



DISSERTATION | DOCTORAL THESIS

Titel | Title

Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtsdesigns zur
Energieübertragung in elektrischen Systemen für die
Sekundarstufe II

verfasst von | submitted by

Mag.rer.nat. Louisa Christine Winter

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Doktorin der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat.)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree
programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 796 605 411

Dissertationsgebiet lt. Studienblatt | Field of
study as it appears on the student record
sheet:

Physik

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Abstract

Moderne Technologien wie Smartphones oder induktive Ladestationen prägen den Alltag von Schüler*innen. Ein zentrales physikalisches Konzept zur Beschreibung solcher elektrischer Systeme ist die Energie. Studien zeigen jedoch, dass viele Schüler*innen alternative, alltags-sprachlich geprägte oder unvollständige Vorstellungen von Energie und ihrer Übertragung in elektrischen Systemen haben. Eine mögliche Ursache ist der Mangel an didaktisch fundierten, empirisch evaluierten Unterrichtskonzepten. Bestehende Ansätze greifen oft zu kurz, sind zu komplex oder lassen zentrale physikalische Aspekte aus.

Die vorliegende Arbeit begegnet dieser Problematik durch die Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtsdesigns für die Sekundarstufe II, das die Energieübertragung in elektrischen Systemen auf Basis elektromagnetischer Felder thematisiert. Im Rahmen eines Design-Based-Research-Ansatzes wird untersucht, wie ein für Schüler*innen verständliches und anschlussfähiges Unterrichtsdesign gestaltet sein muss. Dabei wird insbesondere untersucht, welche Lernhindernisse sowie förderlichen Bedingungen dafür entscheidend sind.

In drei iterativen Designzyklen werden zunächst Prototypen des Unterrichtsdesigns entwickelt und mit Schüler*innen ($N = 21$) hinsichtlich Verständlichkeit und Akzeptanz erprobt. Die finale Version wird anschließend in sieben AHS-Klassen ($N = 128$) in Wien implementiert. Die Wirksamkeit wird mithilfe standardisierter Prä- und Posttests sowie qualitativer Lehrer*inneninterviews evaluiert.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen signifikante Verbesserungen bei der Beantwortung der Wissensfragen und einen Rückgang fachlich inkorrekt beantworteter Fragen im Posttest. Zudem bestätigen die Lehrer*inneninterviews die Anschlussfähigkeit des Konzepts an den Unterrichtsalltag und weisen auf dessen positive Wirkung auf das Lernverhalten der Schüler*innen hin.

Die Arbeit leistet somit einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Physikdidaktik, indem sie ein theoriegeleitetes, empirisch fundiertes Unterrichtsdesign und eine lokale Theorie zu Lernprozessen im Kontext der Energieübertragung in elektrischen Systemen bereitstellt.

Abstract (English version)

Modern technologies such as smartphones or wireless charging stations are an integral part of students' everyday lives. A central physical concept used to describe such electrical systems is energy. However, studies show that many students hold alternative or incomplete ideas of energy and its transfer in electrical systems. One possible reason for this is the lack of literature based and empirically evaluated teaching concepts. Existing approaches often fall short, are too complex, or omit key physical aspects.

This study addresses the issue by developing and evaluating a curricular design for upper secondary schools that focuses on energy transfer in electrical systems based on electromagnetic fields. Using a design-based research approach, the study investigates how to design a teaching-learning-sequence that is both comprehensible and meaningful for students. Particular attention is given to identifying learning obstacles and favorable conditions that influence learning outcomes.

In three iterative design cycles, prototypes of the instructional design are developed and evaluated with students ($N = 21$) for comprehensibility and acceptance. The final version is then implemented in seven upper secondary school classes (AHS) in Vienna ($N = 128$). The evaluation is conducted using standardized pre- and post-tests as well as qualitative interviews with the participating teachers.

The findings of the study show significant improvements in students' responses to knowledge questions and a decrease in scientifically incorrect answers in the post-test. In addition, the teacher interviews confirm the compatibility of the concept with everyday classroom practice and point to its positive impact on student learning behaviour.

This work thus contributes to the advancement of physics education research by providing a theory-driven, empirically validated instructional design and a local theory of learning processes in the context of energy transfer in electrical systems.

Danksagung

Diese Dissertation wäre ohne die Unterstützung vieler Menschen in dieser Form nicht möglich gewesen.

Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater Martin Hopf für die fachliche Betreuung, die wertvollen Anregungen und die spannenden Diskussionen bedanken. Danke, dass ich immer mit deiner Unterstützung rechnen durfte!

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Kolleg*innen und Mitdoktorand*innen am AECC für den fachlichen Austausch, die Unterstützung und die schöne gemeinsame Zeit. Besonders danke ich meinen Kolleg*innen, mit denen ich das Büro teilen durfte: Sarah, Manuel, Florian, Matthias und Anna. Unseren Studienassistent*innen Lukas und Sarah danke ich zudem für Ihre großartige Hilfe beim Transkribieren der Interviews!

Da ich neben meiner Tätigkeit an der Universität Wien auch unterrichtet habe, möchte ich mich auch bei meinen Kolleg*innen an der Schule bedanken. Mein Herzensprojekt, diese Dissertation, war nur möglich, weil ich meine Stunden an der Schule reduzieren durfte. Ich bin sehr dankbar, dass meine Kolleg*innen und Schüler*innen dafür so viel Verständnis zeigten und mich stets unterstützt haben.

Ebenso danke ich allen Lehrpersonen und Schüler*innen, die im Rahmen meiner Forschungsarbeit an der Entwicklung des Unterrichtsdesigns zur Energieübertragung in elektrischen Systemen beteiligt waren. Mit eurer Unterstützung habt ihr dieses Projekt erst möglich gemacht!

Meiner Familie danke ich von Herzen für ihre Liebe, Geduld und ihren Rückhalt während der gesamten Promotionszeit. Besonders meinen Eltern Birgitt, Arndt und John, meiner Oma Traudl und meinen Schwestern Claire und Amelie gilt mein Dank für ihre uneingeschränkte Unterstützung auf meinem gesamten Bildungsweg.

Besonders danke ich meinem Mann Lukas, der mir in allen Phasen dieser Arbeit zur Seite stand. Mit Zuversicht, Humor und Verständnis hat er mir stets den Rücken gestärkt und mich ermutigt, dranzubleiben.

Nicht zuletzt danke ich meiner Tochter Luna, die mitten in der Entstehung dieser Dissertation auf die Welt gekommen ist – du warst und bist meine größte Motivation.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	ii
Abstract (English version)	iii
Danksagung	iv
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1 Oberflächenladungen	6
2.1.1 Oberflächenladungen in einfachen elektrischen Stromkreisen	6
2.1.1.1 Oberflächenladungen in offenen Stromkreisen	9
2.1.1.2 Darstellung von Oberflächenladungen in geschlossenen Stromkreisen	11
2.1.2 Oberflächenladungen in komplexen elektrischen Stromkreisen	14
2.1.3 Nachweis von Oberflächenladungen	14
2.1.3.1 Jefimenkos Experiment	14
2.1.3.2 Chabay und Sherwoods Experiment	15
2.1.4 Oberflächenladungen im schulischen Kontext	16
2.2 Elektromagnetische Felder	17
2.2.1 Grundlagen zu elektrischen Feldern	17
2.2.2 Grundlagen zu magnetischen Feldern	21
2.3 Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern erklären	23
2.4 Repräsentationsformen von Feldern	25
2.4.1 Feldliniendarstellung	26
2.4.2 Vektordarstellung	28
2.4.3 Computerbasierte Simulationen	30
2.4.4 Multiple Repräsentationsformen und didaktische Potentiale	31
2.5 Relevante Schüler*innenvorstellungen	33
2.5.1 Begriffsklärung	33
2.5.2 Kognitive Modelle zur Einordnung von Schüler*innenvorstellungen	34
2.5.3 Konstruktivistische Lerntheorie und Konzeptwechselstrategien	35
2.5.4 Cognitive-Load-Theory	37
2.5.5 Typische Schüler*innenvorstellungen aus der Literatur	39
2.5.5.1 Schüler*innenvorstellungen zu Energie und Energieübertragung	40
2.5.5.2 Systematisierende Frameworks zur Energie in elektrischen Systemen	41
2.5.6 Fazit	44

3. Methodische Grundlagen	47
3.1 Design-Based-Research	48
3.1.1 Kernelemente von Design-Based-Research	49
3.1.2 Methodisches Vorgehen im DBR-Zyklus	51
3.1.3 Designprinzipien	53
3.1.3.1 Allgemeine Designprinzipien	53
3.1.3.2 Domänenspezifische Designprinzipien	54
3.2 Das Modell der didaktischen Rekonstruktion	55
3.2.1 Fachliche Klärung	55
3.2.2 Erfassung von Lernendenvorstellungen	56
3.2.3 Didaktische Strukturierung	56
3.2.4 Das Modell der didaktischen Rekonstruktion im Unterricht	57
3.3 Akzeptanzbefragungen	58
3.3.1 Ablauf der Akzeptanzbefragung	58
3.3.2 Stärken und Schwächen der Methode	59
3.3.3 Anwendungsbeispiele und empirische Befunde	60
3.3.4 Konzeptideen	61
3.4 Qualitative Inhaltsanalyse	63
3.4.1 Formen der qualitativen Inhaltsanalyse	63
3.4.2 Charakteristika und Ablauf der evaluativen qualitativen Inhaltsanalyse	64
4. Forschungsdesign	67
4.1 Zielsetzung der Arbeit	68
4.2 Forschungsfragen	72
4.3 Vorgehensweise im Designprojekt	74
4.4 Designprinzipien	75
4.4.1 Allgemeine Designprinzipien	76
4.4.2 Domänenspezifische Designprinzipien	82
5. Interviewstudie zur iterativen Entwicklung des Unterrichtsdesigns	87
5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen	88
5.1.1 Beschreibung der Stichprobe	88
5.1.2 Interviewleitfaden	89
5.1.2.1 Erster Block	90
5.1.2.2 Zweiter Block	92
5.1.2.3 Dritter Block	95
5.1.3 Ergebnisse	97
5.1.3.1 Interrater Reliabilität für Runde 1	99
5.1.3.2 Querschnittsanalyse	99
5.1.3.3 Längsschnittanalyse	118

5.1.4	Diskussion und Überarbeitung des LLAs nach Runde 1	123
5.1.4.1	Übersicht der Änderungen anhand der Ergebnisse aus Runde 1	123
5.1.4.2	Zusätzliche Änderungsvorschläge	126
5.1.4.3	Abschließende Reflexion zur ersten Runde	128
5.2	Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen	129
5.2.1	Beschreibung der Stichprobe	131
5.2.2	Interviewleitfaden	132
5.2.2.1	Erster Block	133
5.2.2.2	Zweiter Block	134
5.2.2.3	Dritter Block	141
5.2.3	Ergebnisse	143
5.2.3.1	Interrater Reliabilität für Runde 2	145
5.2.3.2	Querschnittsanalyse	145
5.2.3.3	Längsschnittanalyse	173
5.2.3.4	Auswertung der Mindmaps	177
5.2.4	Diskussion und Überarbeitung des LLAs nach Runde 2	181
5.2.4.1	Übersicht der Änderungen anhand der Ergebnisse aus Runde 2	181
5.2.4.2	Zusätzliche Änderungsvorschläge	185
5.2.4.3	Abschließende Reflexion zur zweiten Runde	188
5.3	Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen	189
5.3.1	Beschreibung der Stichprobe	190
5.3.2	Interviewleitfaden	191
5.3.2.1	Erster Block	192
5.3.2.2	Zweiter Block	193
5.3.2.3	Dritter Block	197
5.3.3	Ergebnisse	199
5.3.3.1	Interrater Reliabilität für Runde 3	201
5.3.3.2	Querschnittsanalyse	201
5.3.3.3	Längsschnittanalyse	228
5.3.3.4	Auswertung der Mindmaps	238
5.3.4	Diskussion und Überarbeitung des LLAs nach Runde 3	243
5.3.4.1	Übersicht der Änderungen anhand der Ergebnisse aus Runde 3	243
5.3.4.2	Zusätzliche Änderungsvorschläge	245
5.3.4.3	Abschließende Reflexion zur dritten Runde	246
5.4	Stärken und Schwächen der Interviewstudie	247
6.	Implementationsstudie im realen Klassensetting	249
6.1	Vorbemerkungen	249
6.2	Design des LLAs	251
6.2.1	Beschreibung des entwickelten LLAs	251
6.2.2	Zielsetzung des LLAs	283
6.2.3	Methodische Ansätze und Materialien	283
6.2.4	Implementierung und Ablauf des LLAs	285

6.3	Untersuchungsdesign und -methodik	289
6.3.1	Leitfragen für die Implementationsstudie	289
6.3.2	Auswahl der Studienteilnehmer*innen	291
6.3.3	Datenerhebung	292
6.3.4	Datenanalyse Fragebogen 1 und 3	294
6.3.4.1	Quantitative Analyse	294
6.3.4.2	Qualitative Analyse	301
6.3.4.3	Gütekriterien	303
6.3.5	Datenanalyse Fragebogen 2	307
6.3.6	Ethische Aspekte und Datenschutz	309
6.4	Ergebnisse	311
6.4.1	Ergebnisse des Fragebogens 1 und 3	312
6.4.1.1	Quantitative Analyse	312
6.4.1.2	Qualitative Analyse	325
6.4.2	Ergebnisse des Fragebogens 2	338
6.4.3	Interviews mit den Lehrpersonen	353
6.4.3.1	Interview 1	353
6.4.3.2	Interview 2	359
6.4.3.3	Interview 3	367
6.4.3.4	Interview 4	374
6.5	Diskussion	383
6.5.1	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	383
6.5.1.1	Fragebogen 1 und 3	383
6.5.1.2	Fragebogen 2	397
6.5.1.3	Interviews mit den Lehrpersonen	400
6.5.2	Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Leitfragen	405
6.5.3	Stärken und Schwächen der Implementationsstudie	407
7.	Diskussion	411
7.1	Reflexion der Designprinzipien	411
7.1.1	Allgemeine Designprinzipien	412
7.1.2	Domänenspezifische Designprinzipien	420
7.2	Beantwortung der Forschungsfragen	428
7.3	Implikationen und Limitationen des Unterrichtsdesigns	436
7.4	Zusammenfassung und Ausblick	438
	Literaturverzeichnis	441
	Abbildungsverzeichnis	450
	Tabellenverzeichnis	457
	Anhang	463

Hinweis zu den Bildrechten:

Falls nicht anders angegeben, sind Abbildungen selbst erstellt oder bedienen sich gemeinfreier Bildelemente.

Einleitung

Physikunterricht kann begeistern. Er eröffnet neue Perspektiven auf die Welt, ermöglicht tiefere Einsichten in naturwissenschaftliche Zusammenhänge und fördert das analytische Denken. Damit diese Potentiale wirksam werden, braucht es jedoch eine Vermittlung, die zentrale Konzepte schüler*innengerecht aufbereitet. Ausgehend von meinen Erfahrungen als Lehrperson stellte ich fest, dass dies insbesondere im Themenfeld der Elektrodynamik eine besondere Herausforderung darstellt. Viele Schüler*innen empfinden diesen Bereich der Physik als schwer zugänglich – häufig deshalb, weil wesentliche physikalische Prozesse nur in vereinfachten Modellen dargestellt werden, die zentrale Aspekte wie die Energieübertragung nicht ausreichend abbilden.

Empirische Studien bestätigen diese Beobachtungen: Lernende bringen häufig alltagsweltlich geprägte Vorstellungen mit, die dem physikalischen Verständnis entgegenstehen. So wird elektrische Energie etwa nicht als durch Felder übertragene Größe verstanden, sondern als etwas ‚mit dem Strom Fließendes‘ interpretiert. Solche Vorstellungen sind oft kognitiv stabil und zeigen sich als lernhinderlich, wenn ihnen im Unterricht nicht gezielt begegnet wird.

In diesem Zusammenhang betonen Wiesner und Wodzinski (1996):

„Das Lernen vieler physikalischer Inhalte – oft leider solcher, die physikalische Schlüsselideen enthalten – bereitet Schülerinnen und Schülern erhebliche Schwierigkeiten. Dies zeigt inzwischen eine nicht mehr überschaubare Anzahl von Arbeiten.“ (Wiesner & Wodzinski, 1996, S. 251)

Obwohl feldbasierte Konzepte für das Verständnis elektrischer Prozesse grundlegend sind, werden sie im schulischen Kontext bislang nur eingeschränkt genutzt, insbesondere zur Erklärung der Energieübertragung. Hier setzt die vorliegende Arbeit an: Im Rahmen eines Design-Based-Research-Projekts wird ein forschungsbasiertes Lehr-Lernarrangement für die Sekundarstufe II entwickelt, das eine feldbasierte Sichtweise auf die Energieübertragung im Physikunterricht didaktisch erschließt und für Schüler*innen verständlich macht.

In Kapitel 2 werden dafür die theoretischen Grundlagen beschrieben. Den Ausgangspunkt bildet eine fachliche Beschreibung von Oberflächenladungen (2.1), ein Thema, das im schulischen Kontext bislang wenig Beachtung findet, jedoch für das Verständnis von Energieübertragung eine wesentliche Rolle spielt. Neben der Darstellung ihrer Funktion in offenen und geschlossenen Stromkreisen werden auch experimentelle Nachweise und fachdidaktische Potenziale thematisiert. Daran anschließend erfolgt eine Einführung in elektromagnetischen Felder (2.2) sowie eine feldbasierte Erklärung der Energieübertragung (2.3), die durch unterschiedliche Repräsentationsformen (2.4) wie Feldlinienbilder, Vektordarstellungen und computerbasierte Simulationen anschaulich unterstützt wird. Ein besonderer Fokus liegt auf den Schüler*innenvorstellungen (2.5), die systematisch aufgearbeitet und im Rahmen konstruktivistischer Lerntheorien und Konzeptwechselmodellen eingeordnet werden.

Kapitel 3 beschreibt die methodischen Grundlagen der Arbeit. Neben einer ausführlichen Darstellung des Design-Based-Research-Ansatzes (3.1) und des Modells der didaktischen Rekonstruktion (3.2) werden auch die eingesetzten empirischen Erhebungsmethoden, insbesondere Akzeptanzbefragungen (3.3) und qualitative Inhaltsanalysen (3.4), erläutert.

In Kapitel 4 wird das Forschungsdesign der Arbeit erläutert. Dabei werden Zielsetzung (4.1), Forschungsfragen (4.2) und das methodische Vorgehen des Designprojekts (4.3) vorgestellt. Außerdem erfolgt die Beschreibung der zugrundeliegenden Designprinzipien (4.4).

Im Zentrum der Kapitel 5 und 6 steht die empirische Evaluation des Lehr-Lernarrangements. In Kapitel 5 wird eine Interviewstudie mit drei Zyklen präsentiert, deren Ziel die iterative Weiterentwicklung des Unterrichtsdesigns anhand von Rückmeldungen ist. Die detaillierte Analyse

der Interviews erfolgt mithilfe qualitativer Inhaltsanalysen und wird jeweils durch eine Diskussion und Überarbeitung des Lehr-Lernarrangements abgeschlossen.

Kapitel 6 beschreibt die Implementation und Evaluation des Unterrichtsdesigns im realen Klassensetting. Neben standardisierten Fragebögen werden auch Interviews mit Lehrpersonen geführt. Die Ergebnisse werden sowohl quantitativ als auch qualitativ ausgewertet.

Kapitel 7 liefert eine abschließende Diskussion und Bewertung des entwickelten Unterrichtsdesigns. Die im Laufe des DBR-Zyklus entwickelten Designprinzipien werden reflektiert (7.1), die Forschungsfragen systematisch beantwortet (7.2) und Implikationen für die Unterrichtspraxis sowie Limitationen der Studie aufgezeigt (7.3). Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung mit Ausblick auf mögliche Anschlussprojekte (7.4).

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen für das Verständnis der Energieübertragung mittels elektromagnetischer Felder in einfachen elektrischen Stromkreisen dargestellt.

Zu Beginn wird erläutert, was unter Oberflächenladungen zu verstehen ist und welche Bedeutung sie in elektrischen Stromkreisen haben. Dabei wird sowohl auf offene als auch geschlossene elektrische Stromkreise eingegangen. Zudem erfolgt ein Verweis auf Literatur zu komplexeren elektrischen Stromkreisen, bevor Methoden zur Bestimmung von Oberflächenladungen vorgestellt werden.

Anschließend folgt eine Einführung in elektromagnetische Felder, wobei sowohl die Grundlagen elektrischer als auch magnetischer Felder sowie deren Entstehung beschrieben werden.

Darauf aufbauend wird die Energieübertragung durch elektromagnetische Felder beschrieben. Dazu werden die grundlegenden Prinzipien des Energieflusses sowie verschiedene Darstellungsformen erläutert.

Zum Abschluss werden relevante Vorstellungen von Schüler*innen betrachtet, um auf potenzielle Schwierigkeiten von Lernenden hinzuweisen, die bei der Planung eines Unterrichtsdesign zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen von Bedeutung sein könnten.

2.1 Oberflächenladungen

Die Betrachtung von Oberflächenladungen stellt eine wertvolle Ergänzung zum schulischen Physikunterricht dar, auch wenn dieses Konzept nicht ausdrücklich im österreichischen Lehrplan (BGBl. Nr. 88/1985) verankert ist. Da die Themen Elektrostatik und Ladungen bereits im Unterricht thematisiert werden, bietet sich die Einführung von Oberflächenladungen als mögliche Erweiterung und Vertiefung an.

Oberflächenladungen treten ausschließlich an der Materialoberfläche auf und spielen eine zentrale Rolle bei der Erklärung vieler elektrostatischer Effekte. Die Integration von Oberflächenladungen in den Schulunterricht ermöglicht eine präzisere Erklärung elektrostatischer Phänomene wie der Influenz und trägt so zu einem tieferen Verständnis der physikalischen Grundlagen in diesem Themenbereich bei.

Gleichzeitig handelt es sich dabei um ein recht anspruchsvolles Thema, weshalb im Unterricht nur die grundlegenden Eigenschaften von Oberflächenladungen behandelt werden sollten, die für Schüler*innen der Sekundarstufe II verständlich und angemessen sind. Der einfache elektrische Stromkreis stellt dabei einen geeigneten Kontext dar.

2.1.1 Oberflächenladungen in einfachen elektrischen Stromkreisen

Elektrische Stromkreise sind bereits in der Sekundarstufe I Bestandteil des österreichischen Physiklehrplans (BGBl. Nr. 88/1985) und gehören zu den Grundlagen im Rahmen des Elektrizitätslehreunterrichts. Maßgeblich für das Verhalten dieser Stromkreise sind sogenannte Oberflächenladungen. Sie sammeln sich auf den Oberflächen leitender Materialien (Leiterkabeln, Widerständen, Batterien) und tragen zur Aufrechterhaltung elektrischer Felder sowie des Stromflusses im Stromkreis bei (Jackson, 1996).

Jackson (1996) beschreibt die Bedeutung von Oberflächenladungen wie folgt:

“The electromagnetics of a circuit is ultimately determined by the disposition of all the charges – in the wires as current, on the surfaces as stationary charge densities, and within the battery or other source of emf.” (Jackson, 1996, S. 856).

Dieses Zitat verdeutlicht, dass Jackson die Oberflächenladungen – neben anderen Ladungen – als integralen Bestandteil für die elektromagnetische Beschreibung eines Stromkreises betrachtet. Es lohnt sich also genauer hinzuschauen und zumindest ein grundlegendes Verständnis darüber im Rahmen einer physikalischen Grundausbildung aufzubauen.

Heald (1984) hebt die zentrale Bedeutung von Oberflächenladungen ebenfalls hervor. Er argumentiert, dass es in den meisten Fällen nicht erforderlich ist, die genaue Ladungsverteilung und

die äußeren Felder eines Stromkreises zu kennen – ein Umstand, der sich als vorteilhaft erweist, da deren Berechnung oder Messung in der Regel äußerst komplex ist. Allerdings sind die Ladungen und Felder in einem elektrischen Stromkreis untrennbar miteinander verknüpft. In Healds Worten:

„If we neglect one, we can neglect the other; if we insist on talking about one, we must include the other“ (Heald, 1984, S. 522)

Wie in Abschnitt 2.2.1 noch näher erläutert wird, spielt die Beschreibung elektrischer Felder eine entscheidende Rolle für das Verständnis des Energieflusses in Stromkreisen. Daher soll im Folgenden zunächst ein genauerer Blick auf die Oberflächenladungen geworfen werden.

In seinem Artikel diskutiert Jackson (1996) die stationären Oberflächenladungsdichten in einem einfachen¹ elektrischen Stromkreis². Aufgrund seiner Symmetrie ist es ihm möglich, eine analytische Lösung für den Fall eines offenen und eines geschlossenen Stromkreises zu berechnen. Darüber hinaus zeigt Jackson, wie die Oberflächenladungen auf den Widerständen und Leiterkabeln verteilt sind und durch die übrigen Elemente des Stromkreises beeinflusst werden. Jackson (1996) identifiziert drei wesentliche Funktionen von Oberflächenladungen in Gleichstromkreisen: Erstens sind sie maßgeblich daran beteiligt, das elektrische Potential im gesamten Stromkreis aufrechtzuerhalten. Zweitens erzeugen sie ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter, das für die Feldverteilung außerhalb des Stromkreises relevant ist. Drittens sorgen sie für ein elektrisches Feld entlang der Leiteroberfläche, das den Stromfluss im Inneren des Leiters antreibt und damit kontinuierlich ermöglicht.

Jackson (1996) betrachtet in seiner Abhandlung einen elektrischen Widerstand, der mit einer Batterie über Leiterkabel verbunden ist. Wird der Widerstand entfernt (beispielsweise eine Glühlampe, die aus ihrer Fassung herausgeschraubt wird), so ist der Stromkreis offen. In diesem Fall verteilen sich die Ladungen auf den Kabeln, wobei das Potential konstant über beide Leiter hinweg bleibt und dem Potential der jeweiligen Batterieklemmen entspricht. An den Enden der Leiter, an denen der Widerstand normalerweise angeschlossen wäre, sammeln sich vermehrt Ladungen an. Diese Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld in der Öffnung zwischen den Leiterkabeln (Jackson, 1996).

¹ Ein einfacher elektrischer Stromkreis besteht aus wenigen grundlegenden Komponenten wie einer Spannungsquelle, einem Widerstand und Verbindungen, die den Strom fließen lassen. Im Gegensatz dazu enthält ein komplexer Stromkreis mehrere Elemente wie Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten, die eine Teilung des Stromflusses ermöglichen.

² Es ist hier zu betonen, dass Jacksons Arbeit nicht die erste dieser Art ist. Beispielsweise hatte schon Heald (1984) einen heterogenen Stromkreis in zwei Dimensionen hinsichtlich seines elektrischen Feldes, mit Beachtung der Oberflächenladungsverteilung, analysiert.

2.1 Oberflächenladungen

Sobald der Stromkreis geschlossen wird (indem die Glühlampe wieder in die Fassung eingesetzt wird), kann Strom fließen. Dabei verändert sich die Verteilung der Oberflächenladungen sowie das Potential entlang der Leiter, wobei diese Veränderungen den Prinzipien der Ladungserhaltung und dem Ohm'schen Gesetz folgen, unabhängig von der spezifischen Geometrie des Stromkreises. Da der Widerstand der Kabel im Vergleich zum elektrischen Widerstand vernachlässigbar gering ist, fällt nahezu das gesamte Potential über dem Widerstand ab (Jackson, 1996).

Die Verteilung der Oberflächenladungen passt sich entsprechend an: Es treten nun auch Oberflächenladungen am Widerstand selbst sowie an den Übergangsstellen zwischen Kabeln und dem Widerstand auf. Allerdings sind diese Veränderungen geringer als oft angenommen, da die Spannungsverhältnisse im Stromkreis denen des offenen Stromkreises ähneln (Jackson, 1996).

Obwohl es Jackson gelingt, eine mathematische Beschreibung der Oberflächenladungen in einem sehr symmetrischen, einfachen Stromkreis zu entwickeln, ist dies keineswegs eine triviale Aufgabe. Ähnliche Ansätze zur Berechnung des Potentials in spezifischen Geometrien finden sich auch bei Sommerfeld (1953), der das Feld eines geraden Leiters und einer Spule analysiert, sowie bei Heald (1984), der eine quantitative Analyse von zweidimensionalen kreisförmigen Stromschleifen vornimmt. Hernandez und Assis (2003) untersuchen den Fall eines konstanten Stroms, der sich gleichmäßig über die Oberfläche eines stationären Leitungsstreifens mit Widerstand verteilt. Ihr Ziel ist es, das elektrische Potential, das elektrische Feld im gesamten Raum und die resultierende Oberflächenladungsverteilung zu bestimmen. Davis und Kaplan (2011) betrachten hingegen einen ringförmigen Stromkreis mit einer Batterie von vernachlässigbarer Größe und einem Draht mit gleichmäßiger Widerstandsverteilung.

Müller (2012) betont, dass es einen breiten Konsens darüber gibt, dass die Verteilung von Oberflächenladungen zu komplex ist, um sie mit einfachen Regeln zu beschreiben. Heald (1984) weist darauf hin, dass die Bestimmung der Oberflächenladungsverteilung besonders schwierig ist, da sie maßgeblich von der spezifischen Geometrie des Stromkreises und seiner Umgebung abhängt. So muss beispielsweise präzise festgelegt werden, wie die Leiter eines Stromkreises verlaufen und gebogen sind. Da reale Stromkreise meist eine deutlich komplexere Geometrie aufweisen, stellt die mathematische Berechnung dieser Verteilung eine erhebliche Herausforderung dar.

Müller (2012) schlägt daher eine grafische Methode vor, die eine semi-quantitative Analyse der Oberflächenladungen ermöglicht, um die Komplexität der Berechnungen zu überwinden.

Müller (2012) unterscheidet dabei zwei Haupttypen von Oberflächenladungen: Typ-I-Ladungen treten an den Grenzflächen zwischen Materialien mit unterschiedlichem Widerstand auf (z. B. Draht und Widerstand) und erzeugen zusätzliche elektrische Felder im Innern des Widerstands. Typ-II-Ladungen entstehen an den äußeren Begrenzungen von Leitern, etwa an gekrümmten Leiteroberflächen im Kontakt mit der Umgebung.

Zur Bestimmung der Oberflächenladungsverteilung in einem einfachen Stromkreis schlägt Müller (2012) eine schrittweise Herangehensweise vor: Zunächst werden Stromstärke und Potentialverlauf mittels Ohm'schem Gesetz und Kirchhoff'schen Regeln berechnet, um den Verlauf des elektrischen Potentials entlang des Leiters grob zu bestimmen und die Platzierung der Äquipotentiallinien daran auszurichten. Anschließend wird die Spannung der Batterie in Intervalle entlang des Stromkreises unterteilt, um Äquipotentiallinien zu konstruieren. Deren charakteristische Knickstellen geben Aufschluss über das Vorzeichen der Typ-II-Oberflächenladungen.

Das Zeichnen von Äquipotentiallinien nach Müllers Ansatz (2012) verlangt viel zeichnerisches Geschick und Übung. Eine alternative Herangehensweise bieten Chabay und Sherwood (2015), die zu vergleichbaren Ergebnissen gelangen, dabei jedoch verstärkt auf qualitative Argumente zurückgreifen. Sie gehen vom Verlauf des elektrischen Feldes aus und leiten daraus die zugehörige Oberflächenladungsverteilung ab.

2.1.1.1 Oberflächenladungen in offenen Stromkreisen

Ein einfaches Beispiel für einen offenen Stromkreis ist eine einzelne Batterie. Innerhalb der Batterie führen chemische Prozesse zu einer Ladungstrennung, bei der sich an einem Anschluss ein Überschuss an Elektronen ansammelt (negativ geladen), während am anderen Anschluss ein Elektronenmangel entsteht (positiv geladen) (Chabay & Sherwood, 2015; Härtel, 2021). Diese Oberflächenladungen erzeugen ein elektrisches Feld, das sich entlang der Leiteroberfläche ausbreitet und innerhalb der Leiter ein elektrisches Feld aufbaut. Das elektrische Feld verläuft parallel zum Leiter und sorgt dafür, dass die Elektronen in eine bevorzugte Richtung driften (Chabay & Sherwood, 2015).

In Abbildung 1 sind die Oberflächenladungen an einer Batterie dargestellt, wobei die negativen Ladungen mit einem Minuszeichen und die positiven Ladungen mit einem Plusymbol dargestellt sind (Härtel, 2021).

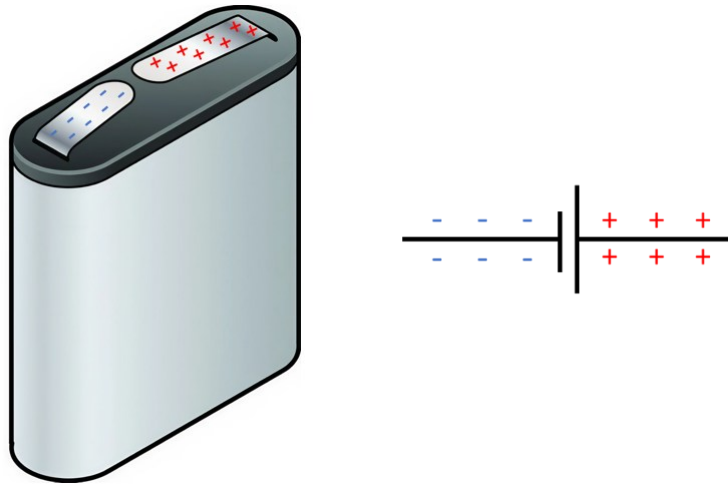


Abbildung 1: Eine Batterie als Spannungsquelle mit Oberflächenladungen an ihren metallischen Ausgängen (angelehnt an Härtel, 2021, S. 4).

Laut Härtel (2021) steigt die gegenseitige Abstoßung der negativ geladenen Elektronen an den metallischen Kontakten der Batterie mit zunehmender Ladungsdichte. Gleichzeitig ziehen die positiven Ladungsträger auf der gegenüberliegenden Seite diese Elektronen an. Es stellt sich ein charakteristisches Gleichgewicht ein, bei dem die abstoßenden und anziehenden Coulomb-Kräfte eine weitere Ansammlung von Ladungen verhindern. In diesem Zustand wirkt die innere Kraft der Batterie den rücktreibenden Coulomb-Kräften entgegen, sodass eine stabile Ladungsverteilung erreicht wird.

Obwohl das elektrische Feld innerhalb des Leiters relativ schwach ist, reicht es aus, um eine konstante Driftgeschwindigkeit der Elektronen aufrechtzuerhalten. Die elektrische Feldstärke E hängt dabei von der mittleren Driftgeschwindigkeit $\bar{v}$ und der materialspezifischen Beweglichkeit u der Elektronen ab, was durch Formel (1) beschrieben wird (Chabay & Sherwood, 2015, S. 563):

$$\bar{v} = uE \quad (1)$$

In dünneren Leitungen muss die Driftgeschwindigkeit entsprechend größer sein als in dickeren, um die Stromstärke konstant zu halten (Chabay & Sherwood, 2015).

Wenn die Batterie nun mit Kabeln verbunden wird, so fungieren diese als Erweiterung der Batterieanschlüsse. Die Oberflächenladungen verteilen sich auf der gesamten Länge der Kabel gleichmäßig und ihre Dichte nimmt somit für einen kurzen Moment ab. Während dieses Moments entsteht kurzzeitig ein Ungleichgewicht: Die chemischen Prozesse in der Batterie wirken darauf hin, weitere Ladungen zu trennen, doch die Coulomb-Kräfte, die dieser Trennung ent-

gegenwirken, haben sich im Stromkreis noch nicht vollständig aufgebaut. Sobald sich die Oberflächenladungen im gesamten Stromkreis neu verteilt haben, ist ein Gleichgewicht erreicht (Härtel, 2021). In Abbildung 2 ist dieser Zustand des Gleichgewichts zu sehen, wobei die Abbildung ein qualitatives Bild zeichnet.

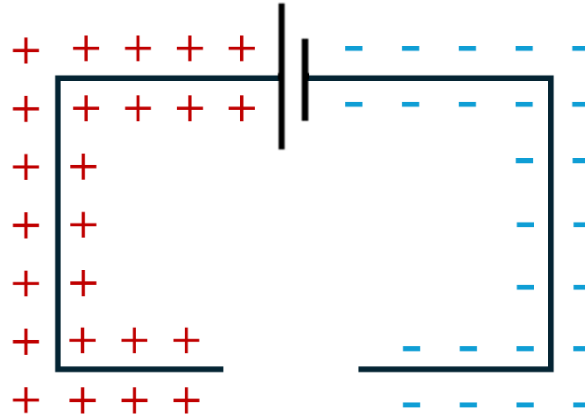


Abbildung 2: Spannungsquelle mit angeschlossenen Leitern und Oberflächenladungen (angelehnt an Härtel, 2021, S. 5).

In der Realität sind die Oberflächenladungen nicht gleichmäßig entlang des Leiters verteilt, wie es in Abbildung 2 dargestellt ist. An Stellen mit Krümmungen oder Knicken sammeln sich Ladungen an, wodurch lokale Änderungen im elektrischen Feld entstehen (Chabay & Sherwood, 2015; Härtel, 2021). Eine Darstellung davon ist in Abbildung 3 zu sehen.

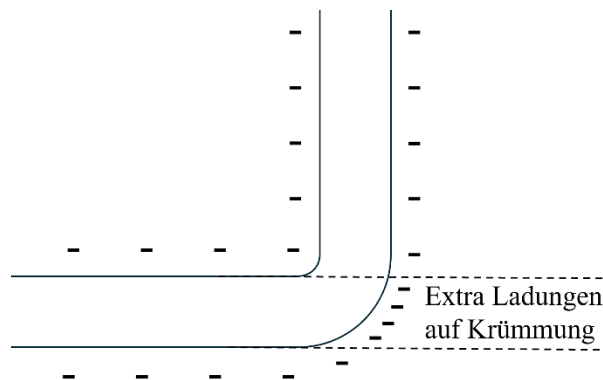


Abbildung 3: Qualitative Darstellung der Oberflächenladungsverteilung auf einem gekrümmten Leiterstück (angelehnt an Chabay & Sherwood, 2015, S. 735).

2.1.1.2 Darstellung von Oberflächenladungen in geschlossenen Stromkreisen

Beim Schließen eines offenen Stromkreises werden die Oberflächenladungen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit umverteilt. Obwohl die einzelnen Elektronen nur eine geringe Driftgeschwin-

2.1 Oberflächenladungen

digkeit besitzen, breitet sich die Information über die Ladungsveränderung im gesamten Stromkreis extrem schnell aus. Dies erklärt, warum beispielsweise eine Glühlampe sofort aufleuchtet, sobald sie an eine Spannungsquelle angeschlossen wird (Chabay & Sherwood, 2015).

Die Oberflächenladungen sind nun über den gesamten Stromkreis verteilt, wobei die Dichte der negativen Ladungen am negativen Anschluss der Batterie am höchsten ist und in Richtung des positiven Anschlusses abnimmt. Umgekehrt gilt es für den positiven Anschluss der Batterie: Auch hier nimmt die positive Oberflächenladungsdichte mit zunehmenden Abstand zur Batterie ab, wie in Abbildung 4 zu sehen ist (Chabay & Sherwood, 2015).

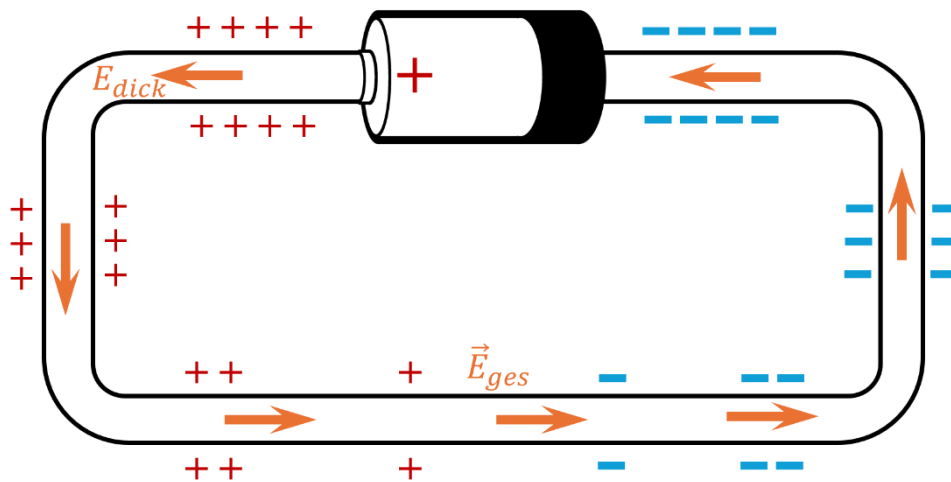


Abbildung 4: Darstellung der Oberflächenladungen in einem einfachen elektrischen Stromkreis ohne Widerstand (angelehnt an Chabay & Sherwood, 2015, S. 733).

Die Oberflächenladungen erzeugen auch im geschlossenen Stromkreis ein elektrisches Feld, das eine Kraft auf die Elektronen im Inneren des Leiters ausübt und ihre Bewegung entlang des Stromkreises ermöglicht (Härtel, 2021).

Wird nun noch ein Widerstand eingebaut, so begrenzt dieser die Driftgeschwindigkeit der Elektronen. Dies beeinflusst wiederum die Verteilung der Oberflächenladungen auf den Leitern. Ist die Batterie stark genug, um den Elektronenfluss aufrechtzuerhalten, entsteht ein kontinuierlicher Kreislauf, an dem alle Ladungsträger im System beteiligt sind (Chabay & Sherwood, 2015; Härtel, 2021).

Solange die von der Batterie bereitgestellte Spannung konstant bleibt, bleibt auch die Oberflächenladungsverteilung an den Leitern erhalten. Gleichzeitig bewegen sich die Elektronen als Strom durch das Leiterinnere mit einer geringen Driftgeschwindigkeit. Der elektrische Widerstand wirkt der Bewegung der Ladungsträger entgegen, wodurch sich nicht nur der Stromfluss

verlangsamt, sondern auch die Oberflächenladungsverteilung und die elektrostatischen Wechselwirkungen im Stromkreis beeinflusst werden (Härtel, 2021).

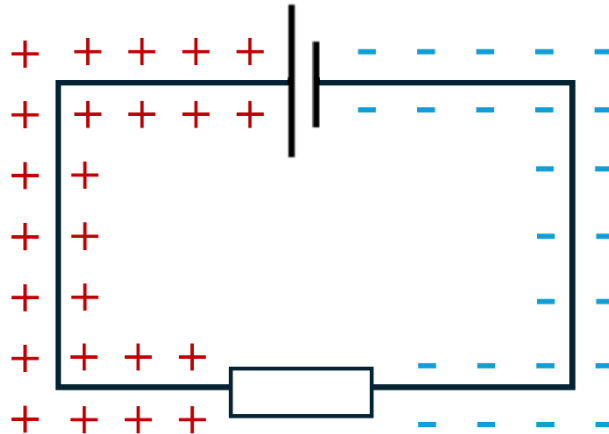


Abbildung 5: Ein geschlossener Stromkreis mit Oberflächenladungen (angelehnt an Härtel, 2021, S. 5).

Die in Abbildung 5 dargestellte Situation eines geschlossenen Stromkreises stellt wieder nur eine Vereinfachung des Bildes der Oberflächenladungsverteilung dar, da die zusätzlichen Ladungen an den Krümmungen der Leiter, den Anschlüssen der Batterie und den Anschlüssen des Widerstands nicht berücksichtigt wurden. In den meisten Fällen stellt diese Annahme jedoch eine hinreichende Näherung dar, mit der gearbeitet werden kann.

Eine detailliertere, aber dennoch schematische, Analyse der Oberflächenladungsverteilung findet sich im Buch ‚Matter and Interaction‘ von Chabay und Sherwood (2015), deren Darstellung in Abbildung 6 wiedergegeben ist.

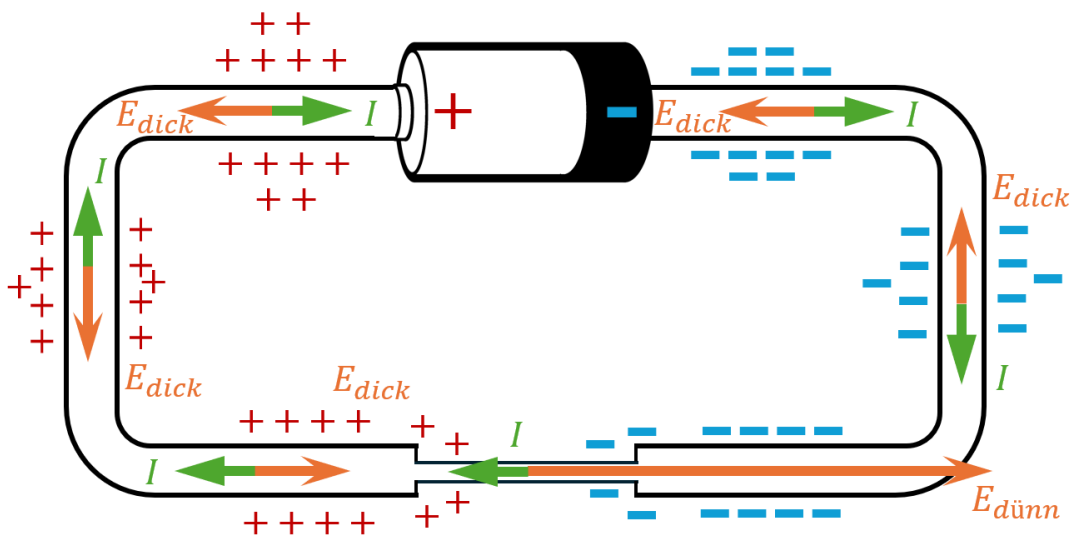


Abbildung 6: Darstellung der Oberflächenladungen in einem einfachen elektrischen Stromkreis mit Widerstand (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 736).

2.1 Oberflächenladungen

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, ist die Oberflächenladungskonzentration im Gleichgewichtszustand in der Nähe der Batterie am höchsten und nimmt mit zunehmender Entfernung leicht ab. Diese Ladungsverteilung erzeugt ein elektrisches Feld E_{dick} im Leiter, das eine geringe Driftgeschwindigkeit der Elektronen bewirkt (Chabay & Sherwood, 2015).

Vor und nach dem Widerstand, der hier als dünner Leiterabschnitt dargestellt ist, kommt es zur Anhäufung zusätzlicher Oberflächenladungen. Dadurch entsteht ein stärkeres elektrisches Feld $E_{\text{dünn}}$, welches eine höhere Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Widerstand zur Folge hat – bei gleicher Stromstärke I im gesamten Stromkreis (Chabay & Sherwood, 2015). Obwohl diese Darstellung nur qualitativ ist, gibt sie ein präziseres Bild der Oberflächenladungsverteilung wieder.

2.1.2 Oberflächenladungen in komplexen elektrischen Stromkreisen

In dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Unterrichtsdesign werden ausschließlich einfache elektrische Stromkreise behandelt, wobei die Verteilung der Oberflächenladungen auf qualitative Weise eingeführt wird. Für interessierte Leser*innen steht darüber hinaus eine Vielzahl weiterführender Literatur zur Verfügung.

Zur Analyse komplexerer Geometrien, etwa von Leitern mit variierendem Durchmesser und Widerstand, kann auf Härtel (1987) zurückgegriffen werden.

Die Rolle der Oberflächenladungen beim Energietransport von einer Batterie zu einem Widerstand wird unter anderem von Galili und Goihbargh (2005), Harbola (2010) sowie Davis und Kaplan (2011) diskutiert. Darüber hinaus befassen sich einige Forscher*innen, wie etwa Preyer (2000), mit Simulationsansätzen zur Verteilung der Oberflächenladungen.

2.1.3 Nachweis von Oberflächenladungen

Der direkte Nachweis von Oberflächenladungen ist experimentell recht anspruchsvoll, da sie sich nicht unmittelbar beobachten lassen. Verschiedene experimentelle Ansätze wurden entwickelt, um die Existenz und Verteilung von Oberflächenladungen sichtbar zu machen. Im Folgenden werden zwei relevante Experimente vorgestellt: das von Jefimenko (1962) entwickelte Verfahren zur Visualisierung elektrischer Felder mithilfe von Grassamen sowie das Experiment von Chabay und Sherwood (zitiert nach Härtel, 2021), das die Wechselwirkung von Oberflächenladungen mit einer geladenen Probe demonstriert.

2.1.3.1 Jefimenkos Experiment

Ein bedeutendes Experiment zum Nachweis von Oberflächenladungen wurde von Jefimenko (1962) durchgeführt. Er entwickelte eine Methode zur Erstellung zweidimensionaler Modelle

von stromdurchflossenen Systemen, um die elektrischen Felder in diesen Stromkreisen zu beschreiben. Dazu zeichnete er die betrachteten Systeme mit transparenter, leitfähiger Tinte auf Glasplatten. Die elektrischen Feldlinien innerhalb und außerhalb der Elemente dieser Modelle wurden durch aufgestreute Grassamen sichtbar gemacht (Jefimenko, 1962, S. 20).

Grassamen eignen sich aufgrund ihrer spitzen Enden besonders gut zur Feldvisualisierung. In einem elektrischen Feld erfahren die elektrisch neutralen Samen eine Influenz: Das äußere Feld polarisiert die Ladungsverteilung innerhalb des Grassamens, sodass sich ein induziertes elektrisches Dipolmoment ausbildet. Dieses erzeugt ein Drehmoment, das die Samen entlang der lokalen Feldlinien ausrichtet (Härtel, 2021).

Laut Jefimenko (1962) entsteht das elektrische Feld durch Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche. Besonders an Stellen mit Krümmungen oder abrupten Querschnittsänderungen des Leiters sammeln sich die Grassamen vermehrt, was auf eine erhöhte Konzentration von Oberflächenladungen an diesen Bereichen hinweist.

2.1.3.2 Chabay und Sherwoods Experiment

Die direkte Beobachtung der Wechselwirkung zwischen Oberflächenladungen und einer externen geladenen Probe ist möglich, wenn hohe Widerstände und große Potenzialdifferenzen verwendet werden. Unter diesen experimentellen Bedingungen zeigt eine bewegliche, geladene Metallfolie eine sichtbare Ablenkung entlang einer Kette von stromdurchflossenen Widerständen (Härtel, 2012). Der Versuch wurde im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und ist in Abbildung 7 zu sehen.

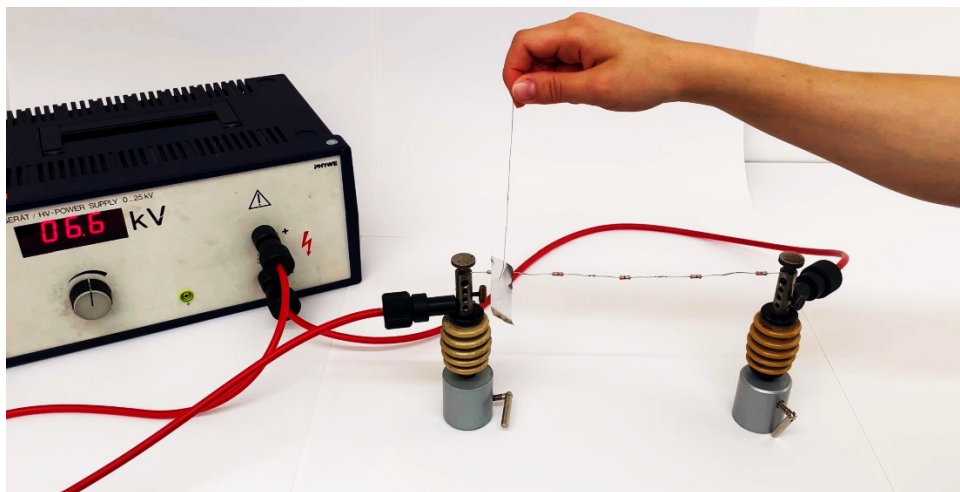


Abbildung 7: Wechselwirkung zwischen einem stromführenden Leiter und einer geladenen Metallfolie, um die Existenz von Oberflächenladungen zu demonstrieren.

2.1 Oberflächenladungen

In diesem Experiment³ von Chabay und Sherwood wird eine Spannung von 10 kV an eine Serienschaltung aus vier Widerständen angelegt, während die Ablenkung einer geladenen Metallfolie an verschiedenen Positionen entlang des Stromkreises untersucht wird. Dabei zeigt sich, dass in der Mitte des Stromkreises keine Wechselwirkung auftritt. An den Enden der Widerstandskette wird die Folie jedoch aufgrund elektrostatischer Influenz abgestoßen (Härtel, 2021).

Ersetzt man die Metallfolie durch einen geladenen Isolator, beispielsweise einen an seinem Schwerpunkt aufgehängten Strohhalm mit markierten Enden, lässt sich nachweisen, dass die Oberflächenladungen an den Enden der Widerstandskette unterschiedliche Polaritäten aufweisen (Härtel, 2021). Diese Variation des Versuchs wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit nachgestellt und ist in Abbildung 8 zu sehen.

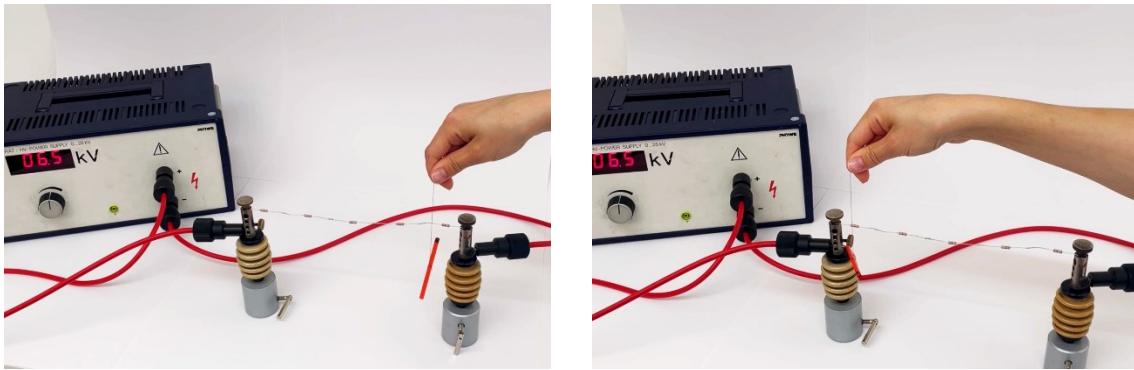


Abbildung 8: Wechselwirkung zwischen einer stromdurchflossenen Serie von Widerständen und einem geladenen Strohhalm, um die Existenz von Oberflächenladungen zu demonstrieren.

2.1.4 Oberflächenladungen im schulischen Kontext

Die detaillierte Betrachtung von Oberflächenladungen, wie sie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben wurde, ist für den schulischen Kontext meist zu komplex. Es kann nicht erwartet werden, dass Lernende die qualitative Herleitung der Oberflächenverteilung nach Müller (2012) oder gar die quantitative Ableitung der Ladungsdichten nach Jackson (1996) oder Heald (1984) durchführen. Dennoch gibt es Möglichkeiten, das Thema Oberflächenladungen sinnvoll in den Unterricht zu integrieren.

Die Oberflächenladungsverteilung, die selbst in einfachen elektrischen Stromkreisen sehr komplex ist, kann vereinfacht dargestellt werden. Dabei liegt der Fokus darauf, Oberflächenladungen als Ursache elektrischer Felder zu betrachten. Dies knüpft an das bestehende Wissen der Lernenden aus dem klassischen Elektrostatik-Unterricht an: Ladungen erzeugen elektrische

³ Ein Video zu diesem Experiment ist unter folgendem Link abrufbar:
<http://matterandinteractions.org/Content/Materials/Videos/SurfaceCharge.mov>.

Felder. Anschließend wird dieses Konzept erweitert, indem aufgezeigt wird, woher die elektrischen Felder in Stromkreisen tatsächlich stammen. Ihre Wirkung lässt sich, wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt, in elektrostatischen Experimenten nachweisen. Die elektrischen Felder entstehen durch Oberflächenladungen.

Für das in dieser Arbeit vorgestellte Unterrichtsdesign bedeutet dies konkret, dass in einfachen elektrischen Stromkreisen eine vereinfachte Darstellung der Oberflächenladungsverteilung verwendet wird (siehe Abbildung 2), anstatt einer detaillierten Analyse (siehe Abbildung 4) zu folgen. Abbildung 2 veranschaulicht das grundlegende Prinzip der Feldentstehung durch Oberflächenladungen, ohne auf die mathematisch anspruchsvolle Analyse lokaler Feldveränderungen aufgrund von Leiterkrümmungen einzugehen. Diese didaktische Vereinfachung ermöglicht es, die wesentlichen Aspekte von Oberflächenladungen zu behandeln, ohne auf komplexe Herleitungen eingehen zu müssen. Zwar gehen damit gewisse Abstriche in der Genauigkeit einher, doch sind diese vertretbar, da das Thema so für die Lernenden verständlich und zumutbar bleibt.

2.2 Elektromagnetische Felder

Elektromagnetische Felder sind ein zentrales Konzept der Physik und spielen eine entscheidende Rolle beim Verständnis zahlreicher technischer und naturwissenschaftlicher Phänomene. Im Physikunterricht werden elektrische und magnetische Felder oft getrennt voneinander eingeführt, und erst am Ende des Themas wird möglicherweise kurz auf das elektromagnetische Feld eingegangen, bevor zum nächsten Inhalt (beispielsweise elektrotechnische Anwendungen wie der Elektromotor, Generator oder Transformator) übergegangen wird. Dabei geht eine wertvolle Gelegenheit verloren, die Energieübertragung in elektrischen Systemen durch elektromagnetische Felder ausführlicher zu behandeln.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die grundlegenden Eigenschaften elektrischer und magnetischer Felder betrachtet, bevor auf die Rolle elektromagnetischer Felder in elektrischen Stromkreisen eingegangen wird, um anschließend im Abschnitt 2.3 die Energieübertragung in elektrischen Systemen beschreiben zu können.

2.2.1 Grundlagen zu elektrischen Feldern

Ein elektrisches Feld beschreibt den Raum, in dem eine elektrische Ladung eine Kraft erfährt. Die Ursache eines elektrischen Feldes ist die Trennung von Ladungen, was durch eine Spannung bewirkt wird. Da elektrische Felder für das menschliche Auge unsichtbar sind und nicht direkt wahrgenommen werden können, werden sie meist mithilfe von Feldvektoren oder Feldlinien visualisiert (Chabay & Sherwood, 2015).

Die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ ist definiert als der Quotient aus der elektrischen Kraft $\vec{F}_{el}$ auf eine Probeladung q (Chabay & Sherwood, 2015, S. 517):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q} \quad (2)$$

Für eine punktförmige Ladung q im Raum ergibt sich die elektrische Feldstärke nach dem Coulomb-Gesetz (Chabay & Sherwood, 2015, S. 519):

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{|\vec{r}|^2} \hat{r}. \quad (3)$$

Dabei zeigt der Feldstärkevektor bei einer positiven Ladung radial nach außen und bei einer negativen Ladung radial nach innen, wie in Abbildung 2 anhand von Feldlinien zu sehen ist (Chabay & Sherwood, 2015).

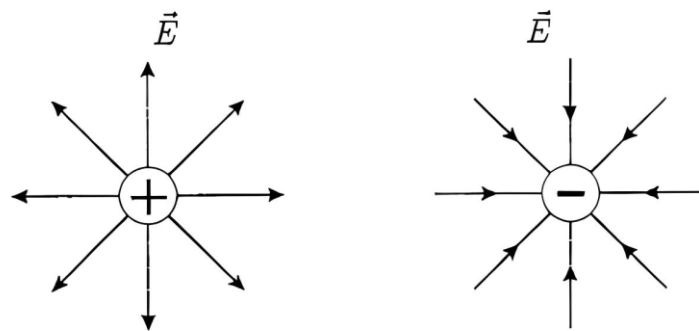


Abbildung 9: Elektrische Feldlinien bei einer positiven (links) und einer negativen (rechts) Punktladung.

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, spielen Oberflächenladungen in elektrischen Stromkreisen eine wesentliche Rolle bei der Erzeugung elektrischer Felder. Sie sorgen dafür, dass die Stromstärke in einem geschlossenen Stromkreis überall gleich ist. Eine Spannungsquelle, wie eine Batterie, trennt Ladungen und erzeugt dadurch eine Potentialdifferenz, die ein elektrisches Feld im Leiter verursacht. Dieses elektrische Feld beeinflusst die Bewegung freier Ladungsträger im Material (Chabay & Sherwood, 2015).

Nach dem Drude-Modell ist die Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Leiter durch Formel (1) definiert. Die Driftgeschwindigkeit ist typischerweise sehr gering, dennoch ist das elektrische Feld essenziell, um den Elektronenfluss aufrechtzuerhalten. Elektronen stoßen innerhalb eines Leiters ständig mit den Atomrümpfen des Gitters, geben dabei Energie ab und bewirken unter anderem eine Erwärmung des Leiters. Das elektrische Feld sorgt dafür, dass nach jeder Kollision erneut Impuls auf die Ladungsträger übertragen wird (Chabay & Sherwood, 2015).

In einem Leiter, beispielsweise einem Kupferdraht, sind insgesamt gleich viele positive wie negative Ladungen vorhanden. Daher erscheint das Material nach außen hin elektrisch neutral. Dennoch bewegen sich die freien Elektronen als eine Art ‚Elektronensee‘, ähnlich wie die Teilchen eines idealen Gases (Chabay & Sherwood, 2015).

Die elektrische Feldstärke innerhalb eines Leiterkabels hängt von der Driftgeschwindigkeit und der Beweglichkeit der Ladungsträger ab. Für einen Kupferdraht mit einer typischen Elektronenbeweglichkeit von $\mu = 4,5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)/(N/C)}$ und einer Driftgeschwindigkeit von $\bar{v} = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $= 4,5 \times 10^{-3} \frac{\text{m/s}}{\text{N/C}}$ ergibt sich eine elektrische Feldstärke von $E = 0,011 \text{ N/C}$ (Chabay & Sherwood, 2015).

Da die Stromstärke überall im Stromkreis konstant ist, muss die Driftgeschwindigkeit in dünnen Leiterkabeln größer sein als in dickeren Abschnitten. Folglich variiert auch die elektrische Feldstärke entlang des Leiters entsprechend der Querschnittsfläche des Kabels (Chabay & Sherwood, 2015).

Die Richtung des elektrischen Feldes in einem Leiter entspricht der Richtung des Stromflusses (siehe Abbildung 10).

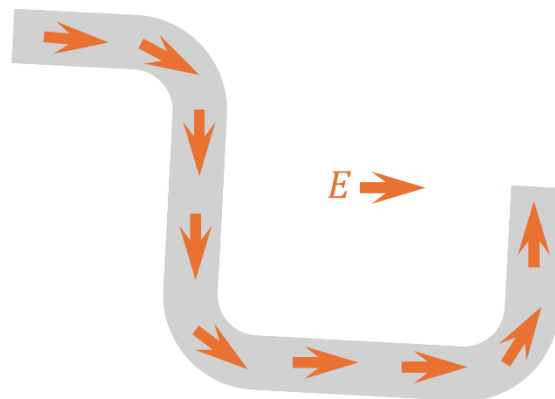


Abbildung 10: Das elektrische Feld in einem stromdurchflossenen Leiter muss dem Leiter folgen (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 722).

Da die Stromstärke in jedem Punkt eines geschlossenen Stromkreises konstant bleibt, muss dies auch für das elektrische Feld gelten. Dafür kann die folgende Formel herangezogen werden (Chabay & Sherwood, 2015, S. 722):

$$I = |q|nA\bar{v} = |q|nAuE \quad (4)$$

Hierbei ist I die Stromstärke, n die Anzahl der beweglichen Ladungsträger pro Volumen und A die Querschnittsfläche des Leiters.

Das resultierende elektrische Gesamtfeld entsteht durch die Kombination von zwei Komponenten – dem axialen Feld und dem radialen Feld (Sefton, 2002):

1. **Axiales Feld:** Dieses Feld ist entlang der Achse des Drahtes gerichtet und wird durch die Trennung von Ladungen entlang des Drahtes erzeugt. Es ist verantwortlich für den Drift der beweglichen Ladungsträger (Elektronen) innerhalb des Drahtes und treibt den elektrischen Strom an.
2. **Radiales Feld:** Dieses Feld ist senkrecht zur Oberfläche des Drahtes und entsteht durch die Oberflächenladungen, die sich auf dem Draht verteilen. In einem statischen Zustand ohne Stromfluss ist das radiale Feld das einzige Feld, das existiert und ist senkrecht zur Drahtoberfläche.

Wenn Strom fließt, existieren beide Komponenten gleichzeitig, wie in Abbildung 11 dargestellt ist.

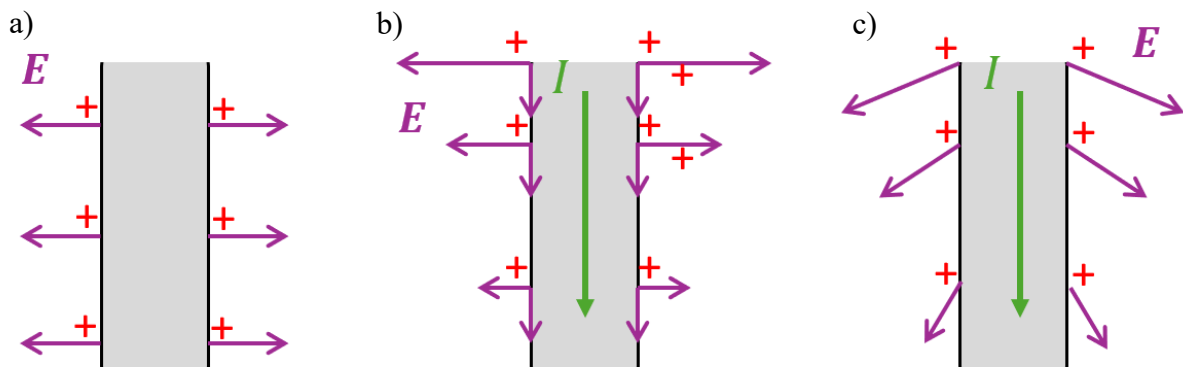


Abbildung 11: Elektrisches Feld an der Oberfläche eines Leiters. **a)** Elektrisches Feld in der Nähe eines neutralen Leiters, **b)** axiale und radiale Komponenten des Feldes bei stromdurchflossenem Leiter, **c)** resultierendes Gesamtfeld bei stromdurchflossenem Leiter (angelehnt an Sefton, 2002, S. 8).

Innerhalb des Leiters ist das elektrische Feld ausschließlich axial und treibt den Stromfluss an. Außerhalb des Leiters hat das elektrische Feld sowohl eine axiale als auch eine radiale Komponente. Die Kombination dieser beiden Komponenten führt zu einem resultierenden Gesamtfeld, das in einem Winkel zur Drahtoberfläche steht (Sefton, 2002).

Diese resultierende Feldverteilung ist entscheidend für die Energieübertragung, da sie mit dem magnetischen Feld interagiert und die Energie durch den Raum transportiert. Die genaue Verteilung und Stärke des resultierenden elektrischen Feldes hängt von der Geometrie des Stromkreises und der Verteilung der Oberflächenladungen ab (Sefton, 2002).

2.2.2 Grundlagen zu magnetischen Feldern

Chabay und Sherwood (2015) beschreiben das magnetische Feld als jene physikalische Größe, die von einem Kompass wahrgenommen werden kann.

Magnetische Felder entstehen durch bewegte elektrische Ladungen. Daher kann ein stromdurchflossener Leiter genutzt werden, um diese Felder näher zu untersuchen (Chabay & Sherwood, 2015).

Die Stromstärke wird als die Anzahl der Elektronen pro Sekunde definiert, die einen Leiterquerschnitt durchfließen. Da eine direkte Zählung der Elektronen nicht praktikabel ist, kommen indirekte Messmethoden zum Einsatz. Eine Möglichkeit besteht darin, das durch die bewegten Elektronen erzeugte magnetische Feld zu bestimmen (Chabay & Sherwood, 2015).

Bereits im Jahr 1820 untersuchte Hans Christian Ørsted den Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus. Während einer Vorlesung machte er zufällig die Beobachtung, dass sich eine Kompassnadel ablenkt, wenn sie in der Nähe eines stromführenden Leiters gelegt ist. Wird ein solcher Leiter in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet und eine Kompassnadel darunter platziert (siehe Abbildung 12a), so richtet sich die Nadel senkrecht zum Leiter aus (siehe Abbildung 12b). Die Richtung der Ablenkung hängt dabei von der Stromflussrichtung im Leiter ab (Chabay & Sherwood, 2015).

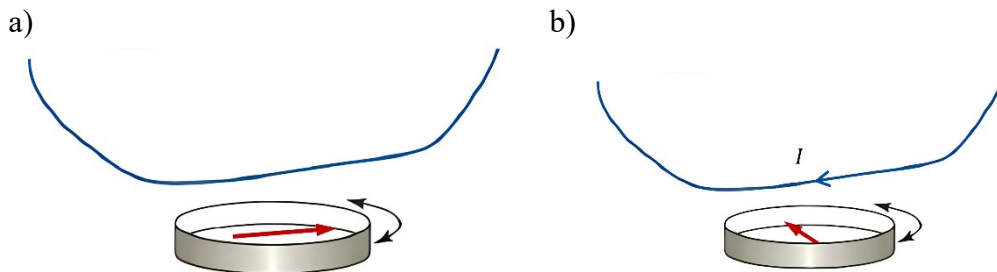


Abbildung 12: Ein Kompassnadel unter einem a) neutralen und b) stromdurchflossenen Leiter (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 674). Die Stromflussrichtung I entspricht in der Abbildung der Elektronenflussrichtung.

Die Wechselwirkung bewegter Ladungen mit dem Erdmagnetfeld beeinflusst die resultierende Feldstärke und -richtung und bestimmt somit die Orientierung der Kompassnadel (siehe Abbildung 13). Aufgrund des Erdmagnetfelds richtet sich die Nadel nicht senkrecht zum Leiter aus. Die beste Auslenkung kann beobachtet werden, wenn das durch den Strom hervorgerufene Magnetfeld deutlich stärker als das Erdmagnetfeld ist und das Erdmagnetfeld senkrecht zum Leiter verläuft (Chabay & Sherwood, 2015).

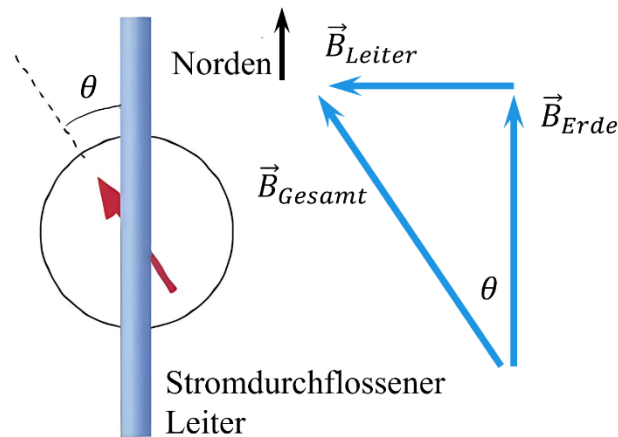


Abbildung 13: Eine Kompassnadel zeigt in die Richtung des Gesamtmagnetfeldes. Dies ist die Überlagerung des Magnetfelds der Erde und des Magnetfelds des stromdurchflossenen Leiters, der durch den Kompass verläuft und in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet ist (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 675).

Durch den sogenannten ‚Ørsted Versuch‘ lassen sich die folgenden Erkenntnisse experimentell ableiten (Chabay & Sherwood, 2015):

- Die Magnetfeldstärke nimmt mit zunehmender Stromstärke zu.
- Ohne Stromfluss ist kein Magnetfeld vorhanden.
- Das Magnetfeld steht stets senkrecht zur Stromrichtung.
- Die Magnetfeldlinien verlaufen oberhalb und unterhalb des Leiters in entgegengesetzten Richtungen.

Das Biot-Savart-Gesetz beschreibt die magnetische Feldstärke, die durch eine einzelne bewegte Ladung erzeugt wird. Während eine ruhende Ladung ausschließlich ein elektrisches Feld erzeugt, führt ihre Bewegung zur Entstehung eines Magnetfeldes, das sich ringförmig um die Bewegungsrichtung aufbaut. Das Gesetz wird mathematisch durch die folgende Gleichung beschrieben (Chabay & Sherwood, 2015, S. 676):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2} \quad (5)$$

Wobei $\frac{\mu_0}{4\pi} = 1 \times 10^{-7} \frac{T \cdot m^2}{C \cdot m/s}$. Hierbei ist μ_0 eine Naturkonstante, $\vec{v}$ die Geschwindigkeit der Ladung q , und $\hat{r}$ ein Einheitsvektor vom Ort der Ladung zum Beobachtungspunkt. Das Kreuzprodukt $\vec{v} \times \hat{r}$ zeigt, dass das Magnetfeld stets senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladung orientiert ist (Chabay & Sherwood, 2015).

In der Praxis ist jedoch nicht das Feld einzelner Ladungsträger relevant, sondern das Gesamtfeld eines elektrischen Stroms. Aufgrund des Superpositionsprinzips lässt sich dieses als Summe der Beiträge vieler einzelner Ladungen berechnen. Für einen dünnen Draht der Länge

$\Delta \vec{l}$ mit einem Querschnitt A ergibt sich die magnetische Feldstärke zu (Chabay & Sherwood, 2015, S. 682):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \Delta \vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (6)$$

Der Vektor $\Delta \vec{l}$ gibt dabei die Richtung des konventionellen Stroms an. Die Stromstärke ergibt sich aus der Gesamtzahl der bewegten Ladungen im betrachteten Volumen $A \Delta \vec{l}$, wobei $I = |q|(nA\vec{v})$ gilt (Chabay & Sherwood, 2015).

Zur Bestimmung der Magnetfeldrichtung in der Umgebung eines stromführenden Leiters kann die Linke-Hand-Regel angewandt werden (siehe Abbildung 14).

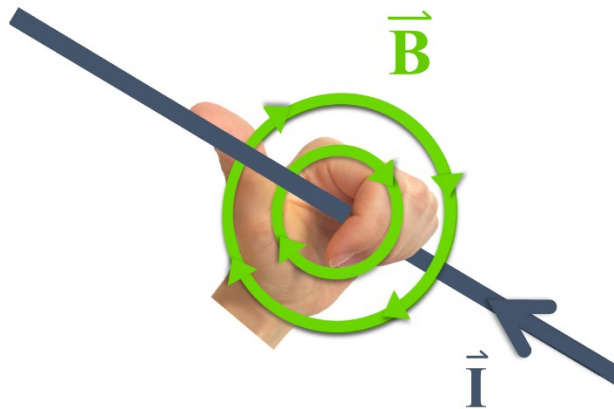


Abbildung 14: Linke-Hand-Regel für die Bestimmung der Magnetfeldrichtung bei einem stromdurchflossenen Leiter.

Umfasst die linke Hand den Leiter so, dass der Daumen in die Richtung des Stromes $\vec{I}$ (Elektronenflussrichtung) zeigt, deuten die gekrümmten Finger in die Richtung des Magnetfeldes.

2.3 Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern erklären

Nachdem im Physikunterricht die Grundlagen elektrischer und magnetischer Felder behandelt wurden, ist es naheliegend, den nächsten Schritt zu gehen und elektromagnetische Felder als deren kombinierte Wirkung zu betrachten. Dabei spielt insbesondere die Frage eine zentrale Rolle, wie diese Felder zur Energieübertragung in elektrischen Systemen beitragen.

Häufig wird die Energieübertragung in elektrischen Systemen primär mit dem elektrischen Stromfluss assoziiert. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass die eigentliche Energieübertragung vor allem durch die elektrischen und magnetischen Felder im umgebenden Raum erfolgt.

2.3 Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern erklären

Der Energiefluss in elektromagnetischen Systemen wird durch den Poynting-Vektor beschrieben. Dieser gibt die Richtung und Stärke des Energieflusses in einem elektromagnetischen Feld an und ist definiert als (Chabay & Sherwood, 2015, S. 957):

$$\vec{S} = (1/\mu_0)(\vec{E} \times \vec{B}) \quad (7)$$

wobei E das elektrische Feld, B das magnetische Feld und $\mu_0 = 1,256\,637 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^{-2}$ (Tipler & Mosca, 2015, S. 1386) die magnetische Permeabilität des Vakuums ist. Jackson (1996) betont, dass Energie nicht primär durch den Leiter selbst fließt, sondern aus dem umgebenden elektromagnetischen Feld in den Leiter hineinströmt. Der Poynting-Vektor zeigt dabei radial auf den Leiter und den Widerstand: Energie wird also aus dem Feld an das Material abgegeben, wo sie schließlich umgewandelt wird (Jackson, 1996). Diese Sichtweise steht im Widerspruch zur weit verbreiteten Annahme, dass elektrische Energie ausschließlich innerhalb des Drahtes transportiert wird.

Didaktisch argumentieren Backhaus und Schlichting (1979), dass gerade solche Widersprüche fruchtbar genutzt werden können, um grundlegende Modellbildungsprozesse im Unterricht anzuregen. Die Vorstellung vom Energiefluss durch das Feld biete einen alternativen Zugang zur Erklärung von Energieumwandlungsprozessen, etwa im Widerstand, bei dem der Energieeintrag durch das Feld erfolgt.

Davis und Kaplan (2011) untersuchten den Energiefluss in einem realistisch modellierten Stromkreis, bestehend aus einer Batterie und einem ringförmigen Draht mit homogener Widerstandsverteilung. Sie zeigten, dass entlang des Drahtes eine lineare Ladungsverteilung entsteht, die ein elektrisches Feld erzeugt. Dieses elektrische Feld wirkt gemeinsam mit dem durch den Strom erzeugten Magnetfeld und ermöglicht so die Anwendung des Poynting-Vektors zur Beschreibung des Energieflusses. Im Gegensatz zu früheren Studien, die oft stark idealisierte oder vereinfachte Geometrien betrachteten, zeigten Davis und Kaplan (2011), dass der Energiefluss im gesamten Raum um den Stromkreis herum fließt. Sie formulierten eine entsprechende mathematische Beschreibung des Poynting-Vektors und analysierten die Energieverteilung im System numerisch.

Bereits Sommerfeld (1953) stellte fest, dass solche Erkenntnisse das herkömmliche Verständnis des Energieflusses in elektrischen Leitern infrage stellen. Er bemerkte: "This picture is materially different from the popular concept of the energy transfer in a wire carrying current" (Sommerfeld, 1953, S. 130). Dabei zitierte er Maxwells Theorie, der zufolge elektrische Leiter selbst keine Energie transportieren: "The conductors are nonconductors of energy. Electromagnetic energy is transported without loss only in nonconductors" (Sommerfeld, 1953, S. 130). Diese

Aussage ist jedoch leicht missverständlich. Die Begriffe Leiter und Nichtleiter beziehen sich in diesem Zusammenhang ausschließlich auf den Ladungstransport, also darauf, ob ein Material elektrischen Strom leiten kann. Wenn man diese Unterscheidung jedoch unkritisch auf den Energiefluss überträgt, entsteht ein verzerrtes Bild: Zwar wird die elektromagnetische Energie tatsächlich nicht im Leiter, sondern im umgebenden Feld transportiert – dennoch spielt der Leiter eine zentrale Rolle bei der Ausbildung und Aufrechterhaltung dieses Feldes. Er ist somit eine notwendige Bedingung für den Energiefluss, auch wenn er nicht selbst Träger der Energie ist.

Feynman (1970) illustriert dieses Konzept anhand eines einfachen Stromkreises mit einem widerstandsbehafteten Leiter. Um den Leiter existiert ein elektrisches Feld, das den elektrischen Strom antreibt. Aufgrund des Potentialabfalls entlang des Leiters entsteht ein zusätzliches elektrisches Feld, das parallel zum Strom verläuft. Senkrecht dazu induziert der stromdurchflossene Leiter ein Magnetfeld. Der Poynting-Vektor steht senkrecht zu diesen beiden Feldern und beschreibt den tatsächlichen Energiefluss. Daraus folgt, dass die Elektronen im Widerstand ihre Energie aus dem elektrischen Feld beziehen und nicht aus den Kollisionen der Elektronen innerhalb des Leiters. Feynman kommentiert dieses Ergebnis kritisch: "This theory is obviously nuts, somehow energy flows from the battery to infinity and then back into the load, is really strange" (Feynman et al., 1970, S. 27–28).

Es ist zu beachten, dass diese Darstellung des Energieflusses durch den Poynting-Vektor keineswegs die einzige Möglichkeit darstellt. Backhaus und Schäfer (1986) diskutieren alternative Energieflussvektoren wie die von Hines (1952) oder Lai (1981)⁴. Diese liefern in bestimmten Felderkonfigurationen andere Aussagen über die Verteilung der Energieflüsse und zeigen, dass die Wahl des Energieflussvektors auch mit theoretischen Entscheidungen verknüpft ist.

2.4 Repräsentationsformen von Feldern

Der Feldbegriff gilt in der Physikdidaktik als besonders herausfordernd, da er sich nur schwer intuitiv erschließen lässt und kaum mit Alltagsvorstellungen in Einklang zu bringen ist. Gleichzeitig ist er jedoch zentral für das Verständnis vieler Phänomene, insbesondere in der Elektrodynamik.

Der Energiefluss in elektromagnetischen Feldern kann auf verschiedene Arten dargestellt werden, je nachdem, welche Aspekte des Phänomens im Vordergrund stehen. Zu den gängigsten

⁴ Laut Backhaus (1987) betrachtet Hines' Modell die magnetische Energie als potenzielle Energie der Ströme, während Lai die Energie mit dem elektrischen Strom transportiert.

2.3 Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern erklären

Darstellungsformen gehören die Feldliniendarstellung, die Vektordarstellung und computerbasierte Simulationen. Jede dieser Repräsentationen hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile, sowohl hinsichtlich ihrer theoretischen Aussagekraft als auch ihrer didaktischen Verwendbarkeit. Im Folgenden werden diese Repräsentationsformen anhand aktueller empirischer Forschungsergebnisse beschrieben und im Hinblick auf ihre Anwendung im Unterricht diskutiert.

2.4.1 Feldliniendarstellung

Eine gängige Methode zur Veranschaulichung des Energieflusses in elektrischen und magnetischen Feldern ist die Darstellung mittels Feldlinien. Das magnetische Feld $\vec{B}$, das durch den Stromfluss im Leiter entsteht, wird dabei kreisförmig um den Leiter eingezeichnet, während das elektrische Feld $\vec{E}$, hervorgerufen durch die Oberflächenladungen, von den positiven zu den negativen Oberflächenladungen verläuft. Der Energiefluss wird meist durch gerichtete Pfeile von der Spannungsquelle zum Energieumwandler dargestellt (siehe Abbildung 15).

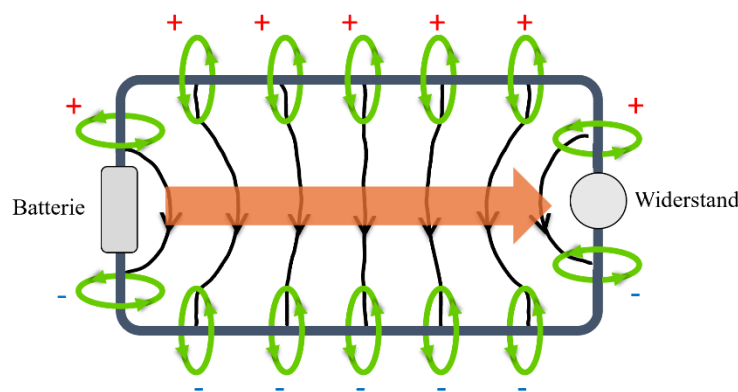


Abbildung 15: Feldliniendarstellung des Energieflusses von einer Batterie zu einer Glühlampe durch ein elektromagnetisches Feld (adaptiert von Hobbs, 2014).

Vorteile der Feldliniendarstellung

Ein wesentliches Merkmal dieser Darstellungsform ist ihre Anschaulichkeit. Feldlinien bieten eine intuitive und leicht verständliche Möglichkeit, den Verlauf physikalischer Felder zu visualisieren. Dabei spiegelt die Dichte der Feldlinien die Intensität des Feldes wider. Darüber hinaus erfordert ihre Nutzung keine vertieften mathematischen Kenntnisse, was sie insbesondere für den schulischen Unterricht und Einführungskurse in die Elektrodynamik geeignet macht.

Studien wie die von Cao und Brizuela (2016) zeigen, dass Schüler*innen bereits vor dem formalen Physikunterricht intuitiv ähnliche Darstellungen wie Feldlinien nutzen, um Wirkungen zu visualisieren. In ihren Skizzen tauchen beispielsweise konzentrische Linien um Ladungen

oder Pfeilmuster zur Richtungsanzeige auf. Diese Beobachtung legt nahe, dass solche Darstellungen an intuitive Vorstellungen anknüpfen und somit eine Brücke zu formalen Repräsentationen schlagen können.

Nachteile der Feldliniendarstellung

Trotz ihrer Vorteile weist die Feldliniendarstellung auch einige Einschränkungen auf. Zum einen bietet sie lediglich eine qualitative Beschreibung des Feldverhaltens und erlaubt keine präzise quantitative Erfassung. Zum anderen handelt es sich um eine vereinfachte Darstellung, die komplexe Wechselwirkungen oder den Einfluss mehrerer Quellen nicht immer adäquat abbilden kann. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Perspektive: Die Richtung des Feldes kann in zweidimensionalen Darstellungen schwer erkennbar sein. Zur Lösung dieses Problems werden häufig Konventionen verwendet, um anzugeben, ob ein Feld in die Zeichenebene hinein oder aus dieser heraus verläuft (siehe Abbildung 16).

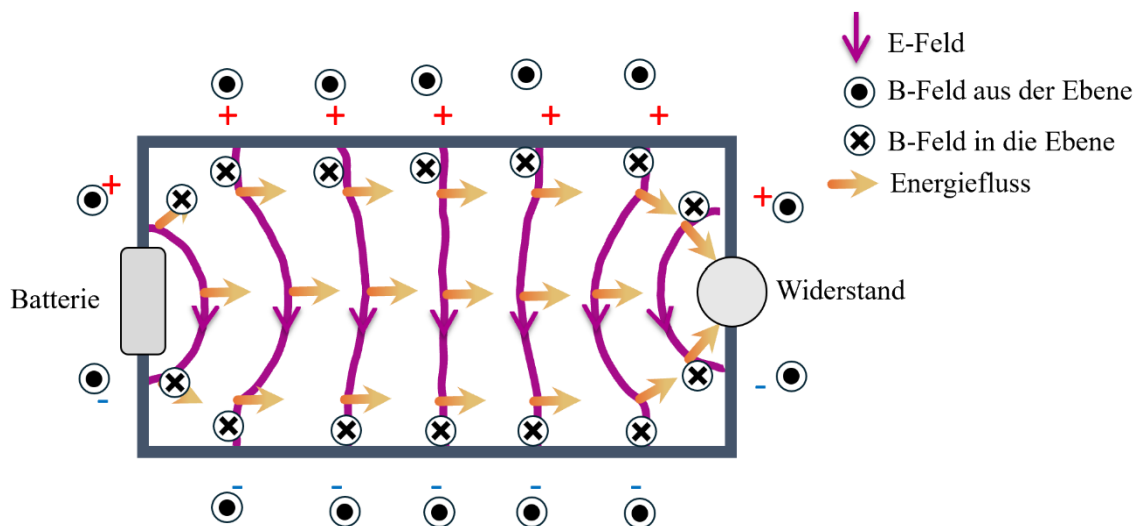


Abbildung 16: Feldliniendarstellung des Energieflusses von einer Batterie zu einer Glühlampe durch ein elektromagnetisches Feld mit alternativen Konventionen (angelehnt an Sefton, 2002, S. 9).

Campos et al. (2020) zeigen in einer Interviewstudie mit Physikstudierenden, dass Feldlinien oft missverstanden werden. Viele Lernende betrachten sie als reale Objekte anstatt als abstrakte Visualisierungen eines unsichtbaren Phänomens. Ihre Dichte wird nur selten korrekt als Maß für die Feldstärke interpretiert, und es fehlt häufig ein Verständnis für die Bedeutung der Linienverteilung im Raum. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass die Einführung von Feldliniendarstellungen didaktisch sorgfältig erfolgen muss – insbesondere im Hinblick auf ihre symbolische Natur und funktionale Bedeutung.

Auch Suárez et al. (2023) weisen auf Probleme im Zusammenhang mit der Feldliniendarstellung in Lehrbüchern hin. Dort finden sich inkonsistente Visualisierungen, die nicht immer dem

physikalischen Konzept entsprechen und so Missverständnisse begünstigen. Besonders kritisch ist, dass Feldlinien häufig nicht in Verbindung mit anderen Darstellungen gesetzt werden, wodurch ein tieferes Verständnis erschwert wird.

Verbreitung und Relevanz der Feldliniendarstellung

Trotz der genannten Herausforderungen bleibt die Feldliniendarstellung aufgrund ihrer Anschaulichkeit ein didaktisch relevantes Werkzeug. Sie findet sowohl in der Schulphysik (vgl. Apolin, 2017; Nussbaumer & Nussbaumer, 2017; Sexl et al., 2017) als auch auf Universitätsniveau (vgl. Chabay & Sherwood, 2015) breite Anwendung.

2.4.2 Vektordarstellung

Eine alternative Möglichkeit zur Darstellung des Energieflusses mit elektromagnetischen Feldern bietet die Vektordarstellung. Dabei werden sowohl das elektrische Feld $\vec{E}$ als auch das magnetische Feld $\vec{B}$ durch Vektoren visualisiert, die an bestimmten Punkten im Raum oder entlang eines Stromkreises angeordnet sind. Die Richtung dieser Vektoren gibt die Feldorientierung an, während ihre Länge die jeweilige Feldstärke widerspiegelt. Der Energiefluss wird durch den Poynting-Vektor $\vec{S}$ dargestellt, der senkrecht auf das elektrische und magnetische Feld gerichtet ist (siehe Abbildung 17).

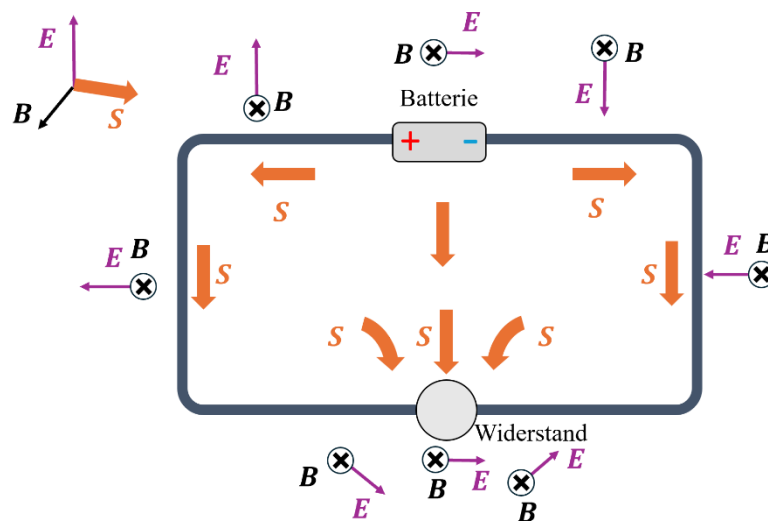


Abbildung 17: Vektordarstellung des Energieflusses von einer Batterie zu einer Glühlampe durch ein elektromagnetisches Feld (angelehnt an Galili & Goihbarg, 2005, S. 143).

Vorteile der Vektordarstellung

Ein wesentlicher Vorteil der Vektordarstellung liegt in ihrer mathematischen Präzision. Sie erlaubt eine exakte Beschreibung physikalischer Größen an jedem Punkt eines Systems und liefert sowohl Richtungs- als auch Intensitätsinformationen. Zudem ist diese Methode universell einsetzbar und eignet sich sowohl für einfache als auch für komplexe elektrische Schaltungen.

Cao und Brizuela (2016) zeigen auch hier, dass Lernende selbst ohne formalen Physikunterricht intuitiv Pfeile verwenden, um Kräfte oder Wirkungsrichtungen zu veranschaulichen. Dies kann im Unterricht als Ansatzpunkt genutzt werden, um die Einführung formaler Vektordarstellungen zu erleichtern.

Nachteile der Vektordarstellung

Dennoch bringt die Vektordarstellung gewisse Herausforderungen mit sich. Ihre Interpretation setzt ein solides mathematisches Verständnis voraus, insbesondere für die Berechnung von Feldstärken und -richtungen an verschiedenen Punkten.

Campos et al. (2020) betonen, dass die Interpretation von Vektordarstellungen für viele Studierende eine erhebliche Herausforderung darstellt. Die räumliche Interpretation von Richtung und Betrag fällt schwer, insbesondere in zweidimensionalen Diagrammen. Zudem gelingt es Lernenden oft nicht, die grafischen Darstellungen mit algebraischen Formeln in Beziehung zu setzen.

Auch Fiedler et al. (2022) heben hervor, dass die Verwendung von Vektordarstellungen – etwa in Form von Linienmodellen – ein vertieftes Verständnis des Feldbegriffs voraussetzt. In seinem Unterrichtsprojekt zur Einführung von Energie über das Feldkonzept wurde deutlich, dass nur jene Schüler*innen die Darstellungen produktiv nutzen konnten, die bereits ein Grundverständnis von Feldern als raumfüllende Strukturen entwickelt hatten.

Verbreitung und Relevanz der Vektordarstellung

In der theoretischen Elektrodynamik ist die Vektordarstellung weit verbreitet und findet insbesondere in fortgeschrittenen Lehrveranstaltungen und der Forschung Anwendung. In der Schulphysik wird sie hingegen seltener genutzt, da sie, wie oben beschrieben, ein vertieftes mathematisches Verständnis erfordert.

2.4.3 Computerbasierte Simulationen

Mit der Entwicklung spezialisierter Softwaretools haben sich computerbasierte Simulationen als bedeutende Methode zur Visualisierung des Energieflusses in elektromagnetischen Feldern etabliert. Diese Simulationen ermöglichen die interaktive Analyse komplexer Systeme, die mit traditionellen Darstellungsformen nur schwer zu erfassen wären.

Vorteile computerbasierter Simulationen

Ein wesentlicher Vorteil computergestützter Simulationen liegt in ihrer Fähigkeit, komplexe und dynamische Systeme detailliert darzustellen. So können beispielsweise an deutlich mehr Raumpunkten Vektoren eingezeichnet werden, da das Computerprogramm die Berechnungen in kurzer Zeit durchführt (Majcen et al., 2000, S. 858). Zudem ermöglichen sie meist eine flexible Variation von Parametern, wie der elektrischen und magnetischen Feldstärke, wodurch die Auswirkungen unterschiedlicher physikalischer Bedingungen unmittelbar analysiert werden können.

Fiedler et al. (2022) nutzten in ihrer Unterrichtsstudie unter anderem computerbasierte Visualisierungen, um potenzielle Energie als Eigenschaft von Feldern zu veranschaulichen. Dabei zeigte sich, dass Simulationen Lernenden helfen können, sich das Feldkonzept als kontinuierliche, raumfüllende Struktur vorzustellen. Besonders der Einsatz interaktiver Modelle, die Energieverteilungen und Feldwirkungen simultan abbilden, erwies sich als förderlich für das konzeptuelle Verständnis. Allerdings wiesen sie auch darauf hin, dass Simulationen nicht automatisch zu einem besseren Verständnis führen, wenn grundlegende Konzepte – wie das des Feldes selbst – nicht vorher explizit thematisiert wurden. Die Kombination von Simulationen mit gezielter Instruktion und Reflexion ist somit entscheidend für ihren didaktischen Mehrwert (Fiedler et al., 2022).

Nachteile computerbasierter Simulationen

Computergestützte Simulationen haben den großen Nachteil, dass sie häufig mit einem hohem Rechenaufwand verbunden sind. Detaillierte Modelle erfordern beträchtliche Rechenkapazitäten, was ihre Nutzung einschränken kann. Zudem erfordern sie spezialisierte Softwarepakete, die nicht immer allgemein zugänglich sind.

Ein Beispiel stellt das Simulationsprogramm FeldLab (Suleder, 2013) dar, das speziell zur Visualisierung stationärer elektrischer und magnetischer Felder entwickelt wurde. Es erlaubt den benutzerfreundlichen Aufbau physikalischer Szenarien mit flächigen Objekten und variablen Materialeigenschaften. Dabei können verschiedene Darstellungsformen – etwa Feldlinien,

Vektorpfeile oder Farbverläufe – kombiniert werden. Die didaktisch ausgerichtete Software eignet sich besonders für schulische und universitäre Anwendungen, ist jedoch nicht frei im Internet verfügbar, sondern nur als CD-ROM im Rahmen eines physikdidaktischen Lehrwerks erhältlich.

Eine Ausnahme stellt das kostenlose Tool des Wolfram Demonstrations Projects (2025) dar, das jedoch nur für festgelegte elektrische Systeme (z. B. Transformatoren) genutzt werden kann.

Verbreitung und Relevanz computerbasierter Simulationen

Computerbasierte Simulationen haben sich in der Analyse der Energieübertragung in elektrischen Systemen mittels elektromagnetischer Felder als unverzichtbares Werkzeug etabliert. Sie ermöglichen die präzise und detaillierte Darstellung von Energieflüssen in komplexen Systemen, etwa in Hochfrequenzanwendungen oder bei der Wechselwirkung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern.

Obwohl computergestützte Simulationen in Forschung und Entwicklung weit verbreitet sind, bleibt ihr Einsatz im Unterricht häufig begrenzt (Suárez et al., 2023), da der Zugang zu geeigneter Hard- und Software oftmals mit finanziellen und infrastrukturellen Hürden verbunden ist.

Suárez et al. (2023) kritisieren, dass in Lehrbüchern digitale Simulationen kaum integriert sind, obwohl sie gerade im Bereich elektromagnetischer Felder das Potenzial hätten, komplexe Konzepte wie die Relativität der Feldbeschreibung zu vermitteln. Ihre begrenzte Präsenz schränkt die Vielfalt an Repräsentationen ein und verhindert, dass Schüler*innen lernen, zwischen verschiedenen Darstellungsformen flexibel zu wechseln.

2.4.4 Multiple Repräsentationsformen und didaktische Potentiale

Die drei beschriebenen Repräsentationsformen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich Anschaulichkeit, mathematischer Präzision und technischer Anforderungen. Feldlinien bieten intuitive Zugänge, Vektoren ermöglichen exakte Beschreibungen, und Simulationen eröffnen interaktive Explorationsräume. Keine dieser Darstellungen ist per se überlegen – ihr didaktischer Wert entfaltet sich erst durch Kombination und gezielte Verknüpfung.

Ein vielversprechender Ansatz ist das Lernen mit multiplen externen Repräsentationen (MERs) (Ainsworth, 1999). Der Einsatz mehrerer Darstellungen stellt ein wirkungsvolles Werkzeug dar, um komplexe wissenschaftliche Konzepte zu vermitteln, erfordert jedoch eine sorgfältige Planung und Begleitung (Ainsworth, 2008). MERs können die Lernleistung verbessern, indem sie Lernende zur Interaktion mit verschiedenen, geeigneten Darstellungen anregen. Dabei ist

die Effektivität nicht allein von der Anzahl der Darstellungen abhängig, sondern von den jeweiligen Kontextbedingungen (Ainsworth, 2006).

Laut Ainsworth (2008) bietet der Einsatz mehrerer Repräsentationen erhebliche Vorteile, da unterschiedliche Informationsaspekte simultan dargestellt werden können. Dies fördert das Verständnis komplexer Sachverhalte, setzt jedoch einen bewussten und reflektierten Umgang voraus: So können einfachere Darstellungen die Interpretation komplexerer unterstützen und Missverständnisse vermeiden. Beispielsweise kann die Animation eines Motorrads das Verständnis eines Tempo-Zeit-Diagramms erleichtern. Konkrete Darstellungen helfen, Fehlinterpretationen vorzubeugen, während abstrakte Modelle die Entwicklung von Konzepten auf höherer Ebene ermöglichen (Ainsworth, 2008).

Ein weiterer zentraler Punkt ist, dass Lernende nicht nur Darstellungen interpretieren, sondern auch selbst erstellen können müssen. Dies setzt ein tiefes Verständnis der zugrunde liegenden Konzepte sowie der jeweiligen Darstellungsformen voraus (Ainsworth, 2008). Ainsworth (2008) betont, dass allein das Wissen über die Konstruktion einer Darstellung nicht automatisch zu deren produktiver Anwendung bei der Problemlösung führt. Dennoch fördert das eigenständige Erstellen von Darstellungen ein vertieftes Verständnis. Die Fähigkeit, Repräsentationen zu konstruieren, ist entscheidend für die Entwicklung von Problemlösekompetenzen (Ainsworth, 2008).

Gleichzeitig kann die Integration von Informationen laut Ainsworth (2006) aus verschiedenen Darstellungen für Lernende herausfordernd sein und das Lernen erschweren. Typische Schwierigkeiten bestehen dabei unter anderem im Wechsel zwischen den Darstellungen sowie in der Übersetzung und im Erkennen ihrer wechselseitigen Beziehungen. Darüber hinaus können Unterschiede in Form, Abstraktionsebene und Modalität der Repräsentationen die Integration zusätzlich erschweren. Zudem beeinflussen individuelle Faktoren wie die Vertrautheit mit den Darstellungen und das vorhandene Fachwissen maßgeblich die Fähigkeit der Lernenden, Informationen aus verschiedenen Repräsentationen erfolgreich zu integrieren (Ainsworth, 2006).

2.5 Relevante Schüler*innenvorstellungen

Damit Lernende ein fundiertes Verständnis der physikalischen Konzepte entwickeln, ist es wichtig, sich nicht nur mit den fachlichen Inhalten, sondern auch mit den bestehenden Schüler*innenvorstellungen auseinanderzusetzen, die sie bereits mitbringen. Insbesondere im Bereich der Elektrizitätslehre sind zahlreiche, gut dokumentierte Vorstellungen bekannt, die bei der Planung einer Unterrichtseinheit nach fachdidaktischen Prinzipien berücksichtigt werden sollten. Das Thema Energie im elektrischen Stromkreis stellt dabei eine besondere Herausforderung für viele Lernende dar: Alltägliche Vorstellungen von Energie und deren Nutzung sind häufig stark vereinfacht oder fehlerhaft, was den Lernprozess erschweren kann. Um dem entgegenzuwirken, ist es notwendig, sich intensiv mit diesen Konzepten auseinanderzusetzen, um im Unterricht gezielt darauf eingehen zu können.

Im folgenden Kapitel werden daher typische Schüler*innenvorstellungen zu Energie und Energieübertragung auf Basis aktueller fachdidaktischer Literatur vorgestellt.

2.5.1 Begriffsklärung

Die Auseinandersetzung mit den Vorstellungen von Schüler*innen ist für einen erfolgreichen Lehr-Lern-Prozess von zentraler Bedeutung (Kircher et al., 2007). Dabei ist es zunächst wichtig zu klären, was in dieser Arbeit unter dem Begriff ‚Schüler*innenvorstellungen‘ zu verstehen ist. Gemeint sind damit die Ideen und Konzepte von Lernenden, die sie in den Unterricht mitbringen – häufig in Form von Alltagserfahrungen oder impliziten Annahmen, die nicht immer mit den fachwissenschaftlichen Konzepten übereinstimmen (Reinfried et al., 2009b). Diese Diskrepanz zwischen subjektiv sinnvollen Erklärungen und fachlich korrekten Konzepten stellt eine zentrale Herausforderung für das Lehren und Lernen dar – gleichzeitig eröffnet sie aber auch wichtige Anknüpfungspunkte für pädagogisches Handeln (R. Duit, 2004).

Wie Pilser (2023) zusammenfasst, hat die fachdidaktische Forschung eine Vielzahl an Begriffen hervorgebracht, um diese Phänomene zu beschreiben. Dabei zeigt sich nicht nur eine begriffliche Vielfalt, sondern auch eine gewisse Unschärfe im Sprachgebrauch. So finden sich in der deutschsprachigen Literatur Bezeichnungen wie ‚Schülervorstellungen‘ (R. Duit, 2004), ‚Lernendenvorstellungen‘ (Heeg et al., 2021) oder ‚Alltagsvorstellungen‘ (R. Duit et al., 1981). Neben diesen neutraleren Begriffen existieren aber auch negativ konnotierte Begriffe wie ‚Fehlvorstellungen‘ (Hopf et al., 2022) oder ‚Lernschwierigkeiten‘ (Wiesner, 2018). Im englischen Sprachraum finden sich Begriffe wie ‚misconceptions‘ (Scherr, 2007), ‚alternative frameworks‘ (Driver & Easley, 1978) sowie ‚preconceptions‘ (Clement, 1982).

Diese breite Begrifflichkeit verdeutlicht, wie differenziert die fachdidaktische Forschung die unterschiedlichen Arten und Ursachen von Vorstellungen und Schwierigkeiten im Lernprozess betrachtet (vgl. Schecker et al., 2018).

Teilweise werden diese Begriffe in der Literatur auch synonym verwendet – was zusätzlich zur begrifflichen Unschärfe beiträgt (Jung, 2011). Gleichzeitig zeigt sich aber auch: Ein pauschales Abwerten dieser Vorstellungen als ‚falsch‘ greift zu kurz. Aus lernpsychologischer Sicht ist es wesentlich produktiver, alternative Denkweisen als Ausdruck subjektiver Sinnbildung zu verstehen. Sie folgen häufig einer inneren Logik, die auf persönlichen Erfahrungen basiert, und zeigen typische Denkmuster, die in bestimmten Themenfeldern immer wieder auftreten (Hopf et al., 2022).

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit bewusst ein sprachlich sensibler Zugang gewählt. Auf negativ konnotierte Begriffe wie ‚Fehlvorstellungen‘ oder ‚misconceptions‘ wird verzichtet. Stattdessen wird der neutralere Begriff ‚Schüler*innenvorstellungen‘ oder kurz ‚Vorstellungen‘ verwendet, um zu verdeutlichen, dass Lernende ihre Welt aktiv deuten – und diese Deutungen wertvolle Ansatzpunkte für weiterführende Lernprozesse darstellen (Pilser, 2023; Schecker et al., 2018).

2.5.2 Kognitive Modelle zur Einordnung von Schüler*innenvorstellungen

In der Physikdidaktik haben sich verschiedene kognitive Modelle etabliert, um die Entstehung und Struktur von Vorstellungen zu erklären und daraus didaktische Konsequenzen abzuleiten. Hervorzuheben ist hierbei die Unterscheidung von ‚deep structures‘ und ‚current constructions‘, wie sie von Niedderer und Schecker (1992) eingeführt wurde. Sie gehen von einer Zweiteilung im kognitiven System aus: Deep structures beschreiben tief verankerte, stabile Konzepte, die sich über lange Zeiträume hinweg ausbilden, während current constructions als kurzfristige, kontextabhängige Erklärungsversuche zu verstehen sind. Die Abgrenzung zwischen diesen beiden Ebenen ist jedoch nicht immer eindeutig – was auf die Komplexität individueller Lernprozesse verweist (Niedderer & Schecker, 1992).

Darüber hinaus haben die Modelle ‚knowledge-as-theory‘ (Chi, 2005; Vosniadou, 1994) und ‚knowledge-as-elements‘ (diSessa, 1993; Hammer, 2000) in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen.

In der frühen physikdidaktischen Forschung wurde das Denken von Schüler*innen über lange Zeit vorwiegend im Sinne des ‚knowledge-as-theory‘-Paradigmas interpretiert (Winter & Pilser, 2024). Vorstellungen wurden dabei als kohärente, stabile kognitive Strukturen verstanden, die im Widerspruch zum wissenschaftlichen Verständnis stehen und den Unterrichtserfolg behindern können (Clement, 1982; Hestenes et al., 1992).

Im Gegensatz dazu steht das ‚knowledge-as-elements‘-Modell, das eine dynamischere Auffassung von kognitiven Prozessen vertritt. Dieser Ansatz geht davon aus, dass das Denken von Lernenden aus flexiblen, kontextabhängigen Wissenseinheiten (‚knowledge pieces‘) besteht, die je nach Situation einzeln oder in Netzwerken aktiviert werden können (diSessa, 1993).

Aktuelle fachdidaktische Ansätze plädieren zunehmend dafür, beide Perspektiven nicht als Gegensätze, sondern als komplementär zu betrachten: Die Vielfalt und Kontextabhängigkeit von Lernprozessen erfordert ein flexibles Verständnis – sowohl von stabilen Konzepten als auch von dynamisch aktivierten Wissensfragmenten (Willison & Taylor, 2006).

2.5.3 Konstruktivistische Lerntheorie und Konzeptwechselstrategien

Die konstruktivistische Lerntheorie bildet eine zentrale Grundlage für das Verständnis von Lernprozessen im naturwissenschaftlichen Unterricht und hat sich in der Naturwissenschaftsdidaktik als „treibende Kraft zur Weiterentwicklung des Unterrichts erwiesen“ (R. Duit, 1995, S. 911). Sie geht davon aus, dass Wissen nicht einfach aufgenommen, sondern aktiv aufgebaut wird – auf der Basis individueller Erfahrungen, Vorerfahrungen und sozialer Interaktionen (Driver & Scanlon, 1989).

Obwohl es unterschiedliche Varianten konstruktivistischer Lerntheorien gibt, lassen sich laut Kircher et al. (2007) sechs zentrale Aspekte benennen:

Erstens gilt Lernen als ein aktiver Prozess, bei dem Wissen nicht einfach übernommen, sondern vom Lernenden selbst konstruiert wird. Diese Vorstellung wird auch von Widodo und Duit (2004) vertreten, die betonen, dass Lernen immer auf den vorhandenen Vorstellungen der Lernenden aufbauen sollte. Vorunterrichtliches Wissen spielt dabei eine zentrale Rolle, da es den Rahmen vorgibt, in dem neue Konzepte verstanden und integriert werden können (Widodo & Duit, 2004).

Zweitens wird laut Kircher et al. (2007) auch naturwissenschaftliches Wissen als menschliche Konstruktion verstanden. Es ist nicht als objektive Abbildung der Realität zu betrachten, sondern als ein vorläufiges Deutungsangebot, das sich in bestimmten Kontexten als nützlich und tragfähig erweist.

Drittens betonen Kircher et al. (2007), dass Lernen immer in einem sozialen und materialen Kontext stattfindet. Der Austausch mit anderen sowie die gezielte Nutzung geeigneter Lernmaterialien beeinflussen die Konstruktion von Wissen maßgeblich. Widodo et al. (2004) unterstreichen ebenfalls die Bedeutung sozialer Interaktion: Die Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Sichtweisen kann Lernprozesse anregen, vertiefen und auf neue Bahnen lenken.

Viertens ist Wissen stets an den Kontext gebunden, in dem es erworben wurde – ein Prinzip, das unter dem Begriff des ‚situierten Lernens‘ bekannt ist. Lernprozesse sind stark durch die jeweiligen Rahmenbedingungen und Lebenswelten der Lernenden geprägt (Kircher et al., 2007). Gemäß Widodo et al. (2004) sind insbesondere authentische, bedeutsame Lernsituationen entscheidend dafür, dass wissenschaftliche Konzepte dauerhaft verankert werden können. Fünftens werden die Lernenden laut Kircher et al. (2007) als aktiv verantwortliche Gestalter des eigenen Lernprozesses verstanden. Der Erwerb physikalischer Konzepte erfordert nicht nur kognitive Aktivität, sondern auch die Fähigkeit zur Reflexion und Selbstregulation. Dieser Punkt findet sich auch bei Widodo et al. (2004): Lernende sollen dazu befähigt werden, ihre Denkprozesse zu hinterfragen, Lernstrategien bewusst einzusetzen und eigenständig weiterzuentwickeln.

Sechstens werden die Lehrpersonen nicht als reine Wissensvermittler*innen, sondern in ihrer unterstützenden Funktion für den Lernprozess gesehen. Sie gestalten Lernumgebungen, die kognitive Konflikte ermöglichen, Austausch fördern und individuelle Lernwege zulassen (Kircher et al., 2007).

Ein bedeutsames Konzept innerhalb dieser Theorie ist der sogenannte Konzeptwechsel (‚conceptual change‘), der vor allem dann notwendig wird, wenn vorunterrichtliche Vorstellungen von physikalischen Phänomenen nicht mit den wissenschaftlich akzeptierten Konzepten übereinstimmen. Solche Vorstellungen sind meist stabil, alltagsweltlich geprägt und oft nur schwer zu verändern (R. Duit & Treagust, 2003).

Das bekannte Modell von Posner et al. (1982) formulieren vier Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit ein solcher Wechsel gelingen kann:

- **Unzufriedenheit mit der bestehenden Vorstellung:** Lernende müssen erkennen, dass ihre bisherigen Konzepte nicht ausreichen, um Phänomene zufriedenstellend zu erklären oder Probleme zu lösen. Diese Unzufriedenheit entsteht meist durch das Erleben von Widersprüchen oder Anomalien (Posner et al., 1982).
- **Verständlichkeit des neuen Konzepts:** Die alternative Vorstellung muss für die Lernenden nachvollziehbar und logisch strukturiert sein. Laut Posner et al. (1982) müssen verstehen, wie sie Erfahrungen neu ordnet und Bedeutung verleiht.
- **Plausibilität des neuen Konzepts:** Das neue Konzept muss als sinnvoll und glaubwürdig für die Lernenden erscheinen. Es sollte besser zur Erklärung der beobachteten Phänomene geeignet sein als das bisherige und mit vorhandenem Wissen in Einklang stehen (Posner et al., 1982).

- **Fruchtbarkeit des neuen Konzepts:** Die neue Vorstellung sollte sich laut Posner et al. (1982) in unterschiedlichen Kontexten bewähren und Anknüpfungspunkte für weiteres Lernen, neue Einsichten oder Anwendungen bieten.

Diese vier Bedingungen stellen ein theoretisches Rahmenmodell für Konzeptwechsel dar und betonen die zentrale Rolle der Lernenden in der Unterrichtsplanung.

Ergänzend dazu betonen Kircher et al. (2007), dass Lernen in den Naturwissenschaften auf mehreren Ebenen des Konzeptwechsels stattfindet, die miteinander verknüpft sind. Es geht dabei nicht nur um die Veränderung von Alltagsvorstellungen zu physikalischen Konzepten, sondern auch um metakognitive Aspekte, etwa Vorstellungen über das Fach Physik selbst oder über das eigene Lernen.

Um Lernende bei diesem komplexen Prozess zu unterstützen, wurden in der fachdidaktischen Forschung verschiedene Strategien zur Förderung von Konzeptwechseln identifiziert. Diese lassen sich nach Kircher et al. (2007) grob in kontinuierliche und diskontinuierliche Lernwege unterteilen:

- **Anknüpfungsstrategie:** Bestehende Vorstellungen der Schüler*innen werden als Ausgangspunkt genutzt. Ziel ist ein fließender Übergang zu wissenschaftlichen Konzepten durch behutsame Erweiterung oder Präzisierung der vorhandenen Ideen (Kircher et al., 2007).
- **Umdeutungsstrategie:** Fehlkonzepte werden nicht verworfen, sondern umgedeutet, um Missverständnisse zu korrigieren und sinnvolle Aspekte beizubehalten (Kircher et al., 2007).
- **Konfrontationsstrategie:** Durch gezielte kognitive Konflikte – etwa durch Experimente, Paradoxa oder Widersprüche – werden Lernende zur Reflexion und Neubewertung ihrer Vorstellungen angeregt (Kircher et al., 2007).
- **Kombination von Strategien:** In der Praxis hat sich gezeigt, dass eine gezielte Kombination kontinuierlicher und diskontinuierlicher Lernwege besonders lernwirksam ist, da sie sowohl emotionale Sicherheit als auch kognitive Herausforderung bietet (Kircher et al., 2007).

2.5.4 Cognitive-Load-Theory

Die Cognitive Load Theory (CLT) verfolgt das Ziel, Lernprozesse zu verbessern, indem kognitive Belastungen gesteuert werden (Sweller, 1994). Besonders im Kontext des Physikunterrichts, der durch eine hohe inhaltliche Komplexität und Abstraktion geprägt ist, erscheint die Anwendung der CLT vielversprechend, um Schüler*innen beim Wissenserwerb effektiv zu unterstützen.

Die Theorie unterscheidet zwischen drei Arten kognitiver Belastung: intrinsische, extrinsische und germane (Sweller et al., 1998):

Die intrinsische Belastung ergibt sich aus der Komplexität des Lerninhalts und ist eng mit der sogenannten Elementinteraktivität verknüpft – also der Anzahl an Elementen, die simultan verarbeitet und miteinander in Beziehung gesetzt werden müssen (Sweller et al., 1998). Gerade in der Physik, wo viele Konzepte wie Kraft, Energie oder elektrische Felder in komplexen Zusammenhängen stehen, ist diese Form der Belastung oft besonders hoch.

Die extrinsische Belastung hingegen entsteht durch suboptimales Materialdesign und kann durch gezielte didaktische Maßnahmen reduziert werden (Sweller et al., 1998).

Die germane Belastung bezieht sich auf die kognitive Anstrengung, die direkt zur Konstruktion von Schemata⁵ beiträgt. Sie entsteht durch bewusste kognitive Prozesse, die darauf abzielen, neues Wissen zu organisieren und zu abstrahieren (Sweller et al., 1998). Im Gegensatz zur extrinsischen Belastung, die durch schlecht gestaltete Instruktionen verursacht wird und das Lernen behindert, ist die germane Belastung förderlich für das Lernen.

Ein wirksames Instruktionsdesign zielt daher darauf ab, die extrinsische Belastung zu minimieren und gleichzeitig Ressourcen für die germane Belastung freizusetzen – also für jene kognitiven Prozesse, die zur Schema-Konstruktion beitragen (Sweller et al., 1998).

Für den Physikunterricht bedeutet dies, dass Schüler*innen durch gezieltes Üben und gestufte Instruktion Schritt für Schritt solche Schemata aufbauen können (Paas et al., 2010).

Die empirische Relevanz der CLT für den Physikunterricht wird durch Studien untermauert, die zeigen, dass kognitive Belastung ein zentraler Prädiktor für die Leistung im Fachwissen ist. So belegt eine Untersuchung von Jaeger, Franz und Müller (2018), dass insbesondere bei authentischen physikalischen Problemstellungen eine erhöhte kognitive Belastung die Leistung beeinträchtigen kann.

Auch die Qualität physikalischer Repräsentationen spielt eine zentrale Rolle. Eine andere Studie zeigt, dass gute externe Repräsentationen – beispielsweise Diagramme oder Skizzen – nicht nur die Problemlöseleistung erhöhen, sondern auch die wahrgenommene kognitive Belastung senken können. Die Wirkung von Repräsentationen wird dabei teilweise durch die kognitive Belastung vermittelt. Diese Erkenntnisse verdeutlichen, wie stark die Qualität der Darstellung physikalischer Inhalte mit dem Lernerfolg verknüpft ist (Jaeger & Müller, 2018).

Zur Reduktion extrinsischer Belastung hat sich der Einsatz spezifischer Lehrstrategien wie ‚worked examples‘ oder ‚goal-free problems‘ als besonders effektiv erwiesen (Sweller, 1994).

⁵ Sweller et al. (1998) definieren Schemata als zentrale mentale Strukturen, in denen Wissen organisiert wird. Sie ermöglichen eine effizientere Informationsverarbeitung und Problemlösung, da sie den Arbeitsgedächtnisbedarf reduzieren.

Worked examples sind Lernformate, bei denen ein Problem gemeinsam mit einer schrittweisen Lösung dargestellt wird. Ziel ist es, Lernenden zu ermöglichen, den Problemlösungsprozess nachzuvollziehen, anstatt sich durch ‚trial and error‘ zur Lösung zu kommen. Indem die Notwendigkeit entfällt, eigenständig zur Lösung zu gelangen, wird die kognitive Belastung reduziert und die Aufmerksamkeit gezielt auf die Beziehung zwischen Problemzuständen und Lösungsschritten gelenkt (Sweller, 1994).

Goal-free problems sind Aufgaben ohne ein klar definiertes Endziel. Statt eine konkrete Lösung zu erarbeiten, sollen Lernende möglichst viele relevante Aspekte eines Problems untersuchen. Diese offene Herangehensweise reduziert die kognitive Belastung, da aufwendige Ziel-Mittel-Analysen entfallen, die häufig von wesentlichen Lerninhalten ablenken. Sie fördert die Aufmerksamkeit auf strukturelle Zusammenhänge innerhalb der Aufgabe und unterstützt so den Aufbau tragfähiger Schemata – insbesondere bei komplexen, stark vernetzten Lerninhalten (Sweller, 1994).

In der Physikdidaktik könnten solche Methoden genutzt werden, um Schüler*innen in frühen Lernphasen gezielt zu entlasten und ihnen Raum für die Entwicklung tragfähiger mentaler Modelle zu geben.

2.5.5 Typische Schüler*innenvorstellungen aus der Literatur

Die theoretischen Überlegungen zu kognitiven Modellen und Konzeptwechselprozessen bilden die Grundlage für ein Verständnis individueller Lernwege. Um diese für die Unterrichtsplanung nutzbar zu machen, ist es entscheidend, typische inhaltliche Vorstellungen zu kennen, die Lernende in bestimmten Themenfeldern mitbringen. Im Bereich der Elektrizitätslehre sind viele Schüler*innenvorstellungen zu den Themen Strom, Spannung und Widerstand bekannt, die gut dokumentiert sind (vgl. Ivanjek et al., 2021; Johsua & Dupin, 1985; McDermott & Shaffer, 1992; von Rhöneck, 1986). Demgegenüber sind die Themen Energie und Energieübertragung in elektrischen Systemen vergleichsweise weniger intensiv erforscht.

Dennoch gibt es einige Studien, die sich entweder allgemein mit Energiemodellen oder konkret mit Energieaspekten in elektrischen Schaltungen befassen. Die in der Literatur dokumentierten Schüler*innenvorstellungen lassen sich meist als stabile Erklärungsmuster (siehe Abschnitt 2.5.2) einordnen, da sie über verschiedene Studien hinweg regelmäßig beobachtet wurden. Um diese Vielzahl an wiederkehrenden Vorstellungen systematisch zu analysieren, schlagen Autoren wie Watts (1983) und Vosniadou (1994) vor, diese in sogenannte Frameworks – abstrahierte Rahmenkonzepte, die typische Denkweisen von Lernenden zu bestimmten Themenfeldern bündeln – zusammenzufassen. In diesem Kapitel werden daher sowohl einzelne, häufig dokumentierte Vorstellungen als auch die ihnen zugrunde liegenden Frameworks beschrieben.

2.5.5.1 Schüler*innenvorstellungen zu Energie und Energieübertragung

Verschiedene fachdidaktische Studien dokumentieren eine Vielzahl von Vorstellungen, mit denen Lernende Energie und ihre Übertragung in elektrischen Systemen erklären. Diese Konzepte sind oft stark von alltagsweltlichen Erfahrungen und Analogien geprägt.

Energie als Substanz, Fluid oder Brennstoff

- Energie wird als eine Substanz oder ein Fluid verstanden, das bei bestimmten Prozessen übertragen wird (Trumper & Gorsky, 1993).
- Energie wird als eine Art Brennstoff aufgefasst, der verbraucht werden kann (Trumper & Gorsky, 1993).
- Objekte oder Gegenstände besitzen Energie und verbrauchen sie im Laufe eines Prozesses (Trumper & Gorsky, 1993).
- Energie ist ein Bestandteil von Dingen und kann durch einen Auslöser freigesetzt werden (Trumper & Gorsky, 1993).
- Energie strömt in den Leiterkabeln; elektrische Ladungen (z. B. Elektronen) sind mit Energie ‚beladen‘ (Backhaus, 1987).
- Energie fließt nur, wenn ein sichtbarer energetischer Vorgang vorliegt (Backhaus, 1987).
- Im Rucksackmodell (siehe Abbildung 18) tragen die Elektronen als kleine Wesen eine bestimmte Energieportion ΔE von der Spannungsquelle zum Widerstand, wo sie diese abgeben (Härtel, 2012).

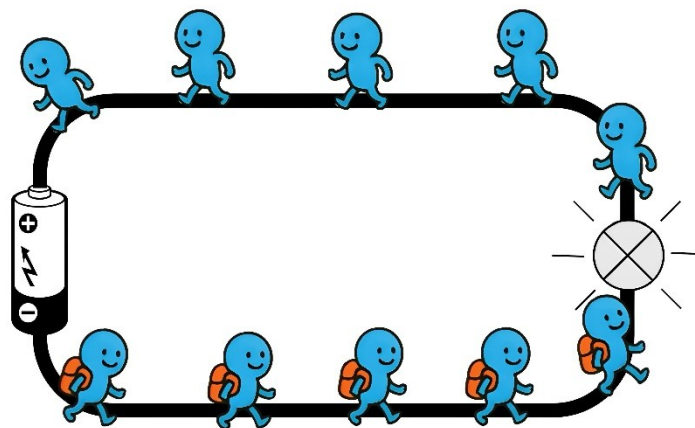


Abbildung 18: Das Rucksackmodell als Schüler*innenvorstellung zur Energie im elektrischen Stromkreis.

Energie als Aktivität, Bewegung oder Wirkung

- Energie wird mit Aktivität, Bewegung und Handlung verbunden (Trumper & Gorsky, 1993).
- Energie wird durch bestimmte Prozesse erzeugt (Trumper & Gorsky, 1993).
- Energie wird mit Elektrizität oder Strom synonym verwendet (Schecker et al., 2018).
- Energie wird mit Menschen verbunden, z. B. durch Aussagen wie „Menschen haben Energie“ oder „Energie macht aktiv“ (Trumper & Gorsky, 1993).

Vorstellungen zur Energie(-übertragung) im elektrischen Stromkreis

- Das elektrische Feld in einem Leiter ist stets Null (Engelhardt & Beichner, 2004).
- Der elektrische Strom wird als Ursache des elektrischen Feldes betrachtet (Engelhardt & Beichner, 2004).
- Die Batterie wird als konstante Stromquelle angesehen (Engelhardt & Beichner, 2004).
- Superposition von Batterien: Unabhängig von der Schaltungsart verstärken mehrere Batterien das Leuchten einer Lampe proportional (Engelhardt & Beichner, 2004).
- Je näher eine Glühlampe zur Batterie ist, desto größer ist die Energiezufuhr (Sherwood & Chabay, 1999).

2.5.5.2 Systematisierende Frameworks zur Energie in elektrischen Systemen

Die Vielzahl an Schüler*innenvorstellungen zu Energie und Energieübertragung lässt sich nicht allein durch die Auflistung einzelner Konzepte erfassen. Vielmehr zeigt sich, dass Lernende häufig auf konsistente Denkraumen zurückgreifen, innerhalb derer sie verschiedene Phänomene deuten. Um diese Denkweisen systematisch zu beschreiben und miteinander zu vergleichen, wurden in der fachdidaktischen Literatur verschiedene konzeptuelle Frameworks entwickelt. Diese Frameworks dienen dazu, wiederkehrende Muster in den Vorstellungen von Lernenden zu erkennen, sie einzuordnen und mögliche Lernpfade in Richtung fachwissenschaftlicher Konzepte zu identifizieren.

Die folgende Auswahl der basiert auf der Zusammenstellung von Pilser (2023), die im Rahmen ihrer Masterarbeit an der Universität Wien eine qualitative Interviewstudie mit Schüler*innen der Sekundarstufe durchführte. Ziel der Studie war es, die Erklärungen von Lernenden zu Energie und Energieübertragung in einfachen elektrischen Stromkreisen zu analysieren und typische Denkstrukturen zu identifizieren. Aufbauend auf etablierten Klassifikationen (u. a. von Watts (1983), Trumper & Gorsky (1993) sowie Behle & Wilhelm (2017)) konnte Pilser bestehende Frameworks rekonstruieren, aber auch zwei neue Erklärungsmuster empirisch feststellen und beschreiben.

Anthropozentrische Energie (Behle & Wilhelm, 2017; Watts, 1983)

- Energie wird in einer Weise beschrieben, die eine menschliche oder anthropomorphe Qualität annimmt. Lernende stellen sich vor, dass Energie ‚etwas will‘ oder eine ‚Absicht‘ hat.
- Diese Sichtweise kann auch im Zusammenhang mit biologischen Prozessen oder Aktivitäten auftreten, in denen Energie als treibende Kraft für menschliche oder tierische Tätigkeiten verstanden wird.

Gelagerte Energie (Behle & Wilhelm, 2017; Watts, 1983)

- Energie wird als in Objekten ‚gelagert‘ verstanden.
- Lernende sehen Energie als etwas, das in einem Objekt oder System gespeichert ist und darauf wartet, freigesetzt zu werden, z. B. in einer Batterie oder einem gespannten Gummiband.

Funktionale Energie (Behle & Wilhelm, 2017; Watts, 1983)

- Energie wird als etwas beschrieben, das eine Funktion oder einen Zweck erfüllt.
- Sie wird oft in Verbindung mit praktischen Aktivitäten oder mechanischen Prozessen genannt, in denen sie eine bestimmte Aufgabe ermöglicht, wie etwa die Funktion einer Maschine oder eines Geräts.

Energie als Zutat (Watts, 1983)

- Energie wird als eine Art ‚Zutat‘ oder Bestandteil von Prozessen verstanden.
- Diese Vorstellung ist oft mit einem ungenauen Verständnis von Energie verbunden, bei dem sie als eine notwendige ‚Komponente‘ für das Funktionieren eines Systems gesehen wird, ohne dass eine klare Vorstellung von der Umwandlung oder Übertragung von Energie besteht.

Energie als Aktivität (Watts, 1983)

- Energie wird als Aktivität beschrieben, die etwas bewirkt oder eine Handlung ausführt.
- Lernende stellen sich Energie als eine Art ‚Aktivität‘ oder ‚Kraft‘ vor, die unmittelbar in Bewegung oder Veränderung umgesetzt wird, wie etwa das ‚Bewegen‘ von Objekten oder das ‚Arbeiten‘ von Maschinen.

Produzierte Energie (Watts, 1983)

- Energie wird als Produkt von Vorgängen verstanden.
- Sie erscheint als Nebenprodukt von Prozessen, oft verbunden mit Abwärme oder Emissionen, und wird nicht als etwas ‚Übertragbares‘, sondern als das Ergebnis eines physikalischen Vorgangs verstanden, z. B. Abwärme bei elektrischen Geräten.

Transferierte Energie (Watts, 1983)

- Energie wird als übertragbar von einem System auf ein anderes beschrieben.
- Lernende verstehen Energie als eine Größe, die in einem System vorhanden ist und durch Wechselwirkungen oder Prozesse von einem Ort auf einen anderen übertragen wird, z. B. in einem Stromkreis von der Batterie zur Lampe.

Partiell transferierte Energie (Behle & Wilhelm, 2017)

- Energie wird nur teilweise übertragen, ein Teil wird am Widerstand (z. B. Glühbirne) verbraucht.
- Diese Vorstellung reflektiert eine erste Idee von Energieumwandlung, wie z. B. die Umwandlung in Licht oder Wärme.

Energie als Katalysator (Behle & Wilhelm, 2017)

- Energie wird als notwendige Bedingung für physikalische Prozesse verstanden.
- Sie dient als Auslöser oder Aktivator für verschiedene Vorgänge, ohne selbst direkt verbraucht zu werden, ähnlich der Funktion eines Katalysators in chemischen Reaktionen.

Energieverbrauch und -umwandlung (Pilsner, 2023)

- Energie wird als umwandelbar und verbrauchbar beschrieben, insbesondere in Bezug auf sichtbare Energieformen wie Wärme oder Licht.
- Lernende verstehen Energie als eine Ressource, die in verschiedene Energieformen umgewandelt werden kann, beispielsweise durch elektrische Geräte oder physikalische Prozesse, wobei die Umwandlung und der Verbrauch von Energie im Vordergrund stehen.

Energieleitung (Pilsner, 2023)

- Energie wird als Fluss durch Drähte beschrieben, wobei elektromagnetische Felder keine Rolle spielen.
- Diese Sichtweise stellt die Energieübertragung als eine vereinfachte Form der ‚Leitung‘ dar, bei der die Energie direkt von einem Punkt zum anderen übertragen wird, ohne dass tiefere physikalische Prozesse wie elektromagnetische Felder berücksichtigt werden.

2.5.6 Fazit

Die Auseinandersetzung mit den Vorstellungen von Schüler*innen stellt einen zentralen Bestandteil fachdidaktischer Überlegungen zur Gestaltung des Physikunterrichts dar. Abschnitt 2.5 verdeutlicht, dass solche Vorstellungen keineswegs bloße Fehlkonzepte sind, sondern vielmehr als Ausdruck subjektiver Sinnbildungsprozesse verstanden werden sollten. Die differenzierte Betrachtung der Begriffsvielfalt sowie der kognitiven Modelle – insbesondere die Gegenüberstellung von ‚knowledge-as-theory‘ und ‚knowledge-as-elements‘ (diSessa, 1993) – zeigt, wie komplex und individuell Lernprozesse verlaufen können.

Für die Unterrichtsplanung ergibt sich daraus die Notwendigkeit, Lernende nicht nur mit fachlich korrekten Konzepten zu konfrontieren, sondern gezielt an ihre vorhandenen Denkweisen anzuknüpfen, um Lernfortschritte im Sinne eines konzeptuellen Wandels (‚conceptual change‘ nach Posner et al., 1982) zu ermöglichen. Die konstruktivistische Lerntheorie liefert hierzu eine zentrale Grundlage: Lernen wird als aktiver, sozial eingebetteter und kontextgebundener Prozess verstanden, bei dem Wissen nicht einfach übernommen, sondern individuell konstruiert wird (Kircher et al., 2007; Widodo & Duit, 2004). Vorunterrichtliche Vorstellungen sind dabei Ausgangspunkt und Rahmen für neue Lerninhalte. Konzeptwechselstrategien – wie Anknüpfen, Umdeuten und Konfrontieren – unterstützen den Wandel stabiler Alltagsvorstellungen hin zu wissenschaftlich fundierten Konzepten. Entscheidend sind dabei laut Posner et al. (1982) Bedingungen wie die Unzufriedenheit mit bisherigen Vorstellungen, die Verständlichkeit, Plausibilität und Fruchtbarkeit neuer Konzepte.

Darüber hinaus zeigt die CTL, wie wichtig das Management kognitiver Belastungen für den Lernerfolg ist (Sweller, 1994). Insbesondere in der Physik, die durch hohe Komplexität und Abstraktion geprägt ist, müssen intrinsische, extrinsische und germane Belastungen bedacht werden. Ein gutes Instruktionsdesign minimiert extrinsische Belastungen durch übersichtliche Darstellungen und geeignete Lehrstrategien wie ‚worked examples‘ oder ‚goal-free problems‘, um so Raum für die germane Belastung zu schaffen, die den aktiven Aufbau mentaler Schemata fördert (Paas et al., 2010; Sweller et al., 1998). Studien belegen, dass eine Reduktion der kognitiven Belastung, insbesondere durch hochwertige Repräsentationen und didaktische Maßnahmen, die physikalische Leistungsfähigkeit von Schüler*innen deutlich verbessert (Jaeger & Müller, 2018).

Im Bereich der Energie und Energieübertragung elektrischer Systeme zeigt sich, dass Lernende häufig auf konsistente, jedoch alltagsgeprägte Erklärungsmuster zurückgreifen – etwa die Vorstellung von Energie als ‚Stoff‘, der verbraucht oder transportiert wird (R. Duit et al., 1981).

Die in der Literatur identifizierten systematisierenden Frameworks bieten eine hilfreiche Grundlage, um solche Denkstrukturen zu analysieren und einzuordnen. Die im Kapitel vorgestellten Konzepte – unter anderem ‚Energie als Zutat‘, ‚produzierte Energie‘ oder ‚Energie als Aktivität‘ (Watts, 1983) sowie ‚anthropozentrische Energie‘, ‚partiell transferierte Energie‘ und ‚Energie als Katalysator‘ (Behle & Wilhelm, 2017) – zeigen, wie Lernende Energiephänomene strukturieren und deuten. Darüber hinaus identifizierte Pilser (2023) in einer qualitativen Interviewstudie mit Schüler*innen zwei weitere Erklärungsmuster: ‚Energieverbrauch und -umwandlung‘ sowie ‚Energieleitung‘. Diese systematisierenden Frameworks ermöglichen es, typische Argumentationslinien zu erkennen, wiederkehrende Missverständnisse zu identifizieren und daran anknüpfend didaktisch begründete Interventionen zu entwickeln.

Die im vorliegenden Kapitel dargestellten Schüler*innenvorstellungen sowie die systematisierenden Frameworks bilden eine wesentliche Grundlage für die Planung eines Unterrichtsdesigns zur Energieübertragung in elektrischen Systemen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit soll untersucht werden, wie eine geeignete didaktische Interventionen aussehen kann, die Lernende dabei unterstützt, ihre konzeptionellen Missverständnisse zu überwinden und ein fundiertes fachwissenschaftliches Verständnis zu entwickeln. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die in diesem Kapitel vorgestellten Schüler*innenvorstellungen gelegt, um den Lernfortschritt im Sinne des Conceptual-Change-Pradigmas zu ermöglichen.

Methodische Grundlagen

Das vorliegende Kapitel bildet die methodische Grundlage des vorliegenden Forschungsprojekts.

Im Zentrum des Projekts steht ein Design-Based Research-Ansatz, der sich durch zyklisches, praxisnahes Forschen im schulischen Kontext auszeichnet. In Abschnitt 3.1 werden die zentralen Merkmale dieses Forschungsansatzes sowie sein methodisches Vorgehen erläutert.

Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3.2 das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (MDR) vorgestellt, das als Grundlage für die inhaltliche und konzeptionelle Entwicklung des Lehr-Lern-Arrangements (LLA) dient. Dieses Modell kombiniert fachwissenschaftliche Analyse mit der Berücksichtigung typischer Vorstellungen und Denkweisen von Lernenden.

In Abschnitt 3.3 folgt eine Einführung in die Methode der Akzeptanzbefragung, die im Rahmen der qualitativen Interviewstudie zur Erhebung von Vorstellungen und Bewertungen durch die Lernenden eingesetzt wird.

Schließlich wird in Abschnitt 3.4 die Qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz vorgestellt, die der systematischen Auswertung der qualitativen Daten dient.

3.1 Design-Based-Research

Design-Based Research (DBR) hat sich seit Beginn des 21. Jahrhunderts als ein bedeutender methodischer Ansatz in der fachdidaktischen Entwicklungsforschung etabliert. Es verbindet die empirische Bildungsforschung mit der theoriegeleiteten Gestaltung von LLAs und legt den Fokus darauf, systematisch zu untersuchen, wie, unter welchen Bedingungen und warum Bildungsinnovationen in der Praxis stattfinden können (Anderson & Shattuck, 2012; Design-Based Research Collective, 2003).

Die Relevanz von DBR in der Fachdidaktik ergibt sich aus seiner Ausrichtung auf praktische Bildungsprobleme und kontextbezogene Lösungen. Laut Haagen-Schützenhöfer (2016) sind typische Ausgangspunkte solcher Projekte etwa „konkrete Probleme aus der Unterrichtspraxis wie beispielsweise die Erhebung von (defizitären) Lernständen“ (Haagen-Schützenhöfer, 2016, S. 9).

Ein zentrales Merkmal von DBR ist die Forschung in authentischen Lehr-Lern-Kontexten, nicht unter künstlich kontrollierten Bedingungen. Barab und Squire (2004, S. 2) betonen, dass DBR in „naturalistic settings“ stattfindet – mit dem Ziel, neue Theorien, Artefakte und Praktiken hervorzubringen. Dabei werden nicht einzelne Variablen isoliert betrachtet, sondern komplexe Wechselwirkungen im schulischen Alltag analysiert. Entwicklungs- und Forschungsprozesse greifen dabei ineinander und fördern sich gegenseitig (Haagen-Schützenhöfer, 2016).

Der iterative Charakter von DBR zeigt sich in der zyklischen Verbindung von Theorieentwicklung, Design, Intervention und Re-Design (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2020). Das Vorgehen ist zugleich praxisnah und wissenschaftlich fundiert: Während auf der einen Seite konkrete Unterrichtsmaterialien und -strategien entstehen, wird auf der anderen Seite eine theoriebasierte Fundierung dieser Gestaltungen angestrebt. So werden neben empirisch geprüften Interventionen meist auch sogenannte „design principles“, „conjecture maps“ oder „hypothetical learning trajectories“ entwickelt – hypothetische, aber theoriegeleitete Konstrukte, die Orientierung im Gestaltungsprozess geben und flexibel weiterentwickelt werden können (Bakker, 2018, S. 46). Plomp und Nieveen (2013) fassen zusammen: „Design research is the systematic study of designing, developing and evaluating educational interventions (i.e. learning processes, learning environments and the like) with the purpose to develop or validate such theories“ (Plomp & Nieveen, 2013, S. VII). Die fachdidaktische Entwicklungsforschung kann diesen doppelten Anspruch – praktische Gestaltung und theoretische Fundierung – besonders gut erfüllen, da sie sowohl praxisrelevante als auch wissenschaftliche Fragestellungen integriert (R. H. Duit & Treagust, 2012).

3.1.1 Kernelemente von Design-Based-Research

Design-Based Research lässt sich durch fünf zentrale Charakteristika beschreiben, die den Anspruch verbinden, praxisorientierte Gestaltungen mit theoriebildender Forschung zu verzahnen (Design-Based Research Collective, 2003):

1. **Verknüpfung von Design und Theoriebildung:** Das Ziel der Entwicklung von LLAs ist eng mit der Formulierung von Theorien oder sogenannten ‚Prototheorien‘ des Lernens verbunden. Die Gestaltungsarbeit dient somit nicht nur der Lösung konkreter Unterrichtsprobleme, sondern auch der Weiterentwicklung bildungstheoretischer Konzepte.
2. **Iterative Design und Re-Design-Zyklen:** Der Forschungsprozess verläuft in wiederholten Phasen von Konzeption, Durchführung, Analyse und Überarbeitung (vgl. Haagen-Schützenhöfer, 2016; Zloklikovits, 2025). Diese Zyklen ermöglichen es, Gestaltungen kontinuierlich zu verbessern und auf empirische Befunde zu reagieren.
3. **Theorien mit Transferpotenzial:** Die im Forschungsprozess gewonnenen Erkenntnisse sollen über den Einzelfall hinausgehen und in Form kommunizierbarer Theorien oder Prinzipien formuliert werden, die anderen Lehrenden und Bildungsforscher*innen Orientierung bieten.
4. **Authentische Kontexte:** Die Forschung erfolgt in realen Bildungssituationen. Dabei steht nicht nur die Bewertung von Erfolg oder Misserfolg im Fokus, sondern insbesondere die Analyse der zugrundeliegenden Lernprozesse und Interaktionen, um ein tieferes Verständnis der jeweiligen Problematik zu gewinnen.
5. **Verknüpfung von Prozessen und Ergebnissen:** Die Analyse stützt sich auf methodische Zugänge, die es erlauben, Prozesse der Umsetzung mit den erzielten Ergebnissen systematisch zu verbinden. So wird sichtbar, wie bestimmte Gestaltungsmerkmale das Lernen tatsächlich beeinflussen.

Diese fünf Merkmale machen DBR zu einem methodischen Zugang, der sowohl der Komplexität des schulischen Alltags gerecht wird als auch zur Weiterentwicklung fachdidaktischer Theorien beitragen kann.

Ergänzend dazu beschreibt Haagen-Schützenhöfer (2016) die Verschränkung von Entwicklungs- und Forschungszyklus im DBR, die sich auf mehreren Ebenen vollzieht:

- **Auf heuristischer Ebene** erfolgt der Übergang von der Problemlage zur Hypothesenbildung beziehungsweise zur Entwicklung erster Entwürfe eines LLAs.
- **Auf der empirischen Ebene** stehen die Datenerhebung und die praktische Erprobung im Fokus.

- **Auf der Produktebene** entstehen sowohl Forschungsprodukte wie Lerntheorien oder Designwissen als auch Entwicklungsprodukte wie prototypische Interventionen oder domänenspezifische Designprinzipien.
- **Die Validierungsebene** umfasst sowohl die wissenschaftliche Überprüfung der Forschungsprodukte durch die Scientific Community (z. B. durch Publikationen) als auch die ökologische Validierung der Entwicklungsprodukte in der Unterrichtspraxis.

Diese vier Ebenen und ihre jeweiligen Prozessschritte sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Ebenen und Arbeitsbereiche bzw. Prozessschritte des Entwicklungs- und Forschungszyklus im Design Bades Research (adaptiert von Haagen-Schützenhöfer, 2016, S. 11).

Ebene	Forschungszyklus	Entwicklungszyklus
Heuristisch	Von der Problemlage zu Hypothesen	Von der Problemlage zur Erprobungsfassung der LLA
Empirisch	Von Hypothesen zu Datenerhebungen	Von der Erprobungsfassung der LLA
Produkte	Von der Datenerhebung zu Forschungsprodukten (lokale Lerntheorien zur Anfangsoptik, Designwissen)	Von der Intervention zu Entwicklungsprodukten (prototypische LLA, domänenspezifische Designprinzipien)
Validierung	Validierung von Forschungsprodukten am Markt (Peers, Scientific Community)	Ökologische Validierung von Entwicklungsprodukten am Markt (Unterrichtspraxis)

3.1.2 Methodisches Vorgehen im DBR-Zyklus

Der iterative Zyklus des Design-Based Research (DBR) lässt sich in verschiedene Phasen gliedern, wie in Abbildung 19 zu sehen: Theorie, Design, Implementation, Evaluation und Re-Design.

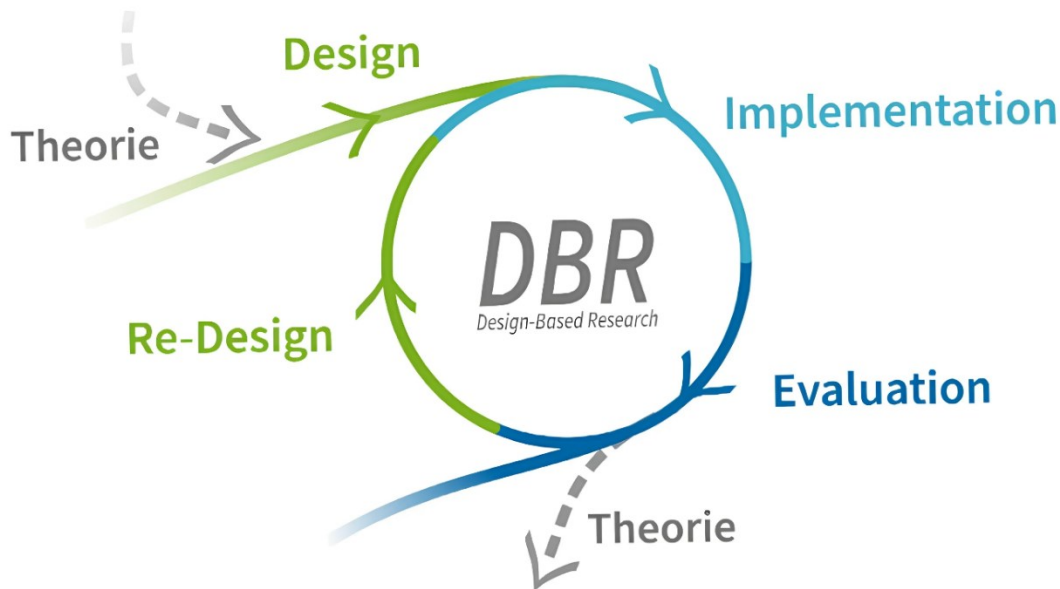


Abbildung 19: Der Design-Based-Research Zyklus (Bild adaptiert von Zloklikovits⁶).

Der DBR-Zyklus beginnt mit der **Theorie**, deren Ausgangspunkt eine konkrete Problemlage aus der Bildungspraxis ist. Dabei werden Diskrepanzen zwischen angestrebtem und tatsächlichem Bildungsprozess identifiziert und analysiert, häufig unter Einbezug empirischer Erkenntnisse (Haagen-Schützenhöfer et al., 2024). Aufbauend auf dieser Analyse werden theoretische Konzepte und Forschungsergebnisse herangezogen, um Hypothesen sowie erste Designprinzipien für die Entwicklung eines LLAs formulieren. Ziel dieser Phase ist es, eine wissenschaftlich fundierte Basis für die anschließende Konzeption der Intervention zu schaffen (Haagen-Schützenhöfer, 2016). Diese Phase entspricht der heuristischen Ebene des DBR-Zyklus (siehe Tabelle 1), in der die Übergänge von Problemlage zu Hypothesenbildung und zur ersten Konzeption eines LLA vollzogen werden.

Auf der Grundlage, der zuvor erarbeiteten theoretischen und empirischen Fundierung wird in der **Design-Phase** ein erster Entwurf eines LLAs entwickelt. Dabei handelt es sich nicht um

⁶ Bildquelle: Zloklikovits, S. (n.d.). *Design-Based Research Zyklus*. Wikimedia Commons. Lizenz: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DBR_german_colour.svg

einen rein kreativen Prozess, sondern um eine forschungsgeleitete und strukturierte Entwicklung, bei der sowohl die Perspektive der Lernenden als auch praxisrelevante Erkenntnisse einfließen (Haagen-Schützenhöfer, 2016). Ziel dieser Phase ist es, eine konkrete Intervention zu entwerfen, die der bearbeiteten Problemlage adäquat begegnet (Haagen-Schützenhöfer et al., 2024). Diese Phase lässt sich ebenfalls noch der heuristischen Ebene (siehe Tabelle 1) zuordnen, da sie auf die initiale Erprobungsfassung des LLA hinführt.

Das entwickelte LLA wird in der **Implementations-Phase** in realen Bildungskontexten erprobt. Die Implementation erfolgt dabei in authentischen Lernumgebungen wie Klassenzimmern, Labors oder Bildungszentren, um die Intervention unter realitätsnahen Bedingungen zu erproben (Haagen-Schützenhöfer et al., 2024). Dabei wird geprüft, wie gut das Design in der Praxis anwendbar ist und welche Wirkungen es auf Lernprozesse hat. Diese Phase entspricht der empirischen Ebene des Zyklus (siehe Tabelle 1): Während im Entwicklungsraum die Intervention weiterentwickelt wird, dient sie im Forschungsraum zur Überprüfung theoretischer Annahmen durch Datenerhebung (Haagen-Schützenhöfer, 2016).

In der **Evaluations-Phase** werden die Daten durch die Implementation analysiert. Im Forschungsraum zielt die Auswertung auf die Generierung wissenschaftlicher Erkenntnisse, wie beispielsweise lokal gültiger Lerntheorien oder Designwissen. Parallel dazu liefert die Evaluation im Entwicklungsraum Rückmeldungen zur Intervention, etwa zu ihrem Aufbau, den verwendeten Materialien oder zur methodischen Gestaltung (Haagen-Schützenhöfer, 2016). Dabei finden iterative Bewertungszyklen statt, um mögliche Mängel und Hindernisse in der Konzeption zu identifizieren. Rückmeldungen von Praktikern und Lernenden werden genutzt, um die Intervention kontinuierlich zu verfeinern (Haagen-Schützenhöfer et al., 2024). Diese Phase markiert den Übergang zur Produktebene (siehe Tabelle 1), da hier sowohl Forschungsprodukte wie Designwissen oder Lerntheorien) als auch Entwicklungsprodukte (überarbeitete Fassungen des LLA) entstehen.

Auf Basis der Evaluation erfolgt in der **Re-Design-Phase** eine Überarbeitung des ursprünglichen Designs. Dabei werden gezielte Anpassungen von Inhalten, Methoden oder Materialien vorgenommen, um identifizierte Schwächen zu beheben oder Potenziale besser zu nutzen. Die überarbeitete Version des LLAs wird anschließend erneut erstellt und getestet (Haagen-Schützenhöfer, 2016). Durch die formative Bewertung wird die Intervention weiter verbessert, um die angestrebten Ziele noch effektiver zu erreichen (Haagen-Schützenhöfer et al., 2024). Auch diese Phase ist Teil der Produktebene (siehe Tabelle 1), da hier neue Versionen des LLA entstehen, die weiterentwickelte Entwicklungsprodukte darstellen.

Die abschließende Phase führt zurück zur **Theorie**, jedoch in reflektierter und weiterentwickelter Form. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse können bestehende Theorien angepasst, neue konzeptuelle Modelle formuliert oder kontextspezifische Designprinzipien abgeleitet werden. Design-Based Research zielt somit nicht nur auf praxisnahe Problemlösungen, sondern auch auf eine fundierte Weiterentwicklung des theoretischen Verständnisses von Lehren und Lernen ab. In diesem Rahmen werden lokale Lerntheorien weiterentwickelt und neue Hypothesen für zukünftige Zyklen formuliert (Haagen-Schützenhöfer, 2016). Die gewonnenen Erkenntnisse werden über den spezifischen Kontext hinaus verallgemeinert, um einen Beitrag zu Theorien, Gestaltungsrahmen oder Gestaltungsmethoden zu leisten. Diese Phase verfolgt das Ziel, einen kumulativen Wissensbestand über Lehren und Lernen aufzubauen (Haagen-Schützenhöfer et al., 2024). Diese Rückkoppelung an die Theorie stellt die Validierungsebene des Zyklus dar (siehe Tabelle 1). Sie umfasst sowohl die wissenschaftliche Validierung durch die Scientific Community als auch die ökologische Validierung in der Praxis.

3.1.3 Designprinzipien

Ein wichtiges Merkmal designbasierter Forschung ist die Verwendung von Designprinzipien. Dabei handelt es sich um handlungsleitende Grundsätze, die den Entwicklungsprozess eines LLA strukturieren und steuern. Sie basieren auf theoretischen Überlegungen und empirischen Befunden und dienen dazu, die Gestaltung von Lernumgebungen effektiv und zielgerichtet zu unterstützen (Haagen-Schützenhöfer, 2016).

Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten von Designprinzipien unterschieden:

3.1.3.1 Allgemeine Designprinzipien

Allgemeine Designprinzipien beschreiben theoretische Aspekte des Lehrens und Lernens auf einer übergeordneten, allgemeinen Ebene. Sie stützen sich auf empirische Evidenz und lassen sich in unterschiedlichen Bildungssettings anwenden. Haagen-Schützenhöfer und Hopf (2020) bringen ihre Funktion prägnant auf den Punkt, indem sie festhalten:

„General design principles specify theoretical aspects of teaching and learning on a general level.“ (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2020, S. 8)

Damit wird verdeutlicht, dass allgemeine Prinzipien nicht an spezifische Kontexte gebunden sind, sondern grundlegende Einsichten in Lehr- und Lernprozesse bereitstellen, die als Ausgangspunkt für verschiedenste Gestaltungsentscheidungen dienen können.

Ein Beispiel für ein allgemeines Designprinzip im Optik-Lehrgang von Haagen-Schützenhöfer (2016) ist das ‚Prinzip der Berücksichtigung von Lernendenperspektiven‘. Dieses Prinzip hebt

hervor, dass bei der Gestaltung von LLAs die individuellen Vorerfahrungen, Interessen und vorunterrichtlichen Vorstellungen der Lernenden gezielt einbezogen werden sollten. Es gründet auf konstruktivistischen Lerntheorien, die davon ausgehen, dass Lernende nicht als unbeschriebenes Blatt („tabula rasa“) in den Unterricht treten, sondern bereits über kognitive Strukturen und alltagsbezogenes Wissen verfügen, das ihren Lernprozess wesentlich beeinflusst (Haagen-Schützenhöfer, 2016). Im Anfangsunterricht zur Optik wird daher die sogenannte Sender-Empfänger-Streu-Vorstellung eingeführt. Sie knüpft an die alltäglichen Erfahrungen der Schüler*innen mit Licht und Sichtbarkeit an. Dabei werden verbreitete Konzepte wie die Beleuchtungsvorstellung aufgegriffen, um daran anknüpfend ein physikalisch fundiertes Verständnis aufzubauen und bestehende Vorstellungen gezielt weiterzuentwickeln (Haagen-Schützenhöfer, 2016).

3.1.3.2 Domänenspezifische Designprinzipien

Im Gegensatz dazu sind domänenspezifische Designprinzipien deutlich kontextnäher ausgerichtet. Sie beziehen sich auf konkrete Anforderungen bestimmter Fachgebiete oder Lernumgebungen und übertragen allgemeine Prinzipien auf spezifische Gestaltungszusammenhänge (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2020). Dabei behalten sie ihren Bezug zur theoretischen Fundierung, werden jedoch durch lokale Bedingungen und fachliche Besonderheiten mit Leben gefüllt. Haagen-Schützenhöfer und Hopf (2020) unterstreichen diese enge Verschränkung von Theorie und Anwendung, indem sie hervorheben:

„A domain specific design principle can resonate with more than one general design principle at the same time“ (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2020, S. 8).

Diese Aussage verweist auf die Mehrdimensionalität domänenspezifischer Prinzipien, die nicht nur einzelne Aspekte des Lernens adressieren, sondern mehrere Designprinzipien gleichzeitig berücksichtigen und miteinander in Beziehung setzen können.

Ein Beispiel für ein domänenspezifisches Designprinzip im Optik-Lehrgang von Haagen-Schützenhöfer (2016) ist die Sender-Empfänger-Streu-Vorstellung. Dieses Konzept wird im Anfangsunterricht der Optik als zentrales Erklärungsmodell für den physikalischen Sehvorgang eingeführt. Es beschreibt, dass Licht von einer Lichtquelle (Sender) ausgeht, an einem Objekt gestreut wird (Zwischensender) und schließlich ins Auge der beobachtenden Person (Empfänger) gelangt.

Dieses Prinzip bildet eine wichtige Grundlage für das Verständnis der Sichtbarkeit sowohl selbstleuchtender als auch beleuchteter Körper und trägt wesentlich dazu bei, alltägliche Beobachtungen im Licht physikalischer Zusammenhänge zu deuten (Haagen-Schützenhöfer, 2016).

3.2 Das Modell der didaktischen Rekonstruktion

Das Modell der didaktischen Rekonstruktion (MDR) ist ein didaktisches Modell, das darauf abzielt, fachwissenschaftliche Konzepte mit den Vorstellungen und Vorerfahrungen der Lernenden systematisch in Beziehung zu setzen. Ziel ist es, auf dieser Grundlage pädagogisch sinnvolle und lernwirksame Unterrichtsinhalte zu entwickeln (Kattmann et al., 1997). Im MDR werden drei Ebenen eng miteinander verknüpft: die Fachliche Klärung, die Erfassung von Lernendenvorstellungen und die didaktische Strukturierung (siehe Abbildung 20).

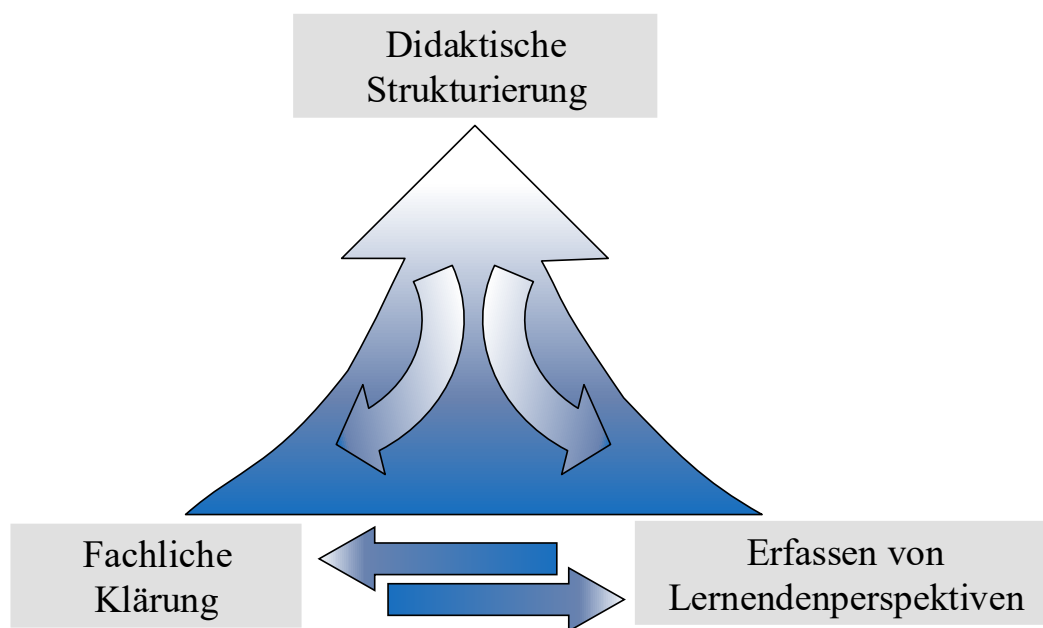


Abbildung 20: Didaktische Rekonstruktion nach Kattmann et al. (1997).

3.2.1 Fachliche Klärung

In einem ersten Schritt werden die zentralen wissenschaftlichen Begriffe und Konzepte des jeweiligen Themenfelds präzise analysiert. Ziel ist es, deren Bedeutung für das schulische Lernen herauszuarbeiten und potenzielle Stolpersteine zu identifizieren. Diese Analyse erfolgt kontextsensitiv und bezieht unterschiedliche disziplinäre Perspektiven mit ein. Dabei werden auch Missverständnisse berücksichtigt, die sich aus uneindeutigen Alltagsbegriffen ergeben können. Die Fachliche Klärung bildet somit die Grundlage für die inhaltliche Fundierung des Unterrichts und wird idealerweise durch aktuelle Forschungsergebnisse ergänzt (Reinfried et al., 2009a).

3.2.2 Erfassung von Lernendenvorstellungen

Ein zentrales Anliegen der Didaktischen Rekonstruktion ist die systematische Auseinandersetzung mit den vorunterrichtlichen Vorstellungen der Lernenden. Diese Vorstellungen sind häufig tief verankert, weichen aber nicht selten deutlich von wissenschaftlichen Erklärungen ab. Studien belegen, dass Unterricht, der diese Vorkonzepte ernst nimmt und gezielt aufgreift, zu deutlich besseren Lernerfolgen führt (Reinfried et al., 2009a). Daher ist es notwendig, empirisch zu erheben, wie Lernende ein Thema verstehen und welche Konzepte sie bereits verwenden – etwa durch Interviews oder schriftliche Erhebungen.

3.2.3 Didaktische Strukturierung

Auf Grundlage fachlicher und lernendenzentrierter Analysen werden konkrete Unterrichtseinheiten entwickelt. Dabei sollen wissenschaftliche Inhalte mit den Alltagsvorstellungen der Lernenden so verknüpft werden, dass ein verständnisorientierter und anschlussfähiger Lernprozess entstehen kann. Dieser Prozess verläuft nicht linear, sondern rekursiv – er erfordert eine kontinuierliche Reflexion und Anpassung. Ziel ist es, Lernumgebungen zu schaffen, die kognitiv herausfordern und gleichzeitig individuell ansprechen (Reinfried et al., 2009a).

Wissenschaftliche Konzepte sollen dabei nicht isoliert vermittelt oder gegen Alltagsvorstellungen ausgespielt werden, sondern im Sinne einer lernförderlichen Didaktik auf vorhandene Vorstellungen der Lernenden aufbauen. Reinfried et al. (2009a) betonen:

„Dabei ist es das Ziel, die wissenschaftlich geklärten Vorstellungen lern- und lehrbar zu machen. Durch Schülervorstellungen werden wissenschaftliche Vorstellungen also nicht in ihrer Bedeutung eingeschränkt, sondern auf eine für das Lernen bedeutsame Basis gestellt.“ (Reinfried et al., 2009a, S. 405).

Voraussetzung dafür ist ein systematisches In-Beziehung-Setzen von lebensweltlichen und fachlich geklärten Vorstellungen, um eine produktive Auseinandersetzung mit den Lerninhalten zu ermöglichen (Reinfried et al., 2009a).

3.2.4 Das Modell der didaktischen Rekonstruktion im Unterricht

Ein anschauliches Beispiel für die Anwendung des MDR liefert ein Unterrichtsprojekt zum Thema ‚Sehen und Sehkraft‘, das exemplarisch zeigt, wie sich die zuvor beschriebenen Prinzipien des MDR im Unterricht konkret umsetzen lassen (R. Duit et al., 2012).

Das Projekt orientierte sich an den drei zentralen Ebenen des MDR: der fachlichen Klärung, der Erhebung von Lernendenvorstellungen und der didaktischen Strukturierung.

In der ersten Phase, der fachlichen Klärung, wurden unterschiedliche wissenschaftliche Zugänge zum Sehen herangezogen – darunter sowohl historische Perspektiven als auch moderne, konstruktivistisch geprägte Konzepte. Dabei spielten erkenntnistheoretische Kategorien wie ‚Identität‘, ‚Konstruktion‘ und ‚In-Konstruktion‘ eine zentrale Rolle. Ziel war es, das Thema fachlich fundiert und zugleich offen für verschiedene Deutungsansätze aufzubereiten, um im Sinne des MDR anschlussfähige Lernzugänge zu ermöglichen (R. Duit et al., 2012).

Darauf aufbauend wurden in einer zweiten Phase die vorunterrichtlichen Vorstellungen von Schüler*innen zum Sehvorgang erhoben. Diese wurden als zentrale Anknüpfungspunkte für den Unterricht herangezogen, auch wenn sie von den wissenschaftlichen Vorstellungen abwichen (R. Duit et al., 2012).

In der dritten Phase, der didaktischen Strukturierung, wurden diese Erkenntnisse in konkrete Unterrichtsangebote übersetzt. Ziel war es, Lernumgebungen zu schaffen, die sowohl die fachlichen Aspekte als auch die subjektiven Perspektiven der Lernenden berücksichtigen. Das Thema ‚Sehen‘ wurde dabei nicht nur als biologischer Vorgang behandelt, sondern auch in seiner Handlungshaftigkeit und Kontextgebundenheit thematisiert. So konnte im Sinne des MDR eine Verbindung zwischen wissenschaftlicher Modellbildung und lebensweltlicher Erfahrung hergestellt werden (R. Duit et al., 2012).

Ein zentraler Unterrichtsansatz, der aus diesem Projekt hervorging, ist die Einführung der ‚Sender-Empfänger-Streu-Vorstellung‘ im Anfangsoptikunterricht. Dieses domänenspezifische Designprinzip beschreibt den Sehvorgang als physikalischen Prozess, bei dem Licht von einer Quelle (Sender) ausgeht, von Objekten gestreut wird (Zwischensender) und schließlich ins Auge (Empfänger) gelangt. Diese Vorstellung eignet sich besonders gut, um gängige Alltagskonzepte systematisch weiterzuentwickeln und zu einem tragfähigen physikalischen Verständnis zu gelangen (R. Duit et al., 2012).

3.3 Akzeptanzbefragungen

Die Methode der Akzeptanzbefragung wurde in der Frankfurter Gruppe rund um Jung (1992), entwickelt und kommt in der fachdidaktischen Forschung als Methode zum Einsatz, um die Akzeptanz physikalischer Sichtweisen bei Schüler*innen zu erfassen. Im Mittelpunkt steht dabei nicht nur die Diagnose von Verständnisproblemen, sondern auch die iterative Weiterentwicklung und gezielte Optimierung von Erklärungen zur Unterstützung des Lernprozesses. Jung (1992) formuliert dies folgendermaßen:

„Instead of asking what a student thinks about a particular phenomenon, he is bluntly told the explanation, and in a number of stages the investigator tries to find out if the student has understood the material and is able to use it to explain related phenomena.“ (Jung, 1992, S. 278)

3.3.1 Ablauf der Akzeptanzbefragung

Die Akzeptanzbefragung folgt einem klar strukturierten Ablauf, der in Abbildung 21 zu sehen ist.

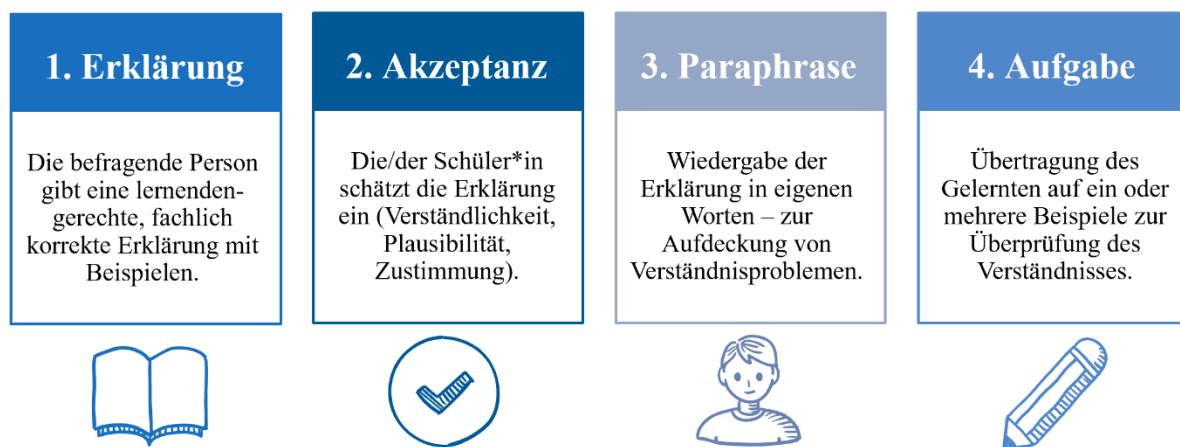


Abbildung 21: Ablauf der Akzeptanzbefragungen nach Jung (1992).

1. Physikalische Erklärung durch Interviewer*in:

Zu Beginn gibt die befragende Person eine fachlich korrekte, jedoch lernendengerechte Erklärung eines physikalischen Sachverhalts. Begriffe werden bei Bedarf erläutert und durch geeignete Beispiele ergänzt (Wiesner & Wodzinski, 1996).

2. Bewertung durch Interviewteilnehmer*in:

Die befragte Person wird gebeten, die präsentierte Erklärung einzuschätzen – etwa im Hinblick auf Verständlichkeit, Plausibilität oder persönliche Überzeugung. Erste Hinweise auf Akzeptanz oder Ablehnung werden sichtbar (Wiesner & Wodzinski, 1996).

3. Paraphrasierung in eigenen Worten:

Anschließend wird die physikalische Erklärung in eigenen Worten formuliert. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf Transformationsprozesse, Auslassungen und Missverständnisse gelegt, die für die Auswertung zentral sind (Wiesner & Wodzinski, 1996).

4. Anwendung auf ein (oder mehrere) Beispiel(e):

Das neu gewonnene Wissen wird auf ein vorgegebenes Beispiel angewendet. Dies dient der Überprüfung des konzeptuellen Verständnisses und der praktischen Anschlussfähigkeit der Erklärung. Schließlich folgt meist noch eine weitere Anwendung auf ein anderes Beispiel. Ziel ist es, die Übertragbarkeit und die Nachhaltigkeit der kognitiven Umstrukturierung zu überprüfen (Wiesner & Wodzinski, 1996).

3.3.2 Stärken und Schwächen der Methode

Die Methode der Akzeptanzbefragung zeichnet sich insbesondere durch ihren iterativen Charakter aus. Im Verlauf des Interviewprozesses können neue Informationsangebote flexibel integriert und gezielt auf individuelle Lernbarrieren eingegangen werden (Wiesner & Wodzinski, 1996). Rückfragen ermöglichen es, unmittelbares Feedback zu nutzen, um Erklärungen zu verbessern und Verständnisprobleme präziser zu erfassen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus einem Interview fließen dabei häufig in überarbeitete Erklärungsangebote ein, die in einer weiteren Interviewrunde – meist mit anderen Schüler*innen – erneut überprüft werden.

Diese intensive Interaktion zwischen Interviewer*in und Schüler*in erlaubt tiefgehende Einblicke in individuelle Denk- und Verstehensprozesse, die mit standardisierten Verfahren kaum zugänglich wären (Wiesner & Wodzinski, 1996).

Besonders hervorzuheben ist auch die Flexibilität der Methode: Im Gegensatz zu Unterrichtsbeobachtungen erlaubt sie gezieltes Nachfragen, wodurch Missverständnisse oder konzeptuelle Lücken aufgedeckt und direkt im Gespräch adressiert werden können (Wiesner & Wodzinski, 1996)

Ein weiterer Vorteil liegt in der unmittelbaren Unterrichtsnähe. Die Struktur und Sprache der eingesetzten Informationsangebote sind so gestaltet, dass sie sich problemlos in den schulischen Kontext übertragen lassen. Damit eignet sich die Methode auch für den Einsatz im Unterricht selbst, etwa in einem mikro-didaktischen Setting (Wiesner & Wodzinski, 1996).

Zudem geht es bei der Akzeptanzbefragung nicht allein um das Vermitteln einer "richtigen" Erklärung, sondern darum, physikalische Sichtweisen als ernstzunehmende Denkangebote zu

3.3 Akzeptanzbefragungen

etablieren. Die Schüler*innen sollen alternative Sichtweisen nicht nur verstehen, sondern als sinnvoll und nachvollziehbar anerkennen (Wiesner & Wodzinski, 1996).

In diesem Zusammenhang betonen Wiesner und Wodzinski (1996), dass

„durch die Konzentration auf einzelne Schülerinnen und Schüler einerseits und die inhaltliche Anbindung an Unterricht andererseits (...) Untersuchungen dieser Art besonders ergiebiges Datenmaterial [liefern], das in vielfältiger Hinsicht auswertbar ist und das den Vorteil hat, direkt für Unterricht umsetzbar zu sein“ (Wiesner & Wodzinski, 1996, S. 271)

Trotz dieser Stärken bringt die Methode auch gewisse Einschränkungen mit sich. Einzelinterviews sind zeit- und ressourcenintensiv und daher nur schwer flächendeckend in größeren Lerngruppen umsetzbar (Wiesner & Wodzinski, 1996). Allerdings ist dies für die Zielsetzung der Methode nicht zwingend erforderlich: Vielmehr geht es darum, auf der Basis detaillierter Einzelfallanalysen Rückschlüsse für die Verbesserung didaktischer Materialien zu ziehen. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich anschließend verallgemeinern und in der Unterrichtsentwicklung berücksichtigen.

Aufgrund des methodischen Aufwands bleibt die Zahl der befragten Personen meist begrenzt. In einigen Studien wurden Interviews mit zwei Schüler*innen gleichzeitig durchgeführt, um mehr Daten in kürzerer Zeit zu gewinnen (vgl. Haagen-Schützenhöfer, 2016). Dieses Vorgehen kann jedoch auch zu gegenseitiger Beeinflussung führen, wodurch individuelle Denkprozesse überlagert und die Validität der Ergebnisse beeinträchtigt werden können.

Nicht zuletzt hängt die Qualität der erhobenen Daten stark von der Kompetenz und Erfahrung der Interviewer*innen ab (Wiesner & Wodzinski, 1996). Gerade zu Beginn kann es vorkommen, dass relevante Aspekte übersehen oder nicht ausreichend dokumentiert werden. Der Einsatz von Leitfäden oder Checklisten kann helfen, solche Lücken zu vermeiden und die Vergleichbarkeit zwischen Interviews zu sichern.

3.3.3 Anwendungsbeispiele und empirische Befunde

Empirische Untersuchungen, die auf der Methode der Akzeptanzbefragung basieren, verdeutlichen exemplarisch, wie Lernprozesse vom Alltagsverständnis hin zu fachlich fundierten Konzepten verlaufen können. Besonders anschaulich wird dies am Beispiel der sogenannten Zusatzbewegung in der Mechanik – einem Themenbereich, der bei vielen Lernenden auf erhebliche kognitive Widerstände stößt (Wiesner & Wodzinski, 1996).

Im Rahmen von Akzeptanzbefragungen konnte gezeigt werden, wie gezielte und strukturierte Erklärungsangebote sowie unmittelbare Rückfragen und iterative Anpassungen des Gesprächsverlaufs zu einem veränderten Verständnis führen können. Die Lernenden begannen, das physikalische Modell nicht nur kognitiv nachzuvollziehen, sondern zunehmend auch als plausibel und akzeptabel anzuerkennen (Wiesner & Wodzinski, 1996).

Diese Befunde unterstreichen die didaktische Relevanz der Methode: Sie zeigt nicht nur auf, wo und warum konzeptuelle Barrieren bestehen, sondern ermöglicht auch, diese gezielt zu adressieren und zu überwinden – ein Anspruch, dem traditionelle Unterrichtsformen in vielen Fällen nicht gerecht werden. Die Akzeptanzbefragung leistet damit einen wichtigen Beitrag zur fachdidaktischen Forschung und zur Entwicklung wirksamer LLAs (Wiesner & Wodzinski, 1996).

Die Methode findet breite Anwendung, insbesondere in Projekten mit Schüler*innen der Sekundarstufe (vgl. Haagen-Schützenhöfer, 2016; Jan-Philipp Burde & Thomas Wilhelm, 2015; Zloklikovits & Hopf, 2020), wird aber auch auf universitärem Niveau, etwa in der Ausbildung von Lehrpersonen, eingesetzt (Korner, 2024).

3.3.4 Konzeptideen

In dieser Arbeit werden die physikalischen Erklärungen, die im Rahmen der Akzeptanzbefragungen gewonnen wurden, systematisch aus sogenannten Konzeptideen (engl. ‚Key Ideas‘) formuliert. Haagen-Schützenhöfer (2016) definiert diese Konzeptideen wie folgt:

„Unter Key Ideas werden im Folgenden fachliche zentrale Konzepte eines (Teil)gegenstandsbereiches verstanden, die im Zentrum von Lernprozessen für die Verständnisentwicklung einer konkreten Zielgruppe von Lernenden stehen“ (Haagen-Schützenhöfer, 2016, S. 21)

Der Einsatz solcher Konzeptideen ist insbesondere in der fachdidaktischen Forschung im Kontext von Design-Based-Research-(DBR-)Projekten etabliert. So greifen unter anderem Wiener et al (2015), Becker (2023), Budimaier (2024), Krebs (2024) sowie Zloklikovits (2025) in ihren Arbeiten darauf zurück.

Ein Beispiel für eine in dieser Arbeit entwickelte Konzeptidee aus dem Bereich des magnetischen Feldes lautet:

Textbox 1: Konzeptidee zum magnetischen Feld aus der 3. Runde an Akzeptanzbefragungen.

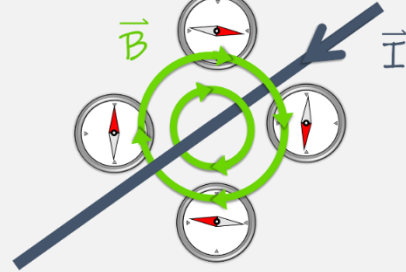
Konzeptidee: Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein magnetisches Feld. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten, wie einer Stromzange oder einem Kompass, nachgewiesen werden

3.3 Akzeptanzbefragungen

Diese Konzeptidee wird dann folgendermaßen in der Erklärung der Akzeptanzbefragung adressiert:

Textbox 2: Erklärung zum magnetischen Feld aus der 3. Runde an Akzeptanzbefragungen.

Erklärung: Ein stromdurchflossener Leiter (egal ob Gleichstrom oder Wechselstrom) erzeugt ein statisches oder wechselndes Magnetfeld. Bringt man einen Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, richtet sich die Kompassnadel senkrecht zum Leiter aus.



Daraus folgt, dass das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter verläuft (siehe Abbildung).

Das Magnetfeld kann anschaulich durch Magnetfeldlinien dargestellt werden, wobei diese nur ein Modell sind, um bestimmte Eigenschaften des Feldes zu verdeutlichen.

Aus Textbox 1 und Textbox 2 wird deutlich, dass die Erklärung auf der jeweiligen Konzeptidee aufbaut und diese fachlich und sprachlich weiter ausformuliert. Umgekehrt lässt sich sagen, dass die Konzeptidee eine kondensierte und fokussierte Form der Erklärung darstellt. Durch diese enge Verknüpfung wird sichergestellt, dass die Erklärungsangebote in den Akzeptanzbefragungen konsistent, zielgerichtet und didaktisch fundiert sind.

3.4 Qualitative Inhaltsanalyse

Die qualitative Inhaltsanalyse ist ein methodisches Verfahren zur systematischen Auswertung qualitativer Daten (Kuckartz, 2018). Kuckartz beschreibt sie folgendermaßen:

„Die qualitative Inhaltsanalyse ist eine Form der Auswertung, in welcher Textverstehen und Textinterpretation eine wesentlich größere Rolle spielen als in der klassischen, sich auf den manifesten Inhalt beschränkenden Inhaltsanalyse.“
(Kuckartz, 2018, S. 26–27)

Im Gegensatz zur klassischen, häufig quantitativ ausgerichteten Inhaltsanalyse liegt der Fokus nicht primär auf der Häufigkeit bestimmter Inhalte, sondern auf dem Verständnis und der Interpretation des Textes – auch nach der Kategorisierung. Die qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz ist sowohl themen- als auch fallorientiert. Dies ist ein wichtiger Unterscheid zu Mayrings (2015) Qualitativer Inhaltsanalyse, denn „dort spielt die fallorientierte im Vergleich zur kategorienorientierten Perspektive so gut wie keine Rolle“ (zitiert nach Kuckartz, 2018, S. 49).

Entscheidende Merkmale der Qualitativen Inhaltsanalyse sind ‚Fälle‘ und ‚Kategorien‘. Erstere beschreibt Kuckartz (2018) folgendermaßen:

„Fälle, das sind meistens, wie etwa bei einer Interviewstudie die Forschungsteilnehmenden. Es können aber auch Familien, Institutionen, Organisationen als Analyseeinheiten, als Fälle einer Studie definiert werden.“
(Kuckartz, 2018, S. 49)

Kategorien wiederum beschreibt er wie folgt:

„Sehr häufig handelt es sich dabei um Themen, aber prinzipiell können alle Arten von Kategorien hier auftreten.“ (Kuckartz, 2018, S. 49).

3.4.1 Formen der qualitativen Inhaltsanalyse

Es ist wichtig zu beachten, dass es verschiedene Formen der qualitativen Inhaltsanalyse gibt. Kuckartz (2018) unterscheidet dabei drei Hauptformen, die sich je nach Zielsetzung und Analysetiefe unterscheiden:

- **Inhaltlich strukturierende Analyse:** Diese Form der Analyse dient der thematischen Ordnung und Strukturierung des Materials. Zunächst werden deduktiv aus der Forschungsfrage abgeleitete Hauptkategorien gebildet, die während der Analyse durch induktiv entwickelte Subkategorien ergänzt werden können. Ziel ist es, zentrale Inhalte systematisch zu erfassen und inhaltlich zu gliedern (Kuckartz, 2018, 97 ff).

- **Evaluative Analyse:** Diese Analyseform fokussiert sich auf Bewertungen, Meinungen und Einstellungen der Befragten zu bestimmten Themen. Sie eignet sich besonders für Fragestellungen, bei denen subjektive Einschätzungen oder Bewertungen im Zentrum stehen. Dabei werden Skalen (z. B. positiv/negativ, zufrieden/unzufrieden) herangezogen, um das Material zu analysieren (Kuckartz, 2018, 123 ff).
- **Typenbildende Analyse:** Ziel dieser Methode ist es, auf Grundlage der qualitativen Daten unterschiedliche Typen oder Fallgruppen zu identifizieren, die bestimmte Gemeinsamkeiten aufweisen. Dazu werden einzelne Fälle zunächst detailliert analysiert und anschließend hinsichtlich typischer Merkmalskombinationen gruppiert. Die Typenbildung erfolgt meist iterativ und wird durch Fallvergleiche systematisch abgesichert (Kuckartz, 2018, 143 ff).

In dieser Arbeit wird die ‚evaluative qualitative Inhaltsanalyse‘ behandelt, die bei Mayring (2015, 101 ff) als ‚skalierende Strukturierung‘ bezeichnet wird und im Folgenden näher erläutert wird.

3.4.2 Charakteristika und Ablauf der evaluativen qualitativen Inhaltsanalyse

Bei der evaluativen qualitativen Inhaltsanalyse geht es „um die Einschätzung, Klassifizierung und Bewertung von Inhalten durch die Forschenden“ (Kuckartz, 2018, S. 123).

Dabei werden Kategorien entwickelt, denen bestimmte Ausprägungen (z. B. „hohes“, „mittleres“ oder „niedriges Selbstvertrauen“) zugewiesen werden. Die Einschätzung erfolgt in der Regel fallbezogen und basiert auf der Interpretation des Textes durch die Forschenden (Kuckartz, 2018).

Je nach Forschungsziel können nicht nur ordinale, sondern auch nominale oder intervallskalierte Bewertungsformen verwendet werden, etwa mithilfe von Ratingskalen. Die anschließende Codierung ermöglicht explorative Analysen, wie beispielsweise Kreuztabellen oder Hypothesentests (Kuckartz, 2018).

Der von Kuckartz (2018) entwickelte Ablauf der evaluativen qualitativen Inhaltsanalyse folgt einem systematischen Vorgehen in fünf Hauptphasen:

Phase 1: Festlegung der Bewertungskategorie

Zu Beginn wird entschieden, welche Kategorie(n) in evaluativer Form betrachtet werden sollen. Die Auswahl basiert auf theoretischen Überlegungen sowie der Forschungsfrage. Die Kategorie kann bereits bei der Datenerhebung eine Rolle gespielt haben oder sich erst im Verlauf der Analyse herauskristallisieren. Aufgrund des Aufwands sollten nur besonders relevante Kategorien gewählt werden (Kuckartz, 2018).

Phase 2: Identifizieren und Kodieren der für die Bewertungskategorie relevanten Textstellen

Das Material wird vollständig auf relevante Textstellen zur gewählten Kategorie hin durchgearbeitet. Diese Segmente werden kodiert. Falls bereits thematische Codierungen vorliegen, kann auf diesen aufgebaut und Phase 2 gegebenenfalls verkürzt oder übersprungen werden. Eine bewertende Kategorie kann auch auf mehreren thematischen Kategorien beruhen (Kuckartz, 2018).

Phase 3: Die kodierten Segmente für jede Bewertungskategorie fallbezogen zusammenstellen

Alle kodierten Textstellen zur Bewertungskategorie werden pro Fall (z. B. pro Interview) zusammengetragen. Diese fallweise Strukturierung ermöglicht eine gezielte und transparente Bewertung in den nächsten Phasen (Kuckartz, 2018).

Phase 4: Ausprägungen der Bewertungskategorie formulieren und Textstellen probe-weise zuordnen, ggf. Veränderung der Definitionen und der Zahl der Ausprägungen

Die gesammelten Textstellen werden analysiert, um Ausprägungen (z. B. ‚hoch‘, ‚niedrig‘, ‚nicht klassifizierbar‘) zu entwickeln. Dieser Schritt erfolgt iterativ: Die Ausprägungen werden formuliert, am Material erprobt, gegebenenfalls angepasst und präzisiert. Dabei sollte eine hinreichend diverse Auswahl von Fällen berücksichtigt werden (Kuckartz, 2018).

Phase 5: Bewerten und Kodieren des gesamten Materials

In der letzten Phase erfolgt die endgültige Einschätzung aller Fälle hinsichtlich der Bewertungskategorie. Jeder Fall wird einer Ausprägung zugeordnet und kodiert. In Zweifelsfällen wird die Entscheidung begründet, etwa in einer Notiz. Gleichzeitig sollten besonders aussagekräftige Textstellen markiert und Definitionen gegebenenfalls weiter geschärft werden. Der Codiervorgang bleibt interpretativ und dient als Grundlage für spätere Auswertungen (Kuckartz, 2018).

Forschungsdesign

Ein zentrales Ziel der physikdidaktischen Forschung besteht darin, Lernenden nicht nur formales Wissen, sondern ein tragfähiges physikalisches Verständnis zu vermitteln. Im Zusammenhang mit der Energieübertragung in elektrischen Systemen zeigt sich jedoch eine besondere Herausforderung, da dieses Thema trotz seiner curricularen Verankerung in der Praxis häufig nur unzureichend behandelt wird. Oftmals wird die Energieübertragung in elektrischen Stromkreisen lediglich oberflächlich oder gar nicht thematisiert, was zu Missverständnissen führt. Dabei ist die Energieübertragung in elektrischen Systemen ein essenzielles Thema, das zur Erklärung vieler Phänomene des Alltags beiträgt.

Wie in Kapitel 2.5 aufgezeigt wurde, bestehen unter Lernenden erhebliche Verständnisprobleme bezüglich dieses Themas. Diese Schwierigkeiten betreffen teilweise auch Lehrpersonen, die oft Mühe haben, das Thema zu unterrichten. Dies liegt teils daran, dass es bislang nur wenige fundierte und empirisch geprüfte Unterrichtskonzeptionen dazu gibt. Besonders auffällig ist, dass es derzeit kein empirisch evaluiertes Unterrichtsdesign zur Energieübertragung in elektrischen Systemen gibt, das speziell für die Sekundarstufe II geeignet ist.

Das folgende Kapitel benennt die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit und leitet daraus die zentralen Forschungsfragen ab. Anschließend werden die Vorgehensweise in diesem Designprojekt sowie die zugrundeliegenden Designprinzipien erläutert.

4.1 Zielsetzung der Arbeit

Die Physikdidaktik hat in den vergangenen Jahren wiederholt aufgezeigt, dass Schüler*innen häufig unvollständige oder fehlerhafte Vorstellungen von Energie und deren Übertragung entwickeln – insbesondere im Kontext elektrischer Schaltkreise (siehe Abschnitt 2.5). Ein möglicher Grund dafür liegt im begrenzten Angebot an empirisch überprüften und didaktisch fundierten Unterrichtsmaterialien, die zentrale Konzepte der Energieübertragung verständlich und konsistent vermitteln. Bestehende Materialien behandeln das Thema meist nur oberflächlich oder konzentrieren sich auf mathematische Herleitungen, ohne die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse anschaulich zu machen.

Zwar existieren zahlreiche Unterrichtskonzeptionen zur Elektrizitätslehre, doch setzen nur wenige davon einen klaren Schwerpunkt auf die Energieübertragung in elektrischen Systemen. Häufig liegt der Fokus entweder auf der phänomenologischen Beschreibung von Stromkreisen oder auf der Einführung elektrischer Felder, ohne explizit auf die Rolle der Energieübertragung einzugehen. Auch wenn manche Konzepte – etwa von Backhaus (1987) und Sefton (2002) – didaktische Vorschläge zur Verbindung von Energie und Feldern liefern, handelt es sich dabei nicht um vollständige Unterrichtskonzeptionen, sondern eher um didaktische Überlegungen. Andere Ansätze, wie jene von Härtel (2012) oder Müller (2012), setzen einen Schwerpunkt auf das Thema Oberflächenladungen, behandeln jedoch das Feldkonzept nur am Rande. Der Lehrgang von Muckenfuß und Walz (1997) fokussiert auf Energie, lässt jedoch Oberflächenladungen und Felder weitgehend unberücksichtigt. Der umfassende Lehrgang ‚Matter and Interactions‘ von Chabay und Sherwood (2015) integriert sowohl Felder als auch Oberflächenladungen, ist jedoch für den universitären Kontext konzipiert und nicht ohne Weiteres auf die Sekundarstufe II übertragbar. Einen kombinierten Zugang auf Sekundarstufenniveau bieten lediglich Aschauer (2017) und Rückl (1991). Bei Aschauer fehlt jedoch eine systematische empirische Evaluation hinsichtlich der Wirkung auf das Verständnis von Energieübertragung in elektrischen Systemen, da der Fokus vielmehr auf dem elektrischen Feldverständnis im Allgemeinen liegt. Rückl thematisiert die Energieübertragung zwar im Rahmen seiner Unterrichtskonzeption, allerdings nur kurz und auf einem für die Sekundarstufe sehr anspruchsvollen Niveau. Dabei ist gerade die Verknüpfung der Konzepte von Energieübertragung, elektrischen Feldern und Oberflächenladungen zentral, um die physikalischen Grundlagen elektrischer Systeme korrekt vermitteln zu können. Wie in Kapitel 2 ausgeführt, wird Elektrische Energie nicht – wie häufig angenommen – innerhalb der Leiter transportiert, sondern über das elektromagnetische Feld im Raum zwischen den Leitern übertragen. Diese Felder entstehen wiederum durch Ober-

flächenladungen, die sich entlang der Leiter in Abhängigkeit von den angeschlossenen Spannungsquellen und der Geometrie des Systems verteilen. Die Oberflächenladungen sind damit maßgeblich für die Ausbildung elektrischer Felder verantwortlich, welche die Energieübertragung im Sinne des Poynting-Vektors ermöglichen. Wird einer dieser Aspekte – etwa die Rolle der Oberflächenladungen – im Unterricht ausgeblendet, bleibt das Verständnis des zugrunde liegenden physikalischen Mechanismus fragmentarisch oder es entstehen alternative Lernenvorstellungen, die sich später nur schwer korrigieren lassen.

Ein Unterrichtsansatz, der diese Konzepte integriert vermittelt, kann wesentlich dazu beitragen, ein kohärentes Verständnis physikalischer Prozesse bei Schüler*innen zu fördern. Durch die explizite Einbindung von Feld- und Ladungskonzepten wird nicht nur das Verständnis der Energieübertragung vertieft, sondern auch eine Brücke zwischen der makroskopischen Beschreibung elektrischer Systeme und den submikroskopischen beziehungsweise feldtheoretischen Modellvorstellungen der modernen Physik geschlagen. Darüber hinaus hilft eine solche Herangehensweise, die Lücke zwischen mathematisch-formalen Darstellungen und konzeptuellem Verständnis zu schließen – eine Herausforderung, die sich insbesondere im Physikunterricht der Sekundarstufe II regelmäßig zeigt.

Eine Übersicht der in diesem Zusammenhang relevanten Unterrichtskonzeptionen und didaktischen Vorschläge bietet Abbildung 22. Die Darstellung zeigt, dass keiner der Ansätze das Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen mit Oberflächenladungen und elektrischen Feldern kombiniert, was eine Forschungslücke offenbart.

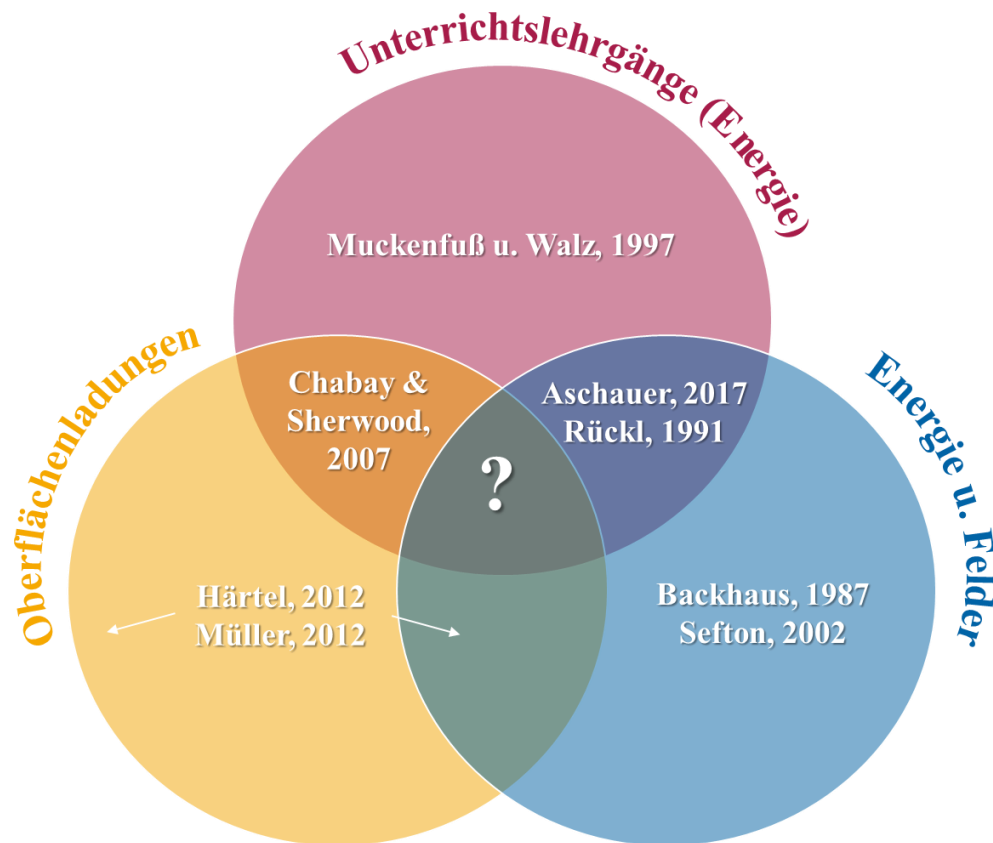


Abbildung 22: Übersicht bestehender Unterrichtskonzeptionen zur Elektrizitätslehre mit Fokus auf Energie, Felder und Oberflächenladungen.

Vor dem Hintergrund der dargestellten Forschungslage und der identifizierten Lücke in der Literatur soll in dieser Arbeit ein Unterrichtsdesign entwickelt werden, das die Energieübertragung in elektrischen Systemen unter Einbeziehung von Oberflächenladungen und elektrischen Feldern verständlich vermittelt. Im Zentrum steht die Frage, wie diese grundlegenden physikalischen Konzepte didaktisch so aufbereitet werden können, dass sie für Schüler*innen der Sekundarstufe II verständlich, und anschlussfähig an ihr Vorwissen sowie anwendbar sind.

Zu diesem Zweck wird zunächst ein konzeptioneller Rahmen entwickelt, der die physikalischen Zusammenhänge zwischen Energie, Feld und Ladung systematisch darstellt. Aufbauend auf diesem Rahmen entsteht ein Unterrichtsdesign, das die Rolle von Oberflächenladungen und elektrischen Feldern bei der Energieübertragung explizit thematisiert und geeignete didaktische Rekonstruktionen sowie Visualisierungen einsetzt. Die Materialentwicklung orientiert sich dabei an definierten Designprinzipien (siehe Abschnitt 4.4).

Im Sinne des Design-Based-Research-Ansatzes (siehe Abschnitt 3.1) werden für dieses Projekt ein Entwicklungs- und ein Forschungsziel formuliert (siehe Textbox 3):

Textbox 3: Entwicklungsziel.

Entwicklungsziel: Die iterative Entwicklung und formative Evaluation eines Unterrichtsdesigns im Rahmen des Design-Based-Research-Ansatzes für Schüler*innen der Sekundarstufe II (15–17 Jahre), das elektromagnetische Felder als Erklärungsansatz für die Energieübertragung in elektrischen Systemen nutzt.

Im Entwicklungszyklus wird untersucht, wie Erklärungen, Visualisierungen und Aufgaben von den Schüler*innen aufgenommen und verstanden werden, um das Material gezielt weiterzuentwickeln und Hindernisse im Lernprozess zu identifizieren.

Textbox 4: Forschungsziel.

Forschungsziel: Die Generierung wissenschaftlicher Erkenntnisse und einer lokalen Theorie über Lehr- und Lernprozesse zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen für Schüler*innen der Sekundarstufe II (15–17 Jahre).

Im Forschungszyklus wird die systematische Analyse lernrelevanter Bedingungen wie typische Lernhindernisse und lernförderliche Gestaltungselemente vorgenommen. Die Auswertung empirischer Daten soll generalisierbare Einsichten über die Vermittlung der fachlichen Inhalte zur Energieübertragung in elektrischen Systemen liefern und so die theoriegeleitete Weiterentwicklung der Physikdidaktik unterstützen.

4.2 Forschungsfragen

Aufbauend auf dem Entwicklungs- und Forschungsziel, werden zwei zentrale Forschungsfragen (siehe Textbox 5 und 6) formuliert:

Textbox 5: Forschungsfrage 1 – Entwicklungszyklus.

Forschungsfrage 1 (F1): *Wie sieht ein Unterrichtsdesign zur Energieübertragung in elektrischen Systemen aus, welches für Schüler*innen der Sekundarstufe II verständlich und anwendbar ist?*

Die erste Forschungsfrage ist im Entwicklungszyklus dieses Projekts situiert und zielt darauf ab, mithilfe des Design-Based-Research Ansatzes iterativ ein Unterrichtsdesign zu entwickeln und zu optimieren, das für Lernende verständlich und abschlussfähig sein soll. Dazu werden die folgenden Unterfragen formuliert:

- *Wie werden die Erklärungen und Visualisierungen im Unterrichtsdesign von den Schüler*innen aufgenommen?*

Im Rahmen von Akzeptanzbefragungen soll erhoben werden, ob die Erklärungen und Visualisierungen dieses Unterrichtsdesigns für Schüler*innen verständlich sind. Diese Rückmeldungen sind essenziell, um das Design bedarfsorientiert anzupassen und Hindernisse im Lernprozess zu identifizieren.

- *Inwiefern sind Schüler*innen in der Lage, mithilfe der vermittelten Konzeptideen Verständnis- und Transferaufgaben zu bearbeiten?*

Die Akzeptanzbefragungen sollen auch Aufschluss darüber liefern, ob Lernende in der Lage sind, mithilfe der vermittelten Konzeptideen entsprechende Aufgaben zu lösen. Damit soll sichergestellt werden, dass sie die Inhalte nicht nur reproduzieren, sondern auch auf andere Kontexte und Problemstellungen übertragen können.

- *Welche Veränderungen im Verständnis der Schüler*innen zur Energieübertragung zeigen sich vor und nach der Durchführung des Lehr-Lern-Arrangements (LLAs)?*

Im Zuge einer Prä- und Posttest-Erhebung im Rahmen der Erprobung des Unterrichtsdesigns in Form eines LLAs im realen Klassensetting wird überprüft, ob sich das Wissen der Schüler*innen zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen im Verlauf des LLAs verändert. Dies erlaubt eine objektive Einschätzung der Wirksamkeit des Unterrichtsdesigns.

Textbox 6: Forschungsfrage 2 – Forschungszyklus.

Forschungsfrage 2 (F2): *Welche Lernhindernisse und lernförderlichen Bedingungen lassen sich im Umgang mit der Energieübertragung in elektrischen Systemen für den Unterricht identifizieren?*

Die zweite Forschungsfrage ist im Forschungszyklus dieses Projekts situiert und soll Aufschlüsse darüber liefern, welche Prinzipien und Konzepte beim Lehren und Lernen über das Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen eine Rolle spielen. Typische Lernbarrieren sowie hilfreiche didaktische Gestaltungsprinzipien sollen identifiziert werden.

Dazu werden die folgenden Unterfragen formuliert:

- *Welche Vorstellungen, Missverständnisse oder Hürden zeigen sich beim Lernen mit dem entwickelten Unterrichtsdesign?*

Durch die Analyse der Antworten aus den Akzeptanzbefragungen und der Ergebnisse des Posttests im Lehr-Lern-Arrangement werden typische Schwierigkeiten der Schüler*innen identifiziert. Dieses Wissen ist entscheidend, um das Material entsprechend für das Unterrichtsdesign optimieren zu können.

- *Welche Gestaltungselemente und didaktischen Prinzipien erweisen sich als besonders hilfreich für das Verständnis der physikalischen Zusammenhänge?*

Die Auswertung der Akzeptanzbefragungen und die Durchführung des LLAs im realen Klassensetting liefern Hinweise darauf, welche Methoden, Visualisierungen und didaktischen Zugänge besonders zuträglich für das Verständnis von Schüler*innen sind.

Zur Bearbeitung dieser Forschungsfragen werden zwei empirische Teilstudien mit unterschiedlichen methodischen Zugängen durchgeführt: eine Interviewstudie zur Akzeptanz des Unterrichtsdesigns (siehe Kapitel 5) sowie eine Implementationsstudie im realen Klassensetting (siehe Kapitel 6). Beide Teilstudien werden durch spezifische Leitfragen strukturiert, die jeweils auf konkrete Untersuchungsschritte innerhalb des Projektabschnitts abzielen, zugleich aber zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfragen beitragen. Die Leitfragen werden im Rahmen der jeweiligen Kapitel diskutiert, während die zentralen Forschungsfragen am Ende der Arbeit (siehe Kapitel 7) zusammenfassend beantwortet werden.

4.3 Vorgehensweise im Designprojekt

Im folgenden Abschnitt wird das methodische Vorgehen innerhalb des gesamten Designprojekts strukturiert dargestellt. Die Umsetzung orientiert sich an einem vierphasigen Prozess, der in Abbildung 23 dargestellt ist. Jede Phase baut systematisch auf den Ergebnissen der vorhergehenden auf und verbindet Theorieentwicklung mit empirischer Erprobung und Reflexion. Die nachfolgende Beschreibung ordnet die einzelnen Phasen in den Gesamtzusammenhang des Forschungsprojekts ein und verweist auf die entsprechenden Kapitel, in denen die jeweiligen Schritte vertieft behandelt werden.

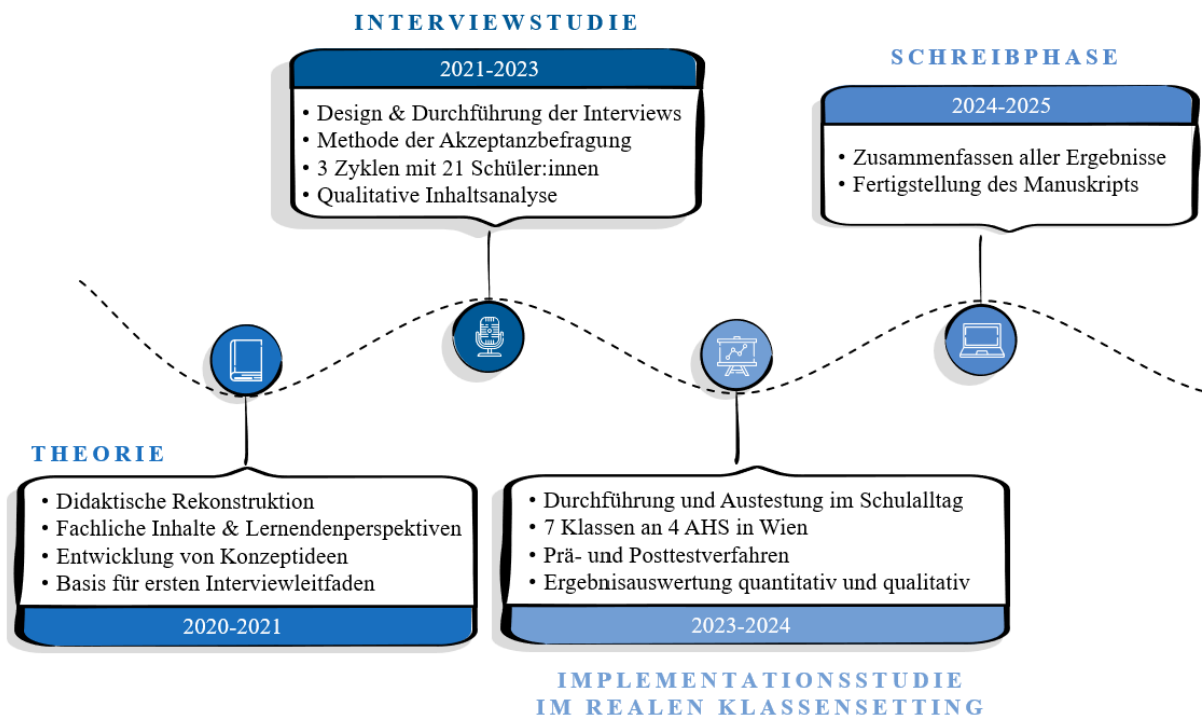


Abbildung 23: Vorgehensweise im Designprojekt in vier Phasen.

Phase 1: Theoretische Fundierung

(siehe Kapitel 2)

Die erste Phase des Projekts dient der theoretischen Fundierung des Forschungsvorhabens. Zu Beginn wird die relevante fachdidaktische und fachwissenschaftliche Literatur zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen gesichtet und ausgewertet. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, wie sich zentrale physikalische Konzepte – insbesondere Oberflächenladungen, elektromagnetische Felder und deren Rolle bei der Energieübertragung – sinnvoll für Schüler*innen der Sekundarstufe II aufbereiten lassen.

Zur strukturierten Aufarbeitung der Inhalte kommt die Methode der Didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann (1997) zum Einsatz (siehe Abschnitt 3.2). Dabei werden die fachlichen

Inhalte unter der Berücksichtigung von Lernendenvorstellungen analysiert (siehe Abschnitt 2.5). Ziel ist es, sogenannte Konzeptideen (siehe Abschnitt 3.3.4) zu erstellen, die zentrale fachliche Prinzipien didaktisch aufbereitet und in strukturierter Form zusammenfassen. Diese Konzeptideen dienen als Grundlage für die Konzeption eines Interviewleitfadens, der in der qualitativen Interviewstudie der zweiten Phase zum Einsatz kommt.

Phase 2: Qualitative Interviewstudie

(siehe Kapitel 5)

In der zweiten Phase wird eine Interviewstudie mit Schüler*innen durchgeführt, um die Konzeptideen auf ihre Anschlussfähigkeit und Verständlichkeit hin zu überprüfen. Die Untersuchung basiert auf der Methode der Akzeptanzbefragung nach Jung (1992) (siehe Abschnitt 3.3) und erfolgt in drei Designzyklen mit insgesamt 21 Schüler*innen (siehe Abschnitt 5.1–5.3). Die Erhebungen werden aufgezeichnet, transkribiert und mit der Qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) ausgewertet (siehe Abschnitt 3.4). Die Ergebnisse dieser Interviews fließen direkt in die Gestaltung des Lehr-Lern-Arrangements ein.

Phase 3: Entwicklung und Erprobung des LLAs

(siehe Kapitel 6)

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Interviewstudie wird ein optimiertes Unterrichtsdesign zur Energieübertragung für die Sekundarstufe II entwickelt (siehe Abschnitt 6.1–6.2). Dieses wird in sieben Oberstufenklassen an vier AHS in Wien erprobt. Die Evaluation erfolgt im Rahmen eines Prä-Posttest-Designs (siehe Abschnitt 6.3–6.4) und umfasst sowohl quantitative als auch qualitative Auswertungen. Zudem werden Lehrer*inneninterviews durchgeführt. Die Ergebnisse und deren Diskussion sind in Kapitel 6.5 und 6.6 dargestellt.

Phase 4: Fertigstellung des Manuskripts

In der finalen Phase werden die in den empirischen Abschnitten gewonnenen Erkenntnisse zusammengeführt und diskutiert (siehe Kapitel 7). Dabei stehen die Implikationen für den Unterricht sowie die methodologischen Erkenntnisse im Zentrum.

4.4 Designprinzipien

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, werden im Rahmen dieses Design-Based-Research-Projekts Designprinzipien formuliert, die als theoretisch fundierte und zugleich praxisorientierte Leitlinien zur Gestaltung des Unterrichtsdesigns dienen. Sie verbinden wissenschaftliche Erkenntnisse mit konkreten Gestaltungsentscheidungen und schaffen so eine Brücke zwischen Theorie

und Praxis. Die folgenden Prinzipien wurden auf Basis einschlägiger Literatur, fachdidaktischer Modelle sowie empirischer Befunde entwickelt und stellen die Grundlage des neuen Unterrichtsdesigns zur Energieübertragung in elektrischen Systemen dar.

4.4.1 Allgemeine Designprinzipien

A1: Das Unterrichtsdesign berücksichtigt bestehende Forschung zu Lernendenvorstellungen.

Ein zentrales Designprinzip dieses Projekts ist die bewusste Einbeziehung empirisch gesicherter Erkenntnisse zu Lernendenvorstellungen. Aufbauend auf konstruktivistischen Lerntheorien (siehe Abschnitt 2.5.3) werden Vorerfahrungen und bereits vorhandene Denkweisen der Lernenden als maßgebliche Einflussfaktoren für den Lernprozess verstanden. Werden diese nicht explizit angesprochen, besteht die Gefahr, dass alternative oder fachlich unzutreffende Konzepte dauerhaft bestehen bleiben oder sich sogar verfestigen.

Haagen-Schützenhöfer formuliert dies in ihrem Design-Based-Research-Projekt von 2016 folgendermaßen:

„Konstruktivistische Lerntheorien stellen Vorerfahrungen der Lernenden (...) als relevantesten Faktor für gelingende Konzeptentwicklung ins Zentrum. Die Integration empirischer Erkenntnisse zu Lernendenvorstellungen und -perspektiven ist ausschlaggebend für Designentscheidungen.“ (Haagen-Schützenhöfer, 2016, S. 24)

Im Rahmen dieses Projekts wurden daher typische Lernendenvorstellungen zum Thema Energie(übertragung) in elektrischen Systemen systematisch über eine Literaturrecherche erfasst und gezielt in die Unterrichtsplanung eingebunden (siehe Abschnitt 2.5). Die didaktische Gestaltung orientiert sich dabei insbesondere an Strategien des Konzeptwechsels (siehe Abschnitt 2.5.3): Es kommen insbesondere Anknüpfungs- und Konfrontationsstrategien zur Anwendung, um entweder an vorhandenes Vorwissen anzuschließen oder einen gezielten Impuls für konzeptuelle Umstrukturierung zu geben.

Wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben, spielen kognitive Konflikte dabei eine zentrale Rolle: Unerwartete Versuchsergebnisse, alltagsnahe Widersprüche oder gezielte Dilemmata können Lernende dazu anregen, bestehende Vorstellungen zu hinterfragen und neue Konzepte zu übernehmen. Wichtig ist, dass diese neuen Konzepte nicht nur korrekt, sondern auch verständlich, anschlussfähig und subjektiv bedeutsam vermittelt werden (Posner et al., 1982).

Darüber hinaus steht dieses Designprinzip im Einklang mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion (MDR) nach Kattmann et al. (1997) (siehe Abschnitt 3.2), das die Perspektiven der Lernenden als zentralen Ausgangspunkt für die Gestaltung von Lehr-Lern-Arrangements

versteht. Die Orientierung an Lernendenvorstellungen erfüllt damit nicht nur eine lernpsychologische, sondern auch eine fachdidaktische Funktion: Sie bildet die Grundlage für eine inhaltlich und kognitiv anschlussfähige Unterrichtsgestaltung.

A2: Lernprozesse werden in Kontexte eingebettet, die für Schüler*innen interessant sind.

Ein weiteres zentrales Designprinzip dieses Projekts ist die bewusste Kontextualisierung von Lernprozessen. Physikalische Inhalte werden gezielt in alltagsnahe Kontexte eingebettet, die für Schüler*innen persönlich bedeutsam und potenziell motivierend sind. Dieses Vorgehen folgt dem MDR (Kattmann et al., 1997), das fordert, wissenschaftliche Inhalte mit den Vorstellungen und Lebenswelten der Lernenden in Beziehung zu setzen (siehe Abschnitt 3.2).

Die Relevanz zeigt sich besonders deutlich in der Kritik von Haagen-Schützenhöfer (2016), die schreibt:

„Physikunterricht ist oft gänzlich dekontextualisiert, oder stützt sich auf Kontexte, die nur marginal den Interessensfeldern des Großteils der Lernenden entsprechen.“

Um dieser Problematik zu begegnen, sollen gezielt interessante Kontexte für Lernende bei der Planung des LLAs gewählt werden.

Die Ergebnisse der IPN-Interessensstudie (Hoffmann et al., 1998) zeigen deutlich, dass das Interesse von Schüler*innen maßgeblich davon abhängt, wie fachliche Inhalte kontextualisiert sind. Dabei steigt die Motivation besonders dann, wenn Inhalte emotional ansprechen oder als persönlich relevant erlebt werden. Technisch orientierte Kontexte erreichen dabei vor allem Jungen, während lebensweltliche Bezüge wie Themen aus Medizin, Alltag oder Natur von beiden Geschlechtern als interessant bewertet werden (Häußler & Hoffmann, 1995).

Diese Ergebnisse werden durch aktuelle Befunde von Zöchling (2023) bestätigt, die aufzeigen konnte, dass insbesondere Kontexte mit persönlicher Relevanz – etwa rund um den eigenen Körper, gesellschaftliche Fragestellungen, existenzielle Themen oder vertraute Alltagsgegenstände – das Interesse und die kognitive Auseinandersetzung mit physikalischen Inhalten fördern. Entscheidend ist dabei nicht nur die inhaltliche Passung, sondern vor allem das Potenzial dieser Kontexte, Emotionen auszulösen und Anknüpfungspunkte zum eigenen Erleben zu schaffen.

Vor diesem Hintergrund setzt das vorliegende Unterrichtsdesign bewusst auf vertraute Technologien aus dem Alltag der Lernenden – wie etwa das Smartphone, das induktive Ladepad oder den elektrischen Föhn (siehe Abbildung 24). Diese Beispiele bieten einen niedrighschwelligen Zugang zu physikalischen Konzepten, erhöhen die subjektive Relevanz des Unterrichts und unterstützen eine intrinsisch motivierte Auseinandersetzung mit den Inhalten.

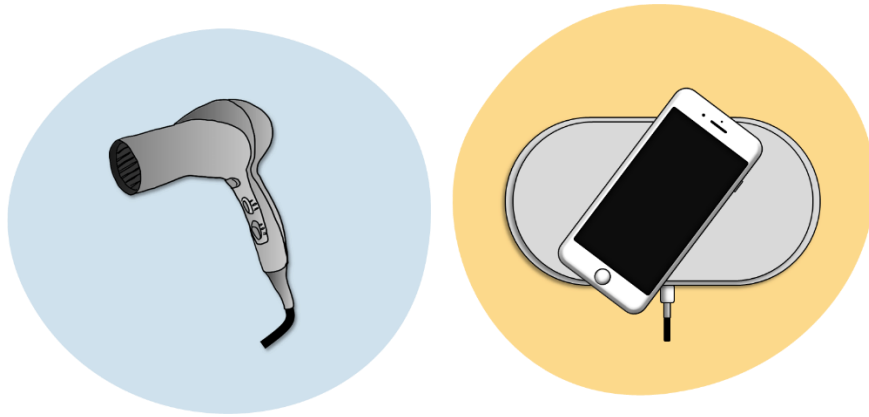


Abbildung 24: Elektrischer Föhn und Smartphone als Beispiel für Alltagskontexte, die für Lernende von interessant sind.

A3: Lernende werden als aktive Teilnehmer*innen im Lehr-Lern-Prozess gesehen.

Ein weiteres allgemeines Designprinzip dieses Projekts besteht darin, die Lernenden als aktive Teilnehmer*innen im Lehr-Lern-Prozess zu sehen. Dieses Designprinzip findet sich auch im Design-Based-Research Projekt von Haagen-Schützenhöfer (2016).

Lernende sollen dabei physikalische Konzepte nicht durch bloßes Zuhören aufnehmen, sondern diese im Rahmen sinnstiftender Lernsituationen selbstständig konstruieren. Wann immer möglich, sollen sie die Möglichkeiten haben, aktiv zu Experimentieren, Beobachten, zu Argumentieren und Reflektieren. Die Rolle der Lehrperson verschiebt sich dabei weg von der reinen Wissensvermittlung hin zu einer Lernbegleitung, die Lernprozesse unterstützt, moderiert und durch geeignete Impulse sowie Materialien anregt.

Die theoretische Grundlage liefert die konstruktivistische Lerntheorie, wie sie in Kapitel 2.5.3 beschrieben wird. Lernen wird darin als aktiver, individueller und sozial eingebetteter Konstruktionsprozess verstanden, bei dem neues Wissen auf Grundlage bereits vorhandener Vorstellungen entsteht (Kircher et al., 2007; Widodo & Duit, 2004)

Lernumgebungen sollen daher Möglichkeiten bieten, in denen Schüler*innen selbst Fragen stellen, Ideen prüfen und eigene Denkprozesse reflektieren können. Dabei spielt der soziale Austausch – etwa in Form von Partner*innen- oder Gruppengesprächen – eine zentrale Rolle, da physikalische Konzepte im Diskurs ausgehandelt und gefestigt werden.

Entscheidend sind hierbei auch Konzeptwechselstrategien (siehe Abschnitt 2.5.3): Viele Lernende verfügen über stabile vorunterrichtliche Vorstellungen, die mit wissenschaftlichen Konzepten oft nicht vereinbar sind (R. Duit & Treagust, 2003). Damit ein tiefgreifender Lernprozess stattfinden kann, müssen diese Vorstellungen nicht nur aktiviert, sondern auch hinterfragt

und weiterentwickelt werden. Dies gelingt beispielsweise durch kognitiv herausfordernde Aufgaben oder durch gezielte Konfrontationen mit widersprüchlichen Erfahrungen (kognitive Konflikte).

A4: Komplexe Sachverhalte werden schrittweise eingeführt.

Bei diesem Designprinzip geht es darum, dass besonders komplexe oder abstrakte physikalische Inhalte (wie der Poynting Formalismus zur Beschreibung der Energieübertragung in elektrischen Systemen), so aufbereitet werden, dass sie in vereinfachter Form und in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten eingeführt werden. Ziel ist es, kognitive Überforderung zu vermeiden und Lernenden einen nachvollziehbaren Zugang zu ermöglichen.

Dieses Vorgehen orientiert sich zentral am in Kapitel 3.2 dargestellten MDR (Kattmann et al., 1997), das eine Verbindung zwischen fachwissenschaftlichen Konzepten und den Vorstellungen der Schüler*innen herstellt. Dabei werden schwierige Inhalte zunächst auf ein grundlegendes Kernverständnis reduziert. Darauf aufbauend erfolgt eine schrittweise Erweiterung und fachliche Präzisierung – abgestimmt auf das Vorwissen und die Denkweisen der Lernenden (Kattmann et al., 1997).

Ergänzend kommen Prinzipien der Cognitive Load Theory (Sweller, 1994) zur Anwendung, die in Kapitel 2.5.4 genauer beschrieben sind. Durch eine gezielte Staffelung der Lernschritte und eine Reduktion auf zentrale Aspekte können sich Lernende schrittweise mit komplexen Konzepten auseinandersetzen, ohne dabei den Überblick zu verlieren.

A5: Lernprozesse beginnen bei subjektiv wahrnehmbaren Phänomenen.

Ein weiteres zentrales Designprinzip dieses Projekts ist, Lernprozesse möglichst bei subjektiv wahrnehmbaren und individuellen Phänomenen anzusetzen. Dieses Prinzip wird ebenfalls im Design-Based-Research Projekt von Haagen-Schützenhöfer (2016) vertreten und findet sich auch bei Zloklikovits (2025). Es basiert auf der Annahme, dass Lernen von den individuellen Wahrnehmungen und Erfahrungen der Lernenden ausgehen sollte und sich schrittweise zu abstrakten physikalischen Prinzipien entwickelt.

Im Zentrum steht dabei die Anknüpfungsstrategie (siehe Abschnitt 2.5.3 zu Konzeptwechselstrategien). Diese Strategie zielt darauf ab, die vorwissenschaftlichen Vorstellungen der Lernenden aufzugreifen und systematisch mit wissenschaftlichen Erklärungen zu verknüpfen, um einen nachhaltigen Lernprozess zu ermöglichen (Kircher et al., 2007).

Konkret könnten die Lernenden beispielsweise zunächst einen Hands-on-Versuch beobachten (siehe Abbildung 25). Darauf aufbauend erfolgt die physikalische Interpretation, die mit den anfänglichen Vorstellungen der Schüler*innen verknüpft wird. So wird ein Brückenschlag zwischen alltäglichen Erfahrungen und abstrakten Konzepten geschaffen.

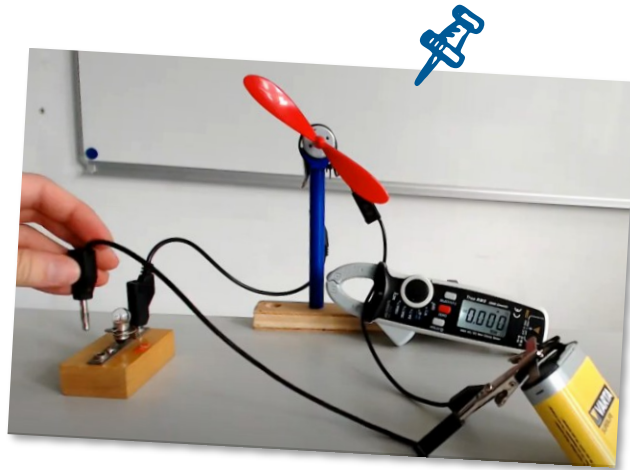


Abbildung 25: Hands-on-Versuch mit Strommesszange in einem Stromkreis, bestehend aus einer Batterie, einer Glühlampe, einem Ventilator und Leiterkabeln.

A6: Adaption technischer Fachbegriffe für Lernende und Verzicht auf mathematische Herleitungen.

Ein weiteres allgemeines Designprinzip liegt in der bewussten sprachlichen und kognitiven Anpassung fachlicher Inhalte an die Perspektive von Lernenden, insbesondere durch die Verwendung intuitiver Begriffe und den Verzicht auf abstrakte mathematische Herleitungen. Statt etablierter technischer Begriffe wie ‚elektrischer Widerstand‘ werden anschaulichere Begriffe wie ‚Energieumwandler‘ eingesetzt, die unmittelbarer eine Vorstellung von der Funktion vermitteln. Dieses Vorgehen entspricht der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methode der didaktischen Rekonstruktion (Kattmann et al., 1997). Auch Zloklikovits (2025) betont in ihrem Design-Based-Research-Projekt die Notwendigkeit, physikalische Fachsprache lernfreundlich zu adaptieren.

Die theoretische Grundlage dieses Prinzips liefert erneut die Cognitive Load Theory (Sweller, 1994), die in Kapitel 2.5.4 beschrieben wird. Der Verzicht auf mathematische Herleitungen – zumindest in frühen Lernphasen – unterstützt demnach das Verstehen konzeptueller Zusammenhänge, bevor diese formalisiert werden. Durch eine Reduktion der extrinsischen kognitiven Belastung können sich Lernende stärker auf das Wesentliche konzentrieren und tragfähige mentale Modelle entwickeln.

Diese konzeptuelle Fokussierung entspricht auch den Intentionen des aktuellen österreichischen Lehrplans für Physik (BGBl. Nr. 88/1985), der mathematische Formeln nicht mehr in das Zentrum des Lernen und Lehren stellt. Vielmehr soll das physikalische Denken durch alltagsnahe Erklärungen und bildhafte Sprache gefördert werden. Ziel ist es, zunächst ein tiefes, qualitatives Verständnis physikalischer Phänomene zu entwickeln, bevor dieses auf eine formale Ebene übertragen wird.

A7: Verwendung lernfreundlicher Repräsentationen.

Ein weiteres zentrales Designprinzip besteht darin, physikalische Inhalte durch lernfreundliche Repräsentationen darzustellen. Solche Repräsentationen werden entweder gemeinsam mit den Lernenden entwickelt oder gezielt so gestaltet, dass sie intuitiv verständlich wirken und zentrale Zusammenhänge auf einen Blick erfassbar sind.

Auch dieses Prinzip stützt sich auf die konstruktivistische Lerntheorie (siehe Abschnitt 2.5.3), wonach Lernprozesse besonders wirksam sind, wenn Lernende neue Informationen aktiv mit ihren bestehenden Vorstellungen verknüpfen können (Kircher et al., 2007; Widodo & Duit, 2004).

Die Bedeutung lernförderlicher Repräsentationen wird durch die Studie von Jaeger und Müller (2018) untermauert: In ihrer Untersuchung mit 170 Schüler*innen der Sekundarstufe I zeigte sich, dass die Qualität physikalischer Repräsentationen einen signifikanten Einfluss auf die Lernleistung und die kognitive Belastung hat. Für die Konzeption des Unterrichtsdesigns bedeutet dies: Visualisierungen, Skizzen oder Modelle werden gezielt eingesetzt, um komplexe Sachverhalte zugänglich zu machen, Denkprozesse zu unterstützen und Lernendenvorstellungen gezielt zu thematisieren und weiterzuentwickeln.

A8: Lernschwierigkeiten werden explizit durch kognitive Stoppschilder thematisiert.

Ein weiteres wesentliches Prinzip dieses Unterrichtsdesigns besteht darin, typische Lernschwierigkeiten systematisch aufzugreifen – und zwar durch den gezielten Einsatz sogenannter „kognitive Stoppschilder“ (Haagen-Schützenhöfer, 2016, S. 63). Dabei handelt es sich um kurze, auffällige Hinweise innerhalb der Lernmaterialien, die Lernende auf bekannte Stolperstellen aufmerksam machen und sie zum Innehalten und Nachdenken anregen.

Dieses Prinzip beruht auf der Annahme, dass das explizite Thematisieren typischer Vorstellungen von Lernenden nicht nur Missverständnissen vorbeugt, sondern auch den metakognitiven Lernprozess fördert: Lernende werden für schwierige Konzepte sensibilisiert, entwickeln ein besseres Verständnis dafür, wo und warum Probleme auftreten können – und wie sie ihnen begegnen können.

Die Stoppschilder werden gezielt an jenen Stellen eingesetzt, an denen sich im Verlauf der Entwicklungszyklen des Design-Based Research-Projekts spezifische Verständnisschwierigkeiten zeigen. So können beispielsweise vor einer Aufgabe kurze Hinweise auf verbreitete Denkfehler stehen. Ein Beispiel findet sich in der folgenden Textbox:

Textbox 7: Kognitives Stoppschild zur Verwechslung von Energie- und Stromfluss (siehe LLA im Anhang).



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Der Energiefluss beschreibt den Fluss der Energie, der Stromfluss den Fluss des Stromes!

4.4.2 Domänenspezifische Designprinzipien

D1: Energie wird früh als zentrales Konzept eingeführt und durchgehend im Unterrichtsdesign berücksichtigt.

Energie gilt als grundlegendes Konzept der Physik, das dazu dient, Phänomene unterschiedlicher Themenfelder zu erklären und zu verknüpfen. Dies spiegelt auch der österreichische Lehrplan für Physik wieder (BGBl. Nr. 88/1985). Schecker et al. (2018) schreiben:

„In allen Themengebieten der Physik sind Betrachtungen unter dem Aspekt der Energie hilfreich. Man denke z. B. an Stromkreise als Energietransportsysteme, Licht als Form des Energieflusses in der Optik oder Energiezustände von Atomen in der Quantenphysik.“ (Schecker et al., 2018, S. 164)

Zugleich zeigen zahlreiche empirische Studien, dass Lernende bei der Auseinandersetzung mit dem Energiekonzept oftmals tief sitzende Lernendenvorstellungen überwinden müssen (siehe Abschnitt 2.5). Die Förderung eines konsistenten, kontextübergreifenden Verständnisses von Energie stellt daher eine besondere didaktische Herausforderung dar.

Nach Solbes et al. (2009) gehört es zu den zentralen Aufgaben der Physik, vielfältige Phänomene unter einem gemeinsamen Erklärungsrahmen zu vereinen. Der Energiebegriff spielt dabei eine zentrale Rolle, da Energie als universelle Eigenschaft aller physikalischen Systeme betrachtet werden kann. Die Energieerhaltung bildet ein fundamentales physikalisches Prinzip, das zugleich Verbindungen zu anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen ermöglicht. Darüber hinaus hat der Begriff durch aktuelle Herausforderungen wie den Klimawandel eine hohe gesellschaftliche Bedeutung und ist fest in der Alltagssprache verankert (Solbes et al., 2009).

Vor diesem Hintergrund ist ein zentrales domänenspezifisches Designprinzip des vorliegenden Unterrichtsdesigns daher die konsequente Ausrichtung am Energiebegriff. Im Gegensatz zu traditionellen Unterrichtsansätzen, in denen Energie meist nur in isolierten Kontexten thematisiert wird, dient der Energiebegriff hier als durchgängiger Leitfaden.

Bereits zu Beginn des Unterrichtsdesigns werden elektrische Alltagsgeräte – etwa ein Föhn, ein Smartphone oder eine elektrische Zahnbürste – als Energieumwandler bezeichnet.

Im weiteren Verlauf werden elektrische Systeme systematisch als Energieübertragungssysteme gedeutet. Dabei steht die leitende Fragestellung im Zentrum, wie Energie von einer Energiequelle zu einem Energieumwandler übertragen wird.

Durch die wiederholte Bezugnahme auf den Energieaspekt in unterschiedlichen Kontexten soll ein konsistentes Begriffsverständnis aufgebaut werden, das anschlussfähig für den weiteren Unterricht ist.

D2: Elektrische Systeme werden als Energieübertragungssysteme aufgefasst.

Ein weiteres domänenspezifisches Designprinzip dieses Projekts besteht darin, elektrische Systeme als Energieübertragungssysteme zu deuten. Diese Perspektive ermöglicht eine fachlich fundierte Grundlage (siehe Abschnitt 2.3), bei der die Energieübertragung als verbindendes Element zwischen Quelle und Umwandler im Mittelpunkt steht.

Dieses Designprinzip stützt sich insbesondere auf die Überlegungen von Sefton (2002), der die Bedeutung der Energieübertragung für das Verständnis elektrischer Systeme besonders betont. Ergänzend wird ein ähnlicher Ansatz von Rückl (1991) berücksichtigt, der im Rahmen seiner Unterrichtskonzeption in einer kurzen Einheit die Energieübertragung, allerdings auf sehr hohem Niveau, thematisiert. Darüber hinaus fließen Elemente aus dem Unterrichtsmodell von Muckenfuß und Walz (1997) in die Planung des vorliegenden Unterrichtsdesigns ein, insbesondere in Hinblick auf die Bedeutung der Energie in elektrischen Systemen.

Bei der Betrachtung elektrischer Systeme als Energieübertragungssysteme werden sowohl kabelgebundene als auch kabellose Übertragungsprozesse berücksichtigt, wodurch eine Vielzahl an Kontexten – vom klassischen Stromkreis bis zur drahtlosen Energieübertragung in Smartphones – physikalisch sinnvoll eingeordnet werden können.

D3: Physikalische Felder werden mittels Feldlinien dargestellt.

Das Feldkonzept ist zentral für das Verständnis elektromagnetischer Phänomene, da es eine räumliche Perspektive auf Wechselwirkungen eröffnet. Es ermöglicht, die Energieübertragung zwischen den Komponenten elektrischer Systeme modellhaft zu erfassen. Im vorliegenden Unterrichtsdesign wird das Feldkonzept insbesondere mithilfe von Feldlinien visualisiert (siehe Abschnitt 2.4), um Lernenden eine anschauliche Darstellung elektrischer und magnetischer Felder zu bieten. Damit wird eine Grundlage geschaffen, um Energieübertragung nicht nur als abstrakten Prozess, sondern als physikalisch vermittelten Vorgang im Raum zu begreifen.

Wie in Kapitel 2.4 erläutert, ist keine der gebräuchlichen Darstellungsformen – Feldlinien, Vektorpfeile oder computerbasierte Simulationen – grundsätzlich überlegen. Jede Repräsentation bringt spezifische Vor- und Nachteile mit sich, die bei der didaktischen Rekonstruktion und Unterrichtsplanung berücksichtigt werden sollten.

Im Rahmen dieses Unterrichtsdesigns wird auf mathematische Herleitungen bewusst verzichtet (siehe A6), weshalb die Vektordarstellung keine Rolle spielt. Stattdessen werden Feldlinien eingeführt, da sie Lernenden eine intuitivere Vorstellung von Feldern ermöglichen (Cao & Briuzuela, 2016). Ergänzend kommen Simulationen zum Einsatz, um im Sinne des Modells multiplexer externer Repräsentationen (Ainsworth, 1999) verschiedene Darstellungsformen miteinander zu verknüpfen und so das physikalische Verständnis zu vertiefen.

D4: Der Energieübertragungsprozess wird mithilfe von elektromagnetischen Feldern beschrieben und durch den Poynting-Vektor modelliert.

Die Beschreibung der Energieübertragung über elektromagnetische Felder stellt einen fachlich präzisen Zugang dar (siehe Abschnitt 2.3). In diesem Unterrichtsdesign wird der Energiefluss explizit über die Kopplung elektrischer und magnetischer Felder erklärt. Anders als oft in Lehrbüchern gezeigt, wird der Energiefluss nicht bloß als ein Pfeil in der Mitte des Stromkreises eingezeichnet, sondern der genaue ‚Weg der Energie‘ hergeleitet und auf den Energiefluss durch elektromagnetische Felder zurückgeführt.

Zur vertieften Auseinandersetzung wird der Poynting-Vektor als mathematisches Modell eingeführt (Sefton, 2002). Er ermöglicht eine genaue Beschreibung der Richtung des Energieflusses im Raum. Für besonders interessierte Schüler*innen kann der mathematische Formalismus vereinfacht besprochen werden.

Dabei ist der Aspekt, dass die Energieübertragung in Lichtgeschwindigkeit geschieht, von zentraler Bedeutung. Diese Perspektive trägt dazu bei, grundlegende physikalische Prozesse besser zu verstehen und verbreitete Alltagsvorstellungen kritisch zu hinterfragen.

D5: Die Linke-Hand-Regel wird als Hilfsmittel zur Bestimmung der Richtung des Energieflusses eingeführt.

Zur räumlichen Orientierung und zur Bestimmung der Richtung des Energieflusses wird in diesem Unterrichtsdesign die Linke-Hand-Regel eingeführt. Sie dient als kognitiver Anker, der Lernprozesse unterstützt, indem er eine anschauliche und körperlich verankerte Struktur bietet. Obwohl in der schulischen Praxis häufig die Rechte-Hand-Regel verwendet wird, erfolgt hier bewusst die Entscheidung zugunsten der Linken-Hand-Regel. Grundlage dafür ist die gewählte Darstellung der Stromrichtung als Elektronenfluss. Diese Perspektive erlaubt eine konsistente Anwendung der Linken-Hand-Regel.

Auch bei Burde (2018) wird die Stromrichtung explizit über den Elektronenfluss definiert: Die Stromstärke ergibt sich dort aus der Anzahl der Elektronen, die pro Zeiteinheit durch einen

Leiterquerschnitt fließen. Vor diesem Hintergrund erscheint es folgerichtig, die Elektronenflussrichtung als Stromrichtung zu interpretieren und für die Bestimmung der Magnetfeldrichtung die Linke-Hand-Regel heranzuziehen (siehe Abbildung 18 in Kapitel 2.2.2).

Um im gesamten Unterrichtsdesign eine einheitliche Darstellung sicherzustellen und potenzielle Verwechslungen zu vermeiden, wird auch für die Bestimmung der Richtung des Energieflusses die Linke-Hand-Regel verwendet (siehe Abbildung 26).

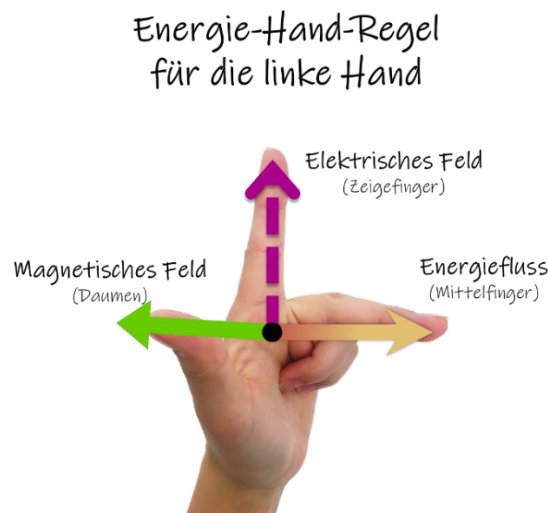


Abbildung 26: Energie-Hand-Regel für die linke Hand (siehe LLA im Anhang)

D6: Die Rolle der Oberflächenladungen für die Feldbildung wird explizit thematisiert und durch bildliche Darstellungen modelliert.

Oberflächenladungen spielen eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung elektrischer Felder in leitenden Materialien, insbesondere im stationären Zustand elektrischer Systeme. In diesem Unterrichtsdesign wird dieser in vielen Darstellungen implizit bleibende Aspekt bewusst hervorgehoben, um Lernenden ein vollständigeres Verständnis der Entstehung und Verteilung elektrischer Felder zu ermöglichen – wie es auch im Lehrgang von Chabay und Sherwood (2015) verfolgt wird.

Durch den gezielten Einsatz bildlicher Darstellungen, etwa in Form schematischer Ladungsverteilungen an Energiequellen und Leitungen, wird der Zusammenhang zwischen Oberflächenladungen und dem Verlauf von Feldlinien anschaulich visualisiert. So entsteht eine Brücke zwischen den mikroskopischen Ladungsverteilungen auf leitenden Oberflächen und den makroskopisch beobachtbaren Feldphänomenen im Raum.

Interviewstudie zur iterativen Entwicklung des Unterrichtsdesigns

In diesem Kapitel wird die Interviewstudie vorgestellt, die im Rahmen der iterativen Entwicklung und Evaluation des Lehr-Lern-Arrangements (LLA) durchgeführt wurde. Die Interviewstudie bildet einen zentralen Bestandteil des Design-Based-Research-Projekts und stellt die praxisnahe Überprüfung und Weiterentwicklung des entwickelten Unterrichtsdesigns sicher. Durch die systematische Einbindung von Rückmeldungen der Lernenden soll gewährleistet werden, dass das LLA nicht nur theoretisch fundiert, sondern auch in der schulischen Umsetzung wirksam und adressatengerecht ist.

Insgesamt wurden drei Erhebungsrunden durchgeführt, in denen jeweils qualitative Interviews mit Schüler*innen geführt und anschließend ausgewertet wurden. Die Interviewleitfäden wurden dabei kontinuierlich überarbeitet, um sowohl neue Erkenntnisse zu ermöglichen. Die Auswertung der Interviews erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018).

Die Darstellung der Interviewstudie folgt einem einheitlichen Aufbau: Für jede der drei Runden werden zunächst die jeweilige Stichprobe beschrieben und der spezifische Interviewleitfaden vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse präsentiert, bevor die daraus abgeleiteten Implikationen für die Weiterentwicklung des LLA diskutiert werden. Zum Abschluss des Kapitels erfolgt eine übergreifende Reflexion der Stärken und Schwächen der Interviewstudie.

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

Die erste Interviewrunde wurde von Juni bis Juli 2021, kurz vor Beginn der Wiener Sommerferien, durchgeführt. Die Stichprobe dieser Runde ist in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, die Darstellung und Analyse der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 5.1.3.

Ziel dieses Projektabschnitts war die Entwicklung eines Lehr-Lern-Arrangements zur Energieübertragung in elektrischen Systemen und dessen Erprobung mit Schüler*innen im Rahmen von Akzeptanzbefragungen (siehe Abschnitt 3.3). Dabei sollten potenzielle Herausforderungen in Bezug auf Akzeptanz, Paraphrase und Aufgabenlösung identifiziert werden. Die gewonnenen Ergebnisse ermöglichen Rückschlüsse darauf, welche Elemente überarbeitet werden mussten, und welche beibehalten werden konnten, um ein tragfähiges und anschlussfähiges Set an Konzeptideen zu erhalten, dass bei den Schüler*innen eine hohe Akzeptanz findet.

Im Vordergrund stand dabei die Beantwortung der folgenden Leitfragen:

- 1) Wie wird das Unterrichtsdesign generell von den Schüler*innen angenommen?*
- 2) Welche Interviewdauer ist angemessen und für die Schüler*innen zumutbar, um ihre Aufmerksamkeit während der Befragung nicht zu überfordern?*
- 3) Inwiefern ist die Verwendung eines Eingangsbeispiels als Einstiegsfrage notwendig für die Durchführung der Interviews?*
- 4) Inwiefern fördert die Thematisierung der Schüler*innenvorstellungen zum ‚Rucksackmodell‘ das Verständnis der Interviewpartner*innen und sollte daher integraler Bestandteil des Unterrichtsdesigns sein?*

Diese Fragen werden in Abschnitt 5.1.4.3 ausführlich diskutiert und beantwortet.

5.1.1 Beschreibung der Stichprobe

Die erste Runde an Akzeptanzbefragungen wurde mit sieben Schüler*innen (vier weiblich, drei männlich) im Alter von 16-17 Jahren, der 11. Schulstufe einer allgemeinbildenden höheren Schulen (AHS) in Wien durchgeführt. Alle Schüler*innen besuchten eine bilinguale Schule (Unterrichtssprachen: Englisch, Deutsch), wobei einige Englisch als Erstsprache hatten. Obwohl diese Schüler*innen über gute Deutschkenntnisse auf AHS-Niveau verfügten, wurde bei einigen Interviews deutlich, dass ihre Ausdrucksweise teilweise Schwächen aufwies, was bei der Auswertung der Interviews berücksichtigt werden musste. Die Transkripte wurden daher teilweise geglättet, um die Lesbarkeit zu gewährleisten. Dabei wurde darauf geachtet, nur kleine Änderungen bezüglich der Artikel oder Zeitformen zu ändern, nicht jedoch ganze Worte auszutauschen, da gerade diese bei einigen Textpassagen eine wesentliche Rolle spielen (z. B. bei

der Phase der Paraphrase, wenn ein besonderes Augenmerk auf die Begriffswahl der Interviewpartner*innen gelegt wird). Die Änderungen wurden bei den entsprechenden Aussagen vermerkt. Die Darstellung der Stichprobe ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Stichprobe für Interviewrunde 1.
(*Bei Schule 1 handelt es sich um ein bilinguales Gymnasium)

ID	Schule	Schulstufe	Letzte Physiknote	Interesse (1 = gar nicht; 5 = sehr hoch)	Dauer des Interviews
IP1	Schule 1	11. Schulstufe	2	4	00:58:54
IP2	Schule 1	11. Schulstufe	1	5	00:41:00
IP3	Schule 1	11. Schulstufe	3	/	00:35:45
IP4	Schule 1	11. Schulstufe	1	5	00:33:19
IP5	Schule 1	11. Schulstufe	2	4	00:45:11
IP6	Schule 1	11. Schulstufe	3	4	00:40:51
IP7	Schule 1	11. Schulstufe	1	3	00:44:42

Je nach Gesprächsbereitschaft beziehungsweise Fragen von den Interviewpartner*innen dauerten die Interviews zwischen einer halben Stunde und Stunde. Manche Schüler*innen akzeptierten die neu eingeführten Ideen ohne weitere Rückfragen, während andere besonderes Interesse zeigten und die Inhalte teilweise genauer besprechen wollten.

Anhand Tabelle 2 ist zu erkennen, dass die Interviewpartner*innen IP1- IP7 zuletzt unterschiedliche Noten in Physik, zwischen Sehr Gut (1) und Befriedigend (3), erzielt haben. Das Interesse der Schüler*innen an Physik konnte auf einer Likert Skala zwischen 1 (gar nicht) und 5 (sehr hoch) angegeben werden. Anhand der Tabelle ist zu erkennen, dass das Interesse der Schüler*innen durchwegs mittel bis hoch eingeschätzt wurde. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich zu Interviewstudien, die außerhalb der Unterrichtszeit stattfinden, vermehrt engagierte Schüler*innen freiwillig melden, da sie persönlich an den Inhalten und der Teilnahme der Studie interessiert sind. Da die Interviewpartner*innen ihre Physiknote und ihr Interesse an Physik freiwillig angeben konnten, fehlen zu IP3 Angaben zum Interesse.

5.1.2 Interviewleitfaden

Der Interviewleitfaden für die erste Runde an Akzeptanzbefragungen basiert auf dem Modell der didaktischen Rekonstruktion (MDR) nach dem Modell von Kattmann (1997), wie in Kapitel 3.2 beschrieben wird.

Im Herbst 2020 wurde dazu die fachliche und fachdidaktische Literatur zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen im deutsch- und englischsprachigen Raum gesichtet. Auf

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

Basis der ausgearbeiteten theoretischen Grundlage (siehe Kapitel 2) konnte unter Berücksichtigung von möglichen Schüler*innenvorstellungen sowie Interessen der Lernenden ein Set an Konzeptideen entwickelt werden (siehe Abschnitt 3.3.4), das die Grundlage des Lehr-Lern-Arrangements bildet. Die Ausarbeitung dieses Arrangements orientierte sich an den in Kapitel 4.4 beschriebenen Designprinzipien, die im Verlauf des Projekts kontinuierlich weiterentwickelt wurden. Das Lehr-Lern-Arrangement wurde anschließend im Rahmen von sieben Einzelinterviews mit Schüler*innen erprobt. Nachfolgend erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Interviewleitfadens. Die Version des Interviewleitfadens, wie sie in den Interviews zur Anwendung kam, ist im Anhang dieser Arbeit zu finden.

5.1.2.1 Erster Block

Der Interviewleitfaden beginnt mit der Konzeptidee, dass elektrische Systeme (Gleich- und Wechselstromkreise) Energie übertragen können. Gleich zu Beginn wird hier also die Funktion eines elektrischen Systems als Energieübertragungssystem hervorgehoben.

Dazu wird zunächst eine Begriffsdefinition von kabellosen und kabelgebundenen elektrischen Systemen vorgenommen (siehe Konzeptidee K1.1 in Tabelle 3). Dabei werden elektrische Stromkreise, die Leiterkabeln benötigen (z. B. Mixer) als kabelgebundene Systeme bezeichnet, während Systeme, die ohne einer direkten Kabelverbindung auskommen, als kabellose Systeme (z. B. kabellose Zahnbürste) bezeichnet werden.

Anschließend werden noch die Begriffe Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium eingeführt und erklärt (siehe Konzeptidee K1.2 in Tabelle 3). Die Energiequelle (z. B. Batterie) und der Energieumwandler (z. B. Lämpchen) stellen die Hauptbestandteile eines elektrischen Systems dar. Den Schüler*innen wird zudem erklärt, dass in kabelgebundenen Systemen noch ein Kabel benötigt wird, was in diesem Unterrichtsdesign als Übertragungsmedium bezeichnet wird.

Tabelle 3: Konzeptideen für den ersten Block zu elektrischen Energieübertragungssystemen aus der ersten Interviewrunde.

K1	Elektrische Systeme (elektrische Gleich- und Wechselstromkreise) können Energie übertragen.
K1.1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z. B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) <i>oder</i> kabellosen Systemen (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
K1.2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z. B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z. B. Leiterkabel).

Zur Visualisierung werden bei dieser Erklärung außerdem Beispielbilder gezeigt (siehe Abbildung 27)⁷.

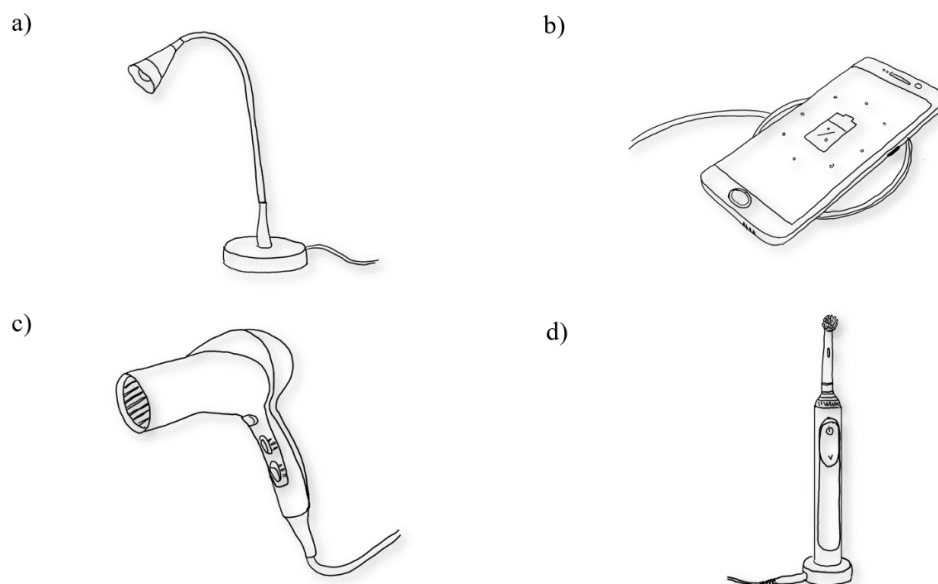


Abbildung 27: Bilder, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 1 gezeigt wurden. Zu sehen sind a) eine Lampe, b) eine Handyladestation, c) ein Föhn und d) eine Zahnbürste.

Nach den Erklärungen der Lehrperson werden die Schüler*innen gemäß der Methode der Akzeptanzbefragung (siehe Abschnitt 3.3) zunächst gefragt, ob die Inhalte für sie verständlich waren (Akzeptanz). Anschließend werden sie gebeten, die Erklärung selbst wiederzugeben. Daran anschließend folgen passende Aufgaben zur Überprüfung des Verständnisses: In der ersten

⁷ Alle Abbildungen dieses Abschnitts wurden im Studienverlauf überarbeitet. Die hier abgebildete Version entspricht dem Stand der ersten Interviewrunde. Entsprechendes gilt für die anderen Interviewrunden.

Aufgabe betrachten die Schüler*innen das Bild eines Föhns (siehe Abbildung 27c). Ihre Aufgabe besteht darin, die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zuzuordnen. Dieses Beispiel repräsentiert ein kabelgebundenes System. Die zweite Aufgabe bezieht sich auf die Abbildung mit einer elektrischen Zahnbürste (siehe Abbildung 27d). Dabei sollen die Begriffe erneut korrekt zugeordnet werden – diesmal im Kontext eines kabellosen Systems.

5.1.2.2 Zweiter Block

Nach dieser Einführung werden mit den Interviewpartner*innen magnetische und elektrische Felder besprochen. Die zweite Konzeptidee (siehe Tabelle 4) beschreibt, dass sich um (geschlossene) elektrische Systeme magnetische und elektrische Felder bilden, die sich experimentell nachweisen lassen. Dazu werden verschiedene Versuche durchgeführt und mit den Schüler*innen besprochen.

Tabelle 4: Konzeptideen für den zweiten Block zu elektromagnetischen Feldern aus der ersten Interviewrunde.

K2	Um (geschlossene) elektrische Systeme gibt es magnetische und elektrische Felder, die sich experimentell nachweisen lassen (Versuche).
K2.1	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein magnetisches Feld. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange) bestimmt werden.
K2.2	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein elektrisches Feld. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Alufolienstück) bestimmt werden.

Zunächst wird das magnetische Feld mit der Konzeptidee K2.1 eingeführt. Den Schüler*innen wird eine Strommesszange gezeigt, die eingeschaltet wird. Den Schüler*innen wird an dieser Stelle nur gesagt, dass es sich um ein Messgerät handelt, nicht aber um was für eines. Das Display zeigt zunächst 0.00 Ampere an. Anschließend wird die Strommesszange um einen stromdurchflossenen Leiter (z. B. Laptopkabel, das den Laptop mit der Steckdose verbindet) gehalten. Das Display zeigt nun einen Wert an, der von 0.00 A abweicht.

In einem ersten Schritt werden die Vermutungen der Schüler*innen mit den folgenden zwei Fragen gesammelt:

- Was könnte die Strommesszange um den Leiter messen?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Anschließend folgt eine Erklärung des beobachteten Versuchs. Den Schüler*innen wird erklärt, dass um einen stromdurchflossenen Leiter (AC) ein (wechselndes) Magnetfeld entsteht. Führt

man die Strommesszange um diesen Leiter, kann das Magnetfeld mithilfe des weichmagnetischen Kerns bestimmt werden. Dieses magnetische Feld wird mithilfe von kreisförmigen Magnetfeldlinien um den Leiter dargestellt (siehe Abbildung 28).

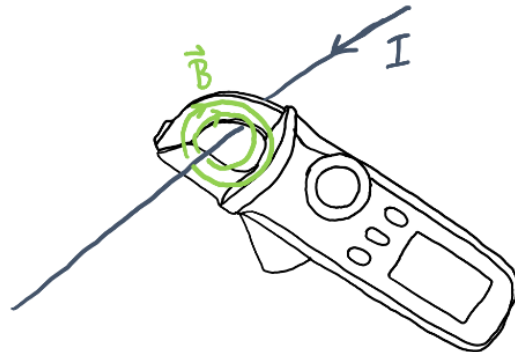
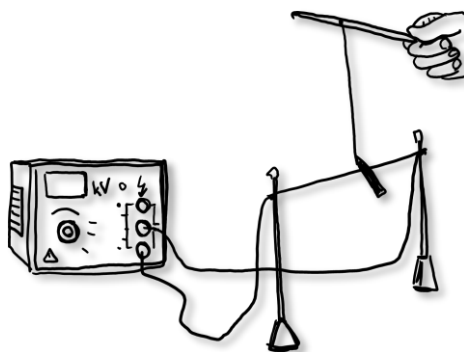


Abbildung 28: Darstellung, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 1 zur Konzeptidee K2.1 gezeigt wird.

Gemäß der Methode der Akzeptanzbefragung folgt nach der Bestätigung und Paraphrase der Schüler*innen eine Aufgabe. Hierbei werden die Schüler*innen gefragt, ob die Strommesszange auch in einem offenen Stromkreis einen positiven Wert anzeigen würde (z. B. wenn der Energieumwandler nicht angesteckt ist). Dies wird anschließend gemeinsam mit der Strommesszange überprüft.

Nach dem magnetischen Feld wird das elektrische Feld mit der Konzeptidee K2.2 eingeführt. Den Schüler*innen wird ein Demonstrationsversuch mittels eines Videos⁸ aus dem Elektrizitätslehre-Einführungskurs von Chabay und Sherwood (2015) gezeigt (siehe Abbildung 29).

a)



b)

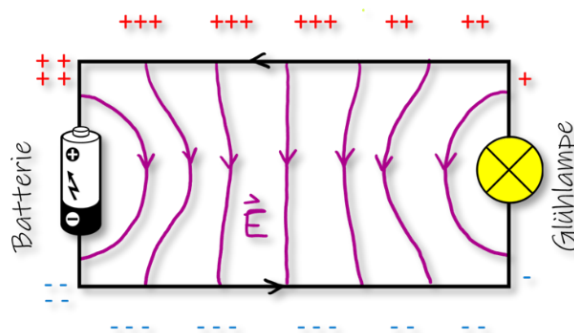


Abbildung 29: a) schematische Darstellung des Demonstrationsversuchs und b) Darstellung der elektrischen Feldlinien in einem geschlossenen Stromkreis, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 1 zur Konzeptidee K2.2 gezeigt werden.

⁸ Matter & Interactions. (2016). *Surface charge demo*. Verfügbar unter: <https://matterandinteractions.org/surface-charge-demo/>

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

Das Video wird den Schüler*innen ohne Ton gezeigt, wobei die Interviewerin in Echtzeit eine deutsche Übersetzung vornimmt. Zu erkennen ist ein Stromkreis mit einer Hochspannungsquelle ($U = 25 \text{ kV}$), Kabeln und fünf in Serie geschaltete Widerständen ($R = 5 \times 50 \text{ M}\Omega$). Sobald die Spannungsquelle eingeschaltet ist, wird ein kleines Alufolienstück auf einen Faden gebunden und in die Nähe der Widerstände gehalten. Zu beobachten ist, dass das Alufolienstück an den beiden äußersten Widerständen abgelenkt wird, während er in der Nähe des mittleren Widerstandes keine Ablenkung erfährt.

Vor der Erklärung werden den Schüler*innen gezielte Fragen gestellt, um ihre Vermutungen zu sammeln:

- Was könnte dazu führen, dass das Alufolienstück angezogen / angestoßen wird?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Das beobachtete Phänomen wird den Schüler*innen anschließend folgendermaßen erklärt: Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC) entsteht ein elektrisches Feld. Bringt man einen elektrostatisch geladenen Strohhalm oder ein kleines Stück Alufolie in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung beobachtet werden (Ablenkung). Dies kann mithilfe des Modells der Oberflächenladungen erklärt werden. Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen.

Nach der Bestätigung und der Paraphrase wird wieder gemäß der Methode der Akzeptanzbefragung eine Aufgabe an die Schüler*innen – in dem Fall zwei Aufgaben – gestellt.

Analog zum magnetischen Feld wird zunächst gefragt, ob das Alufolienstück auch in einem offenen System abgelenkt werden würde (zwei lose Kabel an Energiequelle angeschlossen, aber nicht miteinander verbunden). Hierbei soll überprüft werden, ob die Schüler*innen den Zusammenhang erkennen, dass die Oberflächenladungen auch in einem offenen Stromkreis vorhanden sind, da sie von der Energiequelle auf die Oberfläche des Leiter (geschlossen oder offen) gepumpt werden. Das Alufolienstück sollte also auch hier abgelenkt werden können, da sich auf den Kabelenden des offenen Stromkreises auch Oberflächenladungen bilden, die ein elektrisches Feld verursachen, das wiederum zu einer elektrostatischen Anziehung / Abstoßung des Alufolienstücks führt.

In der zweiten Aufgabe zu dieser Konzeptidee werden die Schüler*innen dazu aufgefordert, ein Beispiel aus dem Alltag zu nennen, wo ein elektrisches Feld um ein elektrisches System entsteht. Die Schüler*innen sollen erkennen, dass um jede elektrische Energiequelle ein elektrisches Feld entsteht. Mögliche Antworten könnten also ein elektrisches System mit einer Batterie, einem Generator, einer PV-Anlage oder ähnlichem sein.

5.1.2.3 Dritter Block

Nachdem das elektrische und magnetische Feld getrennt eingeführt wurden, wird im dritten Block das elektromagnetische Feld als Kombination der beiden besprochen. Die letzte Konzeptidee beschreibt den Umstand, dass in einem elektrischen System Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen werden kann (siehe Tabelle 4). Dafür wird das in Kapitel 2 beschriebene Konzept als Darstellung mittels Feldlinien für das elektromagnetische Feld beziehungsweise den Energiefluss eingeführt (siehe Abbildung 30).

Tabelle 5: Konzeptideen für den dritten Block zur Energieübertragung durch elektromagnetische Felder aus der ersten Interviewrunde.

K3	In einem elektrischen System wird Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen.
K3.1	Die Energieübertragung findet durch das Ausbreiten des elektromagnetischen Feldes statt. Dies passiert in Lichtgeschwindigkeit. (Ausschluss der Elektronen als Energieübertragungsmedium)
K3.2	Der Poynting-Vektor beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld (Rückl, 1991, S. 104).
K3.3	Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z. B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
K3.4	Der Energietransport im elektromagnetischen Feld ist sowohl beim elektrischen als auch beim magnetischen Kreis <i>systemgebunden</i> ; d.h. das elektromagnetische Feld löst sich nicht vom betreffenden System (Rückl, 1991, S. 104).

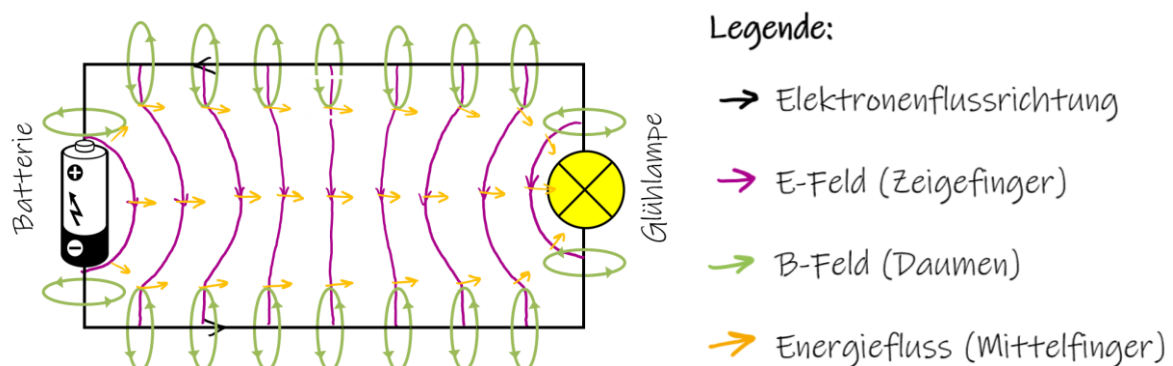


Abbildung 30: Darstellung des elektromagnetischen Feldes um einen einfachen Stromkreis, bestehend aus einer Energiequelle, Kabeln und einem

Energieumwandler. Zu sehen sind das elektrische Feld, magnetische Feld und der Energiefluss, sowie eine Referenz zur Linken-Hand Regel, die im Rahmen des dritten Blocks der Interviewrunde 1 zur Konzeptidee K3 gezeigt werden.

Die Interviewpartner*innen werden Schritt für Schritt darin angeleitet, den Energiefluss mithilfe der Linken-Hand-Regel⁹ an ausgewählten Stellen im Stromkreis zu konstruieren. Nach der Erklärung fragt die Lehrperson zunächst, ob diese verständlich war (Akzeptanz), bevor die Schüler*innen den Inhalt in eigenen Worten wiedergeben. Anschließend folgt eine passende Aufgabe zur Überprüfung des Verständnisses. In diesem Fall sollen die Schüler*innen erläutern, woher die Energie stammt, die beispielsweise einen Ventilator nach dem Betätigen des Schalters sofort in Gang setzt, und auf welche Weise diese übertragen wird.

Im Zuge der Erarbeitung der Konzeptideen K3.3 und K3.4 wird gemeinsam mit den Schüler*innen herausgearbeitet, dass die einzelnen Komponenten eines elektrischen Systems durch ein elektromagnetisches Feld miteinander verbunden sind. Dabei wird erklärt, dass sich dieses Feld mit Lichtgeschwindigkeit von der Energiequelle bis zum jeweiligen Gerät ausbreitet und so die Energieübertragung ermöglicht. Zudem wird darauf hingewiesen, dass die vom System abgegebene Energiemenge gemäß dem Energieerhaltungssatz exakt der Menge entspricht, die am Zielort ankommt. Die Elektronen selbst übernehmen dabei nicht den Energietransport, da sie sich nur sehr langsam durch den Leiter bewegen. Ihre kontinuierliche Bewegung ist jedoch notwendig, damit das elektromagnetische Feld bestehen kann.

Bevor die Schüler*innen die Erklärungen paraphrasieren und eine weiterführende Aufgabe bearbeiten, wird erneut überprüft, ob die Inhalte nachvollziehbar waren. In der anschließenden Aufgabe setzen sie sich mit der Rolle des Elektronenflusses auseinander, der sich im Gleichstromsystem als gerichtete Bewegung vom Minus- zum Pluspol und im Wechselstromsystem als periodisches Hin- und Herfließen zeigt. Ziel ist es, auf Grundlage dieses Wissens zu erklären, weshalb die Elektronen trotz ihrer Bewegung nicht für die eigentliche Energieübertragung im Stromkreis verantwortlich sind.

Im ursprünglichen Plan war vorgesehen, alle Konzeptideen mit allen Interviewteilnehmer*innen zu besprechen. In der Realität stellte sich jedoch heraus, dass die Gesamtlänge der Interviews und die Aufmerksamkeitsspanne der Teilnehmenden eine umfassende Besprechung aller Konzeptideen nicht zuließ. Daher wurde während der Interviews individuell eine Auswahl getroffen, welche Konzeptideen besprochen wurden. Dies hing von mehreren Faktoren ab: der zur Verfügung stehenden Zeit (geplant war maximal eine Stunde Interview), dem Interesse und

⁹ **Linke-Hand-Regel für den Energiefluss:** Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, kann man die Richtung des Energieflusses herleiten. Dies wird mithilfe des sog. Poynting Vektors beschrieben.

der Aufmerksamkeit der Interviewpartner*innen sowie der Tiefe der bereits geführten Diskussionen. So wurde beispielsweise bei Schüler*innen, die bereits Zeichen von Ermüdung zeigten oder weniger Interesse an tiefergehenden Erklärungen hatten, auf die Besprechung der erweiterten Konzeptideen K3.1-K3.4 verzichtet.

Es ist wichtig anzumerken, dass es sich bei der Durchführung der ersten Interviewrunde um eine erste Austestung des LLAs handelt. Die Entscheidung, welche Konzeptideen besprochen wurden, erfolgte situativ, um die Qualität und den Fokus der Interviews zu gewährleisten. Durch diese Anpassung konnte sichergestellt werden, dass die Kernkonzepte verständlich vermittelt und vertieft wurden, ohne die Interviewpartner*innen zu überfordern.

5.1.3 Ergebnisse

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde die Qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) angewendet (siehe Abschnitt 3.4). Eine Übersicht der Kodierungen der Akzeptanzbefragungen mit den Interviewpartner*innen IP1-IP7 ist in Tabelle 6 zu sehen.

Die Interviews der Akzeptanzbefragungen wurden mithilfe der Transkriptionssoftware f4 verschriftlicht, wobei die Aussagen der Schüler*innen Wort-für-Wort übernommen wurden, damit Einblicke in die Gedankenprozesse ermöglicht werden. Besonders interessant sind hierbei Passagen, in denen sich Schüler*innen zunächst für eine Antwort entschieden, in der Mitte des Satzes jedoch auf ein anderes Erklärungsmodell umschwenkten.

Die Transkripte wurden anschließend mit der Software Max-QDA analysiert. Dazu wurde die Methode der qualitativen Inhaltsanalyse verwendet (siehe Abschnitt 3.4).

Aufgrund ihres Umfangs (knapp 120 Seiten allein für die erste Interviewrunde) wurden die Transkripte nicht in den Anhang aufgenommen. Sie können aber auf Anfrage von der Autorin bereitgestellt werden.

Im ersten Schritt wurden die Interviewpassagen gemäß dem Interviewleitfaden kodiert (siehe Tabelle 6, in der linken Spalte). Dabei wurden die Kürzel ‚B‘ für Bestätigung / Akzeptanz, ‚P‘ für ‚Paraphrase‘ und ‚AX‘ für ‚Aufgabe X‘ verwendet, um eine einheitliche Darstellung zu gewährleisten.

Anschließend wurde eine Bewertung der Aussagen nach dem ‚Traffic-Light-Prinzip‘ in den Farben grün, orange, rot und weiß vorgenommen. Zusätzlich wurden den Farbcodes Zahlen von 0-3 zugeordnet, um die Auswertung zu erleichtern. Eine Übersicht ist in Tabelle 7 zu sehen.

Schließlich wurde ein Mittelwert der einzelnen Codes (Querschnitt) gebildet (siehe Tabelle 6, in den ersten beiden Spalten von rechts).

Tabelle 6: Übersicht der Kodierungen für die erste Runde an Akzeptanzbefragungen.

	Code	IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	$\bar{x}$	$\bar{x}$
Block 1	B1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,92
	P1	3	0	0	0	0	0	3	3,00	
	A1.1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	A1.2	3	0	2	3	3	2	3	2,67	
Block 2	B2.1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,95
	P2.1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	A2.1	3	3	2	3	3	3	3	2,86	
	B2.2	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,68
	P2.2	2	3	3	3	2	2	3	2,57	
	A2.2.1	3	2	1	3	1	2	3	2,29	
	A2.2.2	3	0	0	3	3	3	3	3,00	
	B3.1	3	2	3	3	3	3	2	2,71	2,64
Block 3	P3.1	3	3	2	3	3	2	3	2,71	
	A3.1	3	0	2	2	2	3	3	2,50	
	B3.3	3	3	3	3	0	0	3	3,00	2,81
	P3.3	2	3	0	0	0	0	0	2,50	
	A3.3	3	3	0	3	2	2	2	2,50	
	$\bar{x}$	2,90	2,08	2,00	2,48	2,28	2,13	2,73	2,77	

Tabelle 7: Bewertungsschema für die Analyse der Transkripte.

3	Die Aussage ist vollständig korrekt
2	Die Aussage ist teilweise korrekt oder nur mit Hilfe korrekt
1	Die Aussage ist nicht korrekt
0	Die Aussage wurde ausgelassen

Im Folgenden werden die Gütekriterien der Ergebnisanalyse sowie die Querschnitts- und Längsschnittanalyse der ersten Interviewrunde dargestellt, um die Qualität der gewonnenen Daten transparent zu machen und sowohl allgemeine Muster als auch individuelle Entwicklungen sichtbar zu machen.

5.1.3.1 Interrater Reliabilität für Runde 1

Im Rahmen dieser qualitativen Studie wurde die Interrater-Reliabilität bestimmt. Dabei handelt es sich um ein wichtiges Gütekriterium, das die Zuverlässigkeit beim Bewertungsvorgang der qualitativen Inhaltsanalyse ermittelt. Dazu wurden 10% der Daten von einem zweiten Experten aus der Fachdidaktik Physik kodiert (eines von sieben Interviews).

Im ersten Schritt erhielt der Experte das Transkript eines zufällig ausgewählten Interviews. Dieses sollte mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet werden (siehe Abschnitt 3.4). Als Hilfestellung wurden Musterlösungen bereitgestellt, die als Vergleichsmaßstab für die Antworten dienten. Diese wurden auch als ‚Musterbeispiele‘ bezeichnet.

Aus den Ergebnissen der Interrater-Kodierung sowie der eigenen Kodierung konnte der statistische Cohens-Kappa-Koeffizient (Landis & Koch, 1977) mittels folgender Formel berechnet werden:

$$\kappa = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e} \quad (1)$$

Dabei wird p_0 als die sogenannte ‚Relative Übereinstimmung‘ bezeichnet. Sie stellt das Maß an Übereinstimmung relativ zur Gesamtzahl N dar. Im Gegensatz dazu stellt p_e die sogenannte ‚Wahrscheinlichkeit zufälliger Übereinstimmung‘ dar. Damit wird ermittelt, in welcher Größenordnung eine zufällige Übereinstimmung miteinander berechnet werden muss (Wirtz & Kutschmann, 2007).

Die erste Runde an Akzeptanzbefragungen ergab für das Cohens-Kappa einen Wert von $\kappa = 0,91$. Dies stellt einen besonders hohen Wert dar und wird in der Literatur als „almost perfect“ beschrieben (Landis & Koch, 1977, S. 165).

5.1.3.2 Querschnittsanalyse

Erster Block: Konzeptidee 1

Die Kodier-Landkarte für die erste Konzeptidee ist in Tabelle 8 dargestellt. Hier sind die Codes für die verschiedenen Phasen der Akzeptanzbefragung (1. Erklärung, 2. Akzeptanz, 3. Paraphrase und 4. Aufgabe) für die Interviewpartner*innen IP1 bis IP7 angeführt. In der rechten Spalte sind zusätzlich die Mittelwerte ($\bar{x}$) der Codes angegeben.

Tabelle 8: Kodierungen zur 1. Konzeptidee zur Einführung von elektrischen Systemen als Energieübertragungssystem in der ersten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 1		IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	$\bar{x}$
El. Systeme als Energieübertragungssysteme	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	3	0	0	0	0	0	3	3,00
	Aufgabe 1	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Aufgabe 2	3	0	2	3	3	2	3	2,67

Im ersten Block des Interviews wurden die Interviewpartner*innen zunächst in das Thema Energieübertragung eingeführt. Wie in Tabelle 8 ersichtlich ist, wurde diese Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen sehr gut angenommen (Akzeptanz) und es gab keine inhaltlichen Rückfragen weil beispielsweise etwas unklar war. Die nachfolgende Paraphrase (P1) wurde in den meisten Interviews ausgelassen, da diese Einstiegsphase des Interviews zur Einstimmung diente und sich noch nicht strikt an die Struktur der Akzeptanzbefragungsmethode hielt¹⁰. In der Aufgabe A2.1 wurde zudem darauf geachtet, dass die Schüler*innen die neu eingeführten Begriffe des kabellosen und kabelgebundenen Systems sowie der Energiequelle, des Energieumwandlers und des Überträgermediums verwenden und korrekt zuordnen konnten. Dies wurde jedoch nicht nachträglich als Paraphrase kodiert, da es nicht der typischen Struktur einer Akzeptanzbefragung (zuerst Erklärung, dann Bestätigung, dann Paraphrase, dann Aufgabe) folgte. Eine mögliche Musterantwort für die Paraphrase P1 kann der Textbox 8 entnommen werden.

Textbox 8: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 1 in der ersten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Wenn man den Schalter bei einer Lampe betätigt, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. Ein weiteres Beispiel ist das kabellose Aufladen eines Smartphones durch ein Ladepad.

Die Lampe, der Föhn, das Handy und die elektrische Zahnbürste werden in der Physik als Energieumwandler oder Elektrogeräte bezeichnet. Dabei wird elektrische Energie in eine andere Energieform umgewandelt. Ein Energieübertragungssystem enthält üblicherweise neben einem **Energieumwandler** auch eine **Energiequelle** (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage, Steckdose). [Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z. B. Leiterkabel).]

Wie in Textbox 8 ersichtlich ist, sind die Begriffe ‚Energieumwandler‘ und ‚Energiequelle‘ hervorgehoben. Das bedeutet, dass bei der Analyse des Transkripts besonderes Augenmerk auf

¹⁰ Die Auslassung der Paraphrase P1 wurde in den Interviewrunden 2 und 3 geändert.

die Verwendung dieser Begriffe gelegt wurde. Die Beschreibung des Begriffs ‚Überträgermedium‘ wurde hierbei als optionale Erweiterung angesehen.

Die Paraphrase wurde als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert, wenn eine Unterscheidung der Begriffe Energieumwandler und Energiequelle in der Schüler*innenantwort vorkommt. Ein Beispiel einer gelungenen Paraphrase kann dieser Textpassage mit IP7 entnommen werden:

„Also es gibt zwei Systeme: Ein kabelgebundenes und ein kabelloses System, ähm beim kabelgebundenen ist es halt so, dass ähm die Quelle und halt der Energieumwandler durch halt ein Kabel verbunden sind. Also es gibt einen elektrischen Kontakt. Das sind zum Beispiel Lampe und Föhn. Und beim kabellosen System ist es halt so, dass es (...) keinen elektrischen / also keinen Kontakt wirklich [gibt], sondern man / zum Beispiel beim Handy, man legt es nur drauf, also es ist nicht durch ein Kabel verbunden. Und da halt / also ja, da sind Quelle und Umwandler nicht verbunden [durch ein Kabel].“ (R1-IP7, Pos. 12, 00:02:39-00:03:10)

Dieses Zitat zeigt, dass IP7 klar und präzise zwischen den Begriffen Energieumwandler und Energiequelle unterscheiden konnte, wie es in der Musterantwort gefordert ist. In der Erklärung beschreibt IP7 zudem die Unterschiede zwischen kabelgebundenen und kabellosen Systemen und erläutert die Verbindung zwischen Energiequelle und Energieumwandler. Die korrekte Anwendung dieser Konzepte in IP7s Paraphrase zeigt, dass die Begriffe richtig verstanden wurden, was die Kodierung als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) rechtfertigt.

Wären diese Inhalte nicht in der Paraphrase enthalten oder wäre es notwendig gewesen, IP7 eine Hilfestellung zu geben, wäre die Paraphrase mit ‚nicht korrekt‘ (rot-1) beziehungsweise ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) zu kodieren gewesen.

Für die beiden Aufgaben zu dieser Konzeptidee wurden die Interviewpartner*innen gebeten, die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler einerseits bei einem kabelgebundenen System (elektrischer Föhn) und andererseits einem kabellosen System (elektrische Zahnbürste) korrekt zuzuordnen. Die erste Aufgabe konnte von allen Interviewpartner*innen problemlos gelöst werden, weshalb alle Aussagen grün kodiert wurden (siehe Tabelle 8). Ein Beispiel findet sich in der folgenden Interviewpassage mit IP6:

I: „Könntest du mir vielleicht bei diesem Beispiel nochmal sagen, du hast schon das Glätteisen erwähnt, was wäre denn da der Energieumwandler und was würdest du als Energiequelle bezeichnen?“ #00:05:27-4#

IP6: „Ja, Energiequelle ist wieder die Steckdose und Energieumwandler eben das Glätteisen an sich.“

I: „hm (bejahend) und brauchst du dafür ein Übertragungsmedium? würdest das brauchen?“

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

IP6: „Ja, das Kabel.“

(R1-IP6, Pos. 33-36, 00:05:20-00:05:40)

IP6 benennt hier die Steckdose als Energiequelle und das Glätteisen als Energieumwandler. Die zweite Aufgabe wurde von IP1, IP4, IP5 und IP7 erfolgreich gelöst, weshalb sie als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert wurden. Beispielsweise geht dies aus folgendem Interviewabschnitt mit IP5 hervor:

I: „(...) Und selbiges gilt auch hier für die Zahnbürste. Was ist hier Energiequelle und Energieumwandler?“

IP5: „Also die Energiequelle wäre dann das hier [zeigt auf die Ladestation] und die Zahnbürste wandelt dann die [elektrische] Energie in Bewegungsenergie um.“

(R1-IP5, Pos. 22-23, 00:07:29-00:07:54)

Obwohl in dieser Passage nicht explizit der Begriff ‚Energieumwandler‘ erwähnt wurde, so geht aus der Umschreibung eindeutig hervor, was gemeint ist, weshalb diese Aussage als ‚korrekt‘ (grün-3) zu werten ist.

Bei zwei Interviewpartner*innen zeigen sich bei der Lösung dieser Aufgabe Schwierigkeiten: IP3 löst die Aufgabe zunächst richtig, indem die Begriffe ‚Energieumwandler‘ und ‚Energiequelle‘ den richtigen Bildern eines kabelgebundenen Systems zugeordnet werden. Bei der Aufgabe scheint die Zuordnung bei einem kabellosen System jedoch verwirrend zu sein. IP3 löst die Aufgabe zunächst nicht als Zuordnungsaufgabe, sondern beschreibt, wie die Energieübertragung mithilfe von Elektronen stattfinden könnte. Erst als von der Interviewerin noch einmal auf die eigentliche Zuordnungsaufgabe mit den vorgegebenen Begriffen hingewiesen wird, kann die Aufgabe richtig gelöst werden.

Ein anderes Problem zeigt sich im Interview mit IP6: Die befragte Person verwendet den Begriff ‚Energieüberträger‘ anstelle von ‚Energieumwandler‘. Dennoch gelingt die Zuordnung der entsprechenden Abbildungen problemlos. Die Zuordnung des Begriffs ‚Energiequelle‘ wird korrekt vorgenommen.

Beide Aussagen werden demnach als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, da die Schüler*innen erst durch eine Hilfestellung durch die Interviewerin zur korrekten Lösung finden.

Im Zuge dieser Konzeptidee wurden die Interviewteilnehmer*innen gebeten, weitere Beispiele für Kontextualisierung zu nennen, die für die zweite Interviewrunde in Betracht gezogen werden könnten. Die entsprechenden Antworten sind in der folgenden Tabelle 9 aufgeführt:

Tabelle 9: Übersicht der genannten Beispiele zur Konzeptidee 1 in der ersten Interviewrunde.

IPX	Kabelgebundene elektrische Systeme	Kabellose elektrische Systeme
IP1	Gaming-PC, PC-Maus (kabelgebunden)	wireless charging, Induktionsherd, Bluetooth-Kopfhörer, W-LAN
IP2	Klimaanlage, Laptop	AirPods, Applewatch
IP3	Computer	AirPods, Handy-Ladestation (wireless), Laptops
IP4	Lampe, Glätteisen, Ventilator	
IP5	Handy-Ladestation mittels Kabel, Wasserkocher	Ampel, Induktionsherd
IP6	Bohrer	Bluetooth Kopfhörer (AirPods) mit Ladestation
IP7	Fernseher	Staubsauger-Roboter, Bluetooth-Kopfhörer

Zweiter Block: Konzeptidee 2.1

Die Kodierungen für die Konzeptidee zum magnetischen Feld sind in Tabelle 10 zu sehen.

Tabelle 10: Kodierungen zur 2.1. Konzeptidee zum magnetischen Feld in der ersten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 2.1		IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	$\bar{x}$
Versuch zum B-Feld	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Aufgabe	3	3	2	3	3	3	3	2,86

Wie aus Tabelle 10 ersichtlich ist, wird diese Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen problemlos akzeptiert und die Interviewpassagen können als ‚korrekt‘ (grün-1) kodiert werden. Bei der Paraphrase zu dieser Konzeptidee wird die in Textbox 9 dargestellte Musterlösung zum Vergleich herangezogen:

Textbox 9: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 2.1 in der ersten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Um einen stromdurchflossenen Leiter (AC) entsteht ein (wechselndes) Magnetfeld. Führt man die Strommesszange um diesen Leiter, kann das Magnetfeld mithilfe des weichmagnetischen Kerns bestimmt werden.

Alle interviewten Schüler*innen sind in dieser Interviewrunde in der Lage, die Paraphrase korrekt wiederzugeben, weshalb sie mit grün-1 kodiert wurde. Dies wird beispielsweise aus den folgenden zwei Interviewpassagen deutlich:

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

„Genau, also wenn der Stromkreis geschlossen ist und Strom fließt, entsteht ein Magnetfeld um (unv.) also durch die Elektronen entsteht ein Magnetfeld und das können wir eben mit so einem Gerät messen und wir können die Richtungen der Magnetfeldlinien bestimmen mit der Linken Hand Regel. Der Daumen geht in die Stromrichtung und dann zeigen die Finger in welche Richtung die ähm Feldlinien fließen. Und das sind nicht nur zwei Feldlinien, sondern halt mehrere aber zur Einfachheit sind da nur zwei eingezeichnet.“ (R1-IP4, Pos. 75, 00:09:07-0:09:22)

In dieser Interviewpassage beschreibt IP4 zutreffend, dass ein geschlossenes Stromkreis dazu führt, dass ein Magnetfeld um den Leiter entsteht, und erklärt, wie dieses Magnetfeld mit der Linken-Hand-Regel bestimmt werden kann.

Ein weiteres Beispiel einer gelungenen Paraphrase findet sich im Interview mit IP2:

IP2: „Und dieses Gerät misst unter anderem die Stromstärke (unv.) also von dem Strom, der im Leiter fließt in Wirklichkeit. Und ähm jetzt am Anfang, wie man den hier so um / in Richtung des Versuches hält, zeigt es [das Display] nur sehr, sehr geringe Mengen an. Weil dadurch, dass der Stromkreis nicht geschlossen ist, der Strom nicht fließen kann. Der Strom kann nur in geschlossenen Systemen fließen. Und wenn man ihn in die Nähe eines Laptops bringt, merkt man, dass dort irgendwo Strom fließen muss, weil dann auch die Zahl nur um ein kleines Stückchen nach oben geht, man merkt das wirklich. Also wenn jetzt / wenn man jetzt aber den Stromkreis schließt und die Stromzange um das Kabel hält, steigt der Wert enorm.“

I: „Ja, kannst du mal selbst ausprobieren.“

IP2: „Also da steigt der Wert enorm. Das liegt ganz einfach daran, dass ähm die Stromzange / also auf einmal ist das System geschlossen, es fließt ein Strom durch den Leiter / also jedes Mal wenn durch einen Leiter / wenn sich irgendwo in Wirklichkeit Ladungen bewegen, entsteht auch ein entsprechendes Magnetfeld. Und dieses Magnetfeld, wenn sich die Ladungen einheitlich bewegen. Eben mit (unv.) dass es messbar ist und halt stabil. Und der / die Stromstärke misst die Stärke dieses Magnetfeldes und dadurch, dass das ein direkter Zusammenhang ist zwischen Magnetfeldstärke und Stromstärke kann es ähm daraus im Prinzip [auf] die Stromstärke schließen. Also sie, die Zahl.“

(R1-IP2, Pos. 62-64, 00:11:10-00:12:47)

IP2 beschreibt richtig, dass ein geschlossener Stromkreis die Voraussetzung für das Fließen von Strom ist und dabei ein Magnetfeld entsteht. Darüber hinaus erläutert IP2 den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Magnetfeldstärke sowie die Funktionsweise der Stromzange.

Diese Beispiele zeigen, dass die Schüler*innen die Erklärung in ihren Paraphrasen korrekt wiedergaben, weshalb die Kodierung ‚korrekt‘ (grün-1) vergeben wurde. Wären diese Inhalte nicht

in der Paraphrase enthalten gewesen oder wäre eine Hilfestellung notwendig gewesen, hätte die Paraphrase als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) oder ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert werden müssen.

An die Paraphrase schloss sich erneut eine Aufgabe an. Diese befasste sich mit der Frage, ob die Strommesszange auch in einem offenen Stromkreis einen positiven Wert anzeigen würde. Diese Aufgabe wurde von nahezu allen Interviewpartner*innen korrekt beantwortet. Sie waren in der Lage zu erklären, dass die Strommesszange in einem offenen Stromkreis keinen Wert anzeigt, da der Stromkreis nicht geschlossen ist und sich somit kein Magnetfeld um den Leiter bildet, das wiederum zur Berechnung der Stromstärke erforderlich wäre. Dies zeigt sich zum Beispiel in der Interviewpassage mit IP4, in der auf die Frage, warum mit der Strommesszange in einem offenen Stromkreis kein positiver Wert gemessen wird, wie folgt geantwortet wurde:

I: Ja, sehr schön. Ich glaube das hast du e schon sehr schnell erfasst. Ja, wie schaut denn das jetzt aus, wenn der Stromkreis nicht geschlossen ist? Wieso messe ich dann hier keinen Wert mehr?

IP4: Weil sich hier die Elektronen nicht bewegen und dadurch kann kein Magnetfeld entstehen.

I: Ok, also es braucht wirklich einen geschlossenen Stromkreis und einen Stromfluss, damit du das Magnetfeld entstehen hast, das du wiederum messen kannst, genau.

(R1-IP4, Pos. 77-80, 00:09:39-00:10:00)

Aus dieser Interviewpassage geht hervor, dass IP4 korrekt verstanden hatte, dass in einem offenen Stromkreis kein Strom fließt und daher kein Magnetfeld entsteht. Einzig bei IP3 zeigte sich eine kleine Schwierigkeit bei der Bearbeitung dieser Aufgabe: IP3 nahm zunächst fälschlicherweise an, dass die Elektronen im offenen Stromkreis, obwohl sie keine geordnete Richtung haben, dennoch ein Magnetfeld hervorrufen würden, wodurch auf der Anzeige der Strommesszange ein positiver Wert erscheinen könnte. Dies wird in folgender Interviewpassage deutlich:

IP3: (...) Und dann entsteht ein Magnetfeld und deswegen sehen wir, dass die Ampere steigen bis zu [0.]40[mA]. Und wenn man diesen Stromkreis halt bricht [gemeint: öffnet], ähm, wird man trotzdem ein bisschen noch sehen von den Ampere, weil die Elektronen eben noch fließen. (R1-IP3, Pos. 44, 00:09:35-00:10:05)

Nachdem von der Interviewerin klargestellt wurde, dass es sich bei einem Stromfluss nur um Elektronen handelt, die sich geordnet in eine Richtung bewegen, korrigierte IP3 jedoch diese Aussage und stellte die Aufgabe richtig.

Zweiter Block: Konzeptidee 2.2

Die Kodierungen für die Konzeptidee zum elektrischen Feld sind in Tabelle 11 zu sehen.

Tabelle 11: Kodierungen zur 2.2. Konzeptidee zum elektrischen Feld in der ersten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 2.2		IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	$\bar{x}$
Versuch zum E-Feld	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	2	3	3	3	2	2	3	2,57
	Aufgabe 1	3	2	1	3	1	2	3	2,29
	Aufgabe 2	3	0	0	3	3	3	3	3,00

Wie aus Tabelle 11 hervorgeht, wurde die Erklärung zu dieser Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen gut aufgenommen und es kamen keine inhaltlichen Rückfragen. Daher wurde die Akzeptanz durchgehend mit ‚grün-3‘ kodiert.

Bei der Paraphrase wurde zur Bewertung der Schüler*innenantworten die folgende Musterlösung (Textbox 10) verwendet:

Textbox 10: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 2.2 in der ersten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC) entsteht ein elektrisches Feld. Bringt man einen elektrostatisch geladenen Alufolienstück oder ein kleines Stück Aluminiumfolie in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung beobachtet werden (Ablenkung). Dies kann mithilfe des Modells der Oberflächenladungen erklärt werden. Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen. Das elektrische Feld der Oberflächenladungen verursacht einen Stromfluss im elektrischen Stromkreis, sobald er geschlossen vorliegt.

Die Antworten der Interviewpartner*innen IP2, IP3, IP4 und IP7 konnten gemäß der Musterlösung als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert werden. Dies geht beispielsweise aus der nachfolgenden Interviewpassage mit IP4 hervor:

IP4: „Eine Batterie führt dazu, dass entlang des Kabels ähm Ladungen abgelagert wird, kann man das so sagen oder eben Ladung existiert.“

I: „Ich sag immer auf die Oberfläche gepumpt wird.“

IP4: „Auf die Oberfläche gepumpt wird, ja. Und wir haben beim Minuspol der Batterie die negative Ladung, weil eben da viele Elektronen sind (...) Und auf / also nach dem Elektrogerät oder Glühlampe oder was man auch immer angesteckt hat, hat man die positive Ladung, die sich halt auf dem Kabel aufgepumpt wird (...) und

es entsteht eben auch ein elektrisches Feld, elektrische ähm / elektrische Feldlinien und die gehen immer von der positiven zur negativen Ladung.“

(R1-IP4, Pos. 124-126, 00:16:30-00:17:39)

In dieser Interviewpassage erklärt IP4 zutreffend, dass die Batterie Ladungen auf die Oberfläche des Leiters pumpt, die sich entlang des Kabels verteilen. IP4 beschreibt außerdem, dass daraus das elektrische Feld entsteht, das mittels Feldlinien dargestellt werden kann. Diese Schilderung entspricht der Musterlösung, weshalb die Aussage als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert wird.

Ein weiteres Beispiel findet sich im Interview mit IP7:

„Also wenn man halt einen Stromkreis schließt, also an beide Enden der Batterie Kabel anschließt, dann verteilen sich Oberflächenladungen, bei den negativen ähm / bei der negativen Seite, ja also beim Minuspol ähm verteilen sich halt mehr negative Ladungen und halt desto näher bei der Batterie, desto mehr [negative Ladungen sind vorhanden]. Und auf der positiven Seite sind halt weniger negative Ladungen, deshalb ist die positiver. Und dadurch das auf der einen Seite positiv und auf der anderen Seite negativ ist, [bildet sich] ein ähm Magnetfeld beziehungsweise ein elektrisches Feld. Ein elektrisches Feld und das geht halt von Plus zu Minus. Und dieses sorgt halt für den Stromfluss.“ (R1-IP7, Pos. 88, 00:16:01-00:16:47)

In dieser Interviewpassage erklärt IP7 korrekt, dass durch das Anschließen der Kabel an die Batterie Oberflächenladungen verteilt werden, wodurch ein elektrisches Feld entsteht, das den Stromfluss ermöglicht. Diese Erklärung entspricht ebenfalls der Musterlösung, die die Verteilung der Ladungen und die Entstehung des elektrischen Feldes im geschlossenen Stromkreis beschreibt. Deshalb wird auch diese Aussage gemäß der Musterlösung als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert.

Die Paraphrasen von IP1, IP5 und IP6 werden hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. IP1 verwechselt das Magnetfeld mit dem elektrischen Feld, IP5 spricht von ‚Protonen‘ statt von ‚Oberflächenladungen‘ und IP6 beschreibt, in welche Richtung die Feldlinien ‚fließen‘. Letzteres wird auch aus folgender Interviewpassage mit IP6 deutlich:

„Genau, Oberflächenladungen entstehen dann. Und wegen eben chemischen Zusammenbau einer Batterie werden halt mehr negative / also Elektronen hier aufgegeben, also ausgetragen quasi. Und weniger dann beim Plus und es entsteht ein Überschuss, wie man hier sieht, ähm und genau. Ja, und diese Linien sind elektrische Feldlinien. ähm Sie entstehen, ähm / Ja sie entstehen glaube ich wenn es geschlossen ist, das System. ähm und sie fließen immer von positiven nach negativen also auch in dem Fall nach unten.“ (R1-IP6, Pos. 121, 00:20:28-00:21:28)

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

In diesem Zitat erklärt IP6, dass Oberflächenladungen aufgrund der chemischen Reaktionen in der Batterie entstehen und die elektrischen Feldlinien von positiv nach negativ 'fließen'. Diese Darstellung enthält jedoch Ungenauigkeiten im Vergleich zur Musterlösung, insbesondere hinsichtlich der Begriffswahl ‚Fließen‘, was auf ein fehlendes Verständnis der physikalischen Feldvorstellung hindeutet.

Diese Abweichungen von der Musterlösung verdeutlichen, dass diese Interviewpartner*innen die Konzepte nicht vollständig wiedergeben konnten. Da es sich jedoch nur um kleine Fehler handelt und das wesentliche Konzept – dass eine Batterie Ladungen auf die Leiteroberfläche pumpt, die wiederum ein elektrisches Feld erzeugen, das mit elektrischen Feldlinien dargestellt werden kann – wiedergegeben wird, können die Aussagen zumindest als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert werden.

Bei der ersten Aufgabe zur Konzeptidee 2.2 sollen die Schüler*innen die Frage beantworten, ob das Alufolienstück auch in einem offenen System abgelenkt wird. Die Schüler*innen sollten hier erkennen, dass die Oberflächenladungen auch in einem offenen Stromkreis von der Batterie auf die Oberfläche gepumpt werden und dadurch ein elektrisches Feld entsteht. Daher sollte auch eine elektrostatische Wechselwirkung des Alufolienstücks, das in die Nähe des offenen Stromkreises gehalten wird, zu beobachten sein.

IP1, IP4 und IP7 waren in der Lage, diese Aufgabe richtig zu beantworten, weshalb ihre Aussagen als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert wurden. Dies geht beispielsweise aus dieser Interviewpassage mit IP4 hervor:

„Weil es da weder einen Überschuss noch halt wenige Ladungen gibt, es gibt keine Ladungen da, also es ist neutral, deswegen halt passiert da nichts.“ (R1-IP7, Pos. 92, 00:17:10-00:17:21)

Die Aussagen von IP2 und IP6 wurden dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. IP2 nahm zunächst an, dass die Batterie keine Ladungen auf die Oberfläche pumpen könne und dass der Ladungsunterschied lediglich chemischer Natur sei, was als „eine andere Geschichte“ bezeichnet wurde. Allerdings korrigierte sich IP2 selbst und gelangte schließlich ohne Hilfestellung zur korrekten Antwort, wie aus der folgenden Interviewpassage hervorgeht:

I: „Also wenn jetzt dieser Stromkreis geöffnet wäre, beispielsweise an dieser Stelle würde ich einfach das Kabel auftrennen. Glaubst du würde das Alufolienstück dann immer noch abgelenkt werden?“

IP2: „Nein. Und zwar, die Batterie kann auch keine Ladungsunterschied erzeugen, wenn sie in einem nicht-geschlossenen Stromkreis ist. Es gibt einen Ladungsunterschied in der Batterie aber der ist chemisch und das ist eine andere

Geschichte, aber sie kann nicht ähm Elektronen einfach rauspumpen auf einer Seite. Im Prinzip, ohne einen geschlossenen Kreislauf kann die Batterie nicht zu einem Ladungsunterschied / doch kann sie schon! Einen Moment. Kapazitäten [gemeint: Kondensatoren]. Ja, doch (...) wenn man das Alufolienstück an den Leiter dranhält, an die negativere Seite, wird es trotzdem abgestoßen werden, weil das Alufolienstück Elektronen aufnimmt (...) also ja, das Alufolienstück wird schon abgestoßen, selbst wenn es ein offener Stromkreis wäre.“

(R1-IP2, Pos. 105-106, 00:121:31-00:22:38)

IP6 verwendete in der Antwort hingegen den falschen Begriff „Unterbrecher“ anstelle von „Widerständen“ beziehungsweise „Energieumwandlern“. Da bei der Formulierung der Antworten besonderes Augenmerk auf die korrekte Begriffswahl im Sinne des Unterrichtsdesigns gelegt wurde, musste auch diese Aussage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert werden.

Die Aussagen von IP3 und IP5 wurden als ‚nicht korrekt‘ kodiert. Das Konzept des elektrischen Feldes aufgrund der Oberflächenladungen bereitete IP3 offenbar Schwierigkeiten:

„I: Ja also, wenn ich jetzt nur ein loses Kabel hier hätte. Würdest du auch da Oberflächenladungen haben, was glaubst du?

IP3: Nein, es muss ein geschlossener Stromkreis sein.“

(R1-IP3, Pos. 83-84, 00:19:11-00:19:11)

Wie aus diesem Zitat hervorging, gab IP3 zunächst an, dass ein geschlossener Stromkreis notwendig sei, damit die Batterie Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche pumpen könne. Diese Aussage war nicht korrekt, da auch in einem offenen System Ladungen auf die Oberfläche gepumpt werden können, solange eine Verbindung zur Spannungs- bzw. Energiequelle besteht. IP3 erkannte also nicht die Möglichkeit, dass Oberflächenladungen auch in einem offenen Stromkreis vorhanden sein können, sofern eine Spannungsquelle angeschlossen ist. Zudem beschrieb IP3 später, dass das Alufolienstück selbst oder das Kabel „geladen“ sein müsse, damit es zu einer elektrostatischen Abstoßung kommen könne. Eine Einbindung des Konzepts der Oberflächenladungen erfolgte dabei nicht, sondern wurde gänzlich ausgelassen. All dies waren Indizien dafür, dass das Konzept noch nicht vollständig verstanden worden war und die Interviewpassage daher als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert werden musste.

IP5 gab im Interview an dieser Stelle an, die Antwort auf die Frage nicht zu wissen. Diese Aussage wurde daher ebenfalls als ‚nicht korrekt‘ kodiert.

In Aufgabe 2 zur Konzeptidee 2.2 wurden die Schüler*innen gebeten, ein Beispiel aus dem Alltag zu nennen, bei dem ein elektrisches Feld um ein elektrisches System entsteht. Diese Aufgabe konnte von den Interviewpartner*innen IP1, IP4, IP5, IP6 und IP7 korrekt beantwortet werden. Eine Übersicht der genannten Beispiele ist in Tabelle 11 dargestellt:

Tabelle 12: Übersicht der genannten Beispiele aus Aufgabe A2 zur Konzeptidee 2.2.

	Beispiele
IP1	Steckdose, Ladekabel, Handyakku, Handy, Ladestation einer elektrischen Zahnbürste, Föhn
IP2	/
IP3	/
IP4	Föhn, elektrische Zahnbürste, Lampe
IP5	Hochspannungsleitungen, E-Autos, Züge
IP6	Föhn
IP7	Elektrischer Stromkreis

In den Interviews mit IP2 und IP3 wurde diese Aufgabe nicht gestellt. Entweder wurde sie übersehen oder es wurde situativ entschieden, sie auszulassen, insbesondere nachdem die vorherige Aufgabe nicht erfolgreich verlief.

Dritter Block: Konzeptidee 3.1

Die Kodierungen für die Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen sind in Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13: Kodierungen zur 3.1. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in der ersten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 3.1		IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	$\bar{x}$
Energieübertragung in elektrischen Systemen	Erklärung								
	Akzeptanz	3	2	3	3	3	3	2	2,71
	Paraphrase	3	3	2	3	3	2	3	2,71
	Aufgabe	3	0	2	2	2	3	3	2,50

Gemäß Tabelle 13 wurde die Konzeptidee von IP1, IP3, IP4, IP5 und IP6 positiv aufgenommen, ohne dass seitens der Schüler*innen inhaltliche Fragen auftraten. Obwohl die Interviewpartner*innen IP2 und IP7 anfängliche Unsicherheiten äußerten oder Rückfragen stellten, konnten diese rasch geklärt werden. IP1 äußerte sich dazu wie folgt:

„Also ich habe es verständlich gefunden ähm (...) Die Sache ist, es ist etwas neues für mich, ich habe das noch nicht gelernt im Unterricht also es ist komplett neu für

mich ähm aber eben dafür, dass es neu ist, habe ich das Konzept relativ verstanden.“ (R1-IP1, Pos. 179, 00:35:47-00:36:12)

Diese Aussage verdeutlichte, dass IP1 aufgrund der Neuartigkeit des Konzepts etwas unsicher war, die Erklärung jedoch insgesamt als verständlich empfand.

Im Gegensatz dazu stellte IP7 eine Verständnisfrage zur Berechnung des Energieflusses:

„Also ich verstehe nicht ganz wie das / also ja, es zeigt halt den [Energie-]Fluss, aber eben ich verstehe nicht ganz ähm wieso man das berechnen kann. Also wieso man weiß, dass das so ist.“ (R1-IP7, Pos. 126, 00:21:24-00:21:56)

Die Interviewerin reagierte positiv und betonte, dass die gestellte Frage sehr wichtig sei. Sie erklärte, dass es eine entsprechende Formel gebe, die gerne im Anschluss besprochen werden könne. Daraufhin wirkte IP7 zufrieden.

Für die Paraphrase der Erklärung wurde die folgende Musterantwort (Textbox 11) zum Vergleich herangezogen:

Textbox 11: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 3.1 in der ersten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Die Linke-Hand-Regel für den Energiefluss besagt, dass man die Richtung des Energieflusses herleiten kann, wenn das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander stehen. Dies wird mithilfe des sog. Poynting Vektors beschrieben: $S = (1/\mu_0)(E \times B)$.

Die Energie tritt aus der Batterie und wird dort durch das elektromagnetische Feld übertragen. Auch am Energieumwandler kann beobachtet werden: Hier tritt die Energie ein. Diese Energieübertragung passiert in Lichtgeschwindigkeit.

Wie in Tabelle 13 ersichtlich ist, konnte die Paraphrase bei fast allen Interviewpartner*innen als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert werden.

Beispielsweise formulierte IP1 die Erklärung wie folgt:

„[Das] Magnetische Feld kommt zustande durch die Bewegung von Elektronen durch den Leiter. Also das ist dann der Stromfluss. Das elektrische Feld wird dann zustande kommen durch die Präsenz einer Spannungsquelle. Und die Spannungsquelle pumpt sozusagen diese Oberflächenladungen an die Oberfläche des Leiters, wo sie dann präsent sind und eher an den Polen vermehrt [vorkommen] und man kann jetzt ein spezifisches Gebiet des elektrischen und magnetischen Feldes nehmen und das dann so mit einem Pfeil darstellen. Das X bedeutet halt, dass man reinguckt, das ist die Richtung des magnetischen Feldes, es geht da [in die Ebene] hinein. Und wenn man da einen Punkt hat, heißt das, dass die Richtung des magnetischen Feldes da sozusagen rausgeht.“ (R1-IP1, Pos. 181, 00:36:17-00:37:15)

Etwas später ergänzte IP1 noch zum Energiefluss:

„Also der Energiefluss ist eine Kombination aus dem elektrischen Feld und dem magnetischen Feld und er kommt aus der Batterie, aus der Spannungsquelle heraus zu unserem elektrischen Gerät und man kann den sich anhand von dieser (...) Drei-Finger-Regel eben zeigen lassen, indem man eben den Daumen in die Richtung des B-Feldes mal zeigt, in unserem Fall hier geht das Magnetfeld in den Bildschirm hinein, also wird das dann so [verlaufen]. Das elektrische Feld geht dann da unten hin und der Energiefluss würde dann die Richtung zeigen zum elektrischen Gerät.“

(R1-IP1, Pos. 209, 00:42:46-00:43:33)

Aus diesen Interviewpassagen geht hervor, dass IP7 die Erklärung gemäß der Musterlösung korrekt paraphrasieren konnte. Die detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge zwischen dem elektrischen und magnetischen Feld sowie deren Rolle im Energiefluss zeigt ein klares Verständnis seitens IP1. Darüber hinaus demonstrierte die Anwendung der „Drei-Finger-Regel“ (gemeint: Linke-Hand-Regel) zur Veranschaulichung des Energieflusses, dass IP7 die Inhalte auch auf ein konkretes Beispiel anwenden konnte.

Die Antworten der Interviewpartner*innen IP3 und IP6 wurden hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

IP3 beschrieb zunächst die Richtung des Elektronenflusses und wurde von der Interviewerin darauf hingewiesen, dass die Linke-Hand-Regel in diesem Kontext wichtig sei. Daraufhin korrigierte IP3 die Antwort. Schließlich erklärte IP3 zutreffend, wie das magnetische und elektrische Feld verlaufen und dass der Energiefluss in Richtung der Glühlampe ginge (R1-IP3, Pos. 130-150, 00:26:51-00:28:20).

Auch bei IP6 gelang die Paraphrase erst mit einer Hilfestellung beim zweiten Anlauf. IP6 erklärte zunächst richtig, dass der eingezeichnete Energiefluss nur zustande kommt, „wenn ein elektrisches Feld und ein magnetisches Feld im System sind.“ (R1-IP6, Pos. 167, 00:28:53-00:29:44). In diesem Zusammenhang wurde auch die Linke-Hand-Regel erwähnt, jedoch gelang es IP6 zunächst nicht, diese korrekt anzuwenden. Die Interviewerin erklärte daraufhin erneut das Konzept, verwies auf die Legende und zeigte, wie das Magnetfeld und das elektrische Feld kombiniert werden, um den Energiefluss zu bestimmen. IP6 stimmte dem zu und erläuterte anschließend, wie der Energiefluss durch das Magnetfeld und die elektrischen Feldlinien in Richtung der Glühlampe übertragen wird, wo Energie benötigt wird. Die Interviewerin betonte, dass der Energiefluss immer von der Energiequelle zum Energieumwandler verläuft. Somit gelang es IP6 mit einer kleinen Hilfestellung doch noch, zur richtigen Antwort gemäß der Musterlösung zu gelangen.

In der Aufgabe zur Konzeptidee 3.1 sollten die Schüler*innen zeigen, dass sie das Konzept auch auf ein reales elektrisches System anwenden können. Dazu wurde ihnen ein Stromkreis mit einer Batterie, zwei Kabeln und einem Ventilator gezeigt. Die Schüler*innen sollten nun argumentieren, woher die Energie kommt, um den Ventilator zu betreiben, und wie diese übertragen wird. Ziel war es, dass die Interviewpartner*innen das neue Erklärungskonzept anwenden.

Die Aussagen von IP3, IP4 und IP5 konnten dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-1) kodiert werden. IP3 machte eine nahezu vollständig korrekte Aussage, verwendete jedoch den Begriff „Stromfluss“ anstelle von „Energiefluss“. Bei IP4 war beim zweiten Erklärversuch eine Hilfestellung notwendig, da zunächst fälschlicherweise angenommen wurde, dass das elektrische Feld erst bei einem geschlossenen Stromkreis entsteht. IP5 sprach zunächst von einem „Energiefeld“, korrigierte sich jedoch selbst und verwendete anschließend die korrekten Begriffe „B-Feld“ und „E-Feld“, wie aus folgender Passage hervorgeht:

IP5: „(...) Und ähm dann entsteht ein (...) Energiefeld?“

I: „Ja, welche Felder kennen wir?“

IP: „Ach so ja, es entsteht dann halt ein B-Feld und ein E-Feld (...).“

(R1-IP5, Pos. 133-137, 00:28:37-00:29:19)

Da es sich hierbei nur um kleine Fehler handelt, mussten die Aussagen aber nicht als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert werden.

Im Interview mit IP2 wurde diese Aufgabe ausgelassen, da sie vermutlich von der Interviewerin übersehen wurde¹¹.

Dritter Block: Konzeptidee 3.2

Die Konzeptidee 3.2 behandelt die Vorstellung, dass der Poynting-Vektor die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld beschreibt. Diese Konzeptidee wurde in der vorliegenden Interviewrunde nicht abgefragt, da sie als optionale Erweiterung für besonders interessierte Schüler*innen gedacht war. Solche Gespräche fanden nur vereinzelt statt und wurden nicht systematisch dokumentiert, da sie nach Abschluss des Interviews geführt wurden. Deshalb muss die Konzeptidee 3.2 aus dieser Auswertung ausgeschlossen werden.

¹¹ Um dies in den folgenden Interviewrunden zu vermeiden, wurden in den zweiten Interviewleitfaden Kästchen zum Abhaken der gestellten Fragen und Aufgaben hinzugefügt.

Dritter Block: Konzeptidee 3.3

Der fünfte und letzte Block wurde nicht mit allen Schüler*innen bearbeitet, wie aus Tabelle 14 hervorgeht. Es handelt sich um Zusatzfragen, die nur sehr interessierten Interviewpartner*innen gestellt wurden.

Tabelle 14: Kodierungen zur 3.3. Konzeptidee zum Rucksackmodell in der ersten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 3.3		IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	$\bar{x}$
Rucksackmodell	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	0	0	3	3,00
	Paraphrase	2	3	0	0	0	0	0	2,50
	Aufgabe	3	3	0	3	2	2	2	2,50

In Tabelle 14 ist deutlich zu erkennen, dass die Erklärung dieser Konzeptidee von IP1, IP2, IP3, IP4 und IP7 positiv aufgenommen wurde, weshalb die Akzeptanz mit grün-3 kodiert wurde. Die Erklärung wurde im Interview mit IP5 und IP6 jedoch nicht behandelt. Wie bereits zuvor bei Konzeptidee 1 erwähnt, lag der Fokus in der ersten Interviewrunde darauf, herauszufinden, welches Interviewformat (Dauer, Komplexität der Aufgaben) für die Schüler*innen angemessen ist, um sie nicht zu überfordern. Wenn die Interviewerin den Eindruck hatte, dass die Konzentration der Interviewpartner*innen nachließ, wurde diese Konzeptidee möglicherweise nicht mehr detailliert behandelt (daher folgte sie nicht immer dem genauen Ablauf einer Akzeptanzbefragung mit dem 4-Schritt-Ansatz), teilweise wurde nur eine Aufgabe gestellt, ohne die Paraphrase explizit abzufragen.

Um die Paraphrase der Erklärung zu bewerten, wurde die folgende Musterlösung (siehe Textbox 12) als Referenz herangezogen:

Textbox 12: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 3.2 in der ersten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Die Bestandteile eines elektrischen Systems sind durch ein elektromagnetisches Feld miteinander verbunden. Das elektromagnetische Feld breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit von der Energiequelle zum Elektrogerät aus. Dabei wird Energie übertragen. (Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird; Energieerhaltung). Die Elektronen transportieren nicht die Energie, die zum Betrieb der Glühlampe notwendig ist (sie bewegen sich in einem Bummeltempo von etwa $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$). Ihre stetige Bewegung ist aber notwendig, damit es ein elektromagnetisches Feld geben kann.

Bei zwei Interviewpartner*innen wurde die Paraphrase explizit gefordert:

IP2 konnte das Konzept gemäß der Musterlösung ‚korrekt‘ (grün-3) erklären, wie aus dieser Interviewpassage hervorgeht:

„Wir stellen uns oft vor, dass Elektronen selbst die Energieübertragung oder die Energie sind sogar, die in einem Stromkreis fließt. Und das stimmt nicht so ganz, weil Elektronen also die klassische Idee ist irgendwie, man drückt auf den Lichtschalter und der schießt Elektronen bis zum Licht und dort tun sie irgendwas damit das Licht leuchtet. Das stimmt nicht, weil Elektronen sich ähm zwar im Raum sehr schnell aber in eine Richtung nur sehr langsam bewegen. Also wirklich, wie Sie gesagt haben, mm pro Stunde oder so was.“ (R1-IP2, Pos. 162, 00:35:02-00:35:32)

In der Paraphrase erklärt IP2, dass Elektronen nicht die Energieübertragung selbst sind, sondern dass diese Übertragung durch ein elektromagnetisches Feld erfolgt. Dies stimmt mit der Beschreibung in der Musterlösung überein, in der das elektromagnetische Feld als Medium für die Energieübertragung dargestellt wird. Zudem wird darauf hingewiesen, dass Elektronen sich zwar schnell im Raum bewegen, aber in Bezug auf die Energieübertragung in einem Stromkreis nur sehr langsam in eine Richtung bewegen. Dies spiegelt die Information aus der Musterlösung wider, dass Elektronen zwar eine stetige Bewegung haben müssen, damit ein elektromagnetisches Feld entsteht, aber dass ihre Bewegungsgeschwindigkeit im Kontext der Energieübertragung im Stromkreis nicht ausschlaggebend ist. Es wird darauf hingewiesen, dass Elektronen lediglich Teil des Energieübertragungsprozesses sind. Insgesamt wird die Paraphrase als ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet, da sie die wesentlichen Schlüsselkonzepte der Musterlösung enthält.

Die Paraphrase von IP1 wird dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet, da sie einige der wesentlichen Konzepte der Musterlösung zwar anspricht, aber nicht vollständig darstellt, wie aus folgender Interviewpassage hervorgeht:

IP1: „Der Hauptteil dieses Energieflusses verläuft ja eigentlich praktisch hier durch [den Raum] aber wir brauchen eben immer noch ein Kabel, um das elektrische Feld hier aufzubauen und deshalb verläuft der Großteil der Energie dann durch die Kabel und wenn wir hier ein anderes elektrisches Gerät hätten, würde es nicht die Energie von dieser Batterie aufnehmen, sondern es würde zielgerichtet weiter nach da zum elektrischen Gerät gehen.“

I: „Da werde ich nochmal kurz meine Erklärung wiederholen. Du erklärst es mir dann nochmal. Also die Energie fließt nicht durch die Kabel, sondern die Energie fließt im Raum.“

IP1: „Ja, dadurch. Dazwischen hab ich gesagt.“

I: „Dazwischen, genau. Hast dich vielleicht nur versprochen.“

IP1: „hm (bejahend)“.

(R1-IP1, Pos. 241-245, 00:48:46-00:49:36)

IP1 erkannte, dass die Energieübertragung nicht direkt durch die Kabel erfolgt, sondern verwies auf den Raum zwischen den Kabeln, was darauf hindeutet, dass das elektromagnetische Feld gemeint ist. Allerdings wurde die Erklärung dadurch ungenau, da IP1 im Verlauf des Gesprächs andeutete, dass ein Kabel notwendig sei, um das elektrische Feld aufzubauen. IP1 erwähnte zudem, dass der Großteil der Energie durch die Kabel verläuft. Dies steht im Widerspruch zur Musterlösung, die klarstellt, dass das elektromagnetische Feld und nicht die Kabel das Medium der Energieübertragung ist. Zudem schienen Missverständnisse bei der Rolle des Kabels und der Bewegung der Energie vorzuliegen, was durch die Korrekturen der Interviewerin angedeutet wurde. Insgesamt fehlten in IP1s Erklärung präzise Angaben zur Funktion und Bewegung der Elektronen sowie zum Konzept der Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld. Nichtsdestotrotz waren einige wesentliche Inhalte vorhanden, wie die Andeutung, dass die Energie durch den Raum übertragen wird, was die Bewertung als ‚teilweise korrekt‘ rechtfertigt.

Die Aufgabe zur Konzeptidee 3.3 greift die sogenannte ‚Rucksackvorstellung‘ auf (siehe Abschnitt 2.5.5), nach der Lernende häufig davon ausgehen, dass Elektronen die Energie durch den Stromkreis tragen. Ziel der Aufgabe war es, die Schüler*innen dazu anzuregen, diese Vorstellung kritisch zu hinterfragen und nachvollziehbar zu begründen, weshalb die Elektronen nicht als Träger der Energieübertragung in elektrischen Systemen angesehen werden können.

Diese Aufgabe wurde von IP1, IP2 und IP4 korrekt gelöst und konnte mit grün-1 kodiert werden. Beispielsweise argumentiert IP1:

„Die Elektronen selber bewegen sich ja schon und haben eine gewisse Energie aber die Elektronen sind auch sehr, sehr langsam und wir sehen ja jedes Mal, wenn ich einen Lichtschalter anmache, dass das Licht nicht 30 Minuten braucht, um anzugehen, sondern auf der Stelle angeht, sozusagen, und stattdessen was die Elektronen machen ist, sie geben sozusagen Orientierung und sie erzeugen das Magnetische und das elektrische Feld, welches dann eigentlich sozusagen die Kombination der beiden Felder ist der eigentliche Faktor, welcher die Energie überträgt. (...) Somit wird die Energie hier durch den Raum übertragen und nicht durch die Kabel.“ (R1-IP1, Pos. 269-271, 00:53:14-00:54:07)

IP1 erklärte in dieser Textpassage, dass Elektronen zwar Energie besitzen und sich bewegen, aber sehr langsam sind. Das Licht einer Lampe geht jedoch sofort an, wenn ein Schalter betätigt wird. Die Elektronen spielen laut IP1 insofern eine Rolle, als dass sie die Orientierung vorgeben und das magnetische sowie das elektrische Feld erzeugen, welches die Energie überträgt. Somit wird die Energie laut IP1 durch den Raum und nicht durch die Kabel übertragen. Die Antwort von IP1 ist also insofern richtig, als sie klar darlegt, dass die Energieübertragung in elektrischen

Systemen nicht allein durch die Bewegung der Elektronen erfolgt. Stattdessen betont IP1 die Rolle der elektrischen und magnetischen Felder bei der schnellen Übertragung der Energie, was den zentralen Punkt der Aufgabe korrekt erfasst. Allerdings irrt sich IP1 in einem Punkt: die Behauptung, dass die Elektronen das magnetische Feld verursachen. Da dies jedoch nicht im Rahmen der Aufgabe abgefragt wurde, kann die Aussage trotzdem als ‚korrekt‘ (grün-1) kodiert werden.

Die Aussagen von IP5, IP6 und IP7 konnten dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ kodiert werden, da einige wichtige Aspekte der Aufgabe zur Konzeptidee 3.3 zwar angesprochen, aber nicht vollständig oder klar genug ausgeführt wurden.

Die Antwort von IP5 zeigte ein grundlegendes Verständnis, indem das "elektromagnetische Feld" erwähnt wurde. IP5 blieb jedoch zögerlich und führte den Gedanken nicht weiter aus, wodurch die Erklärung unvollständig blieb.

IP6 beschrieb die Rolle der elektromagnetischen Wellen bei der Energieübertragung mit den Worten:

„Die elektromagnetische Wellen quasi, also Energie, die breitet das aus, wahrscheinlich, (unv.) schnell“ (R1-IP6, Pos. 189, 00:35:39-00:35:51).

Diese Aussage enthält zwar den richtigen Ansatz, ist jedoch unscharf formuliert und nicht detailliert genug, um das Konzept vollständig zu erklären.

IP7 ging zunächst davon aus, dass die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich seien. Erst durch eine Hilfestellung wurde erkannt, dass das elektromagnetische Feld die notwendige Bedingung für die Energieübertragung ist. Obwohl letztlich die richtige Schlussfolgerung gezogen wurde, zeigt die Antwort, dass das Verständnis des Konzepts nicht sofort vorhanden war und erst durch externe Unterstützung erreicht wurde.

Sowohl bei IP5, IP6 als auch bei IP7 wurden grundlegende Elemente der richtigen Antwort angesprochen, doch die Erklärungen waren entweder unvollständig, unscharf oder erforderten externe Hilfe, um zum korrekten Ergebnis zu gelangen. Daher wurden die Antworten nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Dritter Block: Konzeptidee 3.4

Konzeptidee 3.4 beschreibt die Vorstellung, dass der Energietransport im elektromagnetischen Feld systemgebunden ist. Das bedeutet, dass sich das elektromagnetische Feld nicht vom System löst. In der vorliegenden Interviewrunde wurde diese Idee nicht thematisiert, da sie, wie

Konzeptidee 3.2, nur als optionale Erweiterung für besonders interessierte Schüler*innen vorgesehen war. Solche Gespräche kamen zwar vereinzelt vor, wurden jedoch nicht systematisch dokumentiert. Daher bleibt Konzeptidee 3.4 in der Auswertung unberücksichtigt.

5.1.3.3 Längsschnittanalyse

Im vorherigen Kapitel wurde die Querschnittsanalyse der ersten Interviewrunde dargestellt. In diesem Abschnitt erfolgt eine Längsschnittanalyse anhand zweier ausgewählter Fälle, um tiefere Einblicke zu gewinnen.

Zwei der sieben Interviews aus der ersten Runde werden dabei exemplarisch beschrieben: eines mit einem sehr erfolgreichen Verlauf und eines mit größeren Schwierigkeiten. Diese Vorgehensweise erlaubt es, durch eine Längsschnittbetrachtung spezifische Muster zu erkennen, die in der Querschnittsanalyse nicht offensichtlich wurden.

Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 8 fällt beispielsweise auf, dass IP1 fast durchgehend positive Bewertungen (grüne Kodierungen) erhielt. Schwierigkeiten traten lediglich bei zwei Paraphrasen auf, was darauf hindeutet, dass IP1 Probleme bei den eigenen Formulierungen hatte.

Im Gegensatz dazu zeigte IP3 im Verlauf des Interviews mehrfach Schwierigkeiten, und die Konzentration ließ gegen Ende nach, sodass einige Fragen der Interviewerin nicht mehr gestellt wurden. Die Analyse ergab zudem, dass IP3 zwar häufig angab, die Inhalte zu verstehen (Akzeptanz), jedoch bei Paraphrasen und Aufgaben Probleme hatte.

Erste Längsschnittanalyse mit einem positiven Beispiel: Interview mit IP1

Als erstes Fallbeispiel wird das Interview mit IP1 als positives Beispiel betrachtet. Das Interview fand am 18.06.2021 um 14:00 Uhr statt und dauerte knapp eine Stunde.

IP1 war gut vorbereitet, hatte einen Taschenrechner dabei und zeigte schon zu Beginn des Interviews eine hohe Motivation. Als Schüler*in einer bilingualen Schule (Englisch-Deutsch) verwendete IP1 gelegentlich Anglizismen oder Mischbegriffe, die bei der Auswertung des Interviews berücksichtigt wurden. Die Interviewerin wiederholte dazu teilweise Begriffe auf Deutsch, um sicherzustellen, dass die Übersetzungen korrekt waren. Alle Interviewfragen wurden gestellt, und die durchschnittliche Bewertung der Antworten lag bei $\bar{x} = 2,90$ von maximal 3,00 (siehe Tabelle 8).

Wie man anhand der Tabelle 8 sehen kann, wurden die Konzeptideen 1 (Konzeptidee zur Einführung von elektrischen Systemen als Energieübertragungssystem mit Begriffsdefinition von kabellosen und kabelgebundenen elektrischen Systemen und Energiequelle, Energieumwandler

und Überträgermedium) und 2.1 (Konzeptidee zum magnetischen Feld) problemlos von IP1 behandelt und konnten durchwegs als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert werden.

Auch die Konzeptidee 2.2 (Konzeptidee zum elektrischen Feld) wurde überwiegend als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert. Einzig bei der Paraphrase wurde deutlich, dass IP1 kurzzeitig das Magnetfeld mit dem elektrischen Feld verwechselte. Hier ist allerdings unklar, ob es sich um einen tatsächlichen Fehler oder einen Versprecher handelte, da IP1 die Aussage anschließend richtig korrigierte. Dies wird aus folgender Interviewpassage deutlich, in der IP1 den Versuchsaufbau beschreibt:

„Wir haben hier einen Generator, Batterie oder was auch immer, eine Spannungsquelle. Und die Spannungsquelle wird dann (...) aufgedreht auf ungefähr 10 Kilovolt“ (R1-IP1, Pos. 109, 00:23:46-00:25:05).

Auf Nachfrage von der Interviewerin, das elektrische Feld zu erklären, erwiderte IP1:

„Beim Fließen des Stroms werden natürlich Magnetfelder hervorgerufen, das wird dann auch hier gezeigt im elektrischen Feld mit den Feldlinien hier (...)“ (R1-IP1, Pos. 109, 00:23:46-00:25:05)

Später bemerkte IP1 den Fehler, als die Interviewerin klarstellte:

„Weil du hast jetzt schon kurz das Magnetfeld eingebaut aber könntest du mir nochmal das elektrische Feld erklären (...)“ (R1-IP1, Pos. 110, 00:25:05-00:25:15).

IP1 korrigierte sich und erklärte das elektrische Feld anschließend genauer:

„Weil die negative Oberflächenladungen waren dann zum Pluspol hin weil die so drangezogen werden. Und die Bewegung von den negativen Oberflächenladungen ruft dann das elektrische Feld hervor“ (R1-IP1, Pos. 113, 00:25:23-00:25:40).

Dieses Beispiel zeigt, dass IP1 grundsätzlich verstanden hatte, dass das elektrische Feld durch Oberflächenladungen hervorgerufen wird, dies aber noch nicht fachlich präzise beschreiben konnte. IP1 nahm fälschlicherweise an, dass die „Bewegung der negativen Oberflächenladungen“ das elektrische Feld hervorrufe. Dies wurde jedoch nicht weiter von IP1 ausgeführt.

Die Konzeptidee 3.1 (Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen) und die Konzeptidee 3.3 (Konzeptidee zur Schüler*innenvorstellung ‚Rucksackmodell‘) wurden durchwegs als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert. Einzig die Paraphrase wurde bei Konzeptidee 3 nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. IP1 beschrieb zunächst, dass die Energie ‚im Kabel fließe‘, korrigierte diese Ansicht aber später selbst. Dies wird aus folgender Interviewpassage deutlich:

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

„Und der Hauptteil dieses Energieflusses verläuft ja eigentlich praktisch hier durch aber wir brauchen eben immer noch ein Kabel, um das elektrische Feld hier aufzubauen und deshalb verläuft der Großteil der Energie dann durch die Kabel und wenn wir hier ein anderes elektrisches Gerät hätten, würde es nicht die Energie von dieser Batterie aufnehmen, sondern es würde zielgerichtet weiter nach da zum elektrischen Gerät gehen.“

(R1-IP1, Pos. 241, 00:48:46-00:49:23).

Die Interviewerin wies IP1 auf den Fehler hin:

„Also die Energie fließt nicht durch die Kabel, sondern die Energie fließt im Raum.“

(R1-IP1, Pos. 242, 00:49:23-00:49:32).

IP1 stellte daraufhin richtig:

„Ja, dadurch. Dazwischen hab ich gesagt.“ (R1-IP1, Pos. 243, 00:49:32-00:49:32).

Dieses Beispiel zeigt, dass IP1 die korrekte Vorstellung vom Energiefluss im Raum annahm, sich aber zunächst missverständlich ausdrückte, bevor die Aussage richtiggestellt wurde.

Nach dem Interview wurde von IP1 angemerkt, dass dieses Unterrichtskonzept sehr sinnvoll wäre, um es im Schulunterricht einzusetzen, da bisher noch nie von Energieübertragung die Rede war. Stattdessen wurden im bisherigen Unterricht laut IP1 nur das magnetische und elektrische Feld behandelt. Es wurde nicht darauf eingegangen, wie diese Felder entstehen, sondern lediglich, dass sie existieren. IP1 äußerte zudem den Wunsch, eine zusätzliche Simulation und noch ein paar ergänzende Abbildungen im LLA einzubauen. Diese visuellen Hilfsmittel könnten laut IP1 dazu beitragen, komplexe Konzepte anschaulicher und nachvollziehbarer zu machen, was letztendlich zu einem besseren Lernerfolg führen könnte.

Das Interview mit IP1 zeigt, wie Lernende mit guten fachlichen Vorkenntnissen und hoher Motivation erfolgreich mit dem Lehr-Lern-Arrangement arbeiten können. Trotz einzelner Missverständnisse oder unpräziser Formulierungen, die meist selbstständig erkannt und korrigiert wurden, demonstrierte IP1 ein differenziertes Verständnis zentraler Konzeptideen. Die durchweg hohen Bewertungen sowie die reflektierten Rückmeldungen am Ende des Interviews unterstreichen das Potenzial des Konzepts, komplexe physikalische Zusammenhänge nachvollziehbar zu vermitteln, insbesondere dann, wenn es gemäß des Feedbacks optimiert wird.

Zweite Längsschnittanalyse mit einem weniger positiven Beispiel: Interview mit IP3

Als zweites Fallbeispiel wird das Interview mit IP3 als weniger positives Beispiel betrachtet. Es fand am 24.06.2021 um 15:30 Uhr statt und dauerte nur rund 35 Minuten. Vorab ist zu beachten, dass Deutsch nicht die Erstsprache von IP3 ist. Gelegentlich wechselte IP3 zwischen Englisch und Deutsch, was zu kleinen Fehlern in der Ausdrucksfähigkeit führte. Wie bereits bei IP1 oben beschrieben, wurden diese Stellen teilweise in der Analyse klargestellt oder schon im Interviewverlauf von der Interviewerin auf Deutsch wiederholt, um die korrekte Übersetzung im Sinne von IP3 zu gewährleisten.

Im Verlauf des Interviews wurde deutlich, dass IP3 grundlegende Kenntnisse zu einfachen Stromkreisen, wie dem Stromfluss und der Funktion einer Spannungsquelle, fehlten. Dadurch wurde das Unterrichtskonzept als zu anspruchsvoll wahrgenommen.

Während des Interviews mit IP3 wurden einige Fragen von der Interviewerin ausgelassen, da gegen Ende des Interviews deutlich wurde, dass IP3 teilweise unkonzentriert war. Der Durchschnittswert der Interviewkodierungen in der Längsschnittanalyse lag bei $\bar{x} = 2,00$ von maximal 3,00 (siehe Tabelle 8).

Die Ergebnisse in Tabelle 8 zeigen, dass bei Konzeptidee 1, welche die Einführung von elektrischen Systemen als Energieübertragungssystem behandelt, die Akzeptanz und die erste Aufgabe als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet wurde. Die Paraphrase wurde leider im Interview von der Interviewerin vergessen. Dieser Umstand wurde jedoch in den folgenden Interviewrunden durch die Verwendung einer Checkliste vermieden, die während des Interviews die gestellten Fragen dokumentierte.

Die zweite Aufgabe zu dieser Konzeptidee wurde hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. Wie bereits in der Querschnittsanalyse erwähnt, konnte IP3 zunächst die Aufgabe richtig lösen, indem die Begriffe ‚Energieumwandler‘ und ‚Energiequelle‘ korrekt einem kabelgebundenen System zugeordnet wurden. Bei der Aufgabe zum kabellosen System schien jedoch eine gewisse Verwirrung aufzutreten: IP3 beschrieb zunächst die Energieübertragung durch Elektronen, anstatt die vorgegebene Zuordnungsaufgabe zu lösen. Erst nach erneuter Aufforderung zur Zuordnung mit den gegebenen Begriffen konnte die Aufgabe korrekt gelöst werden.

Die Konzeptidee 2.1 (Konzeptidee zum magnetischen Feld) wurde von IP1 zunächst gut aufgenommen und korrekt paraphrasiert. Daher wurde dies als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet. Die zugehörige Aufgabe wurde jedoch nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. IP3 nahm zunächst fälschlicherweise an, dass Elektronen in einem offenen Stromkreis, die keine geordnete Richtung haben, ebenfalls ein Magnetfeld erzeugen könnten. Dies führte

laut IP3 dazu, dass auf der Anzeige der Strommesszange ein positiver Wert angezeigt wurde, wie in folgendem Interviewausschnitt deutlich wird:

„(...) Und dann entsteht ein Magnetfeld und deswegen sehen wir, dass die Ampere steigen bis zu [0.]40[mA]. Und wenn man diesen Stromkreis halt bricht [gemeint: öffnet], ähm, wird man trotzdem ein bisschen noch sehen von den Ampere, weil die Elektronen eben noch fließen.“ (R1-IP3, Pos. 44, 00:09:35-00:10:05)

Nachdem die Interviewerin erklärt hatte, dass sich der Stromfluss ausschließlich auf Elektronen bezieht, die sich geordnet in eine Richtung bewegen, korrigierte IP3 diese Aussage und löste die Aufgabe korrekt.

Bei der Konzeptidee 2.2 (Konzeptidee zum elektrischen Feld) wurden die Akzeptanz und die Paraphrase als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet. Die erste Aufgabe hingegen wurde als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert. Wie bereits in der Querschnittsanalyse beschrieben, ging IP3 davon aus, dass das Alufolienstück oder das Kabel ‚geladen‘ sein müsse, damit es zur Abstoßung kommt. IP3 argumentierte, dass es in einem offenen Stromkreis keine abstoßende Wirkung geben könne, da das Kabel nicht geladen sei. Hierbei vernachlässigte IP3 jedoch, dass es auch in offenen Stromkreisen Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche gibt, die durch die Batterie auf die Leiteroberfläche übertragen werden. Für zukünftige Interviews sollte daher ein Zwischenschritt eingefügt werden, der dieses Konzept deutlicher erklärt. Die zweite Aufgabe wurde nicht gestellt, da die Interviewerin den Eindruck hatte, dass die Konzentration von IP3 allmählich nachließ.

Bei der Konzeptidee 3.1 (Energieübertragung in elektrischen Systemen) wird die Akzeptanz als ‚grün-3‘ kodiert. Die Paraphrase hingegen kann nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet werden. Zunächst argumentierte IP3 mit der Elektronenflussrichtung. Nachdem die Interviewerin darauf hingewiesen hatte, dass die Linke-Hand-Regel wichtig sei, um die Paraphrase korrekt wiederzugeben, gelang es IP3 beim zweiten Anlauf.

Die Aufgabe zu dieser Konzeptidee wurde ebenfalls als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. IP3 gelang es zwar zu beschreiben, wie der Energiefluss durch das elektromagnetische Feld übertragen wird, verwendete jedoch den Begriff ‚Stromfluss‘ anstelle von ‚Energiefluss‘.

Die Akzeptanz der Konzeptidee 3.3 (Konzeptidee zum Rucksackmodell) wurde als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet. IP3 gab an, die Erklärung verstanden zu haben und hatte keine Rückfragen. Aufgrund der fortgeschrittenen Zeit und der nachlassenden Konzentration seitens IP3 wurden jedoch die Paraphrase und die Aufgabe ausgelassen.

Am Ende des Interviews wurde allgemeines Feedback von IP3 eingeholt. Dabei äußerte IP3 den Wunsch, im Unterricht den Fokus weniger auf Elektronen zu legen und stattdessen verstärkt

Batterien und deren Energieumwandlungen zu behandeln. Zudem bewertete IP3 die verwendeten Abbildungen als hilfreich und könnte sich 3D-Darstellungen als ergänzende Unterstützung vorstellen, hält diese jedoch nicht für zwingend erforderlich.

Das Interview mit IP3 verdeutlicht exemplarisch, welche Herausforderungen, aber auch welche Potenziale bei der Umsetzung des Lehr-Lern-Arrangements bestehen. Trotz sprachlicher Hürden und nachlassender Konzentration konnte IP3 an mehreren Stellen passende Zuordnungen treffen und nach gezielter Rückmeldung inhaltliche Korrekturen vornehmen. Zugleich machen die Ergebnisse deutlich, dass IP3 von zusätzlichen Hilfestellungen profitiert hätte, etwa durch gezielte Begriffsklärungen.

5.1.4 Diskussion und Überarbeitung des LLAs nach Runde 1

Im folgenden Abschnitt werden die geplanten Anpassungen für die nächste Runde der Akzeptanzbefragungen beschrieben und begründet. Sie basieren auf den Ergebnissen der qualitativen Inhaltsanalyse der ersten Interviewrunde, wie sie oben beschrieben wurden, sowie auf Rückmeldungen von Expert*innen der Fachdidaktik Physik, die unter anderem im Rahmen des GDGP-Doktorandenkolloquiums und bei Diskussionen in einem Forschungsseminar eingeholt wurden. Ziel ist es, das LLA gezielt zu überarbeiten, sodass sich in der zweiten Interviewrunde idealerweise eine Zunahme grüner Kodierungen zeigt.

5.1.4.1 Übersicht der Änderungen anhand der Ergebnisse aus Runde 1

Für die nächste Interviewrunde sollten basierend auf den Ergebnissen der ersten Runde gezielte Änderungen und Ergänzungen vorgenommen werden, um die Verständlichkeit der vermittelten Konzepte zu erhöhen. Die geplanten Anpassungen werden im Folgenden systematisch dargestellt.

Erster Block: K1, Elektrische Systeme als Energieübertragungssysteme

Im Rahmen der Analyse der ersten Interviewrunde zu Konzeptidee K1, die elektrische Systeme als Energieübertragungssysteme thematisiert, ergeben sich zwei zentrale Optimierungsmaßnahmen für die zweite Interviewrunde. Diese Anpassungen basieren auf der qualitativen Inhaltsanalyse und zielen darauf ab, sowohl die methodische Konsistenz als auch die kognitive Zugänglichkeit für die Interviewpartner*innen zu verbessern.

Erstens soll die Technik der Paraphrasierung in allen Interviews systematisch und einheitlich eingesetzt werden, um dem methodischen Anspruch der Akzeptanzbefragung gerecht zu werden. Die Paraphrase ermöglicht es, Aussagen der Interviewpartner*innen in eigenen Worten zu spiegeln und so Missverständnisse frühzeitig zu identifizieren. Um deren konsequente Anwendung sicherzustellen, wird der Interviewleitfaden um Kontrollkästchen ergänzt, die während

des Gesprächs von der Interviewerin aktiv abgehakt werden können. Auf diese Weise wird die Paraphrase als festes methodisches Element im Interviewprozess verankert, wodurch eine präzisere Erfassung der Verständnisebene ermöglicht wird.

Zweitens zeigte sich, dass die Interviewpartner*innen bei der Zuordnungsaufgabe teilweise dazu neigten, sich auf die Begriffsrekonstruktion statt auf die inhaltliche Analyse der dargestellten Komponenten zu konzentrieren. Um dieser kognitiven Überlastung entgegenzuwirken, sollen die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler künftig direkt neben den zugehörigen Bildern eingeblendet werden. Diese Maßnahme fokussiert die Aufmerksamkeit der Schüler*innen stärker auf die intendierte Aufgabe.

Zweiter Block: K2.1, Versuch zum magnetischen Feld

Die Analyse der ersten Interviewrunde zur Konzeptidee K2.1, die den Versuch zum Magnetfeld (B-Feld) thematisiert, lieferte insgesamt positive Rückmeldungen hinsichtlich der Verständlichkeit und Akzeptanz. Zwar wurde im Vorfeld überlegt, den Elektronenfluss in Form eines geschlossenen Rings zu visualisieren, um einer potenziellen Teilchenvorstellung entgegenzuwirken, wie sie in der Literatur beispielsweise von (Härtel, 1985) vorgeschlagen wird, jedoch ergab die Auswertung der Interviews keine Hinweise darauf, dass die aktuell eingesetzte Darstellung des Stromkreises bei den Interviewpartner*innen zu nennenswerten Missverständnissen führt. Aus diesem Grund wurde von einer entsprechenden Umgestaltung zunächst abgesehen.

Darüber hinaus verliefen die Interviews zu diesem Block weitgehend ohne größere Verständnisschwierigkeiten. Ein möglicher Grund hierfür liegt darin, dass das Konzept des Magnetfeldes im schulischen Kontext bereits im Rahmen des Ørsted-Versuchs eingeführt wurde und somit auf bestehende kognitive Strukturen zurückgegriffen werden konnte. Diese curriculare Anschlussfähigkeit scheint eine förderliche Voraussetzung zu sein, um das Konzept des Lern-Lehr-Arrangements (LLA) an dieser Stelle erfolgreich umzusetzen.

Zweiter Block: K2.2, Versuch zum elektrischen Feld

Die Auswertung der Interviews zur Konzeptidee K2.2, die sich mit dem Versuch zum elektrischen Feld (E-Feld) befasst, macht mehrere gezielte Anpassungen für die nächste Interviewrunde erforderlich. Um möglichen Verwechslungen zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld vorzubeugen, sollten diese künftig nicht nur farblich, sondern auch durch unterschiedliche Linientypen, etwa durch durchgezogene Linien für das eine und gestrichelte Linien für das andere, eindeutig voneinander unterschieden werden. Zusätzlich ist es sinnvoll, die Überschrift ‚Elektrisches Feld‘ direkt in die Abbildung zu integrieren, um den konzeptuellen

Fokus der Darstellung klar zu benennen und so die Abgrenzung zu verwandten Feldern zu unterstützen.

Ein weiterer kritischer Punkt betrifft die Einführung der Oberflächenladungen. Die Interviewergebnisse zeigen, dass einigen Schüler*innen nicht ausreichend deutlich war, dass Oberflächenladungen auch in offenen Stromkreisen eine Rolle spielen. In der dritten Interviewrunde sollte dieser Aspekt daher gezielter thematisiert und die zugrunde liegende physikalische Vorstellung explizit erläutert werden.

Ergänzend dazu sollte auch die Konzeptidee K4 fachlich präzisiert werden: Es ist deutlich zu machen, dass sich elektrische Felder grundsätzlich im Raum um elektrische Ladungen ausbilden, unabhängig davon, ob sich diese in einem geschlossenen oder offenen Stromkreis befinden. Diese Klarstellung trägt dazu bei, Missverständnissen hinsichtlich der Entstehung und des Wirkbereichs elektrischer Felder vorzubeugen.

Dritter Block: K3.1, Energieübertragung in elektrischen Systemen

Für die Konzeptidee K3.1 zur Energieübertragung in elektrischen Systemen sind mehrere gezielte Anpassungen erforderlich. Zunächst sollte im Rahmen der Paraphrase eine klar strukturierte Hilfestellung integriert werden, die explizit benennt, welche physikalischen Größen, beispielsweise das elektrische Feld, das magnetische Feld und der Energiefluss, in der Antwort berücksichtigt werden sollen.

Darüber hinaus ist, wie bereits oben angemerkt, eine visuelle Differenzierung der Feldarten dringend anzuraten. Durch unterschiedliche Linientypen (z. B. durchgezogen für das elektrische Feld und gestrichelt für das magnetische Feld) kann die Unterscheidung zwischen den beiden Feldern deutlich unterstützt werden.

Zudem sollte die Legende überarbeitet werden, um die Konstruktion des Energieflusses (durch das Kreuzprodukt von E- und B-Feld) fachlich klarer und didaktisch zugänglicher darzustellen. Eine präzisere Beschreibung in der Legende könnte wesentlich dazu beitragen, die Interpretation der Darstellung durch die Schüler*innen zu erleichtern und Missverständnisse zu vermeiden.

Dritter Block: K3.3, Rucksackmodell

In der Konzeptidee 3.3, die sich mit der gängigen Lernendenvorstellung zum ‚Rucksackmodell‘ (siehe Abschnitt 2.5.5.) beschäftigt, sollten die Aufgaben in der zweiten Interviewrunde genauer besprochen werden. Insbesondere empfiehlt es sich, das Konzept der Energieübertragung zusätzlich in alltagsnahen Kontexten zu besprechen, etwa im Hinblick auf die Effizienz

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

elektrischer Energieübertragungssysteme. Dies würde nicht nur das Verständnis festigen, sondern auch den Anwendungsbezug stärken und die Relevanz des Modells verdeutlichen.

Neben diesen inhaltlichen Ergänzungen werden auch die Bezeichnungen der Konzeptideen zur besseren Übersichtlichkeit geändert. Die neuen Bezeichnungen lauten wie folgt:

K1.1 → K1, K1.2 → K2, K2.1 → K3, K2.2 → K4, K3.1 → K5, K3.2 → K6, K3.3 → K7

5.1.4.2 Zusätzliche Änderungsvorschläge

Im Folgenden werden Aspekte vorgestellt, die durch den Input von Expert*innen der Fachdidaktik in verschiedenen Settings gesammelt wurden. Diese Anregungen flossen in die Überarbeitung des Interviewleitfadens für die zweite Runde ein.

Drei Settings spielten hierbei eine entscheidende Rolle:

1. ZLB Summer School 2021: Diese Summer School des Zentrums für Lehrer*innenbildung (ZLB) der Universität Wien diente als Plattform zur Präsentation der ersten Forschungsergebnisse. Dabei wurden die Erkenntnisse mit Professor*innen und anderen Doktorierenden der NAWI-Fachdidaktik intensiv diskutiert.
2. GDGP Doktorierendenkolloquium 2021: Das Online-Kolloquium der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP) bot ebenfalls Gelegenheit zur Vorstellung der ersten Forschungsergebnisse. Hier wurden die Erkenntnisse erneut mit Professorinnen und anderen Doktorierenden der NAWI-Fachdidaktik ausführlich besprochen.
3. Forschungsseminar am 30.11.2021: Im Rahmen dieses Seminars für Doktorierende an der Universität Wien wurde ein Vortrag über die Forschungsergebnisse der ersten Interviewrunde gehalten. Teilnehmer*innen waren Prädocs, Postdocs sowie ein Professor der Physikdidaktik. In einer anschließenden Diskussion wurden weitere Überarbeitungsvorschläge für die zweite Interviewrunde anhand der Interviewergebnisse erörtert.

Übernommene Änderungsvorschläge:

ZLB Summer School 2021:

- Zur besseren Unterscheidung des magnetischen und elektrischen Feldes werden in künftigen Feldliniendarstellungen durchgezogene und gestrichelte Linien verwendet. Dies erleichtert auch den Umgang mit den Materialien für Personen mit einer Farbsehschwäche.

GDCP Doktorierendenkolloquium 2021:

- Versuch zum magnetischen Feld: Statt des Versuchs mit der Strommesszange wird eine Kompassnadel zum Nachweis des Magnetfeldes verwendet (Ørsted Versuch). Dieses Messinstrument ist den meisten Schüler*innen bereits bekannt, was ein Vorteil bei der Erarbeitung der Inhalte sein könnte, indem die ‚cognitive load‘ (siehe Abschnitt 2.5.4) reduziert wird.
- Versuch zum elektrischen Feld: Hier sollte den Interviewpartner*innen zunächst gezeigt werden, dass das Alufolienstück zu Beginn des Versuches weder elektrostatisch noch magnetisch ist. Dies könnte beispielsweise mit dem Dazuhalten einer Plastikfolie demonstriert werden.
- Um die vielen, neuen Begriffe übersichtlicher zu machen, sollte ein Mindmap in der Mitte des Interviews eingebaut werden, auf das die Interviewteilnehmer*innen bei Bedarf zurückgreifen können.
- Bei der Abbildung zur Energieübertragung mittels des elektromagnetischen Feldes sollte zur besseren Übersicht der Poynting-Vektor (Energiefluss) in der Mitte des Stromkreises weglassen werden. Entsprechend müssen die Magnetfeldlinien nicht bis zur Mitte des Stromkreises gezeichnet werden.
- Zudem sollte die Energieumwandlung am Energieumwandler gezielt thematisiert werden, um keine potenziellen Schüler*innenvorstellungen zu bestärken.

Forschungsseminar 30.11.2021

- Um das wesentliche Konzept besser zu veranschaulichen, sollte zunächst das gesamte elektromagnetische Feld besprochen werden, bevor die Einzelfelder (E-Feld und B-Feld) im Detail vorgestellt werden. Der dritte Block könnte damit beginnen, dass das komplexe Bild zur Darstellung der Energieübertragung mittels Feldern mit den Schüler*innen wiederholt wird und erst anschließend der Übergang zum Wechselstromkreis thematisiert wird. Eine Animation des Ganzen könnte eine visuelle Unterstützung bieten.
- Damit der Übergang von den Einzelfeldern zum elektromagnetischen Gesamtfeld vereinfacht wird, sollte ein kognitives Stoppschild eingefügt werden. Dieses sollte darauf hinweisen, dass das elektromagnetische Feld kein separates Feld darstellt, sondern viel mehr die ‚Kombinierte Wirkung der Einzelfelder‘ darstellt.
- Zudem sollte die Ergänzung um ein weiteres kognitives Stoppschildes zur Differenzierung zwischen elektrischem und magnetischen Feld erfolgen.
- Bei der Behandlung des Wechselstromkreises sollten unbedingt die elektromagnetischen Wellen thematisiert werden. Dies könnte als Ausblick ergänzt werden.

5.1 Erste Runde der Akzeptanzbefragungen

- Bei der achten Konzeptidee (K8) sollte der Zusatz in der Klammer weggelassen werden. Dies sollte in der Lehrer*innenhandreichung als didaktisches Kommentar ergänzt werden, ist aber für die Lernenden an dieser Stelle nicht notwendig zu wissen.
- Bei der Erklärung zur sechsten Konzeptidee (K6) sollte die Energieübertragung von der Batterie zum Gerät beschrieben werden.
- Für den Versuch mit den Oberflächenladungen sollte das Alufolienstück auf einem roten Faden befestigt werden, damit er auf den Abbildungen und im Video besser sichtbar ist.

5.1.4.3 Abschließende Reflexion zur ersten Runde

Im Rahmen der ersten Interviewrunde wurden Leitfragen zur Akzeptanz des Unterrichtsdesigns und der Interviewstruktur untersucht, wie sie eingangs vorgestellt wurden. Im Folgenden sollen diese beantwortet werden.

*1) Wie wird das Unterrichtsdesign generell von den Schüler*innen angenommen?*

Die Analyse der qualitativen Inhalte zeigt, dass das neue Unterrichtsdesign grundsätzlich positiv von den interviewten Schüler*innen aufgenommen wurde. Die überwiegende Mehrheit der Schüler*innen zeigte keine starken Vorbehalte oder Ablehnung gegenüber dem Design. Dies wird durch die Auswertung der Daten in Tabelle 6 deutlich, die keine ‚rot-1‘-Kodierungen aufweist. Dennoch wurden einige Bereiche in den Ergebnissen identifiziert, die einer Verbesserung bedürfen, wie in Abschnitt 5.1.4.1 und 5.1.4.2 näher erläutert wurde. Diese Einsichten legen nahe, dass das Unterrichtsdesign weiterentwickelt werden sollte, wobei die Rückmeldungen der ersten Runde als Grundlage dienen. Für die zweite Interviewrunde wird daher ein überarbeiteter Interviewleitfaden erstellt, der sowohl die positiven Aspekte des aktuellen Designs berücksichtigt als auch gezielt auf potenzielle Verbesserungsmöglichkeiten eingeht.

*2) Welche Interviewdauer ist angemessen und für die Schüler*innen zumutbar, um ihre Aufmerksamkeit während der Befragung nicht zu überfordern?*

Die durchschnittliche Dauer der Interviews lag in dieser Interviewrunde zwischen einer halben Stunde und einer Stunde. Diese Spanne reflektiert unterschiedliche Bedürfnisse der Schüler*innen hinsichtlich ihrer Aufmerksamkeitsspanne während der Befragung. Kürzere Interviews wurden häufig bei leistungsstarken Schüler*innen beobachtet, die ihre Gedanken präzise formulieren konnten und weniger Rückfragen stellten. Andererseits ergaben sich längere Gespräche bei Schüler*innen, die vertiefte Diskussionen bevorzugten oder zusätzliche Erläuterungen benötigten. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass für die nächste Interviewrunde eine ähnliche Zeitspanne von etwa einer Stunde angemessen erscheint. Dies sollte insbesondere beim

Redesign des Interviewleitfadens berücksichtigt werden, da dieser in der nächsten Runde um einige spezifische Aspekte erweitert werden soll.

3) *Inwiefern ist die Verwendung eines Eingangsbeispiels als Einstiegsfrage notwendig für die Durchführung der Interviews?*

Ursprünglich war geplant, ein Eingangsbeispiel in dieser Interviewrunde zu verwenden, um den Interviewprozess zu erleichtern und den Redefluss der Schüler*innen zu fördern. Es stellte sich jedoch heraus, dass dies nicht erforderlich war, da die Schüler*innen zu Beginn der Interviews sehr motiviert und offen für neue Informationen waren. Für die nächsten Runden wird daher auf die Einstiegsfrage verzichtet und stattdessen die erste Konzeptidee wie die anderen Fragen nach dem 4-Schritte-Schema der Akzeptanzbefragungen behandelt.

Ein positiver Aspekt ist jedoch, dass es möglich war, während der Einführungsphase einige Alltagsbeispiele aus den Antworten der Schüler*innen zu sammeln. Diese Beispiele werden in der nächsten Runde genutzt, um das Unterrichtsdesign weiter zu kontextualisieren und zu vertiefen.

4) *Inwiefern fördert die Thematisierung der Schüler*innenvorstellungen zum ‚Rucksackmodell‘ das Verständnis der Interviewpartner*innen und sollte daher integraler Bestandteil des Unterrichtsdesigns sein?*

Das Austesten der Konzeptidee zum Rucksackmodell (Konzeptidee 3.3) erwies sich als praktikabel und stieß bei der Mehrheit der Schüler*innen auf Interesse. Schüler*innen, die in den Interviews damit konfrontiert wurden, erkannten die zugrundeliegenden Missverständnisse dieses Modells und konnten entsprechende Gegenargumente formulieren. Für die kommende Interviewrunde wird dieses Element daher fest in den Interviewleitfaden integriert, um umfassende Einblicke und Rückmeldungen von allen Schüler*innen zu erhalten. Dies soll dazu beitragen, die Akzeptanz des Modells weiter zu evaluieren und bei Bedarf Anpassungen vorzunehmen.

5.2 Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen

Die zweite Interviewrunde wurde von Januar bis März 2022 durchgeführt. Da sich zu dieser Zeit die Corona-Pandemie weltweit ausbreitete und in Österreich ein Lockdown verhängt wurde, mussten einige Interviews im Distance-Learning-Setting durchgeführt werden. Da es anfangs schwierig war, Interviewpartner*innen für diese Runde zu finden, dauerte die Durchführung aller Interviews in dieser Runde vergleichsweise am längsten.

Aufgrund der virtuellen Durchführung der Interviews ergaben sich folgende Anpassungen:

1. Versuche wurden nur als Video gezeigt:

Eine wesentliche Änderung bestand darin, die Versuche ausschließlich in Form von Videos zu präsentieren. Dies erwies sich grundsätzlich als praktikabel, da die Schüler*innen offenbar keine Schwierigkeiten im Umgang mit den Videodarstellungen hatten. Allerdings fehlte dabei das interaktive Element der praktischen Versuchsdurchführung. So konnten die Interviewpartner*innen beispielsweise beim Versuch mit der Strommesszange das Messgerät nicht selbst halten. Folglich bleibt unklar, ob sie das räumliche Auftreten des Magnetfeldes vollständig verstanden haben. Insbesondere ist nicht nachvollziehbar, ob sie die Strommesszange korrekt in die Nähe des Leiters geführt hätten. Zudem ist offen, ob die Schüler*innen in der Lage gewesen wären, die Strommesszange eigenständig zu bedienen, das Gerät zu öffnen, den Leiter zu umschließen und die Messwerte vom Display abzulesen.

2. Das Interview fand über Zoom oder Microsoft Teams statt:

Eine weitere grundlegende Anpassung betraf das Interviewformat, das in dieser Runde ausschließlich virtuell über Zoom oder Microsoft Teams durchgeführt wurde. Die Wahl der Plattform wurde den Interviewpartner*innen freigestellt. Ein wesentlicher Nachteil der virtuellen Durchführung bestand darin, dass die Kontrollierbarkeit der Umgebung der Schüler*innen eingeschränkt war. Beispielsweise kam es in einem Fall zu wiederholten Störungen, als der Akku des Computers erschöpft war und das Gerät nicht an eine Stromquelle angeschlossen werden konnte. Dadurch war die Interviewperson gezwungen, den Standort zu wechseln und sämtliche Materialien mitzunehmen. Zudem könnten laute Hintergrundgeräusche durch anwesende Personen in der unmittelbaren Umgebung die Konzentrationsfähigkeit der Befragten beeinträchtigt haben.

Ziel dieser Runde war die Durchführung und Auswertung der Interviews mithilfe des überarbeiteten Interviewleitfadens (siehe Abschnitt 5.2.2). Dabei sollten insbesondere die folgenden Leitfragen geklärt werden:

- 1) Inwiefern verbessern sich die Interviewergebnisse durch die Anpassung des Interviewleitfadens?*
- 2) Inwiefern beeinflusst die Änderung des Versuchsaufbaus beim Magnetfeldversuch (von der Strommesszange zum Kompass) die Genauigkeit und Interpretation der Ergebnisse durch die Schüler*innen?*
- 3) Wie wirkt sich die Implementierung einer Checkliste während des Interviews auf die Vollständigkeit der Datenerhebung und -kodierung aus?*

Für die Beantwortung dieser Fragen wird in Abschnitt 5.2.4.3 eine entsprechende Diskussion angeführt.

5.2.1 Beschreibung der Stichprobe

Die zweite Runde an Akzeptanzbefragungen wurde mit einer Stichprobe von sieben Schüler*innen (fünf weiblich, drei männlich) durchgeführt. Alle Teilnehmer*innen waren im Alter zwischen 16-17 Jahren und besuchten die 11. Schulstufe (7. Klasse) in zwei unterschiedlichen allgemeinbildenden höheren Schulen (AHS) in Wien. Bei einer dieser Schulen (Schule 2, siehe Tabelle 15 unten) handelt es sich, wie bereits in Runde 1, um ein bilingual geführtes Gymnasium (Englisch, Deutsch). Einige Schüler*innen sprechen Englisch als Erstsprache und weisen daher teilweise Ausdrucksschwierigkeiten im Deutschen auf. Dies ist in einigen Interviewpassagen ersichtlich und wurde bei der Auswertung berücksichtigt. Beispielsweise wurden kurze Passagen auf Englisch von der Interviewerin auf Deutsch wiederholt und von den Interviewpartner*innen bestätigt, um die korrekte Übersetzung zu gewährleisten. Die Transkripte wurden teilweise geglättet, um die Lesbarkeit zu verbessern. Dabei wurde darauf geachtet, nur kleine Anpassungen an Artikeln und Zeitformen vorzunehmen, ohne ganze Wörter auszutauschen. Dies war besonders wichtig, da die Wortwahl in einigen Textstellen eine wesentliche Rolle spielt, insbesondere in der Phase der Paraphrase, in der ein besonderes Augenmerk auf die Begriffe der Interviewpartner*innen gelegt wird.

Die Darstellung der Stichprobe ist in Tabelle 15 dargestellt. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Interviewpartner*innen IP12, IP13 und IP14 das gleiche, bilinguale Gymnasium besuchen.

Tabelle 15: Stichprobe für Interviewrunde 2.
(*Bei Schule 2 handelt es sich um ein bilinguales Gymnasium)

ID	Schule	Schulstufe	Letzte Physiknote	Interesse (1 = gar nicht; 5 = sehr hoch)	Dauer des Interviews
IP8	Schule 1	11. Schulstufe	3	2	01:01:35
IP9	Schule 1	11. Schulstufe	1	4	01:00:46
IP10	Schule 1	11. Schulstufe	2	3	01:09:11
IP11	Schule 1	11. Schulstufe	1	5	01:11:35
IP12	Schule 2*	11. Schulstufe	1	4	00:59:56
IP13	Schule 2*	11. Schulstufe	1	4	00:51:20
IP14	Schule 2*	11. Schulstufe	1	4	01:00:56

Anhand Tabelle 15 kann man sehen, dass die Interviews jeweils ungefähr eine Stunde dauerten.

Laut eigenen Angaben der Interviewpartner*innen wurden sie im Fach Physik im letzten Jahr mit der Note 'Sehr gut' (1) bis 'Befriedigend' (3) beurteilt (siehe Tabelle 15). Zu Beginn des Interviews wurde zudem das durchschnittliche Interesse der Schüler*innen am Fach Physik auf einer Likert-Skala von 1 ('gar nicht interessiert') bis 5 ('sehr hohes Interesse') erhoben. Die meisten Schüler*innen gaben an, dass ihr Interesse an Physik 'hoch' sei (IP9, IP12, IP13, IP14). Eine Person gab an, dass sie 'durchschnittliches Interesse' habe (IP10). Darüber hinaus gab jeweils eine Person an, 'kaum Interesse' (IP10) beziehungsweise 'sehr hohes Interesse' (IP11) zu haben.

5.2.2 Interviewleitfaden

Der Interviewleitfaden aus Runde 2 basiert auf den Ergebnissen aus Interviewrunde 1 (siehe Abschnitt 5.1.3). Die didaktischen Entscheidungen, die zur Überarbeitung dieses Interviewleitfadens geführt haben, wurden bereits in Abschnitt 5.1.4.1 und 5.1.4.2 ausgeführt. Im Folgenden soll die Version des Interviewleitfadens vorgestellt werden, die für die Durchführung der Interviews in Runde 2 verwendet worden ist.

Eine wichtige Neuerung des Interviewleitfadens ist, die Gliederung in drei Blöcke¹². Diese beinhalten jeweils zwei bis vier Konzeptideen und erlauben es, je nach Bedarf, Pausen während der Interviews einzuhalten. So hätte das Interview beispielsweise an zwei Terminen, anstatt einem, abgehalten werden können. Dies sollte bei der Gesamtlänge der Interviews von zirka einer Stunde dabei helfen, die Aufmerksamkeit durchwegs aufrecht zu erhalten. In dieser Interviewrunde entschieden sich allerdings alle Interviewpartner*innen dafür, das Interview in einem Zug durchzuführen. Entgegen der ursprünglichen Annahme zeigten die Schüler*innen am Ende der Interviews keine Anzeichen von Ermüdung, im Gegenteil: Häufig entwickelten sich im Anschluss noch sehr aufschlussreiche und anregende Diskussionen. Ein möglicher Grund hierfür könnte die Einführung einer Mindmap-Aufgabe zwischen dem zweiten und dritten Interviewblock sein, die zumindest eine kurze Unterbrechung im Ablauf darstellte und somit für eine kleine mentale Pause sorgte.

Eine weitere zentrale Neuerung besteht darin, dass die Interviews nun mit dem Hinweis beginnen, dass elektrische Systeme Energie übertragen können. Dadurch wird von Beginn an deutlich gemacht, worum es im weiteren Verlauf des Interviews inhaltlich geht.

¹² Zum Vergleich: In der Interviewrunde 1 wurde die Gliederung in drei Blöcke erst im Auswertungsschritt vorgenommen. Die drei Blöcke waren aber noch nicht im Interviewleitfaden enthalten.

Zudem wurde eine überarbeitete visuelle Unterstützung in Form einer PowerPoint-Präsentation integriert. Diese enthält Grafiken und Fotografien, die während des Gesprächs eingesetzt werden, um das Verständnis zu fördern und zentrale Inhalte anschaulich zu vermitteln.

5.2.2.1 Erster Block

Der erste Block dieser Interviewrunde beschäftigt sich mit dem Thema ‚Elektrische Energieübertragungssysteme‘. Eine Übersicht der Konzeptideen zu diesem Block sind in folgender Tabelle (Tabelle 16) zu sehen:

Tabelle 16: Konzeptideen für den ersten Block zu elektrischen Energieübertragungssystemen aus der zweiten Interviewrunde.

K1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z. B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) <i>oder</i> kabellosen Systemen (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
K2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z. B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z. B. Leiterkabel).

In der ersten Konzeptidee (K1) zu diesem Interviewabschnitt wird zunächst allgemein erläutert, was man unter einem ‚elektrischen System‘ versteht und wie es identifiziert werden kann. Den Schüler*innen wird erklärt, dass ein elektrisches System sowohl einen Energieumwandler als auch eine Energiequelle und manchmal ein Übertragungsmedium wie ein Kabel beinhaltet. In diesem Zusammenhang werden sowohl kabelgebundene Systeme (z. B. elektrischer Mixer, Föhn) als auch kabellose Systeme (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen von Smartphones) besprochen. Die Schüler*innen werden im Anschluss jeweils nach weiteren Beispielen für kabelgebundene und kabellose elektrische Systeme gefragt, um mehr Beispiele für die Kontextualisierung zu sammeln.

Im Rahmen der zweiten Konzeptidee (K2) werden den Schüler*innen einige grundlegende Begriffe wie ‚Energieumwandler‘ und ‚Energiequelle‘ vorgestellt. Angesichts der Vielzahl an Begriffen, insbesondere für ‚Energiequelle‘ (alternative Begriffe sind z. B. Stromquelle, Spannungsquelle, Batterie, Generator), wird ab diesem Zeitpunkt konsequent die gewählte Terminologie verwendet, um die sprachliche Kohärenz im weiteren Verlauf zu fördern.

Der Begriff ‚Energieumwandler‘ wird gewählt, um den Fokus auf die Umwandlung von Energie am elektrischen Gerät zu legen. So wird beispielsweise im Verlauf der Interviews die Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie an einem Ventilator besprochen. Der häufig

5.2 Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen

verwendete Begriff ‚Verbraucher‘ wird in diesem Konzept bewusst vermieden, um einer Vorstellung von Energie- oder Stromverbrauch entgegenzuwirken (siehe Abschnitt 2.5.5).

In dieser Interviewrunde folgt auf die Erklärung der Konzeptideen K1 und K2 zunächst eine Frage nach der Akzeptanz („Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Findest du die gewählten Begriffe passend?“). Wenn es an dieser Stelle keine weiteren Fragen gibt, werden die Schüler*innen gebeten, die Erklärung zu paraphrasieren.

Anschließend folgen zwei Aufgaben: In Aufgabe 1 sehen die Schüler*innen ein Bild eines elektrischen Föhns als Beispiel für ein kabelgebundenes, elektrisches System, das über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden ist. Die Schüler*innen sollen hier die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zuordnen. Sie sollen erkennen, dass der Föhn selbst als Energieumwandler bezeichnet wird, da er elektrische Energie in thermische Energie umwandelt, und dass die Steckdose die Energiequelle darstellt, da sie die Verbindung zu einem Kraftwerk liefert.

In Aufgabe 2 wird ihnen ein Bild einer elektrischen Zahnbürste auf einer Ladestation als Beispiel eines kabellosen elektrischen Systems gezeigt. Dabei sollen die Schüler*innen die Begriffe Energieumwandler und Energiequelle erneut korrekt zuordnen. Ziel ist es, dass die Schüler*innen erkennen, dass die elektrische Zahnbürste als Energieumwandler fungiert, da sie, sobald sie eingeschaltet wird, elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt. Die Ladestation hingegen wird als Energiequelle bezeichnet.

5.2.2.2 Zweiter Block

Der zweite Block der zweiten Interviewrunde besteht aus vier Konzeptideen (siehe Tabelle 17). Zu Beginn des zweiten Blocks wird zunächst geklärt, dass die Energieübertragung in elektrischen Systemen durch elektromagnetische Felder erfolgt und dass dieser Zusammenhang im Folgenden diskutiert werden soll. Dadurch wird den Interviewpartner*innen von Beginn an ein konkretes Ziel vorgegeben und sie erlangen Einsicht darin, warum zunächst das elektrische und dann das magnetische Feld getrennt betrachtet werden.

Anschließend wird das magnetische, dann das elektrische Feld einzeln behandelt. Zuletzt werden die beiden Konzepte vereint und das elektromagnetische Feld besprochen, welches die Grundlage dafür bildet, die Energieübertragung in elektrischen Systemen mithilfe des Energieflusses zu beschreiben.

Für besonders interessierte Schüler*innen gibt es die Möglichkeit, eine Erweiterung in Form der Konzeptidee zum Poynting-Vektor zu besprechen.

Tabelle 17: Konzeptideen für den zweiten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen) aus der zweiten Interviewrunde.

K3	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein magnetisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden.
K4	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein elektrisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohalm, Alufolienstück) bestimmt werden.
K5	Die Energieübertragung findet durch das elektromagnetische Feld statt. Dies kann mit dem Energiefluss beschrieben werden.
K6	Der Poynting-Vektor beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld mathematisch.

Im Rahmen der ersten Konzeptidee für diesen Abschnitt (K3) wird zunächst das magnetische Feld eingeführt. Dafür wird ein Hands-on-Versuch durchgeführt, bei dem jeweils eine Hälfte der Interviewpartner*innen eine unterschiedliche Variation des Versuchs präsentiert bekommt. In der ersten Variante des Versuchs wird eine Strommesszange verwendet, wie bereits in Interviewrunde 1 beschrieben (siehe Abschnitt 5.1.2.2 Zweiter Block). Die Schüler*innen erhalten lediglich die Information, dass es sich um ein Messgerät handelt, ohne jedoch nähere Angaben zur Art des Geräts zu bekommen. Auf dem Display wird zu Beginn 0.00 Ampere angezeigt. Anschließend wird die Strommesszange um einen stromdurchflossenen Leiter gehalten, beispielsweise ein Laptopkabel, das den Laptop mit der Steckdose verbindet. Das Display zeigt dann einen Wert an, der größer als 0.00 Ampere ist.

Im nächsten Schritt werden die Vermutungen der Schüler*innen durch zwei Fragen gesammelt

- Was könnte die Strommesszange um den Leiter messen?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Daraufhin folgt eine Erklärung des beobachteten Versuchs. Den Schüler*innen wird verdeutlicht, dass um einen stromdurchflossenen Leiter (AC) ein (wechselndes) Magnetfeld entsteht. Durch das Umgreifen des Leiters mit der Strommesszange kann dieses Magnetfeld mithilfe eines weichmagnetischen Kerns bestimmt werden. Die Darstellung dieses magnetischen Feldes erfolgt durch kreisförmige Magnetfeldlinien um den Leiter. Zur Unterstützung wird den Schüler*innen eine entsprechende Repräsentation der Feldlinien gezeigt (siehe Abbildung 31).

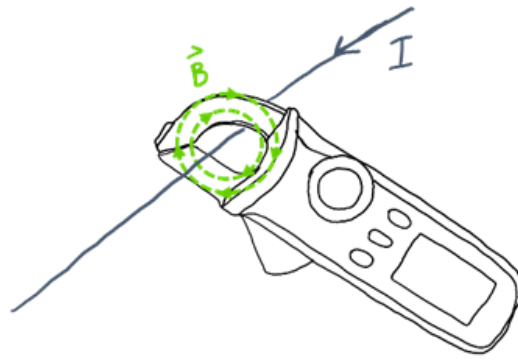


Abbildung 31: Darstellung, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 2 zur Konzeptidee K2.1 bei der Variation a gezeigt wird.

Diese Abbildung unterscheidet sich zur Abbildung in Interviewrunde 2, da hier die Magnetischen Feldlinien strichliert gezeichnet wurden und zur besseren Sichtbarkeit etwas größer gemacht wurden.

An dieser Stelle wird mit den Schüler*innen die Anwendung der Linken-Hand-Regel besprochen. Mit dieser kann die Richtung der Magnetfeldlinien bestimmt werden, indem man den Daumen der linken Hand in Elektronenrichtung zeigt und die restlichen Finger um den Leiter legt, wobei die Richtung der gekrümmten Finger dann den Feldlinienverlauf anzeigt (siehe Abschnitt 2.2.2).

Gemäß der Methode der Akzeptanzbefragung wird nach der Bestätigung und Paraphrase der Schüler*innen eine Aufgabe gestellt. Dabei werden die Schüler*innen gefragt, ob die Strommesszange auch in einem offenen Stromkreis einen positiven Wert anzeigen würde (z. B. wenn der Energieumwandler nicht angesteckt ist). Diese Frage wird dann gemeinsam mit der Strommesszange überprüft.

Die zweite Hälfte der Schüler*innen erhält eine Variante dieses Versuchs: Präsentiert wird ein einfacher Stromkreis, bestehend aus einer 4,5V-Flachbatterie und einem langen Kabel mit Krokodilklemmen, das an den Batteriepolen angeschlossen ist. Anschließend wird ein Kompass unter das Leiterkabel gehalten, um die Ausrichtung der Kompassnadel zu beobachten.

Danach werden die Vermutungen der Schüler*innen durch zwei Fragen gesammelt:

- Wofür kann ein Kompass verwendet werden?
- Was befindet sich in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Die Auslenkung der Kompassnadel wird durch die Entstehung eines Magnetfeldes um den stromdurchflossenen Leiter erklärt, welches durch Magnetfeldlinien beschrieben werden kann.

Den Schüler*innen wird an dieser Stelle eine Skizze von geschlossenen, kreisförmigen Magnetfeldlinien um den Leiter gezeigt. Es wird betont, dass diese Feldliniendarstellung lediglich ein anschauliches Modell ist und nicht die Realität wiedergibt. Zudem wird die Stromrichtung von Minus nach Plus als Elektronenflussrichtung eingeführt (siehe Abbildung 32).

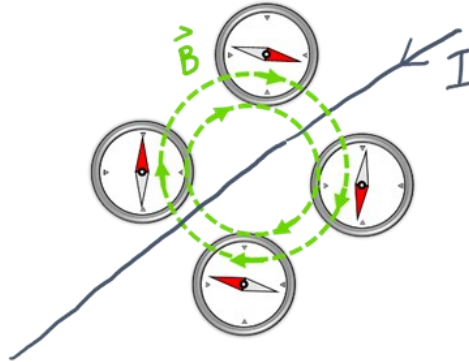


Abbildung 32: Darstellung, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 2 zur Konzeptidee K2.1 bei der Variation b gezeigt wird.

Bei dieser Variation wird ebenfalls im Anschluss an die Erklärung die Verwendung der Linken-Hand-Regel geübt, wie oben beschrieben.

Nach der Bestätigung und Paraphrase der Schüler*innen wird eine ähnliche Aufgabe wie bei der ersten Variation gestellt: Die Schüler*innen werden gefragt, warum sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht ausrichtet. Die Schüler*innen sollen auch hier erkennen, dass sich die Kompassnadel nur dann ausrichtet, wenn der Stromkreis geschlossen ist und sich ein Magnetfeld um den Leiter bildet.

Nach der Konzeptidee wird ein kognitives Stoppschild eingebaut (siehe Abbildung 33).

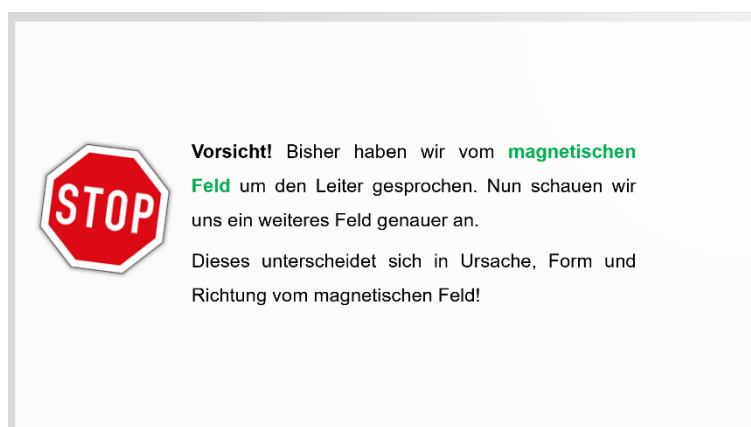


Abbildung 33: Kognitives Stoppschild zur Unterscheidung des magnetischen und elektrischen Feldes in Interviewrunde 2.

Die Schüler*innen werden darauf hingewiesen, dass bisher über das magnetische Feld um den Leiter gesprochen wurde. Im folgenden Verlauf soll dagegen ein weiteres Feld genauer betrachtet werden. Die Schüler*innen werden darauf hingewiesen, dass sich dieses in Ursache, Form und Richtung vom magnetischen Feld unterscheidet. Dadurch soll der Fokus darauf gelegt werden, dass es sich um ein anderes Feld handelt¹³.

Nach dem kognitiven Stoppschild folgt die Besprechung der vierten Konzeptidee (K4). Den Schüler*innen wird dazu ein Demonstrationsversuch als Video präsentiert, der bereits in der ersten Interviewrunde zum Einsatz kam. In diesem Versuch wird eine Hochspannungsquelle mit fünf in Reihe geschalteten Widerständen verbunden. Anschließend wird ein Stück Alufolie in die Nähe der Widerstände gebracht. Im Video ist zu beobachten, wie es zu einer elektrostatischen Anziehung und Abstoßung kommt (eine detailliertere Beschreibung findet sich in Abschnitt 5.1.2.2).

Nach der Beobachtung werden die Gedanken der Schüler*innen mit zwei gezielten Fragen gesammelt:

- Was könnte dazu führen, dass das Alufolienstück angezogen / angestoßen wird?
- Was ist in der Umgebung eines Leiters?

Anschließend wird das beobachtete Phänomen folgendermaßen erklärt: Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein elektrisches Feld. Bringt man ein kleines Stück Alufolie oder einen elektrostatisch geladenen Strohalm in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung beobachtet werden (Anziehung oder Abstoßung). Dies kann mithilfe des Modells der Oberflächenladungen erklärt werden: Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen. Das elektrische Feld kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden, die von Plus zu Minus verlaufen. Die Richtung des elektrischen Feldes hat historische Hintergründe. Die Oberflächenladungen erzeugen am Leiter ein elektrisches Feld, das auch im geschlossenen Stromkreis aufrecht erhalten bleibt. Dieses elektrische Feld übt eine Kraft auf die Elektronen im Inneren des Leiters aus und bewirkt ihre Bewegung entlang des Stromkreises, sobald dieser geschlossen ist (siehe Abschnitt 2.1.1.2).

Die Schüler*innen werden nach der Erklärung gefragt, ob diese für sie verständlich war (Akzeptanz), bevor sie darum gebeten werden, die Erklärung nochmals zu wiederholen (Paraphrase).

¹³ In der Auswertung der ersten Interviewrunde hatte sich gezeigt, dass einige Schüler*innen das magnetische Feld mit dem elektrischen Feld verwechselt hatten (siehe Abschnitt 5.1.3.2).

Anschließend folgen zwei Aufgaben: In der ersten Aufgabe sollen die Schüler*innen, ähnlich wie beim magnetischen Feld, die Frage beantworten, ob das Alufolienstück in einem offenen Stromkreis auch abgelenkt oder angezogen wird. Die Schüler*innen sollten hier erkennen, dass es auch in einem offenen Stromkreis zur Ansammlung von Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche kommt und deshalb ein elektrisches Feld um den Leiter entsteht, welches für die elektrostatische Wechselwirkung sorgt.

In der zweiten Aufgabe werden die Schüler*innen gebeten, ein Beispiel aus dem Alltag zu nennen, bei dem ein elektrisches Feld um ein elektrisches System entsteht. Die Schüler*innen sollen hier erkennen, dass es um jedes elektrische System, das an eine Energiequelle angeschlossen ist, ein elektrisches Feld geben muss. Beispiele dafür wären die zu Beginn des Interviews genannten elektrischen Systeme wie der elektrische Föhn, der mit der Steckdose verbunden ist, oder die elektrische Zahnbürste auf der induktiven Ladestation.

Vor der fünften Konzeptidee (K5) dieser Interviewrunde wird wieder ein kognitives Stoppschild eingeführt (siehe Abbildung 34).

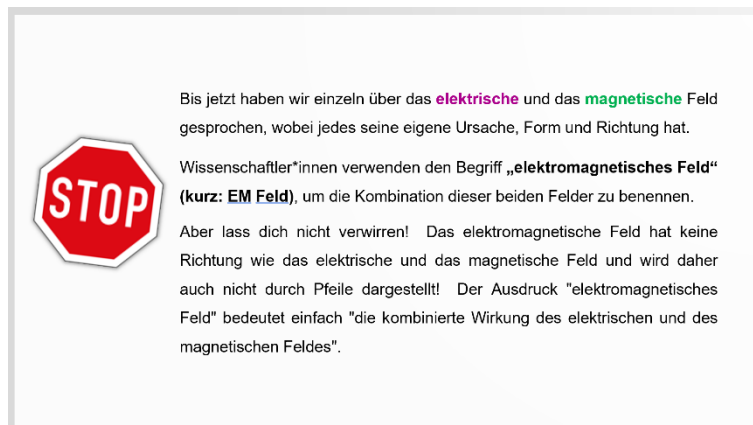


Abbildung 34: Kognitives Stoppschild zur Einführung des Begriffs ‚elektromagnetisches Feld‘ in Interviewrunde 2.

Hierbei werden die Schüler*innen darauf hingewiesen, dass es sich beim elektromagnetischen Feld, das im Folgenden besprochen wird, nicht etwa um ein drittes Feld handelt, sondern um die ‚kombinierte Wirkung‘ des magnetischen und elektrischen Feldes.

In der darauffolgenden Konzeptidee (K5) wird mit den Schüler*innen wiederholt, dass es ein elektrisches Feld aufgrund der Oberflächenladungen gibt, das für den Stromfluss sorgt. Der

Stromfluss erzeugt wiederum ein Magnetfeld um den Leiter. Gemeinsam ergeben sie das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel¹⁴ für die linke Hand hergeleitet werden.

In diesem Zusammenhang wird die Energie-Hand-Regel für die linke Hand zur Bestimmung des Energieflusses besprochen: Stehen das E-Feld und das B-Feld senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss senkrecht darauf einzeichnen (siehe Abbildung 35).

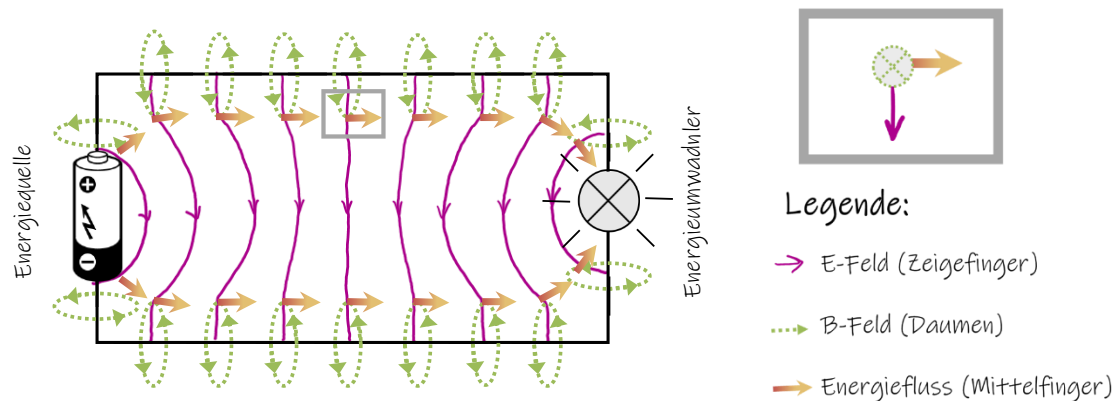


Abbildung 35: Darstellung des elektromagnetischen Feldes um einen einfachen Stromkreis, bestehend aus einer Energiequelle, Kabeln und einem Energiewandler. Zu sehen sind das elektrische Feld, magnetische Feld und der Energiefluss, sowie eine Referenz zur Linken-Hand Regel, die im Rahmen der Konzeptidee K5 in Interviewrunde 2 gezeigt wird.

Mit besonders interessierten Schüler*innen kann an dieser Stelle auch die sechste Konzeptidee (K6) besprochen werden. Dabei wird den Schüler*innen erklärt, dass es auch einen mathematischen Hintergrund zum Energiefluss gibt, den man Poynting-Formalismus nennt. Das Kreuzprodukt aus dem magnetischen und elektrischen Feld ergibt den Energiefluss $\vec{S}$ gemäß der Formel $\vec{S} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right) (\vec{E} \times \vec{B})$. Da es sich hierbei um einen sehr komplexen Sachverhalt für die Sekundarstufe II handelt, wird dies aber nur besprochen, falls die Schüler*innen von sich aus Interesse zeigen.

Nach der Akzeptanz und Paraphrase wird den Schüler*innen die folgende Aufgabe gestellt: Die Schüler*innen sollen begründen, warum ein Ventilator, der mit einer Batterie verbunden ist, scheinbar sofort zu drehen beginnt und woher die Energie kommt, um diesen zu betreiben. Die Schüler*innen sollen für ihre Antwort auf das Konzept der elektromagnetischen Felder und des

¹⁴ **Energie-Hand-Regel für die Linke Hand:** Der Daumen zeigt in die Richtung des Magnetfeldes, der Zeigefinger in die Richtung des elektrischen Feldes und der Mittelfinger in Richtung des Energieflusses.

Energieflusses zurückgreifen und erklären, dass die Energie durch die Felder übertragen wird und dieser Prozess nicht in den Leiterkabeln, sondern im umgebenden Raum stattfindet.

Anders als in Interviewrunde 1 wird den Schüler*innen an dieser Stelle zur Ergänzung die Aufgabe gegeben, ein Mind-Map zu gestalten, in dem alle bisher erwähnten Begriffe übersichtlich geordnet werden sollten (siehe Abbildung 36 für ein Beispiel). Dies sollte mehr Klarheit verschaffen und eine praktische Referenz für die folgenden Aufgaben bieten, da die Schüler*innen diese Mind-Map für die restlichen Aufgaben verwenden durften.

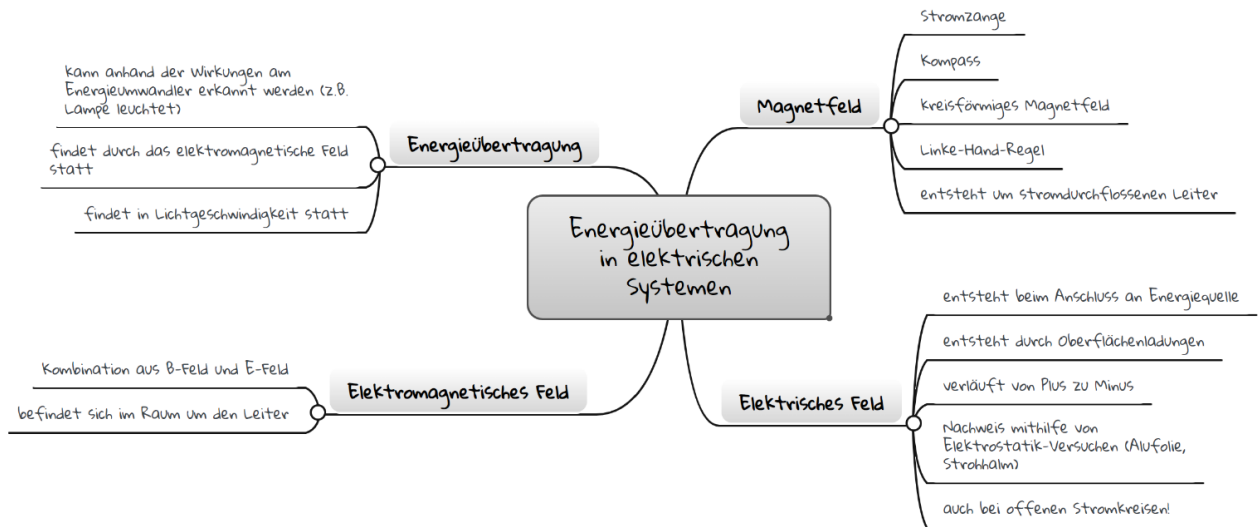


Abbildung 36: Beispielhafte Mind-Map zur Organisation der Begriffe für Interviewrunde 2. Das Diagramm wurde exemplarisch erstellt und stellt kein direktes Ergebnis der Interviews dar.

5.2.2.3 Dritter Block

Im dritten und letzten Abschnitt wird die Erklärung zur Energieübertragung in elektrischen Systemen noch weiter vertieft. Hierbei werden Gleich- und Wechselstromkreise besprochen, um darauf hinzuweisen, dass der Energiefluss in beiden Systemen nach demselben Prinzip konstruiert werden kann. Darüber hinaus wird noch größere Betonung auf die Energieumwandlung gelegt, um der oben beschriebenen ‚Verbrauchervorstellung‘ entgegenzuwirken. Zuletzt beinhaltet dieser Abschnitt noch eine Vorstellung zum Prozess der Energieübertragung. Hier wird thematisiert, dass die Energieübertragung in Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld stattfindet. Damit können gängige Fehlvorstellungen, wie das ‚Rucksackmodell‘ (siehe Abschnitt 2.5.5) thematisiert werden. Eine Übersicht der Konzeptideen für diesen Block ist in Tabelle 18 zu sehen.

Tabelle 18: Konzeptideen für den dritten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung) aus der zweiten Interviewrunde.

K7	Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld kann sowohl bei Gleich- als auch Wechselstromkreisen erfolgen.
K8	Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z. B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
K9	Die Energieübertragung findet in Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld statt.

Im Rahmen der siebten Konzeptidee wird mit den Schüler*innen zunächst wiederholt, dass ein elektrisches System aus einer Energiequelle und einem Energieumwandler besteht. Außerdem wird manchmal ein Übertragermedium (z. B. Leiterkabel) benötigt. Die Energiequelle (z. B. Batterie) pumpt Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche, die ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter hervorrufen. Gemeinsam ergeben das elektrische und das magnetische Feld um den Leiter das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden. Zudem wird den Schüler*innen erklärt, dass sich die Elektronen bei einem Gleichstromkreis im Leiter vom Minus- zum Pluspol bewegen, während sie sich in Wechselstromkreisen hin- und her bewegen.

Nach der Akzeptanz und Paraphrase dieser Erklärung wird den Schüler*innen eine Aufgabe zu dem Thema gestellt: Dabei werden die Schüler*innen darauf hingewiesen, dass sich Elektronen in Gleichstromkreisen gerichtet vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle bewegen. Bei Wechselstromkreisen hingegen bewegen sie sich hin- und her. Ergänzend werden hier zwei Skizzen gezeigt (siehe Abbildung 37).

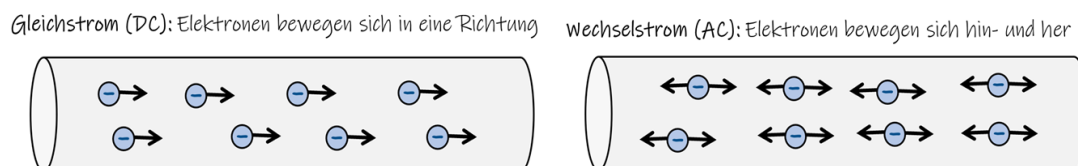


Abbildung 37: Unterscheidung von Gleich- und Wechselstromkreisen in Interviewrunde 2.

Die Schüler*innen sollen erklären, wie die Energie in Wechselstromkreisen übertragen wird. Dabei wird besonders darauf geachtet, dass sie das Erklärungsmodell mithilfe der elektromagnetischen Felder nutzen.

Sie sollen beschreiben, dass der Energiefluss auch in einem Wechselstromkreis von der Energiequelle zum Energieumwandler verläuft. Dies kann gegebenenfalls mithilfe der Energie-Hand-Regel demonstriert werden.

Für die achte Konzeptidee (K8) wird den Schüler*innen zunächst erklärt, dass die Bestandteile eines elektrischen Systems durch ein elektromagnetisches Feld miteinander verbunden sind. Das elektromagnetische Feld breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit von der Energiequelle zum Elektrogerät aus und überträgt dabei die Energie. In einem idealen Stromkreis entspricht die abgegebene Energie der Energiequelle der aufgenommenen Energie am Energieumwandler (Energieerhaltung). In der Praxis wird jedoch ein Teil der Energie als Wärme an die Umgebung abgegeben.

Nach der Akzeptanz und Paraphrase dieser Idee wird den Schüler*innen wieder eine Aufgabe gestellt. Sie sollen erklären, woran sie bei einem elektrischen Föhn oder einer elektrischen Zahnbürste erkennen können, dass Energie übertragen wurde. Ergänzend können sie auch erläutern, welche Energieumwandlung beim Energieumwandler stattfindet.

Für die neunte Konzeptidee wird mit den Schüler*innen besprochen, dass die Elektronen im Leiterinneren nicht die Energie transportieren, die zum Betrieb der Glühlampe notwendig ist (sie bewegen sich in einem langsamen Tempo von etwa $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$). Ihre kontinuierliche Bewegung ist jedoch notwendig, damit ein elektromagnetisches Feld existieren kann.

Nach der Akzeptanz und Paraphrase dieser Idee sollen die Schüler*innen erklären, warum die Elektronen auch in einem Wechselstromkreis nicht für die Energieübertragung im Stromkreis verantwortlich sein können. Sie sollen erkennen, dass sich die Elektronen in einem Wechselstromkreis hin und her bewegen und daher nicht alle beim Energieumwandler ankommen. Stattdessen ist das sich ständig wechselnde elektromagnetische Feld für die Energieübertragung im Raum um den Leiter verantwortlich.

5.2.3 Ergebnisse

Erster Block: Konzeptidee 1

Für die zweite Interviewrunde wurden die Akzeptanzbefragungen, wie bereits in Interviewrunde 1, transkribiert¹⁵ und anschließend mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2018) ausgewertet (siehe Abschnitt 3.4). Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle (siehe Tabelle 19) zu sehen. In der linken Spalte sind die einzelnen Codes gemäß dem Interviewleitfaden der zweiten Runde aufgeführt. Dabei wurden folgende Abkürzungen verwendet:

¹⁵ Die Transkripte der zweiten Interviewrunde wurden aufgrund ihres Umfangs nicht in den Anhang aufgenommen und können bei der Autorin angefordert werden.

5.2 Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen

B – Bestätigung / Akzeptanz

P – Paraphrase

A – Aufgabe

Jede der folgenden Spalten zeigt die Ergebnisse der jeweiligen Interviewpartner*innen (IP8 bis IP14). Die Bewertung der Aussagen erfolgte – analog zur ersten Interviewrunde – nach dem sogenannten ‚Traffic-Light-Prinzip‘ in den Farben grün, orange, rot und weiß, wobei den Farbcodes numerische Werte von 0 bis 3 zugeordnet wurden (siehe Tabelle 7).

In der rechten Spalte ist der Mittelwert der jeweiligen Codes über alle Interviews hinweg (Querschnitt) angegeben.

Tabelle 19: Übersicht der Kodierungen für die zweite Runde an Akzeptanzbefragungen.

	Code	IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$	$\bar{x}$
Block 1	B1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,75
	P1	3	3	3	3	3	2	2	2,71	
	A1.1	3	3	3	2	2	2	3	2,57	
	A1.2	3	2	3	2	3	3	3	2,71	
Block 2	B3a	3	3	3	3	0	0	0	3,00	2,92
	P3a	3	3	3	3	0	0	0	3,00	
	A3a	3	2	3	3	0	0	0	2,75	
	B3b	0	0	0	0	3	3	3	3,00	2,89
	P3b	0	0	0	0	3	3	2	2,67	
	A3b	0	0	0	0	3	3	3	3,00	
	B4	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,57
	P4	3	2	2	3	3	2	3	2,57	
	A4.1	2	2	2	3	2	2	2	2,14	
	A4.2	2	3	2	3	3	3	2	2,57	
	B5	2	3	3	3	3	3	3	2,86	2,71
	P5	3	2	3	3	3	2	3	2,71	
	A5	2	3	2	3	2	3	3	2,57	
	B7	2	3	3	3	3	3	3	2,86	2,57
	P7	2	3	2	3	3	3	2	3,00	
	A7	2	2	1	2	2	2	2	1,86	
Block 3	B8	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,71
	P8	1	0	3	3	3	2	3	2,14	
	A8	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	B9	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,67
	P9	2	2	3	3	3	3	3	2,71	
	A9	1	2	3	3	3	2	2	2,29	
	$\bar{x}$	2,48	2,52	2,70	2,87	2,83	2,65	2,70	2,72	

Im Folgenden werden die Interrater-Reliabilität der Ergebnisanalyse, die Quer- und Längsschnittdanalysen der zweiten Interviewrunde sowie die Auswertung der Mindmaps beschrieben.

5.2.3.1 Interrater Reliabilität für Runde 2

Analog zur ersten Interviewrunde (siehe Abschnitt 5.1) wurde auch in dieser Runde bei einem von sieben Interviews die Interrater-Reliabilität mittels Cohens-Kappa bestimmt. Die Berechnung erfolgte wieder gemäß Formel (1). In dieser Runde wurde ein Wert von $\kappa = 0,45$ erzielt. Laut der Literatur wird dieser Wert als „moderate“ bezeichnet (Landis&Koch, 1977, S. 165) und liegt damit im mittleren Bereich der Bewertungsskala. Im Vergleich zur ersten Runde, in der eine höhere Übereinstimmung erzielt wurde, ist dieser Wert als geringer einzustufen.

Die Abweichung ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in drei Fällen eine Codierung nur durch einen der beiden Rater*innen vorgenommen wurde, während die zweite Person keinen Code vergab. Solche Fälle wirken sich statistisch stark auf das Kappa aus, da vollständige Übereinstimmungen ausbleiben. In der Diskussion dieser Fälle konnten die unterschiedlichen Einschätzungen zwar nachvollzogen, aber nicht aufgelöst werden, sodass keine nachträglichen Anpassungen an den Codes vorgenommen wurden.

Obwohl der Wert von $\kappa = 0,45$ methodisch als akzeptabel angesehen werden kann, weist er darauf hin, dass die Codierung in dieser Runde weniger übereinstimmend war. Für zukünftige Erhebungen wäre eine noch stärkere Kalibrierung der Rater*innen vor der Codierung empfehlenswert, um eine höhere Übereinstimmung sicherzustellen.

5.2.3.2 Querschnittsanalyse

Erster Block: Konzeptidee 1 und 2

Die Ergebnisse der Qualitativen Inhaltsanalyse für die erste und zweite Konzeptidee zur Einführung von elektrischen Systemen als Energieübertragungssystemen in der zweiten Interviewrunde ist in Tabelle 20 zu sehen.

Tabelle 20: Kodierungen zur 1. und 2. Konzeptidee zur Einführung von elektrischen Systemen als Energieübertragungssystemen in der zweiten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 1 und 2		IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$
El. Systeme als Energieübertragungssysteme	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	3	3	3	3	3	2	2	2,71
	Aufgabe 1	3	3	3	2	2	2	3	2,57
	Aufgabe 2	3	2	3	2	3	3	3	2,71

Im ersten Block blieben die Erklärungen und Aufgaben im Vergleich zur ersten Interviewrunde weitgehend unverändert (siehe Abschnitt 5.2.2.1). Lediglich die Nummerierung der Konzep-

tideen wurde angepasst. Entsprechend war zu erwarten, dass auch die Ergebnisse ähnlich ausfallen würden. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, wurden die vorgestellten Konzeptideen von allen Interviewpartner*innen akzeptiert und somit mit grün (3) kodiert.

Für die Paraphrase wurde die in Textbox 13 angeführte Muserlösung zum Vergleich herangezogen:

Textbox 13: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 1 und 2 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Wenn man den Schalter bei einer Lampe betätigt, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. Ein weiteres Beispiel ist das kabellose Aufladen eines Smartphones durch ein Ladepad.

Die Lampe, der Föhn, das Handy und die elektrische Zahnbürste werden in der Physik als Energieumwandler oder Elektrogeräte bezeichnet. Dabei wird elektrische Energie in eine andere Energieform umgewandelt. Ein Energieübertragungssystem enthält üblicherweise neben einem **Energieumwandler** auch eine **Energiequelle** (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage, Steckdose). [Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z. B. Leiterkabel).]

Wie in Tabelle 20 ersichtlich ist, wurde die Paraphrase von fast allen Interviewpartner*innen als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet.

Beispielsweise beschrieb IP10:

„Also es gibt eben Energiequellen. Das ist sozusagen das, wovon die Energie kommt. Zum Beispiel eine Steckdose, oder Solarpaneele wurden als Beispiele genannt. Und dann die Energieumwandler verwenden diese Energie von zum Beispiel der Steckdose und wandeln das in Wärmeenergie oder Lichtenergie oder innere Energie oder Lichtenergie oder irgendeine Form um.“ (R2-IP10, Pos. 24, 00:04:12-00:04:39)

Wie man anhand dieses Zitats erkennen kann, wurde die Beschreibung der Energiequellen und Energieumwandler korrekt von IP10 wiedergegeben.

Ein weiteres Beispiel liefert IP11:

„Also, wir hatten die Energiequelle. Das ist das, wo unser System die Energie sozusagen bezieht. In dem Fall die Steckdose. Und dann haben wir eben den Energieumwandler. Der wandelt dann die elektromagnetische Energie in andere Energieformen um. Nein, nicht elektromagnetisch, Entschuldigung. Elektrische Energie.“ (R2-IP11, Pos. 28, 00:05:33-00:06:12)

Aus diesem Zitat geht ebenfalls hervor, dass die Konzepte der Energiequelle und des Energieumwandlers verstanden und korrekt wiedergegeben wurden. Die Korrektur des Begriffs

„elektromagnetische Energie“ zu „elektrische Energie“ zeigt außerdem ein Bewusstsein für den korrekten Sprachgebrauch.

Die Paraphrasen von IP13 und IP14 wurden hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. IP13 verwendete zwar den Begriff „Energiequelle“, erinnerte sich allerdings erst mit einer kleinen Hilfestellung an den Begriff „Energieumwandler“ (R2-IP13, Pos. 21-26, 00:03:38-00:04:12). IP14 erwähnte die beiden Begriffe dagegen zutreffend. Allerdings beschrieb IP14 diese nicht fachlich korrekt, sondern äußerte, dass die Energiequelle „Energie schenkt“, wie aus folgender Interviewpassage hervorgeht:

„Also, es gibt die Energiequellen. Das bedeutet, dass du einfach nur etwas hast, was dir jetzt diese elektrische Energie schenkt - schenkt.“ (R2-IP14, Pos. 30, 00:02:56-00:03:05)

Diese Aussage wurde daher nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, da sie gemäß der Musterlösung zwar die Unterscheidung der Begriffe Energiequelle und Energieumwandler enthält, aber eine unpräzise Wortwahl bei der Beschreibung eingesetzt wurde.

Da alle Antworten zumindest die korrekte Differenzierung dieser beiden Begriffe enthalten, wurde keine Aussage als ‚nicht korrekt‘ (rot – 1) kodiert.

Im Rahmen der ersten Aufgabe sollten die Schüler*innen die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler einem konkreten Beispiel (ein elektrischer Föhn, der über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden ist) zuordnen. Diese Aufgabe wurde von vier der sieben Interviewpartner*innen korrekt (grün-3) gelöst. Die Interviewpartner*innen IP8, IP9, IP10 und IP14 erkannten, dass die Steckdose die Energiequelle darstellt und der elektrische Föhn den Energieumwandler. Dies geht beispielsweise aus der folgenden Interviewpassage mit IP14 hervor:

I: „Du siehst jetzt da ein Bild von so einem elektrischen System. Kannst du mir diese Begriffe nochmal zuordnen, die du gerade genannt hast?“

IP14: „Also, die Steckdose ist die Energiequelle.“

I: „Sehr schön.“

IP14: „Und der Föhn, das Föhn?“

I: „Der Föhn.“

IP14: „Der Föhn ist jetzt der Energieumwandler.“

(R2-IP14, Pos. 35-40, 00:03:24-00:03:42)

Die Antworten von IP11, IP12 und IP13 wurden dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. IP11 nannte die Energiequelle fälschlicherweise „Stromquelle“, konnte aber den Energieumwandler korrekt benennen:

IP11: „Also das war eine Stromquelle. Das ist dann die Steckdose, also, das Weiße. (...). Ja, und dann der Energieumwandler. (R2-IP11, Pos. 30-32, 00:06:44-00:07:18)

Zwei Interviewpartner*innen (IP12 und IP13) konnten nur den Begriff „Energiequelle“, nicht jedoch den Begriff „Energieumwandler“ nennen. Beispielsweise verwendete IP12 stattdessen die Bezeichnung „Energienutzer“ und begründete dies folgendermaßen:

„Ähm, die Energiequelle ist bei uns die Steckdose, der Föhn ist der Energienutzer, also das Gerät, was die Energie nutzt.“ (R2-IP12, Pos. 16-17, 00:03:55-00:04:02)

Die zweite Aufgabe war ähnlich formuliert wie die erste, nur dass dieses Mal die Zuordnung in einem kabellosen System (elektrische Zahnbürste auf Ladestation) erfolgen sollte. Diese Aufgabe wurde von den meisten Interviewpartner*innen korrekt beantwortet (grün-3). Sie erkannten, dass die Zahnbürste der elektrische Energieumwandler und die Ladestation die elektrische Energiequelle ist. Beispielsweise beschrieb dies IP10 folgendermaßen:

„Also, die Aufladestation von der Zahnbürste ist die Energiequelle im verlängerten Sinne. Und die Zahnbürste ist dann der Energieumwandler.“ (R2-IP10, Pos. 30, 00:05:41-00:05:52)

Die Antworten von IP9 und IP11 wurden nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. IP11 griff in seiner Erklärung offenbar auf eigene Präkonzepte zurück, anstatt das im Interview vorgestellte Erklärungsmodell zu verwenden. So wurde beispielsweise der Begriff „Stromquelle“ benutzt und die Energieübertragung mithilfe von Primär- und Sekundärstromkreisen beschrieben, obwohl diese Konzepte zuvor nicht thematisiert worden waren. Es wurde somit ein alternatives Erklärungsmodell herangezogen, das jedoch unabhängig vom vermittelten Konzept ist. Dies geht aus folgender Interviewpassage hervor:

I: „Dann habe ich hier noch ein Beispiel vorbereitet, von einem kabellosen System, das du eh schon früher genannt hast. Kannst du auch hier die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler zuordnen?“

IP11: „Wir hatten zufälligerweise bei unserer Physikschararbeit die Zahnbürste. Deswegen weiß ich da schon mehr. Also, wir haben eigentlich zwei Stromkreise mehr oder weniger. Das heißt: Im Primärstrom, also Primärstromkreis müsste der sein, der zur Steckdose geht. Da hätte ich da natürlich als Stromquelle die Steckdose selber an sich. Und dann eben über einen Transformator müsste ich/ Ist

da eigentlich der Transformator schon ein Energieumwandler? Eigentlich gehört das Ganze noch zum Stromkreis – das würde dann über den Sekundärstromkreis wieder zur/ Eigentlich habe ich da einen Energiespeicher zwischengeschaltet, die Batterie, und dann eben den Motor, der dann wieder als Energieumwandler die umwandelt.“

I: „Genau. Also, hast du eigentlich schon erkannt: Der Energieumwandler ist hier wieder der Motor. Man sagt Akku und nicht Batterie in diesem Fall, weil es wiederaufladbar ist.“

IP11: „Ja.“

I: „Also in diesem Fall, wie du richtig gesagt hast, hast du eine Energiequelle, es wäre deine Steckdose, die zunächst einmal diesen Akku aufladen kann über einen Transformatorschaltkreis im Inneren der Zahnbürste. Und hier ist unter anderem - es sind Dioden verbaut, es ist aber auch ein Elektromotor verbaut, und noch ein paar Einzelwiderstände, die dann hier für die Energieumwandlung notwendig sind.“

(R2-IP11, Pos. 33-37, 00:07:18-00:09:04)

Trotz der Einbeziehung alternativer Konzepte, die nicht Teil der ursprünglichen Erklärung waren, gelang IP11 die korrekte Zuordnung der Begriffe „Energiequelle“ und „Energieumwandler“. Die Antwort von IP11 wurde daher als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

IP9 gelang es ebenfalls nicht, das vorgegebene Erklärungsmodell konkret anzuwenden. Stattdessen schien IP9 lange hin- und her zu überlegen und weit auszuholen, bis eine endgültige Antwort gegeben wurde:

„Das verwirrt mich ein bisschen. Also, die Energiequelle ist auf jeden Fall die Steckdose. Wobei ich mir nicht sicher bin, ob dann die Ladestation oder die Zahnbürste selber ... Es macht nicht ganz Sinn - wobei, die Ladestation gibt es ja nur weiter, und die elektrische Zahnbürste selber wandelt es dann ja in eine andere Energieform um. Das heißt, ich würde sagen: Die elektrische Zahnbürste ist das, was die Energie umwandelt.“ (R2-IP9, Pos. 24, 00:04:45-00:05:17)

Diese Antwort wird ebenfalls als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, da IP9 zwar die grundlegende Idee erkannte, jedoch bei der Anwendung des Modells unsicher war und sich nicht klar ausdrücken konnte.

Zweiter Block: Konzeptidee 3a und 3b

Die Kodierungen für die dritte Konzeptidee zum magnetischen Feld sind in Tabelle 21 zu sehen. Dabei wurde der Versuch, wie in Abschnitt 5.2.2.2 beschrieben, mit einer Hälfte der Interviewpartner*innen (IP8-IP11) mit einer Strommesszange und mit der anderen Hälfte (IP12-IP14) mit einem Kompass durchgeführt.

Tabelle 21: Kodierungen zur 3. Konzeptidee zum magnetischen Feld in der zweiten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 3		IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$
Versuch zum B-Feld mit Strommesszange	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	0	0	0	3,00
	Paraphrase	3	3	3	3	0	0	0	3,00
	Aufgabe	3	2	3	3	0	0	0	2,75
Versuch zum B-Feld mit Kompass	Erklärung								
	Akzeptanz	0	0	0	0	3	3	3	3,00
	Paraphrase	0	0	0	0	3	3	2	2,67
	Aufgabe	0	0	0	0	3	3	3	3,00

In Tabelle 21 ist ersichtlich, dass diese Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen gut aufgenommen wurde und es keine Rückfragen gab, weshalb die Akzeptanz durchwegs mit grün-3 kodiert wurde.

Für die Bewertung der Paraphrase wurde die folgende Musterlösung für den Versuch mit der Strommesszange verwendet (siehe Textbox 14):

Textbox 14: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 3 für den Versuch mit der Strommesszange in der zweiten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC oder AC) entsteht ein (statisches oder wechselndes) Magnetfeld. Führt man das Messgerät um diesen Leiter, kann das Magnetfeld mithilfe des weichmagnetischen Kerns bestimmt werden. Daraus berechnet das Gerät die Stromstärke.

Nach diesem Schema wurde auch die Musterlösung für den Versuch mit dem Kompass formuliert (siehe Textbox 15):

Textbox 15: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 3 für den Versuch mit dem Kompass in der zweiten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC oder AC) entsteht ein (statisches oder wechselndes) Magnetfeld. Bringt man den Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, richtet sich die Kompassnadel senkrecht dazu aus. Daraus kann geschlossen werden, dass das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter verlaufen muss.

Aus den Ergebnissen der qualitativen Inhaltsanalyse (siehe Tabelle 21) wird ersichtlich, dass die Paraphrasen der Interviewpartner*innen bei dem Versuch mit der Strommesszange durchwegs als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert werden konnten.

Beispielsweise beschreibt IP8:

„Die Strommesszange kann um einen Leiter geschlossen werden. Diese misst, wenn Strom durch den Leiter fließt, das Magnetfeld um diesen und kann daraus dann die Stromstärke berechnen.“ (R2-IP8, Pos. 34, 00:10:50-00:11:06)

Die Paraphrase beim Versuch mit dem Kompass kann ebenfalls bei fast allen Interviewpartner*innen als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert werden. Einzig die Antwort von IP14 wird nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet, da IP14 zwar die grundlegende Idee eines durch Elektronenbewegung erzeugten Magnetfelds korrekt wiedergibt, jedoch einige Missverständnisse und Ungenauigkeiten in der Erklärung beim Vergleich mit der Musterlösung (siehe Textbox 15) aufweist, wie aus dieser Interviewpassage ersichtlich wird:

I: „Probiere es nochmal in deinen Worten zu wiederholen, wie ich es erklärt habe.“

IP14: „Also, wenn Elektronen durch das Kabel fließen, dann wird durch ihre Bewegung eben ein Magnetfeld erzeugt. (...). Weil es eben so eine Stange ist, erzeugt es sich eben in Ringern rundherum. Und wenn man einen Kompass da hat, dann wird er sich entlang dieser Ringe ausrichten - aber nicht für immer. Sondern, sobald es wieder ausgeschaltet ist, wird es wieder normal nach Norden zeigen.“

I: „Mhm (bejahend). Hier vielleicht noch eine kleine Anmerkung: Also, die Magnetfeldlinien, die du hier sehen kannst, das ist nur ein Modell, mit dem wir uns das Magnetfeld versuchen vorzustellen.“

IP14: „Mhm (bejahend).“

(R2-IP14, Pos. 87-94, 00:09:42-00:10:35)

Zunächst erkennt IP14 korrekt, dass die Elektronenbewegung ein Magnetfeld hervorruft. Im weiteren Gesprächsverlauf beschreibt IP14 jedoch das Magnetfeld als „Ringe“, die um den Leiter erzeugt werden. Hier sollte deutlicher hervorgehoben werden, dass es sich bei den „Ringern“ lediglich um die Repräsentation des Magnetfelds im Feldlinienmodell handelt und nicht um das tatsächliche Magnetfeld. Stattdessen sollte IP14 präzisieren, dass das Magnetfeld kreisförmig um den stromdurchflossenen Leiter entsteht und durch Magnetfeldlinien veranschaulicht wird. Ein weiteres Missverständnis zeigt sich in der Aussage von IP14, dass ein Kompass sich „entlang dieser Ringe“ ausrichtet, aber wieder nach Norden zeigt, sobald der Strom abgeschaltet

wird. Hier sollte IP14 genauer erklären, dass sich der Kompass entlang des Magnetfeldes und somit senkrecht zum stromdurchflossenen Leiter ausrichtet, nicht jedoch an „Ring“.

Diese Aspekte zusammen begründen, warum die Antwort von IP14 als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert wird.

In der Aufgabenstellung zu den Versuchen sollten die Interviewpartner*innen erklären, weshalb im Fall der Strommesszange ein Wert von 00,00 Ampere angezeigt wird, wenn der Stromkreis geöffnet ist, und warum sich im Fall des Kompasses die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht senkrecht zum Leiter ausrichtet.

Diese Aufgabe konnte beim Versuch mit der Strommesszange von fast allen Interviewpartner*innen korrekt gelöst werden (grün-3). IP8, IP19 und IP11 beschrieben, dass die Strommesszange nur dann einen Wert anzeigt, wenn der Stromkreis geschlossen ist und somit ein Magnetfeld um den Leiter entsteht, das von der Strommesszange gemessen werden kann.

Dies wird beispielsweise in den folgenden Interviewpassagen von IP8 und IP10 deutlich:

IP8: „Weil da durch den Leiter noch kein Strom geflossen ist, das heißt, es bestand kein Magnetfeld, das heißt da kann die Zange nichts messen.“ (R2-IP8, Pos. 36, 00:11:21-00:11:30)

IP10: „Weil (...) der Stromkreis ist nicht geschlossen, das heißt, es ist kein Strom geflossen, also auch kein Magnetfeld.“ (R2-IP10, Pos. 60, 00:12:33-00:12:40)

Nur die Antwort von IP9 wurde als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Aus der folgenden Interviewpassage geht hervor, dass IP9 lediglich mit der Unterbrechung des Stromflusses argumentierte, das Magnetfeld jedoch nicht erwähnt wurde:

I: „Ja, sehr schön, genau. Dann noch eine Frage zum Nachfragen. Du hast ganz am Anfang ein Bild gesehen von einem offenen Stromkreis. Warum hat denn das Display dort keinen Wert angezeigt oder den Wert 0?“

IP9: „Weil die Elektronen nicht durchfließen konnten, weil die fließen immer von - ich glaube - dem Plus- zum Minuspol?“

I: „Ah, von Minus zu Plus - 50-50-Chance.“

IP9: „Das vergesse ich immer. Aber, wenn sie eben irgendwo unterbrochen werden, können sie das nicht machen, und dadurch fließen sie gar nicht.“

(R2-IP9, Pos. 55-58, 00:14:07-00:14:42)

Die Aufgabe konnte beim Versuch mit dem Kompass hingegen von allen Interviewpartner*innen korrekt gelöst werden (grün-3). Beispielsweise argumentierte IP14:

„Weil es kein Magnetfeld gibt, solange es keinen Strom gibt. Also, man braucht den Strom, damit es ein Magnetfeld gibt.“ (R2-IP14, Pos. 104, 00:12:03-00:12:13)

Zweiter Block: Konzeptidee 4

Die Kodierungen für die Konzeptidee zum elektrischen Feld sind in Tabelle 22 zu sehen.

Tabelle 22: Kodierungen zur 4. Konzeptidee zum elektrischen Feld in der zweiten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 4		IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$
Versuch zum E-Feld	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	3	2	2	3	3	2	3	2,57
	Aufgabe 1	2	2	2	3	2	2	2	2,14
	Aufgabe 2	2	3	2	3	3	3	2	2,57

Wie aus Tabelle 22 hervorgeht, wurde die Erklärung zu dieser Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen akzeptiert und es kam zu keinen inhaltlichen Rückfragen, weshalb die Akzeptanz durchgehend mit ‚grün-3‘ kodiert wurde.

Für die Analyse der Paraphrase wurde die in Textbox 16 dargestellte Musterlösung zum Vergleich herangezogen:

Textbox 16: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 4 in der zweiten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC) entsteht ein elektrisches Feld. Bringt man ein kleines Stück Alufolie oder einen elektrostatisch geladenen Strohhalm in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung beobachtet werden (Anziehung / Abstoßung). Dies kann mithilfe des Modells der Oberflächenladungen erklärt werden.

Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen. Das elektrische Feld kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden, die von Plus zu Minus verlaufen. Die Richtung des elektrischen Feldes hat historische Hintergründe.

(Das elektrische Feld der Oberflächenladungen verursacht einen Stromfluss im elektrischen Stromkreis, sobald er **geschlossen** vorliegt, d.h. jeder Anschluss der Energiequelle mit je einem Anschluss des Energieumwandlers verbunden ist.)

Wesentlich für diese Paraphrase war, dass die Schüler*innen beschreiben konnten, dass um einen Leiter, der mit einer Energiequelle verbunden ist, ein elektrisches Feld aufgrund von Oberflächenladungen entsteht. Dieses elektrische Feld lässt sich mithilfe von Feldlinien darstellen, die von Plus zu Minus verlaufen.

Die Paraphrase wurde bei IP8, IP11, IP12 und IP14 als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert. IP8 formulierte dies beispielsweise folgendermaßen:

„Also die Oberflächenladung befindet sich am Leiter und erzeugen ein elektrisches Feld, das (...) von der Plusseite sozusagen zur Minusseite verläuft. Um die Energiequelle herum krümmt es [die Feldlinien] sich (...). (R2-IP8, Pos. 40, 00:18:32-00:19:20)

Aus dieser Aussage ging hervor, dass IP8 korrekt erkannt hatte, dass die Oberflächenladungen die Ursache für das elektrische Feld sind. Außerdem führte IP8 aus, dass das Feld von den positiven zu den negativen Ladungen verläuft. Die Aussage konnte daher als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert werden, da sie die wichtigsten Aspekte gemäß der Musterlösung (siehe Textbox 16) enthielt.

Die Paraphrase wies allerdings bei drei Interviewpartner*innen (IP9, IP10 und IP13) Mängel auf und wurde nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

IP9 beschrieb die Entstehung von Oberflächenladungen am Leiter mit folgenden Worten:

„Ok. Also, je nach Stärke der Energiequelle werden so Oberflächenladungen über den Leiter gesendet und vom Pluspol kommen positive Ladungen, vom Minuspol kommen negative Ladungen. Und dadurch entstehen dann elektrische Feldlinien, die vom Plus- zum Minuspol gehen.“ (R2-IP9, Pos. 72, 00:22:23-00:22:46)

Wie im Zitat deutlich wird, nahm IP9 an, dass die Oberflächenladungen von der Batterie auf die Leiteroberfläche „gesendet“ werden. Die gewählte Formulierung ist insofern bemerkenswert, als sie von IP9 selbst stammt. Dabei handelt es sich um eine ungenaue Darstellung des Prozesses, da Oberflächenladungen nicht „gesendet“, sondern durch die Energiequelle auf den Leiter übertragen und dort verteilt werden.

IP10 vermied in der Paraphrase gänzlich das Konzept der Oberflächenladungen. Stattdessen wurde der Versuch mithilfe positiver und negativer Ladungen erklärt, ohne jedoch auf die genauere Beschreibung der Oberflächenladung einzugehen:

„Also, wir hatten einen Versuch, da hatten wir eben Starkstrom, dann hatten wir vier Widerstände und die waren mit dem Starkstrom verbunden. Und dann war da eine Alufolie, und wenn man die Alufolie zum ersten Widerstand gehalten hat, wurde sie ganz kurz angezogen und dann wieder abgestoßen. Und das ist aufgrund der elektrostatischen Kräfte gewesen. Und ähm, in der Mitte wurde es aber dann nicht/ da wurde die Alufolie dann nicht abgestoßen und nicht angezogen, und das ist, weil es eben ein neutraler Punkt sozusagen ist - weil wie wir auf der Grafik sehen - es ist zuerst stark positiv oder stark negativ geladen. Und dann - umso weiter wir weg sind von der Energiequelle und dann beim Energieumwandler sind - umso neutraler wird es dann irgendwo. Und deshalb wird es dann eben nicht mehr angezogen beziehungsweise abgestoßen.“ (R2-IP10, Pos. 72, 00:22:23-00:22:46)

Gemäß der Musterlösung wurde diese Antwort nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet, da die Beschreibung der Oberflächenladung fehlte und die elektrostatische Wechselwirkung unzureichend erklärt wurde. Es wurde nicht deutlich, dass die Oberflächenladungen selbst das elektrische Feld verursachen.

Interviewpartner*in IP13 schien ebenfalls Schwierigkeiten zu haben, das Konzept der Oberflächenladung zu akzeptieren. Zunächst wurde zwar korrekt paraphrasiert, dass sich die Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche befinden, im weiteren Verlauf des Gesprächs änderte IP13 jedoch die eigene Einschätzung, wie aus folgender Passage hervorgeht:

„Okay, also, es gibt eine Energie[quelle], das ist die Batterie. Dann gibt es Leiter. Und auf diesen, also in den Leitern, befinden sich die Ladungen. Beim Pluspol befinden sich die positiven Ladungen, beim Minuspol befinden sich die negativen Ladungen. (R2-IP13, Pos. 162, 00:09:49-00:10:24)

Wie aus dem Zitat hervorgeht, nahm IP13 an, dass sich die Oberflächenladungen im Inneren des Leiters befinden. Zur Überprüfung dieser Aussage wurde noch einmal gezielt nachgefragt, worauf IP13 erneut antwortete, die Oberflächenladungen seien „im Leiter“.

Die erste Aufgabe zu dieser Konzeptidee behandelte die Frage, ob ein Alufolienstück in einem offenen Stromkreis ebenfalls abgelenkt würde, so wie im Versuchsvideo beim geschlossenen Stromkreis demonstriert worden war. Die Schüler*innen sollten beschreiben können, dass auch in einem offenen Stromkreis Oberflächenladungen auf den Leiterkabeln vorhanden sind, da diese mit der Energiequelle verbunden sind. Dadurch wird ein elektrisches Feld erzeugt, das zu einer Wechselwirkung mit dem Alufolienstück führt, wenn dieses in die Nähe gehalten wird. Diese Aufgabe konnte nur von IP11 richtig beantwortet werden und wurde daher in diesem Fall als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet.

Die Antworten von IP8, IP9, IP10, IP12, IP13 und IP14 wurden hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. IP8 antwortete hier beispielsweise:

"In dem Fall würde ich meinen, nicht, weil dann auch kein Strom durch den Leiter fließen müsste. Das heißt, da gibts dann auch kein elektrisches Feld, von dem die Alufolie abgelenkt werden könnte." (R2-IP8, Pos. 46, 00:21:05-00:21:19)

Diese Aussage zeigt, dass IP8 zwar richtig erkannte, dass ein elektrisches Feld notwendig ist, damit die Alufolie elektrostatisch abgelenkt wird. Allerdings wurde fälschlicherweise angenommen, dass dieses Feld durch den Stromfluss entsteht, statt durch die Oberflächenladungen. Die Möglichkeit, dass bereits durch die Verbindung zur Spannungsquelle Oberflächenladungen

und damit ein statisches elektrisches Feld vorhanden sind, wurde nicht berücksichtigt. Aufgrund der richtigen Nennung der Feldwirkung, jedoch unzutreffender Ursachenzuschreibung, wurde die Antwort als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) eingestuft.

Ein ähnliches Bild zeigte sich im Interview mit IP10, wo folgende Aussage gemacht wurde:

„Nein, ich glaube nicht. Weil es würde ja kein magnetisches Feld zustande kommen, wenn der Stromkreis nicht geschlossen ist, oder?“ (R2-IP10, Pos. 92, 00:25:49-00:26:01)

Hier wurde fälschlicherweise ein magnetisches Feld als Ursache für die beobachtete Ablenkung angenommen. Erst auf Nachfrage der Interviewerin stellte IP10 klar, dass eigentlich das elektrische Feld gemeint war. Diese Korrektur deutete auf ein grundsätzlich vorhandenes Verständnis der Relevanz von Feldern hin, offenbarte jedoch Unsicherheiten bei der begrifflichen Differenzierung. Die Antwort wurde daher ebenfalls als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Bei IP9 wurde eine andere Begründung für die Antwort gegeben. IP9 nahm an, dass das Alufolienstück im offenen Stromkreis nicht abgelenkt würde, weil die im Versuchsaufbau sichtbaren Ohm’schen Widerstände einen Einfluss haben müssten. Als Hilfestellung wurde daraufhin die Erklärung noch einmal wiederholt und die Frage erneut gestellt. Im Anschluss konnte IP9 die Frage richtig beantworten.

Die Antworten von IP12 und IP14 enthielten die zentrale Aussage, dass das Alufolienstück auch im offenen Stromkreis abgelenkt wird, wenn es sich in der Nähe des Leiters befindet, allerdings deuteten ihre Antworten noch auf gewisse Unsicherheiten hin. IP12 stellte beispielsweise die Frage, wohin die Ladungen ‚fließen‘, wenn die Alufolie Elektronen vom Leiter aufnimmt. Diese Formulierung deutete darauf hin, dass elektrostatische Wechselwirkungen möglicherweise nicht vollständig von stromführenden Prozessen unterschieden wurden. IP14 äußerte Zweifel daran, ob ein Generator (wie der Batterie in der dargestellten Skizze) in der Lage sei, Oberflächenladungen auf den Leiter zu übertragen, die eine Feldwirkung verursachen könnten. Obwohl in beiden Fällen die Kernaussage physikalisch korrekt war, ließen die Ausführungen auf ein nicht vollständig konsistentes Konzeptverständnis schließen. Beide Antworten wurden daher als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) eingestuft.

Eine weitere Antwortvariante zeigte sich im Interview mit IP3. Dabei erläuterte IP3, dass die gleichmäßige Ladungsverteilung im offenen Stromkreis, im Gegensatz zum geschlossenen Stromkreis, dazu führe, dass die Wechselwirkung des Alufolienstücks weniger effektiv sei. IP13 erklärte:

"(...) Ich glaube, dass es schon ein bisschen abgestoßen wird, aber nicht so sehr wie beim anderen, weil es [die Oberflächenladungen] überall gleich viel, also,

Konzentration hat. Und ja, weil es [das Alufolienstück] trotzdem abgestoßen werden sollte." (R2-IP13, Pos. 190, 00:25:21-00:25:45)

Die zweite Aufgabe zu dieser Konzeptidee behandelte die Frage, wo elektrische Felder im Alltag vorkommen. Die Interviewpartner*innen sollten hier konkrete Beispiele nennen. Grundsätzlich konnten sie hierfür jedes elektrische System anführen, in dem eine Energiequelle vorhanden war, wie beispielsweise eine Tischlampe, die mit einer Steckdose verbunden war, oder eine elektrische Zahnbürste, die auf einer Ladestation stand.

Die Beantwortung dieser Frage gelang den meisten Schüler*innen zufriedenstellend, wie man in Tabelle 22 erkennen kann. Eine Übersicht der genannten Beispiele ist in der nachfolgenden Tabelle 23 zu sehen:

Tabelle 23: Übersicht der genannten Beispiele aus der zweiten Aufgabe zur Konzeptidee 4 in Interviewrunde 2.

	Beispiele
IP8	Föhn
IP9	Elektromotoren, Steckdosen
IP10	Glätteisen, Wasserkocher, Induktionsherd
IP11	Lampe, Föhn, Zahnbürste, Elektroauto
IP12	Batterie, Steckdose, Ladestation einer elektrischen Zahnbürste, Handyladestation
IP13	Elektrische Zahnbürste, Waschmaschine
IP14	Steckdose, elektrische Zahnbürste, Computer

Die Interviewpartner*innen IP8, IP10 und IP14 benötigten allerdings einen kleinen Hinweis, um eine Antwort nennen zu können. Dafür bat die Interviewerin sie, nochmal an die Beispiele am Anfang des Interviews zurückzudenken. Im zweiten Anlauf gelang es schließlich allen Interviewpartner*innen, einige passende Beispiele aufzuzählen.

Zweiter Block: Konzeptidee 5 und 6

Die Kodierungen für die Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in der zweiten Interviewrunde sind in Tabelle 24 zu sehen.

Tabelle 24: Kodierungen zur 5. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in der zweiten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 5		IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$
Energieübertragung in elektrischen Systemen	Erklärung								
	Akzeptanz	2	3	3	3	3	3	3	2,86
	Paraphrase	3	2	3	3	3	2	3	2,71
	Aufgabe	2	3	2	3	2	3	3	2,57

In Tabelle 24 ist zu erkennen, dass die die Erklärung zu dieser Konzeptidee von fast allen Interviewpartner*innen akzeptiert wurde und deshalb die Akzeptanz durchgehend mit ‚grün-3‘ kodiert wurde. Nur bei IP8 wurde die Akzeptanz mit ‚gelb-2‘ kodiert, da einige Unsicherheiten beim Verständnis auftraten, die aber mithilfe der Interviewerin schnell geklärt werden konnten. Zunächst stellte IP8 eine Rückfrage zur Richtung des Stromflusses und erkundigte sich, ob der Strom vom Minus- zum Pluspol fließe. Die Interviewperson wartete dabei auf eine Bestätigung durch die Interviewerin, bevor sie mit ihrer Erklärung fortfuhr. In einem weiteren Schritt stellte IP8 die Frage, ob die Richtung des Magnetfeldes unabhängig von der Stromrichtung sei. Die Interviewerin erläuterte daraufhin, dass das Magnetfeld von der Stromrichtung abhängt und sich umkehrt, wenn sich die Stromrichtung ändert. Im Gesprächsverlauf wurden somit mehrere Rückfragen durch IP8 formuliert, die sich auf den Zusammenhang zwischen Stromrichtung und Magnetfeld bezogen. Die Interviewerin ging jeweils auf diese Rückfragen ein und erläuterte die entsprechenden Konzepte.

Für die Analyse der Paraphrase wurde die in Textbox 17 dargestellte Musterlösung zum Vergleich verwendet:

Textbox 17: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 5 in der zweiten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Wir haben bisher festgestellt, dass es ein elektrisches Feld aufgrund der Oberflächenladungen gibt, das für den Stromfluss sorgt. Der Stromfluss erzeugt wiederum ein Magnetfeld um den Leiter. Gemeinsam ergeben sie das sogenannte **elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld)**. Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden.

Energie-Hand-Regel für die linke Hand zur Bestimmung des Energieflusses: Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss ebenfalls senkrecht darauf einzeichnen.

In der Paraphrase sollten die Schüler*innen beschreiben, dass ein elektrisches Feld durch Oberflächenladungen erzeugt wird, ein Magnetfeld durch den Stromfluss im Leiter entsteht und dass beide Felder zusammen das elektromagnetische Feld bilden, dessen Energiefluss mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand bestimmt werden kann.

Die Paraphrase zu dieser Konzeptidee wurde bei allen Interviewpartner*innen, außer bei IP9 und IP13, als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert.

in Beispiel für eine ausführliche Antwort fand sich im Interview mit IP12. Die Antwort wurde gemäß der Musterlösung als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet, da sie alle wesentlichen Aspekte der Konzeptidee 5 enthielt und die physikalischen Zusammenhänge vollständig wiedergegeben wurden.

IP12 begann mit der Beschreibung des elektrischen Feldes, das durch Oberflächenladungen erzeugt werde:

„Also, wenn wir einen einfachen Stromkreis haben mit einer Energiequelle und einem Energieumwandler, dann haben wir – wie vorher besprochen – unser elektrisches Feld. Das geht von der Seite, wo wir die positiven Oberflächenenergieelektronen haben, in die, also zu der Seite des Kabels, wo wir negative Oberflächenenergieelektronen haben“ (R2-IP12, Pos. 232, 00:41:98-00:41:31)

In dieser Passage wurde die Entstehung des elektrischen Feldes durch die Verteilung der Ladungen beschrieben. IP12 führte anschließend aus, dass der Stromfluss ein Magnetfeld erzeugt:

„(...) wenn wir den Stromkreis aufdrehen, dann haben wir eben wieder den elektrischen Strom da durch fließen, wodurch wir ein magnetisches Feld haben (...)“ (R2-IP12, Pos. 234, 00:41:33-00:42:46)

Darüber hinaus beschrieb IP12 die Anwendung der Energie-Hand-Regel für die linke Hand zur Bestimmung des Energieflusses:

„(...) stellen wir das dann durch den Daumen dar (...) können wir den Mittelfinger ausstrecken, und das zeigt uns eben an, in welche Richtung der Energiefluss geht.“ (R2-IP12, Pos. 234, 00:41:33-00:42:46)

Abschließend wurde erläutert, dass der Energiefluss nicht im Leiter, sondern im Raum um den Leiter stattfindet:

„(...) dass der Energiefluss nicht unbedingt im Leiter ist, sondern eigentlich nur im Raum rund um den Leiter (...)“ (R2-IP12, Pos. 234, 00:41:33-00:42:46).

Die Antwort von IP12 enthielt somit die Beschreibung der Entstehung des elektrischen und magnetischen Feldes, die Anwendung der Energie-Hand-Regel für die linke Hand sowie die Verortung des Energieflusses im Raum außerhalb des Leiters. Diese Aspekte deckten alle relevanten Punkte der Musterlösung für Konzeptidee 5 ab.

Die Paraphrasen von IP9 und IP13 wurden hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, da beide Interviewpartner*innen zwar wesentliche Elemente der Konzeptidee 5 erkennen und beschreiben konnten, jedoch Schwierigkeiten bei der präzisen Anwendung der Energie-Hand-Regel auftraten:

Zu Beginn des Gesprächs äußerte IP9 Unsicherheiten in der Anwendung der Regel. Dies zeigte sich in der folgenden Passage:

5.2 Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen

„Das [elektrische Feld] entsteht durch die Oberflächenspannung. Das wird vom Zeigefinger / wobei, das verwirrt mich kurz hier.“ (R2-IP9, Pos. 118, 00:35:45-00:36:03)

Im weiteren Verlauf kam es zu Rückfragen und Klärungen seitens der Interviewerin, die durch verbale Anleitungen und eine bildschirmgestützte Demonstration unterstützt wurden:

IP9: „Achso, ich habe die Pfeile falsch herum gedeutet...“ und „I: Ich sehe schon, was dir Schwierigkeit bereitet. Zeige mal mit dem Daumen in den Bildschirm hinein...“

(R2-IP9, Pos. 126-129, 00:36:26-00:37:12)

Nach diesen Erläuterungen konnte IP9 die Anwendung der Energie-Hand-Regel zwar korrekt ausführen, zu Beginn war die Beschreibung des elektrischen Feldes jedoch sehr ungenau formuliert worden. IP9 sprach von „Oberflächenspannungen“ statt, wie in der Musterlösung vorgesehen, von Oberflächenladungen als Ursache für das elektrische Feld. Deshalb wurde die Antwort nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

IP13 beschrieb grundlegende Zusammenhänge der elektrischen und magnetischen Felder, machte jedoch ungenaue Angaben in der Terminologie und zeigte Unsicherheiten in der Erklärung. In der folgenden Interviewpassage beschrieb IP13 die Bestimmung des Energieflusses mithilfe einer Regel, benannte diese jedoch als FBI-Regel¹⁶, die üblicherweise im Zusammenhang mit der Lorentzkraft verwendet wird:

IP13: Und dann können wir gleich schon das Magnetfeld mit dem Daumen zeigen, und das ist immer, also, die Elektronen fließen von Minus zu Plus. Also, können wir rund um den Leiter mit der Daumenregel wieder so curln. (...) Und der Energiefluss ist mit dem Mittelfinger. Und dann können wir mit der FBI-Regel, zeigen wir mit dem Zeigefinger nach unten. Mit dem Daumen rein, weil die Magnetfelder into the plane gehen.

I: In die Ebene.

IP13: In die Ebene. Und dann wissen wir, dass der Energiefluss von – in diesem Fall – links zu rechts geht.

(R2-IP13, Pos. 240-242, 00:33:08-00:33:51)

¹⁶ Die ‚FBI-Regel‘ wird verwendet, um die Lorentzkraft $\vec{F}$, die Magnetfeldrichtung $\vec{B}$ und die Elektronenrichtung $\vec{I}$ mithilfe der linken Hand darzustellen: der Mittelfinger zeigt die Richtung der Lorentzkraft an, der Zeigefinger die Magnetfeldrichtung und der Daumen die Stromrichtung.

Die Interviewerin wies anschließend auf die begriffliche Unschärfe hin:

„Die FBI-Regel hast du kurz angesprochen. Die ist tatsächlich bei der Lorentzkraft wichtig...“ (R2-IP13, Pos. 243, 00:33:51-00:34:14).

In der Musterlösung wurde formuliert, dass ein elektrisches Feld durch Oberflächenladungen entsteht, ein Magnetfeld durch den Stromfluss im Leiter erzeugt wird und beide Felder gemeinsam das elektromagnetische Feld bilden. Der Energiefluss sollte mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand bestimmt werden. In der Antwort von IP13 fanden sich diese inhaltlichen Elemente wieder. Die Benennung der Regel wich jedoch von der in der Musterlösung geforderten Terminologie ab. Trotz korrekter Ausrichtung der Finger zur Bestimmung der Energieflussrichtung wurde die Regel als FBI-Regel bezeichnet, was auf eine begriffliche Verwechslung hindeutete. Aufgrund dieser Unschärfen bei der Anwendung und Benennung der Energie-Hand-Regel wurde die Antwort als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

Bei der Aufgabe zu dieser Konzeptidee sollen die Schüler*innen das Konzept auf einen realen Stromkreis anwenden. Dazu wurde ihnen ein einfacher elektrischer Stromkreis präsentiert, bestehend aus einer Batterie als Energiequelle, Leiterkabeln als Übertragungsmedien und einem Ventilator als Energieumwandler. Den Schüler*innen wurde erklärt, dass der Ventilator scheinbar sofort anspringt, sobald der Stromkreis geschlossen ist. Die Aufgabe bestand darin zu erklären, woher die Energie stammt, um den Ventilator zu betreiben, und wie diese übertragen wird, indem mit dem Energiefluss argumentiert wird. Gemäß

Tabelle 24 konnten die Interviewpartner*innen IP9, IP11, IP13 und IP14 diese Aufgabe korrekt beantworten, weshalb ihre Aussagen als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert wurden. Ein Beispiel hierfür ist in der folgenden Interviewpassage mit IP9 ersichtlich:

I: „Woher kommt denn nun die Energie, um den Ventilator zu betreiben?“

IP9: „Naja, die wird so, so neben dem Kabel ... Also es ist so: Durch das elektromagnetische Feld kann die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler fließen. Die fließt nicht durch das Kabel, sondern durch das Feld selber.“

I: „Ja. Sehr schön, also eigentlich im Raum drumherum, können wir sagen. Ja?“

(R2-IP9, Pos. 145-147, 00:39:21-00:39:49)

In dieser Interviewpassage beschrieb IP9 korrekt, dass die Energie durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen wird. Dabei stellte IP9 auch klar, dass die Energie keineswegs durch die Leiterkabel fließt, sondern durch das Feld.

Im Gespräch mit IP13 wurde dies ebenfalls deutlich beschrieben:

5.2 Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen

I: „(...) Wenn [sich] der Ventilator in einem geschlossenen Stromkreis scheinbar sofort zum Drehen beginnt – woher kommt denn die Energie, um ihn zu betreiben? Kannst du mir das nochmal erklären mit dem, was du gerade gelernt hast? Du brauchst dieses Mal nicht die Linke-Hand-Regel verwenden, aber zumindest die Begriffe ein bisschen beschreiben.“

IP11: „Genau. Also, ist der Stromkreis schon geschlossen oder gehen wir davon aus, dass er gerade geschlossen wird?“

I: „Er wird jetzt geschlossen und jetzt beschreibst du, wie die Energie übertragen wird.“

IP11: „Okay. Also, er wird geschlossen – das heißt: Wir haben ein elektrisches Feld, das sich aufbaut und ein magnetisches Feld, das sich eben aufbaut. Ähm. Und eben aufgrund der Wechselwirkung aus beidem wird dem Motor eben Energie zugeführt, so möchte ich das mal ausdrücken. Und der kann es eben umwandeln in kinetische und innere Energie. Ähm. Soll ich sonst noch was?“

I: „Ja, wenn du beschreiben würdest, welchen Weg die Energie nimmt? Wie würde die Energie/“

IP11: „Ah ja, genau. Die Energie geht nicht über die Kabel, weil sie eben außerhalb [fließt] (...). Und diese würde dann eben über den gesamten Raum, würde dann die Energie von der Batterie zum Ventilator übertragen werden.“

I: „Ja, sehr schön.“

(R2-IP11, Pos. 249-259, 00:52:36-00:54:16)

Aus diesem Zitat geht hervor, dass IP11 korrekt erkannte, dass es in dem Stromkreis elektrische und magnetische Felder gibt, die miteinander wechselwirken und eine Energieübertragung ermöglichen. Dabei führte IP11 näher aus, dass die Energie im Raum durch die Felder und nicht durch die Kabel übertragen wird.

Die Antworten der Interviewpartner*innen IP8, IP10 und IP12 wurden dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

Die Antwort von IP8 wurde als ‚teilweise korrekt‘ kodiert, weil wichtige Aspekte des Energieflusses durch elektromagnetische Felder richtig erfasst, aber ungenaue Begriffe verwendet wurden: So verwendete IP8 fälschlicherweise den Begriff „Verbraucher“ anstelle des Begriffs „Energieumwandler“. Dies wurde an dieser Stelle streng kodiert, da die Begriffsschärfe von entscheidender Bedeutung ist.

Gleichzeitig zeigte IP8 ein grundsätzlich richtiges Verständnis des Energieflusses durch elektromagnetische Felder, was in folgender Aussage deutlich wird:

„die Energie wird nicht speziell jetzt über das Kabel weitergeleitet zum Verbraucher, sondern eben durch den Energiefluss um den Raum herum“ (R2-IP8, Pos. 102, 00:34:29-00:34:51).

Zwar war der Ausdruck „um den Raum herum“ unglücklich gewählt (korrekt wäre „im Raum um den Leiter“), doch zeigte die Aussage, dass IP8 das Konzept des Energieflusses über Felder im Raum und nicht als reinen Transport durch das Kabel verstanden hatte.

Darüber hinaus betonte IP8 die physikalischen Voraussetzungen für den Energiefluss zutreffend:

„(...) Einerseits also das elektrische Feld als auch das magnetische Feld als auch auf jeden Fall einen geschlossenen Stromkreis“. (R2-IP8, Pos. 104, 00:34:57-00:35:03)

Die Antwort von IP10 wurde nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. In der Beschreibung verwendete IP10 mehrere Begriffe, die von der in der Musterlösung vorgesehenen Fachsprache abwichen. IP10 verwendete die Begriffe „Elektrofeld“ statt Elektrisches Feld, „Stromquelle“ statt Energiequelle und „Oberflächenspannung“ statt Oberflächenladung.

Dennoch benannte IP10 zentrale Aspekte der Konzeptidee 5. In folgender Interviewpassage wurde zunächst der Zusammenhang zwischen Stromfluss und Magnetfeld sowie die Entstehung des elektrischen Feldes beschrieben:

„(...) Der Stromkreis ist eben geschlossen und wir haben unser Magnetfeld. Das entsteht durch den Elektronenfluss. Und dann haben wir unser Elektrofeld (...) und das entsteht durch die Oberflächenspannung.“ (R2-IP10, Pos. 172-174, 00:42:07-00:43:19)

Trotz der abweichenden Terminologie wurde damit die Entstehung des elektrischen Feldes durch Oberflächenladungen thematisiert.

In einer weiteren Passage beschrieb IP10 die Notwendigkeit eines geschlossenen Stromkreises für den Stromfluss:

„Dann fließt das eben von der Batterie – das ist sozusagen unsere (...) Stromquelle. Und das fließt dann zu dem Ventilator – das ist unser Stromumwandler.“ (R2-IP10, Pos. 174, 00:42:34-00:43:19)

Insgesamt lagen der Fokus der Antwort auf dem Elektronenfluss sowie auf der Entstehung von elektrischen und magnetischen Feldern. Eine direkte Beschreibung der Energieübertragung von der Energiequelle zum Ventilator wurde nicht gegeben. Der Energiefluss blieb somit implizit und wurde nicht explizit benannt. Aus diesen Gründen wurde die Antwort von IP10 als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

5.2 Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen

Bei IP12 zeigte sich die Vorstellung, dass der Energiefluss an das Kabel gebunden sei. Zunächst wurde der Energiefluss mithilfe des elektromagnetischen Feldes beschrieben, ohne dass deutlich wurde, wie dieses genau zustande kommt:

„Und dadurch haben wir/ Ich weiß nicht, ob es als Resultat, dass wir dadurch den Energiefluss haben. Aber, durch diese zwei können wir den Energiefluss quasi herausfinden, wo der Energiefluss ist. (...)“ (R2-IP12, Pos. 254, 00:45:04-00:45:22)

In der folgenden Passage wurde allerdings die Richtung des Energieflusses mit der des Stromflusses gleichgesetzt:

„(...) Und der Energiefluss wäre dann - in diesem Fall - ich weiß nicht, wo negativ und positiv ist. (...) Ich glaube, in diese Richtung, wenn ich mich nicht irre. Nein. Er wäre in die andere. Nein. Entschuldigung. Ich habe mich in den Strom wieder hineingeredet. Er wäre wieder in die Richtung zur Glühbirne, dadurch, dass das magnetische Feld so herumgeht und das elektrische Feld in diese Richtung geht.“ (R2-IP12, Pos. 254-256, 00:45:24-00:45:46)

In einer späteren Aussage korrigierte sich IP12 und präzierte die Vorstellung des Energieflusses:

„Also, es ist vermutlich nicht in der Mitte, sondern rundherum. Aber am Kabel entlang. Oder in der Richtung, wo das Kabel geht, aber nicht genau durch das Kabel.“ (R2-IP12, Pos. 264, 00:45:24-00:45:46)

Die Aussagen von IP12 zeigten damit, dass zunächst eine Bindung des Energieflusses an das Kabel angenommen wurde, später jedoch eine Korrektur dieser Vorstellung erfolgte. Die korrekte Beschreibung wurde im Verlauf des Gesprächs schrittweise erarbeitet.

Die sechste Konzeptidee baute auf der fünften auf und wurde im Interview nur mit ausgewählten Schüler*innen ($n = 2$) besprochen, sofern diese vor Beginn des zweiten Blocks Interesse an einer inhaltlichen Vertiefung signalisierten. Da die Gespräche in diesem Fall eher dialogisch und offen geführt wurden, erfolgte keine systematische Erhebung von Akzeptanz, Paraphrase oder Aufgabenbearbeitung. Entsprechend liegen hierzu keine auswertbaren Daten vor.

Zweiter Block: Mindmap

Zwischen dem zweiten und dritten Block wurde den Interviewpartner*innen die Aufgabe gestellt, ein Mindmap zu erstellen, das die wichtigsten Begriffe aus dem Interview enthält. Dies sollte die Gelegenheit bieten, alle Gedanken zu den neuen Konzepten zu ordnen und festzuhalten. Die Ergebnisse dieser Mindmaps sind in Abschnitt 5.2.3.3 zu sehen.

Dritter Block: Konzeptidee 7

Die Kodierungen für die siebte Konzeptidee zum Vergleich von Gleichstrom- und Wechselstromkreisen sind in Tabelle 25 zu sehen.

Tabelle 25: Kodierungen zur 7. Konzeptidee zu Gleichstrom- und Wechselstromkreisen in der zweiten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 7		IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$
Gleichstrom- und Wechselstromkreise	Erklärung								
	Akzeptanz	2	3	3	3	3	3	3	2,86
	Paraphrase	2	3	2	3	3	3	2	3,00
	Aufgabe	2	2	1	2	2	2	2	1,86

Wie man in Tabelle 25 erkennen kann, wurde diese Konzeptidee von fast allen Interviewpartner*innen gut aufgenommen (Akzeptanz). Es kamen bei den meisten keine Verständnisfragen oder Beschwerden seitens der Schüler*innen auf.

Einzig die Akzeptanz von IP8 wurde mit ‚gelb-2‘ kodiert. IP8 schien sich darüber unsicher zu sein, wie sich das Magnetfeld bei Wechselstrom verhält. IP8 schien sich darüber unsicher zu sein, wie sich das Magnetfeld bei Wechselstrom verhält. IP8 überlegte laut, dass sich das Magnetfeld die ganze Zeit ändert, was korrekt ist. Allerdings war die Unsicherheit darüber, ob die Oberflächenladungen im Fall von Wechselstrom genauso wären wie beim Gleichstrom, deutlich. Erst durch die Bestätigung der Interviewerin war IP8 zufrieden und akzeptierte die Erklärung.

Für die Bewertung der Paraphrase wurde die folgende Musterlösung zum Vergleich herangezogen (siehe Textbox 18):

Textbox 18: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 7 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Bisher hast du gehört, dass ein elektrisches System aus einer Energiequelle und einem Energieumwandler besteht. Außerdem wird manchmal ein Übertragermedium (z. B. Leiterkabel) benötigt. Die Energiequelle (z. B. Batterie) pumpt Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche, die ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter hervorrufen. Durch die Oberflächenladungen entsteht außerdem ein Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld um den Leiter erzeugt. Gemeinsam ergeben das elektrische und das magnetische Feld um den Leiter das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden.

In Gleichstromkreisen bewegen sich die Elektronen gerichtet vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle. Bei Wechselstromkreisen hingegen bewegen sie sich hin und her.

In der Paraphrase ging es vor allem darum, die Inhalte aus dem Ende des letzten Blocks noch einmal zusammenzufassen, nachdem durch die Mindmap-Aktivität eine Pause stattgefunden hatte. Diese Erklärung sollte die Interviewpartner*innen außerdem auf die Lösung der Aufgabe zu dieser Konzeptidee vorbereiten, indem sie noch einmal auf die Ursachen für das elektrische

und magnetische Feld hinwies, die sowohl bei Gleich- als auch Wechselstromkreisen relevant waren. Zudem wurde fachlich geklärt, was unter einem Gleich- beziehungsweise Wechselstromkreis zu verstehen war.

Die Paraphrase (P7) wurde von den meisten Interviewpartner*innen korrekt formuliert, wie man in Tabelle 25 erkennen kann, weshalb diese Passagen als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert wurden. Beispielsweise formuliert IP13 dies folgendermaßen:

„Also, es gibt einen Gleichstrom, dc, direct current. Und das ist, wenn sich die Elektronen nur in eine Richtung bewegen. Und dann gibt es den ac current, den Wechselstrom (...) und das ist, wenn sich die Batterie umpolt, also Minus zu Plus und Plus zu Minus.“ (R2-IP13, Pos. 293-295, 00:41:44-00:42:05)

Wie man anhand dieser Interviewpassage erkennen kann, konnte IP13 die Unterscheidung zwischen einem Gleich- und Wechselstromkreis fachlich korrekt wiedergeben.

Die Antworten von IP8, IP10 und IP14 wurden hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

IP8 benötigte bei der Paraphrase eine kleine Hilfestellung, um den Unterschied zwischen einem Gleich- und Wechselstromkreis deutlich zu erklären. Dazu fragte die Interviewerin, wie sich das Magnetfeld beim Wechselstrom verhält, woraufhin IP8 korrekt erwiderte:

„(...) dieses ändert sich glaub ich die ganze Zeit.“ (R2-IP8, Pos. 134, 00:49:46-00:49:48).

Darüber hinaus fanden sich in zwei Interviews kleine Unregelmäßigkeiten bei der Begriffswahl. IP10 verwendete beispielsweise den Begriff „magnetische Kraft“, anstatt vom Magnetfeld zu sprechen:

„(...) Ich glaube, dass die magnetische Kraft sich vielleicht verändert, eventuell?“ (R2-IP10, Pos. 208, 00:57:51-00:58:06)

IP14 sprach zudem von „Energiestrichen“ statt vom Energiefluss (R2-IP14, Pos. 351, 00:47:12-00:47:21). Ansonsten enthielten die Schüler*innenantworten aber die wichtigsten Aspekte gemäß der Musterlösung und wurden daher als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

In der zugehörigen Aufgabe sollten die Schüler*innen argumentieren, wie die Energie in Wechselstromkreisen übertragen wird. Dabei sollten sie erkennen, dass sich das magnetische und elektrische Feld periodisch ändern, die Richtung des Energieflusses aber stets gleich bleibt.

Diese Aufgabe konnte von niemanden ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) beantwortet werden. Die Interviewpartner*innen IP8, IP9, IP11, IP12, IP13 und IP14 konnten die Aufgabe aber zumindest teilweise lösen.

IP8, IP9 und IP14 benötigten jeweils eine kleine Hilfestellung, um zur richtigen Antwort zu gelangen. Dabei wurden sie Schritt für Schritt danach gefragt, welche Auswirkungen eine Umpolung auf das Magnetfeld, das elektrische Feld und zuletzt das elektromagnetische Feld und somit den Energiefluss haben könnte. Durch diese schrittweise Betrachtung gelang es ihnen, den Sachverhalt für den Wechselstromkreis korrekt zu beschreiben.

IP11 schaffte es zwar ohne Hilfestellung zur richtigen Antwort zu kommen, benötigte dafür aber sehr lange Bedenkzeit und schien sich bis zuletzt unsicher zu sein. Daher wurde auch diese Aussage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Die übrigen drei Interviewpartner*innen erkannten jeweils nur für eines der Felder (magnetisches oder elektrisches Feld), dass dieses bei einer Umpolung der Energiequelle die Richtung ändern muss. IP10 und IP12 beispielsweise nahmen an, dass nur das Magnetfeld die Richtung ändert, während das elektrische Feld gleich bleiben muss. IP12 begründete dies folgendermaßen:

„Man hätte die Energiequelle, die würde ja immer noch das elektrische Feld, das würde ja dann immer noch in dieselbe Richtung zeigen, weil das hängt ja nicht damit zusammen.“ (R2-IP12, Pos. 298, 00:52:31-00:52:51)

Diese Aussage korrigierte IP12 jedoch wenig später, als noch einmal einzeln nach dem magnetischen und elektrischen Feld gefragt wurde. Dies erfolgte wieder im oben beschriebenen Schritt-für-Schritt-Schema.

IP13 erkannte zwar, dass sich das elektrische und magnetische Feld im Wechselstromkreis ändern müssen, nahm jedoch an, dass die Magnetfelder im Wechselstromkreis kleiner sein müssten.

Die Antwort von IP10 wurde als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) bewertet, da hier selbst mit Hilfestellung klar wurde, dass das Thema noch nicht vollständig verstanden wurde. Die Interviewerin erklärte zunächst noch einmal, dass Wechselstrom bedeutet, dass sich die Pole der Energiequelle 50-mal pro Sekunde umpolen. Daraufhin erkannte IP10 zwar, dass das elektrische Feld die Richtung ändern müsste, konnte aber weiterhin nicht beschreiben, was mit dem magnetischen Feld passiert. IP10 gab schließlich an, bei der Antwort nur geraten zu haben:

„Also, ich rate jetzt nur. Aber, vielleicht kann das Magnetfeld zwischen den Elektronen beziehungsweise, nein. Ich weiß es leider nicht.“ (R2-IP10, Pos. 222, 00:59:57-01:00:14)

Dritter Block: Konzeptidee 8

Die Kodierungen für die achte Konzeptidee zur Energieerhaltung sind in Tabelle 26 zu sehen.

Tabelle 26: Kodierungen zur 8. Konzeptidee zur Energieerhaltung in der zweiten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 8		IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$
Energie- erhaltung	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	1	0	3	3	3	2	3	2,14
	Aufgabe	3	3	3	3	3	3	3	3,00

In Tabelle 26 ist ersichtlich, dass diese Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen gut aufgenommen wurde, weshalb die Akzeptanz durchwegs mit ‚grün-3‘ kodiert wurde. Es kamen keine Rückfragen von Seiten der Schüler*innen, sondern sie gaben durchwegs an, dass sie die Erklärung verstanden hätten.

Für die Bewertung der Paraphrase wurde die folgende Musterlösung zum Vergleich herangezogen (siehe Textbox 19):

Textbox 19: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 8 in der zweiten Interviewrunde.

Musterbeispiel: [Die Bestandteile eines elektrischen Systems sind durch ein elektromagnetisches Feld miteinander verbunden.] Das elektromagnetische Feld breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit von der Energiequelle zum Elektrogerät aus. Durch das Feld wird Energie übertragen.

Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht (in einem idealen Stromkreis) der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird (Energieerhaltung). [In der Realität wird ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben.]

Wesentlich bei der Paraphrase war, dass die Schüler*innen beschreiben konnten, dass sich das elektromagnetische Feld in Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld ausbreitet und dass die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird, entspricht.

Wie man in Tabelle 26 erkennen kann, konnte die Paraphrase bei IP10, IP11, IP12 und IP14 als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet werden. Diese Antworten enthielten also die wesentlichen Aspekte gemäß der Musterlösung in Textbox 19. Beispielsweise formulierte IP12 seine Antwort folgendermaßen:

„(...) es wirkt zwar immer so, dass – wenn man etwas aufdreht oder ansteckt – es direkt angeht. Aber es hat eigentlich schon Verzögerung – aber es ist eben so schnell, dass man es mit dem menschlichen Auge nicht auffassen kann – also fast Lichtgeschwindigkeit. Und die Energie, die unsere Energiequelle abgibt, also das, was sie quasi in den Raum schickt durch den Stromkreis, das kommt auch alles immer beim Energieumwandler an. In einem idealen Kreislauf natürlich, weil immer

etwas an die Umwelt abgegeben wird. Man kann von Energieerhaltung reden.“ (R2-IP12, Pos. 320, 00:55:41-00:56:18)

Wie man anhand dieser Interviewpassage erkennen kann, konnte IP12 die wesentlichen Aspekte der Musterlösung präzise wiedergeben. IP12 beschrieb korrekt, dass sich das elektromagnetische Feld mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausbreitet und dass die abgegebene Energie der Energiequelle in einem idealen Stromkreis vollständig am Energieumwandler ankommt. Zudem erwähnte IP12 die Verzögerung, die zwar existiert, jedoch aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Feldes für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar ist. Schließlich wurde auch das Konzept der Energieerhaltung betont und darauf hingewiesen, dass in der Realität ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird.

Die Paraphrase von IP13 wurde dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Der Energieübertragungsprozess von der Energiequelle zum Energieumwandler wurde von IP13 damit begründet, dass Energie teilweise „verloren geht“. Auf eine Nachfrage der Interviewerin antwortete IP13, dass sie

„(...) in eine andere Energie umgewandelt wird, zum Beispiel Wärmeenergie“ (R2-IP13, Pos. 329, 0:45:29-00:45:34)

Obwohl dies korrekt ist, wurde diese Stelle als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, da IP8 die Ergänzung der Energieumwandlung von sich aus nicht erwähnt hätte, dies aber ein entscheidender Aspekt dieser Konzeptidee ist.

Die Aussage von IP8 wurde als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) bewertet. IP8 erwähnte zwar die Begriffe 'Energiefluss' und 'Magnetfeld', konnte diese aber nicht sinnvoll einsetzen. Beispielsweise wurde von IP8 erwähnt, dass der „Energiefluss die Energie in der Zahnbürste anregt“, wie aus folgender Interviewpassage hervorgeht:

„(...) Und ich nehme mal an, da der Energiefluss ja ähm sozusagen um den Raum herum ist, ähm fließt der / bewegt sich dieser eben auch durch die Zahnbürste selber und ähm regt dort eben den Energiefluss / also die Energie auch wieder an.(...)“ (R2-IP8, Pos. 144, 00:52:23-00:53:14)

Zudem benannte IP8 das elektromagnetische Feld nicht als Ursache des Energieflusses.

Die Paraphrase von IP9 wurde leider übersehen, es liegen hierzu keine Daten im Transkript vor.

In der Aufgabe zu dieser Konzeptidee sollten die Interviewpartner*innen den Energieübertragungsprozess in einem anderen Kontextbeispiel (z. B. elektrische Zahnbürste) beschreiben, indem sie auf das zuvor eingeführte Erklärungsmodell rund um elektromagnetische Felder zurückgreifen. Dies gelang allen Interviewpartner*innen. Sie waren in der Lage zu beschreiben,

dass beispielsweise bei einer elektrischen Lampe das Licht aufleuchtet oder bei einer Zahnbürste der Motor startet, sobald Energie übertragen wurde.

Dritter Block: Konzeptidee 9

Die Kodierungen für die neunte Konzeptidee zum Rucksackmodell als gängige Fehlvorstellung beim Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen sind in Tabelle 27 zu sehen.

Tabelle 27: Kodierungen zur 9. Konzeptidee zur Energieerhaltung in der zweiten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 9		IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13	IP14	$\bar{x}$
Rucksackmodell	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	2	2	3	3	3	3	3	2,71
	Aufgabe	1	2	3	3	3	2	2	2,29

In Tabelle 27 ist ersichtlich, dass diese Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen gut aufgenommen wurde, weshalb die Akzeptanz mit ‚grün-3‘ kodiert wurde.

Für die Bewertung der Paraphrase wurde die nachstehende Musterlösung (siehe Textbox 20) herangezogen:

Textbox 20: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 9 in der zweiten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Die Elektronen transportieren nicht die Energie, die zum Betrieb der Glühlampe notwendig ist (sie bewegen sich in einem Bummeltempo von etwa $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$). Ihre stetige Bewegung ist aber notwendig, damit es ein elektromagnetisches Feld geben kann.

Wesentlich bei der Paraphrase war, dass die Schüler*innen beschreiben konnten, dass die Elektronen zwar nicht die eigentliche Energie zur Glühlampe transportieren, ihre Bewegung jedoch essenziell ist, um das elektromagnetische Feld zu erzeugen, welches für den Energietransport und letztlich für den Betrieb der Glühlampe verantwortlich ist. Dabei war es wichtig, dass die Schüler*innen verstanden, dass das Tempo der Elektronen ($5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) sehr gering ist, ihre kontinuierliche Bewegung jedoch die notwendige Bedingung für die Existenz des magnetischen und somit des elektromagnetischen Feldes darstellt.

Diese Paraphrase wurde bei fast allen Schüler*innen als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert (siehe Tabelle 27). Beispielsweise wurde IP13 im Interview gefragt, ob die Elektronen die alleinige Ursache für die Energieübertragung seien. IP13 antwortete daraufhin:

„(...) Ein elektrisches Feld ist auch vorhanden ohne, also, ohne, dass sich die Elektronen bewegen. Nur wegen der Oberflächenladungen. Und, das magnetische Feld spielt da auch eine Rolle mit dem. Und, wenn sich die Elektronen bewegen,

kommt auch ein magnetisches Feld zustande (...) und deswegen hat die Geschwindigkeit nichts mit den Elektronen zu tun.“ (R2-IP13, Pos. 344-351, 00:47:13-00:48:22)

Diese Aussage zeigt, dass IP13 verstanden hatte, dass sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld eine Rolle spielen und dass die Bewegung der Elektronen zur Erzeugung des magnetischen Feldes beiträgt, was essenziell für das elektromagnetische Feld ist. Zudem verdeutlicht die Antwort, dass IP13 erkannt hatte, dass nicht die Geschwindigkeit der Elektronen, sondern die Existenz ihres kontinuierlichen Flusses entscheidend für die Energieübertragung ist.

Die Paraphrase von IP8 und IP9 wurde hingegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. IP8 interpretierte beispielsweise die Lichtgeschwindigkeit als „Einheit der Energie“, wie aus folgender Passage ersichtlich wird:

„(...) also das Magnetfeld gibt es, wenn sich eben die Elektronen bewegen, also wenn ein Strom fließt und eben das elektrische Feld / und da es sich dann um EM-Felder handelt / ähm ist dessen Einheit / die können es [Energie] eben mit Lichtgeschwindigkeit übertragen, und das wäre dann eben die Einheit. (...) (R2-IP8, Pos. 162, 00:58:02-00:58:39)

IP9 konnte zwar richtig wiedergegeben, dass die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld im Raum um den Leiter stattfindet, allerdings wurde bei der Aufzählung der notwendigen Dinge für diese Energieübertragung nur folgendes genannt:

"Naja, man braucht einen Pluspol und einen Minuspol und eine Energiequelle" (R2-IP9, Pos. 210, 00:56:56-00:57:29)

Der Energieumwandler, als notwendiger Bestandteil des elektrischen Systems, wurde von IP9 jedoch nicht erwähnt.

Bei der Aufgabe zu dieser Konzeptidee sollten die Schüler*innen erklären, warum die Elektronen auch in einem Wechselstromkreis nicht allein für die Energieübertragung verantwortlich sind.

Die Interviewpartner*innen IP10, IP11 und IP12 konnten diese Aufgabe richtig beantworten. Sie argumentierten, dass die Energieübertragung über das elektromagnetische Feld stattfindet und dass bei einem Wechselstromkreis nicht alle Elektronen von der Energiequelle zum Energieumwandler gelangen, da sie sich auf ihren Positionen periodisch hin- und herbewegen. IP12 formulierte dies folgendermaßen:

„Die Elektronen sind nur in dem Sinne dafür verantwortlich in Anführungszeichen, weil sie geladene Partikel sind, die sich bewegen und eben dadurch, dass sie sich bewegen, hat man dann das mit dem magnetischen Feld. Und je nachdem, vom Kontext her, wenn wir zum Beispiel was angeschlossen haben bei einer Energiequelle - dann haben wir ein elektrisches Feld und dann den Energiefluss. Aber sie direkt sind nicht diejenigen, die Energie übertragen.“ (R2-IP12, Pos. 336, 00:58:18-00:58:48)

Wie aus dieser Interviewpassage hervorgeht, beschrieb IP12, dass die Elektronen nur indirekt zur Energieübertragung beitragen, indem ihre Bewegung das magnetische Feld erzeugt, welches Teil des elektromagnetischen Feldes ist. Dieses elektromagnetische Feld ist dann für die Energieübertragung verantwortlich. Durch die präzise Beschreibung der Rolle der Elektronen und der Bedeutung des elektromagnetischen Feldes konnte diese Aussage somit als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert werden.

Bei den Interviewpartner*innen IP9, IP13 und IP14 wurden die Antworten aufgrund unterschiedlicher Gründe jeweils als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. IP9 konnte die Aufgabe zunächst nicht beantworten und stellte infrage, ob ein Elektronenfluss wirklich ein Stromfluss sei. Nach einer gezielten Nachfrage durch die Interviewerin wurde jedoch deutlich, dass IP9 verstanden hatte, dass die Energie nicht durch die Elektronen selbst, sondern über das elektromagnetische Feld übertragen wird. Darüber hinaus erkannte IP9, dass die Bewegung der Elektronen zumindest eine notwendige Voraussetzung für die Entstehung des Magnetfeldes ist. Die Antwort von IP13 war nur teilweise korrekt, da zentrale physikalische Zusammenhänge zur Energieübertragung im Wechselstromkreis weder klar noch fachlich präzise dargestellt wurden. Zwar nannte IP13 wichtige Begriffe wie Oberflächenladungen, elektrisches Feld und magnetisches Feld, formulierte diese jedoch unstrukturiert und ohne erkennbaren Bezug zum zugrunde liegenden Mechanismus der Energieübertragung. IP3 erklärte:

IP13: „(...) Ein elektrisches Feld ist auch vorhanden ohne, also, ohne, dass sich die Elektronen bewegen. (...) Nur wegen der Oberflächenladungen. Und, das magnetische Feld spielt da auch eine Rolle mit dem. Und, wenn sich die Elektronen bewegen, kommt auch ein magnetisches Feld zustande. (...) Und deswegen hat die Geschwindigkeit nichts mit den Elektronen zu tun“ (R2-IP13, Pos. 345-347, 00:47:32-00:48:03)

Insbesondere die Formulierung „deswegen hat die Geschwindigkeit nichts mit den Elektronen zu tun“ war missverständlich, da sie suggerieren konnte, die Bewegung der Elektronen sei irrelevant, obwohl diese notwendig ist, um das elektromagnetische Feld zu erzeugen. Die grundlegende physikalische Idee, dass die Energie über das elektromagnetische Feld und nicht durch

den direkten Transport der Elektronen übertragen wird, wurde in der Antwort von IP13 somit lediglich angedeutet, aber nicht hinreichend erläutert.

IP14 erkannte zunächst zutreffend, dass die Elektronen für die Ausbildung eines magnetischen Feldes verantwortlich sind und die Energieübertragung durch elektromagnetische Felder erfolgt. Damit wurde der zentrale Mechanismus der Energieübertragung im Wechselstromkreis im Wesentlichen richtig erfasst. Allerdings ergänzte IP14 als Begründung, die Elektronen könnten ihre kinetische Energie in Wechselstromkreisen nicht in andere Energieformen umwandeln, weil sie sich weiterhin bewegen und somit keine Energie „abgeben“ würden (R2-IP14, Pos. 439, 00:58:27-00:59:05).

Die Antwort von IP8 wurde als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) bewertet. IP8 nannte die Lichtgeschwindigkeit wieder fälschlicherweise als Einheit der Energie. Weiterhin äußerte IP8, dass das elektrische Feld „nicht unbedingt abhängig von der Geschwindigkeit [ist], mit welcher sich die Elektronen jetzt bewegen“ (R2-IP8, Pos. 158, 00:55:41-00:56:32). Damit wurde zwar richtig erkannt, dass das elektrische Feld nicht direkt von der Elektronengeschwindigkeit abhängt, jedoch wurde die Rolle des magnetischen Feldes, das durch die Bewegung der Elektronen entsteht, nicht erwähnt. Insgesamt entsprach die Antwort nicht den fachlichen Anforderungen der Aufgabe.

5.2.3.3 Längsschnittanalyse

In diesem Abschnitt wird, analog zur ersten Interviewrunde, eine Längsschnittanalyse präsentiert, um detailliertere Einblicke zu gewinnen. Die Analyse konzentriert sich auf zwei der sieben Interviews der zweiten Runde: Einen Fall mit erfolgreichem Verlauf und einen weiteren mit deutlich größeren Herausforderungen.

Erste Längsschnittanalyse mit einem positiven Beispiel: Interview mit IP11

Die Interviews mit IP11 und IP12 stellen zwei Positivbeispiele dar. Beide erzielten einen Durchschnittswert von $\bar{x} = 2,83$ von 3,00 bei der Längsschnittanalyse der Kodierungen.

Im Folgenden wird das Beispiel von IP11 näher erläutert. Dieses fand am 04.02.2022 um 17:00 Uhr statt und dauerte eine Stunde und 11 Minuten.

Wie aus Tabelle 19 ersichtlich ist, wurden bei Konzeptidee 1 und 2 (Einführung elektrischer Systeme als Energieübertragungssysteme mit Definitionen für kabellose und kabelgebundene Systeme sowie Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium) Akzeptanz und Paraphrasierung als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert. Lediglich die beiden Zuordnungsaufgaben wurden als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

IP11 schien bei den Aufgaben auf Vorwissen zurückzugreifen, und verwendete den Begriff „Stromquelle“ um die Energiequelle zu beschreiben. Dies wurde daher nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, weil die Begriffe des Unterrichtsdesigns verwendet werden sollten. Dennoch zeigte IP11 ein grundlegendes Verständnis für die zugrunde liegenden Konzepte, wie aus folgendem Interviewausschnitt hervorgeht:

I: „(...) In diesem Beispiel mit dem elektrischen Föhn - kannst du mir da vielleicht noch ein bisschen genauer zuordnen, was jetzt welcher Begriff ist?“

IP11: „Ähm. Also, das war eine Stromquelle. Das ist dann die Steckdose. Also, das Weiße. Wobei man am Schaltplan eventuell sogar den Stecker an sich dafür nehmen würde, aber das ist, glaube ich, nicht so wichtig in dem Fall.“

I: „Ja, vermische jetzt nicht immer Schaltpläne mit echten Beispielen. Also, das werden wir uns später eh noch anschauen. Jetzt reicht es nur einmal, das Bild anzusehen.“

IP11: „Ja, und dann den Energieumwandler. Ähm. Dabei müsste man ja, weil der Motor alleine/ Eigentlich müsste es sogar der Motor alleine sein, weil ich habe immer noch die innere Energie und die kinetische Energie dabei. Und damit habe ich den Motor alleine, der da drinnen verbaut ist. Also, die Rotorblätter, bräuchte ich sogar gar nicht, die wären dann nur, um den Effekt zu beschreiben.“

(R2-IP11, Pos. 29-32, 00:06:12-00:07:18)

IP11 ordnete die Begriffe korrekt zu, verwendete jedoch für die Energiequelle einen alternativen Begriff. In der zweiten Aufgabe, bei der die Begriffe im Kontext einer elektrischen Zahnbürste auf einer Ladestation zugeordnet werden sollten, griff IP11 erneut auf den Begriff „Stromquelle“ zurück.

Die dritte Konzeptidee (Konzeptidee zum magnetischen Feld), die vierte Konzeptidee (Konzeptidee zum elektrischen Feld) und die fünfte Konzeptidee (Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen) wurden durchwegs als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert. Jedoch wurde die Aufgabe nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet, da IP11 zwar grundlegende Konzepte ansprach, dabei jedoch Unsicherheit zeigte und längere Bedenkzeit benötigte. IP11 beschrieb, dass sich sowohl das magnetische als auch das elektrische Feld periodisch verändern, während der Energiefluss in konstanter Richtung erfolgt. Dies wurde durch folgende Aussage deutlich:

"Dass sich alle Felder auf- und dann wieder abbauen, das heißt, sie werden schwächer oder stärker, und das bei Wechselstrom" (R2-IP11, Pos. 272, 00:58:32-00:59:43)

Die achte und neunte Konzeptidee (Konzeptidee zur Energieerhaltung und zum Rucksackmodell) konnten wieder durchgehend als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass IP11 trotz gelegentlicher Unsicherheiten und der wiederholten Verwendung des Begriffs 'Stromquelle' anstelle von 'Energiequelle' eine insgesamt gute Bearbeitung der Aufgaben im Interviewverlauf zeigte und zentrale Inhalte des Unterrichtsdesigns aufgriff. Dies spiegelte sich auch im positiven Feedback wider, das IP11 nach dem Interview äußerte.

Zweite Längsschnittanalyse mit einem weniger positiven Beispiel: Interview mit IP8

Ein Beispiel für ein Interview, bei dem größere Herausforderungen sichtbar wurden, ist der Fall von IP8, der nur einen Durchschnittswert von $\bar{x} = 2,48$ von 3,00 bei der Längsschnittanalyse der Kodierungen erreichte. Das Interview fand am 27.01.2022 um 16:00 Uhr statt und dauerte rund eine Stunde.

Wie aus den Interviewergebnissen ersichtlich ist (siehe Tabelle 19) begann das Interview zunächst gut. Die Akzeptanz, Paraphrasen und Aufgaben zu den Konzeptideen 1 und 2 (Einführung elektrischer Systeme als Energieübertragungssysteme mit Definitionen für kabellose und kabelgebundene Systeme sowie Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium) sowie zur dritten Konzeptidee (magnetisches Feld) wurden durchweg als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert. Es gab keine Verständnisschwierigkeiten, und IP8 konnte die Paraphrasen gemäß der Musterlösungen korrekt beantworten. Die entsprechenden Aufgaben wurden ebenfalls richtig gelöst.

Erst bei der vierten Konzeptidee (Konzeptidee zum elektrischen Feld) traten erstmals Schwierigkeiten auf. Während die Akzeptanz und Paraphrase noch als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert werden konnten, wurden die beiden Aufgaben nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. Bei der ersten Aufgabe zu dieser Konzeptidee sollte IP8 erklären, dass auch in einem offenen Stromkreis Oberflächenladungen auf den Leiterkabeln vorhanden sind. IP8 zeigte jedoch Unsicherheiten in der Antwort auf die Frage, ob ein Alufolienstück in einem offenen Stromkreis weiterhin abgelenkt werde. Wie bereits in der Querschnittsanalyse beschrieben, verneinte IP8 dies mit der Begründung, dass kein Strom durch den Leiter fließe und daher kein elektrisches Feld vorhanden sei, das die Alufolie beeinflussen könnte. IP8 ging offenbar davon aus, dass ein elektrisches Feld nur bei tatsächlichem Elektronenfluss im Leiter existiert, was eher auf das Magnetfeld zutrifft. In der zweiten Aufgabe sollten die Schüler*innen Beispiele aus ihrem Alltag nennen, wo elektrische Felder vorkommen. IP8 konnte zunächst kein Beispiel

nennen, erinnerte sich jedoch etwas später an elektrische Systeme wie den elektrischen Föhn. Diese Antwort wurde daher als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet, da IP8 Unterstützung benötigte, um auf die richtige Lösung zu kommen.

Bei der fünften Konzeptidee (Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen) gab es eine Rückfrage von IP8 bezüglich der Stromrichtung und wie diese den Energiefluss beeinflusst, die jedoch schnell geklärt werden konnte. Die Akzeptanz wurde aufgrund dieser Rückfrage mit ‚gelb-2‘ bewertet, während die Paraphrase als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) eingestuft wurde. Die Aufgabe erhielt jedoch erneut nur eine ‚teilweise korrekte‘ (gelb-2) Bewertung, da IP8 den Ausdruck ‚Verbraucher‘ anstelle von ‚Energieumwandler‘ verwendete.

Laut eigener Aussage zeigte IP8 ab der siebten Konzeptidee Unsicherheiten bei der Beantwortung einzelner Fragen. Obwohl die Antworten schließlich korrekt formuliert wurden, war ein gewisser Zweifel erkennbar. Diese Unsicherheit spiegelte sich in der durchgängig als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewerteten Beurteilung der siebten Konzeptidee (Gleichstrom- und Wechselstromkreise) wider. Bereits bei der Akzeptanz gab IP8 an, sich bei der Erklärung noch unsicher zu fühlen. Bei der Paraphrase gelang es IP8 nur mit einer Hilfestellung der Interviewerin, die Erklärung wiederzugeben, indem diese explizit nachfragte, was mit dem Magnetfeld bei einem Wechselstromkreis geschieht. In der zugehörigen Aufgabe sollte IP8 erklären, wie die Energieübertragung in einem Wechselstromkreis funktioniert. IP8 erarbeitete die Antwort selbstständig, indem die Auswirkungen der Umpolung auf das B-Feld und E-Feld gemeinsam mit der Interviewerin schrittweise durchgesprochen wurden. Da diese Erklärung jedoch von der Interviewerin angeleitet werden musste, wurde auch diese Passage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Besonders auffällig war der Fall bei der achten Konzeptidee (Konzeptidee zur Energieerhaltung). IP8 empfand die Erklärung zwar als verständlich, zeigte jedoch bei der Paraphrase Schwierigkeiten. Obwohl die Begriffe ‚Energiefluss‘ und ‚Magnetfeld‘ genannt wurden, konnten diese nicht korrekt im Erklärungskontext angewendet werden. Wie schon in der Querschnittsanalyse erläutert, sprach IP8 beispielsweise davon, dass der Energiefluss die Energie in der Zahnbürste ‚anrege‘. Es wurde nicht erkannt, dass zur Energieübertragung neben dem magnetischen Feld auch ein elektrisches Feld vorhanden sein muss. Die anschließende Aufgabe konnte IP8 jedoch problemlos lösen.

Bei der neunten Konzeptidee (Konzeptidee zum Rucksackmodell) wurde die Akzeptanz als ‚grün-3‘ kodiert, jedoch wurde die Paraphrase nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. Wie bereits oben in der Querschnittsanalyse beschrieben, konnte IP8 die Paraphrase im Wesentlichen gemäß der Musterlösung wiedergeben, interpretierte jedoch die Lichtgeschwindigkeit

fälschlicherweise als Einheit der Energie. In der zugehörigen Aufgabe erwähnte IP8 erneut die Lichtgeschwindigkeit als Einheit der Energie, obwohl diese von der Interviewerin korrigiert wurde. Zudem zeigte sich eine Verwechslung des magnetischen mit dem elektrischen Feld, wie aus der Aussage hervorgeht, dass das elektrische Feld "nicht unbedingt abhängig von der Geschwindigkeit [ist], mit welcher sich die Elektronen jetzt bewegen" (R2-IP8, Pos. 158, 00:55:41-00:56:32). Aufgrund dieser Missverständnisse wurde die Antwort von IP8 als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) bewertet. Ab der Mitte des Interviews ließ die Leistung jedoch nach. Dies ging mit einer Verwechslung physikalischer Begriffe und Unsicherheiten bei den Konzepten einher. Für zukünftige Interviews empfiehlt es sich, solche Schwankungen im Verständnis genauer zu untersuchen und gegebenenfalls zusätzliche Hilfestellungen anzubieten, um das Verständnis der Schüler*innen besser zu unterstützen.

5.2.3.4 Auswertung der Mindmaps

Im Rahmen einer neuen Aufgabe in der zweiten Interviewrunde wurden die Interviewpartner*innen gebeten, nach dem zweiten Block ein Mind-Map zu erstellen. Dies sollte einerseits dabei helfen, die vielen neuen Worte zu wiederholen und andererseits, um diese zu ordnen und Beziehungen herzustellen. Diese Übersicht sollte anschließend verwendet werden, falls es beim dritten und letzten Block Schwierigkeiten geben sollte. Eine Auswahl der dabei entstandenen Mindmaps wird im Folgenden vorgestellt. Bei den dargestellten Mindmaps handelt sich um Rekonstruktionen der Originale.

Mindmap von IP8:

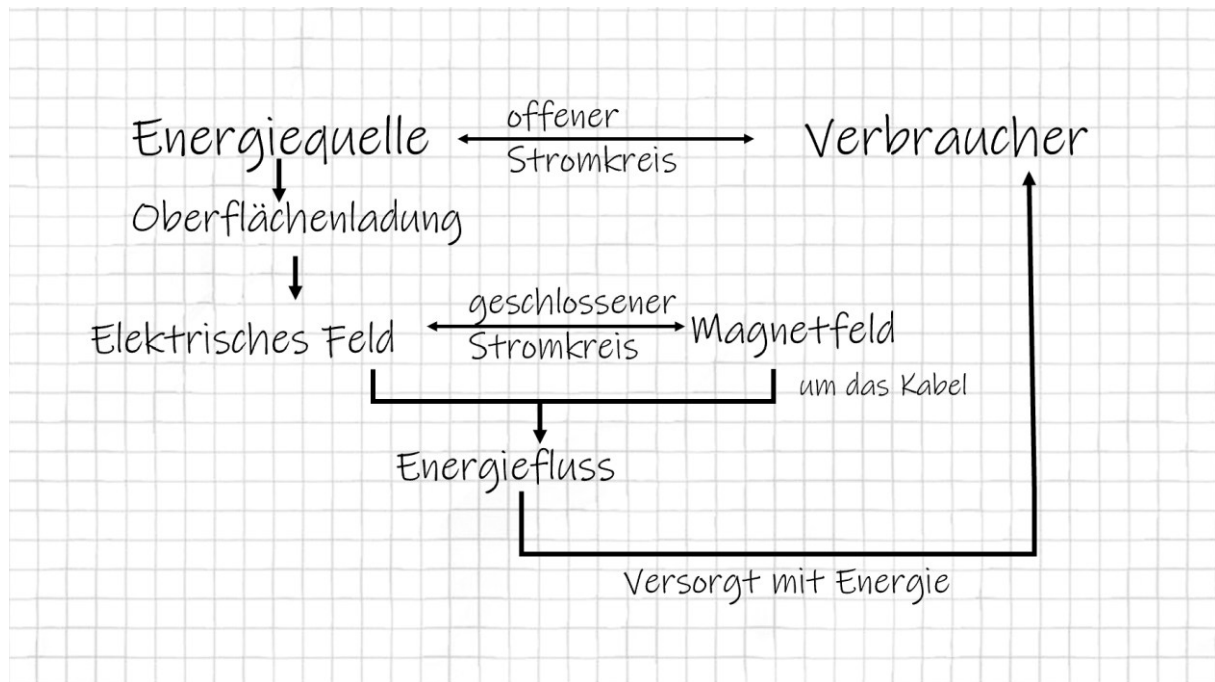


Abbildung 38: Rekonstruierte Mindmap von IP8

Das erste hier dargestellte Mindmap stammt von IP8. Wie man sehen kann, wurden hier vor allem einige wichtige Schlagwörter aufgeschrieben, während auf Zeichnungen verzichtet wurde. Die Begriffe ‚Energiequelle‘ und ‚Verbraucher‘ sind am größten dargestellt. Es handelt sich hierbei vermutlich um einen Bezug auf den Beginn des Interviews, als eine Unterscheidung der verschiedenen Bestandteile des Stromkreises besprochen wurden. Man beachte, dass hier anstatt ‚Energieumwandler‘ der Begriff ‚Verbraucher‘ geschrieben wurde. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass der neue Begriff nicht angenommen wurde.

Interessant ist auch die Beschriftung des Pfeiles, der vom Begriff ‚Energiefluss‘ zu ‚Verbraucher‘ geht. Hier steht ‚Versorgt mit Energie‘. Dies klingt so, also würde der Energiefluss ein Mechanismus sein, der den Verbraucher mit Energie versorgt. Dabei könnte eine Energieverbrauchsvorstellung zugrunde liegen. In der nächsten Interviewrunde sollte daher unbedingt beachtet werden, mehr Wert auf den Energieumwandlungsaspekt zu legen.

Mindmap von IP9:

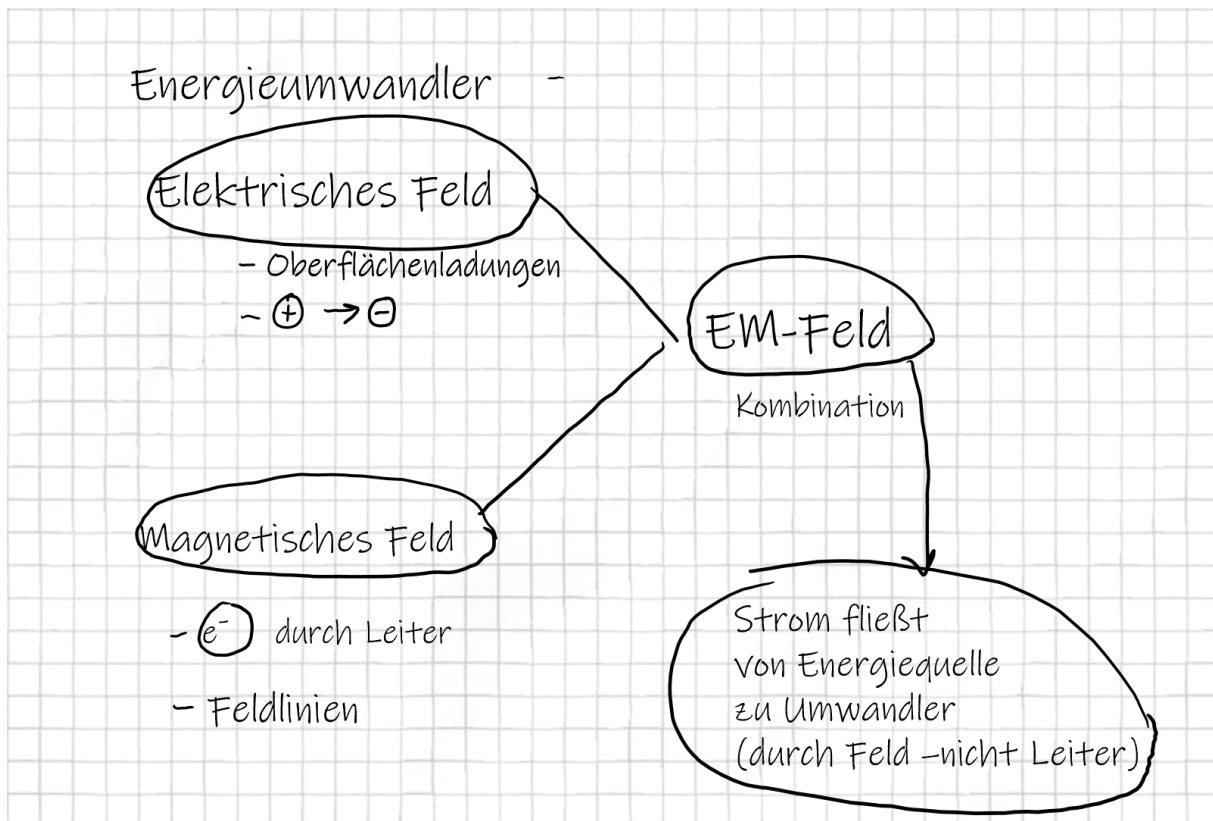


Abbildung 39: Rekonstruierte Mindmap von IP9

In diesem Mind-Map hat IP9 einige zentrale Begriffe aufgeschrieben, die mit Pfeilen miteinander verknüpft wurden. Die Struktur dieses Diagramms scheint auf den ersten Blick sehr logisch aufgebaut zu sein: Links sind die beiden Begriffe ‚Elektrisches Feld‘ und ‚Magnetisches Feld‘ zu sehen. Darunter sind jeweils ein paar zusätzliche Informationen notiert (Ursache des Feldes und Feldlinien). Diese beiden Begriffe führen über eine Verbindung zum Wort ‚EM-Feld‘. Darunter steht ‚Kombination‘, was so interpretiert werden kann, dass das elektromagnetische Feld die kombinierte Wirkung aus elektrischem und magnetischem Feld darstellt. Von diesem Begriff führt wiederum ein Pfeil in eine Blase, die folgendes enthält: ‚Strom fließt von Energiequelle zu Umwandler (durch Feld- nicht Leiter)‘. Insgesamt finden sich hier keine fachlichen Fehler und das Mindmap scheint eine gute Übersicht zu bieten.

Mindmap von IP10:

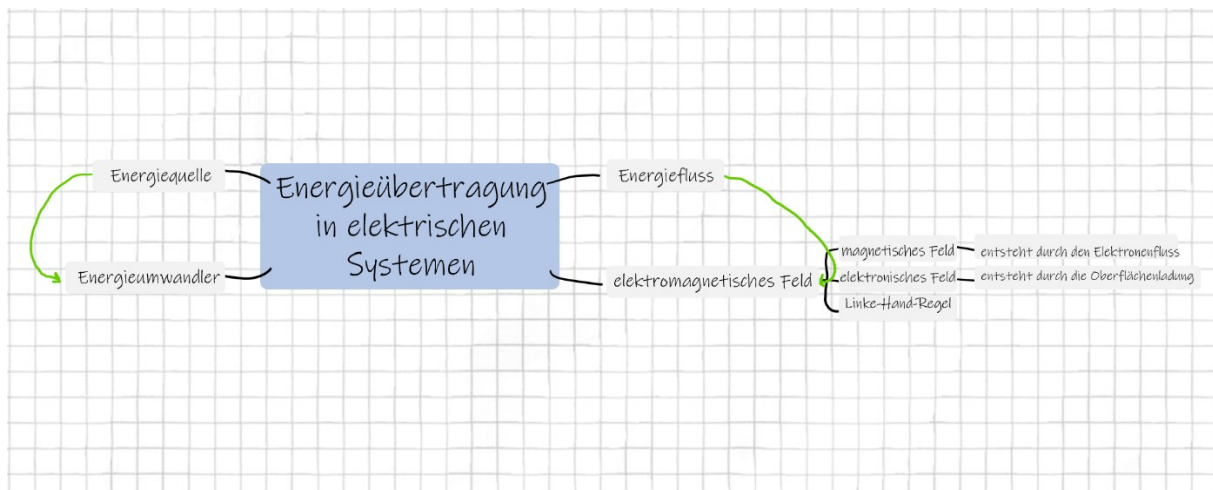


Abbildung 40: Rekonstruierte Mindmap von IP10

Für dieses Mindmap wurde eine sehr klare und einfache Struktur gewählt. In der Mitte steht die Überschrift ‚Energieübertragung in elektrischen Systemen‘. Links davon sind die beiden Hauptbestandteile eines elektrischen Systems (Energiequelle und Energieumwandler) aufgeschrieben. Rechts von der Überschrift finden sich die Begriffe ‚Energiefluss‘ und ‚elektromagnetisches Feld‘. Von letzterem gehen weitere Begriffe aus, nämlich die Einzelfelder, sowie die Linke-Hand-Regel. IP10 hat neben das magnetische und das elektrische Feld jeweils ihre Ursachen aufgeschrieben (Elektronenfluss beziehungsweise Oberflächenladungen), was darauf schließen lässt, dass das Gesamtkonzept vermutlich gut aufgenommen wurde.

Die Mindmaps der anderen Interviewpartner*innen wurden hier nicht im Detail dargestellt, da sie in Struktur und Inhalt den gewählten Beispielen stark ähnelten. In allen Fällen wurden zentrale Begriffe aufgegriffen, teilweise miteinander verknüpft und teils durch kurze Erläuterungen ergänzt. Unterschiede zeigten sich vor allem in der grafischen Gestaltung und der Tiefe der Ausführung. Die drei vorgestellten Beispiele wurden exemplarisch ausgewählt, da sie typische Tendenzen sowie einzelne inhaltlich besonders interessante Aspekte sichtbar machen.

5.2.4 Diskussion und Überarbeitung des LLAs nach Runde 2

In diesem Kapitel werden die geplanten Anpassungen für die nächste Runde der Akzeptanzbefragungen ausführlich dargelegt. Diese basieren nicht nur auf den Erkenntnissen aus der qualitativen Inhaltsanalyse der zweiten Interviewrunde, die im Kapitel 5.2.3.1 beschrieben sind, sondern auch auf zusätzlichen Beiträgen von Fachexpertinnen und -experten der Physikdidaktik. Diese Änderungsvorschläge wurden im Rahmen eines Forschungsseminars auf der Universität Wien eingeholt, bei dem die aktuellen Interviewergebnisse präsentiert und diskutiert wurden. Ziel dieser Anpassungen ist es, das Unterrichtsdesign zu optimieren und in der dritten Interviewrunde eine höhere Akzeptanz zu erzielen.

5.2.4.1 Übersicht der Änderungen anhand der Ergebnisse aus Runde 2

Die im Folgenden dargestellten Änderungen des LLAs basieren auf der qualitativen Inhaltsanalyse der zweiten Interviewrunde.

Erster Block: K1 und K2, Energiequelle und -umwandler und kabelgebundene sowie kabellose elektrische Systeme

Im ersten Block dieser Interviewrunde wurde deutlich, dass die Begriffe ‚Energieumwandler‘ und ‚Energiequelle‘ von den Interviewpartner*innen überwiegend korrekt verwendet wurden. Dennoch traten vereinzelt Präkonzepte auf, wie beispielsweise die Verwendung des Begriffs ‚Stromquelle‘ statt ‚Energiequelle‘ oder ‚Energienutzer‘ anstatt ‚Energieumwandler‘. Diese Fehlzuordnungen deuten auf Unsicherheiten in der fachlichen Begriffsklärung hin. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden in der zweiten Interviewrunde die zentralen Begriffe ‚Energiequelle‘ und ‚Energieumwandler‘ direkt auf den PowerPoint-Folien als Text sichtbar eingeblendet. Ziel dieser Maßnahme war es, die korrekte Begriffsnutzung zu unterstützen und Verwechslungen zu reduzieren. Für die dritte Interviewrunde wurde darauf aufbauend entschieden, diesen Ansatz weiter zu verstärken: Die neuen Begriffe sollten nicht nur in den Erklärungen sichtbar sein, sondern auch im Rahmen einer gezielten Zuordnungsaufgabe Anwendung finden. Durch diese kontextuelle Verankerung sollten die Schüler*innen die Begriffe nicht nur wiedergeben, sondern aktiv in ihrem fachlichen Verständnis verankern.

Zudem wurde beschlossen, die Konzeptideen K1 (Energiequelle) und K2 (Energieumwandler) in der kommenden Runde getrennt abzufragen. Diese Differenzierung ermöglicht eine präzisere Auswertung und erlaubt gezieltes, individuelles Feedback zu den jeweiligen Konzepten.

Zweiter Block: K3, Versuch zum magnetischen Feld

Die Ergebnisse der zweiten Interviewrunde zeigen, dass die Versuche 1a und 1b zum magnetischen Feld von den Interviewpartner*innen insgesamt positiv aufgenommen wurden. Um die individuellen Präferenzen der Teilnehmenden zu erfassen, wurden den Interviewpartner*innen IP12, IP13 und IP14 beide Versuche gezeigt, wobei Versuch 1b zunächst demonstriert und anschließend Versuch 1a vorgestellt wurde.

Zwei der drei Interviewpartner*innen (IP12 und IP13) bevorzugten Versuch 1b, da sie lieber mit Kompassen arbeiteten, die ihnen aus dem Unterricht bereits vertraut waren, statt mit dem unbekannten Messgerät der Strommesszange. IP12 betonte jedoch, dass Versuch 1a als Ergänzung sinnvoll sei, da er ein anschauliches Anwendungsbeispiel darstelle und eine Verbindung zum Alltag herstelle. IP14 beschrieb Versuch 1a als „anschaulicher“, sofern die Kompassnadeln eine ausreichende Ablenkung zeigten. Andernfalls präferierte IP14 Versuch 1b, da dieser aufgrund des Messgeräts als zuverlässiger erschien. Gleichzeitig äußerte IP14 Bedenken bezüglich der Zuverlässigkeit der Kompassnadeln, da diese teilweise bereits magnetisiert seien und nicht immer eine klare Ablenkung zeigten.

Auf Grundlage dieser Befunde wurde für die dritte Interviewrunde entschieden, Versuch 1b als primären Versuch einzusetzen, während Versuch 1a lediglich als ergänzende Demonstration oder in Form einer Aufgabe verwendet werden soll. Zudem wurde beschlossen, explizit darauf hinzuweisen, dass Magnetfeldlinien lediglich eine Anschauungshilfe darstellen. Um Missverständnisse, wie sie im Interview mit IP14 auftraten, zu vermeiden, sollte beispielsweise folgender Hinweis in die Erklärung integriert werden: ‚Das magnetische Feld kann mit Magnetfeldlinien beschrieben werden. Beachte jedoch, dass diese nur eine Anschauungshilfe sind, mit der einige Eigenschaften magnetischer Felder gut veranschaulicht werden können.‘

Zweiter Block: K4, Elektrostatisches Feld um Energiequelle

Im Rahmen der Konzeptidee 4, die den Versuch zum elektrischen Feld (E-Feld) behandelt, zeigte sich, dass der Unterschied zwischen den Oberflächenladungen an der Leiteroberfläche und den Ladungen im Leiterinneren nicht durchgängig klar war. Einige Interviewpartner*innen griffen auf bereits im Physikunterricht erworbene Vorstellungen zurück und vermischten diese mit den neu eingeführten Konzepten. Um dieser Problematik zu begegnen, wird für die dritte Interviewrunde eine ergänzende Grafik eingeführt, die einen Leiterabschnitt visualisiert und dabei Oberflächenladungen sowie Ladungen im Inneren des Leiters eindeutig differenziert darstellt. Diese Visualisierung soll durch eine begleitende Erklärung ergänzt werden, um die Konzepte anschaulicher und verständlicher zu machen.

Besondere Schwierigkeiten bereitete den Interviewpartner*innen die Aufgabe A4.1, welche die Ablenkung eines Alufolienstücks in einem offenen Stromkreis thematisiert. Die Antworten deuteten darauf hin, dass der zuvor genannte Unterschied zwischen Oberflächen- und Innenladungen nicht klar erkannt wurde. Daher wird vorgeschlagen, in der nächsten Interviewrunde die elektrische Influenz genauer zu thematisieren, um den Teilnehmenden ein fundierteres Verständnis elektrostatischer Vorgänge zu ermöglichen. Alternativ wurde erwogen, die Aufgabe A4.1 durch eine weniger komplexe zu ersetzen, um die zeitliche Schwerpunktsetzung zugunsten des elektromagnetischen Feldes zu optimieren. Letztlich wurde entschieden, die Aufgabe A4.1 in Runde 3 wegzulassen, da sie als zu anspruchsvoll für diesen Abschnitt bewertet wurde. Die anschließende Aufgabe A4.2 konnte hingegen von den meisten Interviewpartner*innen korrekt gelöst werden. Bei den Interviewten IP8, IP10 und IP12, bei denen diese Aufgabe mit Gelb (teilweise korrekt) bewertet wurde, waren Hilfestellungen notwendig, um Beispiele für das Vorkommen eines elektrischen Feldes zu nennen. Bemerkenswert ist, dass alle drei Proband*innen zuvor bei Aufgabe A4.1 ebenfalls Schwierigkeiten zeigten, was auf ein tiefergehendes Verständnisproblem in Bezug auf elektrostatische Phänomene hindeuten könnte.

Zweiter Block: K5 und K6, Elektromagnetisches Feld als Ursache der Energieübertragung

Im Rahmen der Konzeptideen 3.1 zur Energieübertragung in elektrischen Systemen zeigte sich, dass die Verwendung der Abkürzungen ‚E-Feld‘ und ‚B-Feld‘ für das elektrische und magnetische Feld bei einigen Interviewpartner*innen, insbesondere bei IP9 und IP10, zu Verständnisschwierigkeiten führte. Diese konnten die Begriffe nicht selbstständig reproduzieren. Zur Verbesserung der Verständlichkeit wird deshalb für die dritte Interviewrunde vorgesehen, die vollständigen Bezeichnungen in der Legende einzufügen (z. B. ‚B-Feld steht für Magnetfeld‘). Für die Aufgabenstellung zur Anwendung der Energie-Hand-Regel sollte zudem bei IP9 und IP13 ein expliziter Hinweis ergänzt werden, die Legende als Hilfsmittel zu nutzen. In der dritten Interviewrunde wird außerdem die Bezeichnung ‚Energie-Hand-Regel‘ in der Legende ergänzt, um eine einheitliche Verwendung sicherzustellen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund relevant, dass IP13 in der zweiten Interviewrunde anstelle dessen von der ‚FBI-Regel‘ sprach. Weiterhin zeigte sich bei IP8 in der zweiten Interviewrunde ein unvollständiges Verständnis hinsichtlich der Differenzierung zwischen Stromfluss und Energiefluss. Um diesem Missverständnis entgegenzuwirken, wird dieser Unterschied in der nächsten Interviewrunde explizit thematisiert. Dies entspricht auch den Ergebnissen aus der Aufgabe A9 (Interview mit IP9), bei dem diese Frage ebenfalls thematisiert wurde.

Dritter Block: K7, Energieübertragung in Gleich- und Wechselstromkreisen

Die Ergebnisse aus Aufgabe A7 zeigen, dass alle Interviewpartner*innen eine Hilfestellung für die Lösung benötigten, weshalb diese Aufgabe überarbeitet werden muss. Dies weist auf eine Überforderung durch die ursprüngliche Aufgabenstellung hin, die offenbar zu breit und wenig strukturiert formuliert war. Um dem entgegenzuwirken, wird die Aufgabe für die dritte Interviewrunde in mehrere kleinere, aufeinander aufbauende Teilschritte untergliedert. Zunächst soll nach dem magnetischen Feld, anschließend nach dem elektrischen Feld und schließlich nach dem elektromagnetischen Feld bei einem Wechselstromkreis gefragt werden. Dieses gestufte Vorgehen wurde bereits in der zweiten Interviewrunde als spontane Hilfestellung eingesetzt und führte dazu, dass letztlich alle Interviewpartner*innen die Aufgabe erfolgreich bearbeiten konnten.

Darüber hinaus wurde in einzelnen Interviews (z. B. bei IP10) deutlich, dass der Begriff ‚Wechselstrom‘ nicht bei allen Interviewpartner*innen als bekannt vorausgesetzt werden kann. Während die Erklärung, dass sich die Elektronen im Leiter bei Wechselstrom hin- und herbewegen, weitgehend verstanden und akzeptiert wurde, blieb der dahinterliegende physikalische Mechanismus (die fortlaufende Umpolung der Energiequelle) in mehreren Fällen unklar. Um dieses Verständnisproblem zu adressieren, wird in der dritten Interviewrunde die Erklärung E7 erweitert. Anstelle eines isolierten Leiterschnitts wird der vollständige Stromkreis visualisiert, einschließlich Energiequelle, Übertragungsmedium und Energieumwandler. Durch diese ganzheitliche Darstellung soll die Wechselwirkung der einzelnen Komponenten besser nachvollziehbar werden und ein konsistenteres Verständnis der Energieübertragung im Wechselstromkreis gefördert werden.

Dritter Block: K8, Energieumwandlung und -erhaltung

Die Auswertung der Interviews zur Konzeptidee K8 zeigt, dass das Thema ‚Energieumwandlung und Energieerhaltung‘ von den Interviewpartner*innen grundsätzlich positiv aufgenommen wurde. Die zentralen Konzepte wurden mehrheitlich verstanden und nachvollzogen. Allerdings traten an zwei Stellen Schwierigkeiten auf (insbesondere bei IP8 und IP12), die offenbar auf eine Aktivierung von Vorwissen aus dem schulischen Physikunterricht zurückzuführen sind. In beiden Fällen führten diese Präkonzepte dazu, dass die Interviewpartner*innen nicht strikt mit dem im Material vorgestellten Erklärungsansatz argumentierten, sondern alternative Konzepte aus dem Unterricht heranzogen, wodurch es zu inkonsistenten Aussagen kam.

Zur Minimierung solcher Missverständnisse muss in der dritten Interviewrunde explizit durch die Interviewerin betont werden, dass bei der Bearbeitung der Aufgabe ausschließlich mit dem

dargelegten Erklärungsmodell gearbeitet werden soll. Diese Klarstellung ist notwendig, um sicherzustellen, dass die Interviewpartner*innen nicht auf Vorwissen zurückgreifen, sondern sich mit den Inhalten des LLAs auseinandersetzen. Auf diese Weise kann besser überprüft werden, ob das gewählte Erklärungsmodell verständlich ist und kognitive Konflikte bei der Integration neuen Wissens auslöst oder auflöst.

Dritter Block: K9, Energieübertragungsprozess und Lichtgeschwindigkeit

Die Analyse der Interviews zur Konzeptidee K9, die den Energieübertragungsprozess und dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit thematisiert, verdeutlicht verschiedene Verständnisschwierigkeiten, die in der dritten Interviewrunde gezielt adressiert werden sollen. So zeigte sich im Interview mit IP8 eine fundamentale Fehlvorstellung, wonach die Lichtgeschwindigkeit als Einheit der Energie interpretiert wurde. Um derartigen Missverständnissen vorzubeugen, soll in der überarbeiteten Fassung explizit erläutert werden, dass sich die Lichtgeschwindigkeit auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht (im Vakuum) bezieht und rund $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ beträgt. Diese Erklärung engt den Interpretationsspielraum ein und fördert ein physikalisch korrektes Verständnis der Begrifflichkeiten.

Zudem wurde im Interview mit IP9 deutlich, dass die Unterscheidung zwischen Stromfluss und Energiefluss nicht ausreichend verinnerlicht wurde. Diese Differenzierung ist jedoch essenziell für das Verständnis elektromagnetischer Prozesse. Aus diesem Grund wird das Thema in der dritten Interviewrunde erneut explizit angesprochen und durch gezielte Rückfragen vertieft.

Ein weiteres Missverständnis trat bei im Interview mit IP11 auf. Dort wurde angenommen, dass die Elektronen im Leiter für die Ausbildung des elektrischen Feldes außerhalb des Leiters verantwortlich seien. Diese Aussage weist vermutlich auf eine Verwechslung der physikalischen Konzepte elektrisches Feld und magnetisches Feld hin. Um dies aufzuklären, wird in der dritten Runde nochmals der Unterschied zwischen Oberflächenladungen und den frei beweglichen Ladungsträgern im Leiterinneren thematisiert. Die gezielte Verdeutlichung dieser Begriffe soll helfen, konzeptionelle Fehlvorstellungen frühzeitig zu identifizieren und zu korrigieren.

5.2.4.2 Zusätzliche Änderungsvorschläge

Im Rahmen eines Forschungsseminars für Doktorierende an der Universität Wien (520001-1, 2022S, SE, Fachdidaktische Entwicklungsforschung - aktuelle Entwicklungen) am 31.05.2022 wurden die Ergebnisse der zweiten Interviewrunde mit Kolleg*innen der Fachdidaktik im Rahmen eines Vortrags präsentiert. In der anschließenden Diskussion wurden basierend auf den Interviewergebnissen weitere Überarbeitungsvorschläge für die dritte Interviewrunde erarbeitet. Dabei beteiligten sich Prädocs, Postdocs sowie ein Professor der Physikdidaktik an der Diskussion.

Übernommene Änderungsvorschläge:

- Die Formulierung der Konzeptideen K3 und K4 wird in der dritten Interviewrunde fachlich präzisiert, indem sie folgendermaßen umformuliert, werden: Das Magnetfeld und Elektrisches Feld ‚wird nachgewiesen‘ statt ‚wird bestimmt‘.
- Die Akzeptanz und Paraphrasen der Konzeptideen K1 und K2 (B1, B2, P1 und P2) werden in der Interviewrunde 3 getrennt voneinander ausgewertet.
- Bei der Auswertung der Aufgabe A1 ist es wichtig, zwischen den Konzeptideen K1 und K2 zu unterscheiden. Diese Unterscheidung würde deutlich machen, welche der beiden Konzepte funktioniert und wo mögliche Schwierigkeiten liegen.
- Im Rahmen des Forschungsseminars wurde der Vorschlag diskutiert, bei den Konzeptideen K1 und K2 den Begriff 'Elektrisches Gerät' anstelle von 'Energieumwandler' zu verwenden, da manche Schüler*innen mit diesem Begriff eventuell bereits bekannt sind. Für die dritte Interviewrunde wurde jedoch entschieden, diesen Vorschlag nicht zu übernehmen, da der Fokus weiterhin auf der expliziten Betrachtung der Energieumwandlung bleiben soll und es in den Interviewergebnissen nur vereinzelt vorkam, dass ein anderer Begriff als ‚Energieumwandler‘ verwendet wurde.
- Im Forschungsseminar wurde diskutiert, dass einige Interviewpartner*innen (z. B. IP14) Magnetfeldlinien als reale Objekte interpretieren. Da das Unterrichtsdesign nicht auf die Überprüfung von Modellkompetenz abzielt, sondern auf ein funktionales Verständnis elektromagnetischer Phänomene, wird in Interviewrunde 3 auf eine genaue Modellabgrenzung verzichtet. Stattdessen wird betont, dass Magnetfeldlinien lediglich eine Anschauungshilfe darstellen.
- Im Forschungsseminar wurde der Vorschlag diskutiert, bei den Kognitiven Stoppschildern kürzere Sprüche anstelle von längeren Sätzen zu verwenden, um sie einprägsamer zu gestalten. Dieser Ansatz wird, wo möglich, für die dritte Interviewrunde umgesetzt.
- Im Forschungsseminar zur Konzeptidee K4 wurde die Verwechslung zwischen dem B-Feld und dem E-Feld intensiv diskutiert. Ein Vorschlag war, dickere Feldlinien zu zeichnen, da feinere Linien schwerer zu erkennen und zu unterscheiden sind. Weiterhin wurde empfohlen, die B-Feldlinien durchgezogen und die E-Feldlinien gestrichelt darzustellen, um die Klarheit zu verbessern. Diese Änderungen werden für die dritte Interviewrunde umgesetzt. Außerdem wurde angeregt, zur besseren visuellen Veranschaulichung ein Flow-Diagramm oder eine Tabelle zu erstellen, um den Energiefluss anschaulicher zu gestalten (z. B. dass Stromfluss ein Magnetfeld hervorruft, Oberflächenladungen ein elektrisches Feld erzeugen).

usw.). Dieser Vorschlag wird jedoch bereits im Rahmen der geplanten Mindmap-Aktivität umgesetzt.

- In der Diskussion zur Konzeptidee 4 wurde vorgeschlagen, einen anderen Versuchsaufbau zu erwägen, der sich geometrisch weniger stark dem Versuch zum Magnetfeld ähnelt. Dies sollte verhindern, dass einige Schüler*innen Schwierigkeiten haben zu unterscheiden, wann vom Magnetfeld und wann vom elektrischen Feld die Rede ist. Ein Beispiel hierfür wäre die Drehung eines Stromkreises um 90° . Dieser Vorschlag wurde vorerst nicht für die dritte Interviewrunde umgesetzt, da zunächst andere Änderungsvorschläge untersucht werden sollen. Sollten diese jedoch keinen Erfolg bringen, kann dieser Änderungsvorschlag in Betracht gezogen werden. Zudem bietet die Ähnlichkeit der Stromkreise den Vorteil, dass alles innerhalb eines Stromkreises gezeigt werden kann, ohne zwischen verschiedenen Stromkreisgeometrien wechseln zu müssen.
- Bei der vierten Konzeptidee wurde auch darüber diskutiert, eine neue Darstellungsform für die Oberflächenladungen zu wählen, um sie deutlich von den Elektronen innerhalb des Leiters zu unterscheiden. Aus diesem Grund wurde eine neue Konzeptidee eingeführt, die sich explizit mit den Oberflächenladungen vor dem Hintergrund des elektrischen Feldes beschäftigt. Dabei könnte der Ursprung der Oberflächenladungen im Stromkreis thematisiert werden, unterstützt durch entsprechende Abbildungen.
- Bei der vierten Konzeptidee wurde diskutiert, dass es wichtig wäre zu thematisieren, woher das elektrische Feld stammt. Dazu sollen die Oberflächenladungen und das elektrische Feld sowohl in einem offenen als auch in einem geschlossenen Stromkreis behandelt werden. Diese Thematik wird auch für die nächste Interviewrunde übernommen.
- Bei der fünften Konzeptidee wurde angesichts der Ergebnisse aus der zweiten Interviewrunde diskutiert, dass es sinnvoll wäre, den Unterschied zwischen dem Energiefluss und dem Stromfluss direkt anzusprechen. Aus diesem Grund wurde für die dritte Interviewrunde ein kognitives Stoppschild eingeführt. Weiterhin sollte betont werden, dass der Strom zurück zur Batterie fließt, während die Energie von der Batterie zum Elektrogerät übertragen und dort umgewandelt wird.
- Bei der fünften Konzeptidee wurde als mögliche Ergänzung diskutiert, das elektrische System mithilfe von Transparentfolien zu zeichnen. Dadurch wäre es möglich gewesen, das B-Feld und das E-Feld nach Bedarf hinzuzufügen oder zu entfernen. Diese Idee wurde jedoch verworfen, da stattdessen beschlossen wurde, eine Simulation mit der ETH Zürich zu entwickeln, die diese Funktion übernehmen soll.

5.2 Zweite Runde der Akzeptanzbefragungen

- Bei Aufgabe A7 innerhalb der siebten Konzeptidee wurde im Forschungsseminar der Vorschlag diskutiert, mehr Beispiele einzubauen. Statt nur einen Vergleich zwischen Gleich- und Wechselstromkreisen anzustellen, wurde angeregt, auch die Unterschiede zwischen verschiedenen Ladevorgängen zu thematisieren. Zudem sollte eine Schritt-für-Schritt-Anleitung hinzugefügt werden, wie man Gleich- und Wechselstromkreise miteinander vergleichen kann, um den Übergang für Schüler*innen zu erleichtern. Die Schritt-für-Schritt-Anleitung wurde für die dritte Interviewrunde übernommen, wie bereits zuvor beschrieben. Der Unterschied zwischen verschiedenen Ladevorgängen wird vorerst aufgrund der bereits sehr langen Interviewdauer nicht eingefügt.

5.2.4.3 Abschließende Reflexion zur zweiten Runde

In der zweiten Interviewrunde wurden, wie bereits in der ersten Interviewrunde, spezifische Leitfragen zur Akzeptanz des Unterrichtsdesigns sowie zur Struktur der Interviews untersucht. Die Erkenntnisse und Resultate dieser Phase dienen als Basis für die Weiterentwicklung des Unterrichtsdesigns in Vorbereitung auf die dritte Interviewrunde. Im Folgenden werden die anfangs gestellten Fragen beantwortet.

1) Inwiefern verbessern sich die Interviewergebnisse durch die Anpassung des Interviewleitfadens?

Die Anpassung des Interviewleitfadens zeigte deutliche Verbesserungen in den Interviewergebnissen, wie aus den Daten in Tabelle 19 ersichtlich ist. Im Vergleich zur ersten Runde der Interviews haben sich die Ergebnisse leicht verbessert, obwohl es weiterhin Bereiche gibt, die überarbeitet werden müssen (weitere Details dazu finden sich in Kapitel 5.2.4). Für die dritte Interviewrunde ist geplant, die Auswirkungen dieser Änderungen auf die Akzeptanz der Schüler*innen bezüglich des Unterrichtsdesigns genauer zu untersuchen. Dabei wird besonders darauf geachtet, wie die Anpassungen im Leitfaden die Qualität der erhobenen Daten beeinflussen und welche spezifischen Aspekte der Interviews weiter optimiert werden können.

*2) Inwiefern beeinflusst die Änderung des Versuchsaufbaus beim Magnetfeldversuch (von der Strommesszange zum Kompass) die Genauigkeit und Interpretation der Ergebnisse durch die Schüler*innen?*

Die Änderung des Versuchsaufbaus beim Magnetfeldexperiment, von der Strommesszange zum Kompass, hat verschiedene Auswirkungen auf die Genauigkeit und Interpretation der Ergebnisse durch die Schüler*innen gezeigt. Wie in Tabelle 19 ersichtlich ist, gab es keine großen Unterschiede bei den Ergebnissen zwischen dem Kompass- und dem Strommesszangenversuch

zur Einführung des magnetischen Feldes. Allerdings bevorzugten die Schüler*innen laut eigener Aussage den Kompassversuch aufgrund seiner Bekanntheit aus dem Unterricht.

Die Schüler*innen meinten aber auch, dass der Versuch mit der Strommesszange hilfreich für das Verständnis des magnetischen Feldes ist, insbesondere wenn der Versuch ergänzend eingesetzt wird, um einen praktischen Alltagsbezug herzustellen. Viele Schüler*innen kannten die Strommesszange vorher nicht und fanden es spannend zu erfahren, wie sie in verschiedenen Berufsfeldern genutzt wird, wie z. B. in der Elektrik oder auf Baustellen.

3) Wie wirkt sich die Implementierung einer Checkliste während des Interviews auf die Vollständigkeit der Datenerhebung und -kodierung aus?

Die Einführung einer Checkliste während der Interviews hatte einen klaren positiven Effekt auf die Vollständigkeit und Genauigkeit der Datenerhebung und -kodierung, wie aus den Ergebnissen in Tabelle 19 hervorgeht. Durch das Abhaken der gestellten Fragen während des Interviews konnte die Interviewerin sicherstellen, dass keine wichtigen Themen übersehen wurden. Dies erwies sich als äußerst hilfreich, um die Konsistenz und Zuverlässigkeit der gesammelten Daten zu gewährleisten. Die Checkliste wird daher auch für die dritte Interviewrunde beibehalten, um sicherzustellen, dass alle relevanten Aspekte gründlich abgedeckt werden.

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

Die dritte Interviewrunde fand von Oktober bis November 2022 statt. Die Stichprobe dieser Runde wird in Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Aufgrund der endemischen Phase des Coronavirus in Österreich konnten alle Interviews dieser Runde wieder in Präsenz durchgeführt werden. Die Darstellung und Analyse der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 5.3.3 Ergebnisse.

Ziel dieser Runde war die Durchführung und Auswertung der Interviews anhand des überarbeiteten Interviewleitfadens (siehe Änderungen zur letzten Interviewrunde in Abschnitt 5.2.4.1). Dabei sollten insbesondere die folgenden Leitfragen geklärt werden:

- 1) Sind die Ergebnisse der dritten Interviewrunde ausreichend zufriedenstellend, um die Austestung des Lehr-Lern-Arrangements im realen Klassensetting durchzuführen oder ist eine weitere Interviewrunde notwendig?*
- 2) Welchen Einfluss hat die Implementierung der neuen Konzeptidee zu Oberflächenladungen auf das Verständnis von Schüler*innen bezüglich des elektrischen Feldes und der Energieübertragung durch elektromagnetische Felder?*

Für die Beantwortung dieser Fragen wird in Abschnitt 5.3.4.3 eine entsprechende Diskussion angeführt.

5.3.1 Beschreibung der Stichprobe

In dieser Interviewrunde wurden insgesamt sieben Schüler*innen (vier weiblich, drei männlich) aus drei verschiedenen allgemeinbildenden höheren Schulen (AHS) in Wien interviewt. Im Gegensatz zu den ersten beiden Runden wurden dieses Mal Schüler*innen der 10. Schulstufe im Alter von 15-16 Jahren befragt. Für diese Entscheidung gibt es zwei Gründe: Zum einen kann das Thema Energieübertragung laut österreichischem Lehrplan sowohl in der 10. als auch in der 11. Schulstufe unterrichtet werden (BGBl. Nr. 88/1985). In dieser Interviewrunde soll daher überprüft werden, ob das Konzept auch von jüngeren Schüler*innen gut aufgenommen wird. Zum anderen soll überprüft werden, ob die kürzere Ausbildungszeit der jüngeren Interviewteilnehmer*innen einen beobachtbaren Einfluss auf die Ergebnisse dieser Interviewrunde hat.

Die Darstellung der Stichprobe ist in Tabelle 28 dargestellt. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Interviewpartner*innen IP15, IP16, IP18 und IP19 das gleiche, bilinguale Gymnasium (Sprachen: Englisch, Deutsch) besuchen. Wie in den vorhergegangenen Runden beschrieben, ist dies bei der Auswertung der Interviews zu beachten, da einige dieser Schüler*innen aufgrund ihrer zweisprachigen Erziehung teilweise Probleme mit der Ausdrucksfähigkeit in der deutschen Sprache haben. Die Transkripte wurden daher teilweise geglättet, um die Lesbarkeit zu gewährleisten. Dabei wurde wieder darauf geachtet, nur kleine Änderungen bezüglich der Artikel oder Zeitformen zu ändern, nicht jedoch ganze Worte auszutauschen, da gerade diese bei einigen Textstellen eine wesentliche Rolle spielen (z. B. bei der Phase der Paraphrase, wenn ein besonderes Augenmerk auf die Begriffswahl der Interviewpartner*innen gelegt wird).

Die Interviewpartner*innen IP20 und IP21 besuchen Schule 1, IP15, IP16, IP18 und IP19 sind Schüler*innen von Schule 2, die bereits in den ersten beiden Interviewrunden genannt wurde, und IP17 besucht Schule 3.

Tabelle 28: Stichprobe für Interviewrunde 3.
(*Bei Schule 2 handelt es sich um ein bilinguales Gymnasium)

ID	Schule	Schulstufe	Letzte Physiknote	Interesse (1 = gar nicht; 5 = sehr hoch)	Dauer des Interviews
IP15	Schule 2*	10. Schulstufe	3	3	01:08:08
IP16	Schule 2*	10. Schulstufe	1	4	00:59:16
IP17	Schule 3	10. Schulstufe	3	3	01:08:29
IP18	Schule 2*	10. Schulstufe	1	4	01:01:47
IP19	Schule 2*	10. Schulstufe	1	5	01:05:50
IP20	Schule 1	10. Schulstufe	3	3	01:12:46
IP21	Schule 1	10. Schulstufe	2	3	01:13:23

Die Interviews dauerten zwischen 1-1,25 Stunden, sie waren also durchschnittlich länger als in den vorherigen Runden. Das lag vor allem daran, dass eine neue Konzeptidee zu Oberflächenladungen in den Interviewleitfaden eingefügt wurde. Wie in der zweiten Interviewrunde gab es die Möglichkeit, zwischen dem zweiten und dritten Interviewblock eine Pause einzulegen. Alle Interviewteilnehmer*innen bevorzugten in dieser Runde ebenfalls, das Interview ohne Pause durchzuführen.

Bei der Anmeldung zu den Interviews wurden die Teilnehmer*innen gebeten, freiwillig ihre letzte Physiknote anzugeben und ihr allgemeines Interesse an Physik einzuschätzen. Das Interesse der Schüler*innen an Physik konnte auf einer Likert Skala zwischen 1 (gar nicht) und 5 (sehr hoch) angegeben werden. Wie in Tabelle 28 zu sehen ist, stellt die Stichprobe hinsichtlich der Noten eine relativ homogen verteilte Gruppe mit den Noten Sehr gut (1) bis Befriedigend (3) dar. Das persönliche Interesse wurde durchschnittlich mit 4 von 5 Punkten von den Schüler*innen bewertet. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich zu Interviewstudien, die außerhalb der Unterrichtszeit stattfinden, vermehrt engagierte Schüler*innen freiwillig melden, da sie persönlich an den Inhalten und der Teilnahme der Studie interessiert sind.

5.3.2 Interviewleitfaden

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Interviewleitfaden beschrieben, der für die dritte Interviewrunde verwendet wurde.

Die Struktur dieses Interviewleitfadens gleicht jener von Interviewrunde 2. Die Einteilung des Interviews in drei große Blöcke, mit der Möglichkeit, eine kurze Pause zwischen den Blöcken einzulegen, wurde auch für diese Runde übernommen. Der erste Block umfasst dabei zwei, der zweite fünf und der dritte drei Konzeptideen. Insgesamt wurde das Unterrichtsdesign im Vergleich zu Runde 2 also von neun auf zehn Konzeptideen erweitert. Wie bereits in Interviewrunde 2 wurde auch dieses Mal wieder eine Mindmap-Aktivität zwischen Block 2 und 3 eingebaut, um den Schüler*innen die Gelegenheit zu geben, ihre Gedanken zu ordnen und die neuen Begriffe und Konzepte zu Papier zu bringen. Eine Auswahl dieser Mindmaps ist in Abschnitt 5.3.3.3 zu sehen.

Die Überarbeitung des Interviewleitfadens basiert auf den in Kapitel 5.2.4 angeführten Erkenntnissen aus Interviewrunde 2. Eine der wichtigsten Neuerungen ist dabei die Ergänzung des Leitfadens um eine Konzeptidee zum Thema ‚Oberflächenladungen‘. Anhand der Ergebnisse von Runde 2 wurde deutlich, dass dieses Thema mit den Schüler*innen näher besprochen werden musste. Einerseits traten hier vermehrt Fragen von Interviewpartner*innen auf und andererseits schien das Item zu elektrischen Feldern noch Probleme zu bereiten. Die Behandlung der Oberflächenladungen in einem kleinen Exkurs sollte daher Klarheit bringen, bevor man die

elektrischen Felder einführt. Eine weitere Neuerung ist, dass der Foliensatz, der zur visuellen Unterstützung bei den Erklärungen dient, überarbeitet wurde. Dabei wurden auch einige kognitive Stoppschilder ergänzt.

Im Folgenden wird der überarbeitete Interviewleitfaden, nach Blöcken gegliedert, vorgestellt.

5.3.2.1 Erster Block

Der erste Block beinhaltet, wie in Runde 2, eine Einführung in das Thema elektrische Systeme. Dabei erhalten die Interviewpartner*innen eine kurze Erklärung dazu, dass elektrische Systeme (Gleich- und Wechselstromkreise) dazu in der Lage sind, Energie zu übertragen. Anschließend folgen die ersten beiden Konzeptideen (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Konzeptideen für den ersten Block zu elektrischen Energieübertragungssystemen aus der dritten Interviewrunde.

K1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z. B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) <i>oder</i> kabellosen Systemen (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
K2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z. B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z. B. Leiterkabel).

Wie in Tabelle 29 zu sehen ist, behandelt Konzeptidee 1 die Unterscheidung zwischen kabelgebundenen und kabellosen Systemen. Dabei wird den Schüler*innen im Laufe der Erklärung für jede Kategorie ein Beispiel genannt: eine Tischlampe für ein kabelgebundenes System und ein Smartphone auf einem Ladepad für ein kabelloses System. Für den Aufgabenteil werden die Schüler*innen zunächst nach weiteren Beispielen für kabelgebundene und anschließend kabellose Systeme gefragt.

Die zweite Konzeptidee (K2) thematisiert die Bestandteile eines elektrischen Systems. Dabei werden die Energiequelle, der Energieumwandler und (bei kabelgebundenen Systemen) das Überträgermedium genannt. Dabei wird an die erste Konzeptidee angeknüpft, in dem die Lampe und das Smartphone als Energieumwandler identifiziert werden, da sie elektrische Energie in eine andere Energieform (z. B. Strahlungsenergie) umwandeln. Für die Energiequelle und das Übertragungsmedium wird ebenfalls auf die vorherigen Beispiele verwiesen: Die Steckdose wird als Energiequelle und das Kabel als Übertragungsmedium bezeichnet.

Die beiden Aufgaben dieser Konzeptidee zielen darauf ab, zu überprüfen, ob die Schüler*innen in der Lage dazu sind, diese Bestandteile bei anderen Beispielen zu identifizieren. Dabei wird

zunächst ein Bild eines elektrischen Föhns, der an einer Steckdose angeschlossen ist, und anschließend ein Bild einer elektrischen Zahnbürste, die auf einer Ladestation befestigt ist, gezeigt. Als kognitives Stoppschild werden die Begriffe ‚Energieumwandler‘ und ‚Energiequelle‘ neben den Bildern dargestellt (siehe dazu Kapitel 5.2.4.1).

5.3.2.2 Zweiter Block

Der zweite Block beginnt mit einer kurzen Einführung in das Prinzip der Energieübertragung in elektrischen Systemen mittels elektromagnetischer Felder. Die Schüler*innen werden gefragt, ob sie diesen Begriff schon einmal gehört haben, woraufhin näher ausgeführt wird, dass sich diese aus elektrischen und magnetischen Feldern zusammensetzen, die man experimentell nachweisen kann.

Tabelle 30: Konzeptideen für den zweiten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen) aus der dritten Interviewrunde.

K3	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein magnetisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Kompass, Stromzange) bestimmt werden.
K4	Energiequellen pumpen Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche. Diese generieren ein elektrisches Feld.
K5	Um einen Leiter, der mit einer Energiequelle verbunden ist, gibt es ein elektrisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.
K6	Die Energieübertragung findet durch das elektromagnetische Feld statt. Dies kann mit dem Energiefluss beschrieben werden.
K7	Der Poynting-Vektor beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld mathematisch.

Wie Tabelle 30 zu entnehmen ist, behandelt die dritte Konzeptidee das Magnetfeld. Den Schüler*innen wird ein einfacher Stromkreis gezeigt, der aus einer 4,5V-Flachbatterie und einem langen Kabel besteht, das mit Kroko-Klemmen an den Polen der Batterie befestigt wird. Anschließend wird ein Kompass unter das Leiterkabel gehalten. Die Schüler*innen können nun beobachten, wie sich die Kompassnadel ausrichtet. Diese Auslenkung der Kompassnadel wird damit erklärt, dass um den stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld entsteht, das mit Magnetfeldlinien beschrieben werden kann. Dazu wird den Schüler*innen eine Skizze von geschlossenen, kreisförmigen Magnetfeldlinien um den Leiter gezeigt. Hierbei wird betont, dass es sich bei der Feldliniendarstellung nur um ein anschauliches Modell handelt und nicht um die Realität. Als Stromrichtung wird die Elektronenflussrichtung von Minus nach Plus eingeführt. An dieser Stelle kann mit den Schüler*innen besprochen werden, dass man mithilfe der Linken-

Hand-Regel die Richtung der Magnetfeldlinien bestimmen kann, wenn man den Daumen der linken Hand in Richtung des Elektronenflusses hält und mit den übrigen Fingern gedanklich um das Kabel greift. Die Richtung der gekrümmten Finger zeigt dann den Feldlinienverlauf an. Die Schüler*innen werden in der ersten Aufgabe dieser Konzeptidee dazu befragt, warum sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht ausrichtet, um zu überprüfen, dass die das Konzept des Magnetfeldes anwenden können. Für die zweite Aufgabe wird eine Variation des Versuchs mithilfe einer Strommesszange gezeigt. Anstatt einen Kompass in die Nähe des Leiters zu halten, wird eine Strommesszange um ein Kabel gehalten. Dabei wird am digitalen Display erkennbar, dass der Wert für die gemessene Stromstärke ansteigt, sobald die Zange um den Leiter geschlossen wird. Dies wird damit erklärt, dass das Gerät mithilfe seines weichmagnetischen Kerns das entstandene Magnetfeld bestimmen kann, woraus in weiterer Folge die Stromstärke berechnet wird. Die Interviewpartner*innen werden daraufhin aufgefordert, ein weiteres Beispiel aus dem Alltag zu nennen, bei dem das Messgerät ein Magnetfeld detektieren könnte (z. B. beim Kabel eines Computers, Toasters, Wasserkochers, etc.). Damit soll überprüft werden, ob die Schüler*innen das Thema auch in anderen Kontexten erkennen können.

Bevor das Interview mit der vierten Konzeptidee fortgesetzt wird, findet ein kurzer Einschub in Form eines weiteren kognitiven Stoppschildes statt. Dabei wird betont, dass nun ein weiteres Feld besprochen wird, dass sich allerdings in Ursache, Form und Richtung vom Magnetfeld unterscheidet. Um diese Unterscheidung klarzumachen, wird dafür eine andere Darstellungsform verwendet. Im Gegensatz zu den Magnetfeldlinien, die als grüne, durchgehende Linien dargestellt werden, wird das nachfolgende elektrische Feld mit violetten, gestrichelten Linien veranschaulicht.

Wie in Kapitel 5.2.4.1 beschrieben, wurde für die dritte Interviewrunde eine neue Konzeptidee eingeführt. Die vierte Konzeptidee (K4) beschäftigt sich mit den Oberflächenladungen.

Die Erklärung beginnt damit, dass es verschiedene Arten von Energiequellen gibt, diese aber alle das gleiche Prinzip verfolgen. Im Inneren der Energiequellen kommt es zu einer Verschiebung von Ladungen, wodurch sich bei einem äußeren Kontakt auf einer Seite ein Überschuss an Elektronen und auf der anderen Seite ein Mangel an Elektronen ergibt, was insgesamt zu einer positiven Ladung führt. Diese positiven und negativen Ladungen an den äußeren Kontakten der Energiequelle werden als Oberflächenladungen bezeichnet, wobei die Stärke der Energiequelle die Anzahl der Ladungen bestimmt. Unterstützend wird hier mit Grafiken gearbeitet, die die positiv geladenen Oberflächenladungen mit einem ‚Plus-Symbol‘ (+) und die negativ geladenen Oberflächenladungen mit einem ‚Minus-Symbol‘ (-) darstellen.

Als erste Aufgabe zu dieser Konzeptidee sollen die Schüler*innen die Verteilung der Oberflächenladung auf einem Leiterstück, dass mit einer Energiequelle verbunden ist, einzeichnen, indem sie die vorgegebenen Symbole (Plus und Minus) verwenden. Dadurch soll überprüft werden, ob sie die Anordnung gemäß der Pole der Batterie korrekt einzeichnen können (positive Oberflächenladungen am Leiterstück, das mit dem positiven Pol der Energiequelle verbunden ist und umgekehrt für die negativen Oberflächenladungen).

In der zweiten Aufgabe wird genauer danach gefragt, wo sich die Oberflächenladungen befinden. Hier sollten die Schüler*innen erkennen, dass sich diese immer rund um den Leiter befinden. Somit soll sichergestellt werden, dass die 2D Darstellung auf den Abbildungen zu keinen Verständnisschwierigkeiten führt.

Vor der nächsten Konzeptidee wird auch hier ein kognitives Stoppschild eingebaut. Die Schüler*innen werden darauf hingewiesen, dass die Oberflächenladungen von den Ladungen im Inneren des Leiter zu unterscheiden sind. Dazu werden zwei Skizzen gezeigt, die diesen Punkt verdeutlichen sollen (siehe Abbildung 41).

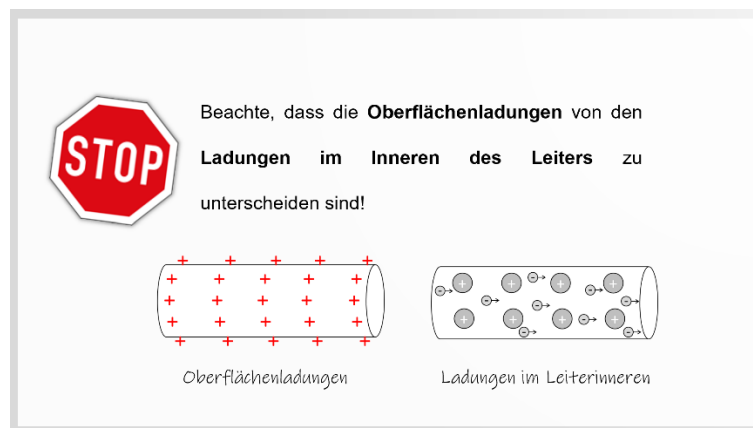


Abbildung 41: Kognitives Stoppschild zur Unterscheidung der Oberflächenladungen und der Ladungen im Leiterinneren.

Die fünfte Konzeptidee behandelt das elektrische Feld. Dabei wird ein Demonstrationsversuch mit einer Hochspannungsquelle und vier in Reihe geschalteten Widerständen in Form eines Videos gezeigt (siehe Abbildung 42). Dieses basiert auf dem Video von Chabay und Sherwood (2016), das in Interviewrunde 1 und 2 zum Einsatz kam.

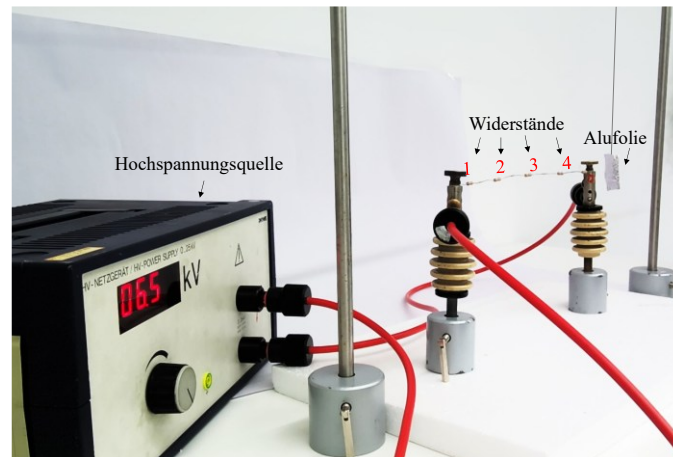


Abbildung 42: Versuch 2.2 zum elektrischen Feld. Zu sehen ist der Versuchsaufbau mit einer Hochspannungsquelle, vier in Reihe geschalteten Widerständen und einem Alufolienstück; das an einem Faden befestigt ist und in die Nähe des ersten Widerstands gehalten wird.

Hält man ein an einem Faden befestigtes Stück Aluminiumfolie in die Nähe des ersten und vierten Widerstands, so lässt sich eine elektrische Wechselwirkung beobachten. Zwischen dem zweiten und dritten Widerstand hingegen ist zu beobachten, dass das Stück Alufolie weder angezogen noch abgestoßen wird. Dies wird mit der Anwesenheit von Oberflächenladungen erklärt, die ein elektrisches Feld im umgebenden Raum verursachen.

Die Oberflächenladungen werden durch die Energiequelle auf den Leiter gepumpt. Sie verteilen sich dort gleichmäßig und erzeugen ein elektrisches Feld, das mit Feldlinien veranschaulicht werden kann. Die Richtung des elektrischen Feldes, von Plus zu Minus, wird auf historische Hintergründe zurückgeführt. Als Aufgabe zu dieser Konzeptidee werden die Schüler*innen dazu aufgefordert, ein Beispiel aus ihrem Alltag zu nennen, wo ein elektrisches Feld um ein elektrisches System auftritt.

Die letzten beiden Konzeptideen beschäftigen sich, wie in den Interviewrunden zuvor, mit der Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld. Während sich an der Formulierung dieser Konzeptideen nichts verändert hat, ist die Einbettung im Interviewleitfaden anders, da die vorausgehenden Konzeptideen überarbeitet wurden und eine neue Konzeptidee zu Oberflächenladungen hinzugefügt wurde. Zudem wurde die Illustration der Energieübertragung durch elektromagnetische Felder, die an dieser Stelle mit den Schüler*innen besprochen wird, überarbeitet (z. B. wurden die Feldlinien dicker eingezeichnet).

Vor der Erklärung der sechsten Konzeptidee wird noch ein Kognitives Stoppschild eingebaut, welches die Schüler*innen daran erinnern soll, dass das elektrische und magnetische Feld nicht

dasselbe sind. Zudem wird darauf hingewiesen, dass das im Folgenden besprochene elektromagnetische Feld kein neues Feld sei, sondern nur als ‚kombinierte Wirkung des elektrischen und magnetischen Feldes‘ aufgefasst werden muss.

Nach der Erklärung der sechsten Konzeptidee, die eine Herleitung des Energieflusses mit der Energie-Hand-Regel beinhaltet, wird bei Bedarf mit den besonders interessierten Schüler*innen noch die siebte Konzeptidee ergänzt. Hierbei wird der Poynting-Vektor als das Kreuzprodukt aus elektrischem und magnetischen Feld eingeführt. Die siebte Konzeptidee wurde nur mit Schüler*innen besprochen, wenn sich von ihrer Seite besonderes Interesse zeigte. In dem Fall wurde nur eine Bestätigung und Paraphrase gefragt, da die Aufgabe dieselbe wie bei der sechsten Konzeptidee war. In der Aufgabe zur sechsten Konzeptidee sollen die Schüler*innen erklären, warum sich die Rotorblätter eines Ventilators scheinbar sofort zu drehen beginnen, wenn ein geschlossener Stromkreis vorliegt. Für die Erklärung, woher die Energie kommt, sollen die Schüler*innen das neu erlernte Konzept verwenden. Anschließend wird ein weiteres Kognitives Stoppschild mit den Schüler*innen besprochen. Dabei wird der Unterschied zwischen dem Energiefluss und dem Stromfluss thematisiert, damit es in weiterer Folge zu keinen Verwechslungen der beiden Begriffe kommt.

Zwischen dem zweiten und dem dritten Block soll auch in dieser Interviewrunde ein Mindmap von den Interviewteilnehmer*innen angefertigt werden. Dazu werden sie gebeten, die bisher besprochenen Begriffe zu Papier zu bringen und miteinander logisch zu verbinden.

5.3.2.3 Dritter Block

Der dritte Block knüpft an die vorherigen Konzepte aus Block 1 und 2 an und versucht diese zu vertiefen. Einleitend werden die Schüler*innen nochmal daran erinnert, dass in einem elektrischen System Energie durch ein elektromagnetisches Feld übertragen werden kann. Ergänzend folgt die Information, dass diese elektrischen Systeme entweder Gleich- oder Wechselstromkreise sein können. Insgesamt beinhaltet der dritte Block drei Konzeptideen, die sich bezüglich der Formulierung von der zweiten Version nicht unterscheiden. Allerdings wurden die Erklärungen und Aufgaben leicht abgewandelt. Eine Übersicht der Konzeptideen ist in der nachfolgenden Tabelle 31 zu entnehmen:

Tabelle 31: Konzeptideen für den dritten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung) aus der dritten Interviewrunde.

K8	Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld kann sowohl bei Gleich- als auch Wechselstromkreisen erfolgen.
K9	Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z. B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
K10	Die Energieübertragung findet in Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld statt.

Anstatt in der Erklärung den Fokus auf das Wiederholen zu legen, wird in Runde 3 ein größeres Augenmerk auf die Unterscheidung von Gleich- und Wechselstromkreisen gelegt. Die Aufgabe zur Konzeptidee acht wird wesentlich zur vorherigen Runde verändert, indem sie in drei Schritte zerlegt wird: Zuvor wurden die Interviewpartner*innen direkt nach einem Vergleich des Wechselstromkreises zum Gleichstromkreis befragt. In Runde 3 sollen sie hingegen zuerst nur das Magnetfeld betrachten und argumentieren, ob und was sich an diesem ändert, wenn die Energiequelle umgepolt wird. Im nächsten Schritt wird nach der Änderung am elektrischen Feld gefragt bevor erst in der letzten Aufgabe der Energiefluss thematisiert wird.

Die neunte Konzeptidee befasst sich mit dem Thema der Energieumwandlung. Dabei wird mit den Schüler*innen besprochen, dass die Energie in einem idealen Stromkreis vollständig von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen und dort in eine andere Energieform umgewandelt wird. Die Aufgabe thematisiert eine Wiederholung des Konzepts der Energieübertragung am Beispiel eines realen, elektrischen Systems (z. B. Modell einer Zahnbürste oder kabelgebundenen Ventilators). Im Gegensatz zur zweiten Interviewrunde wird bei dieser Aufgabe nicht mehr explizit nach den Energieformen gefragt, die bei der Energieumwandlung eine Rolle spielen, da dies in der Erklärung nicht vorkommt.

Die zehnte und letzte Konzeptidee befasst sich mit dem Prozess der Energieübertragung. In der zweiten Interviewrunde wurde hier das sogenannte Rucksackmodell, eine bekannte Schüler*innenvorstellung (siehe Abschnitt X), thematisiert. In der Erklärung sollten die Schüler*innen damit konfrontiert werden, dass Elektronen in einem einfachen Stromkreis nicht allein für die Energieübertragung verantwortlich sein können, weil sie sich nur sehr langsam bewegen. Damit sollte also bei den Schüler*innen ein Konflikt ausgelöst werden, der nur durch Verwendung des neuen Erklärungsansatzes mittels elektromagnetischen Feldern gelöst werden kann.

Diese Konzeptidee wurde aufgrund der Ergebnisse der zweiten Interviewrunde (siehe Abschnitt 5.2.4) überarbeitet. Anstatt sich auf die Elektronen zu konzentrieren, geht es in der neuen Erklärung um die Vorstellung, dass der Prozess der Energieübertragung mit Lichtgeschwindigkeit

durch das elektromagnetische Feld stattfindet. Erst in der zugehörigen Aufgabe wird das Tempo der Elektronen angesprochen. Insgesamt ist die Aufgabe jedoch ähnlich wie in der zweiten Interviewrunde, wo ebenfalls erwähnt wird, dass sich die Elektronen langsam bewegen. Zusätzlich wird eine zweite Aufgabe ergänzt, die sich mit der Frage befasst, warum Elektronen auch in Wechselstromkreisen nicht allein für die Energieübertragung verantwortlich sind. Damit soll ein weiterer Kontext geschaffen werden, in dem die Schüler*innen das neue Erklärungsmodell mithilfe von elektromagnetischen Feldern nutzen können, um die Energieübertragung in einem elektrischen System zu beschreiben.

5.3.3 Ergebnisse

Die Interviews der dritten Runde an Akzeptanzbefragungen wurden, wie bereits in Interviewrunde 1 und 2, transkribiert¹⁷. Für die Qualitative Inhaltsanalyse wurde wieder die Methode nach Kuckartz (2018) angewendet (siehe Abschnitt 3.4). Eine Übersicht der Kodierungen der Akzeptanzbefragungen mit IP15-IP21 ist in Tabelle 32 zu sehen.

Für die Codes, die in der Spalte ganz links zu sehen sind, wurden gemäß dem Interviewleitfaden für die dritte Runde folgende Abkürzungen verwendet: ‚B‘ für die Bestätigung / Akzeptanz, ‚P‘ für die Paraphrase und ‚A‘ für die Aufgabe.

Die einzelnen Antworten der Schüler*innen wurden, wie bereits in Interviewrunde 1 und 2, nach der qualitativen Inhaltsanalyse (siehe Abschnitt 3.4) analysiert und in Form einer Kodier-Landkarte dargestellt. Dabei wurde wieder das in Tabelle 7 dargestellte Bewertungsschema verwendet. Die letzten beiden Spalten rechts geben die Mittelwerte (Querschnittsanalyse) der Daten an.

¹⁷ Aufgrund ihres Umfangs wurden die Transkripte der dritten Interviewrunde nicht in den Anhang integriert. Sie sind auf Anfrage bei der Autorin erhältlich.

Tabelle 32: Übersicht der Kodierungen für die dritte Runde an Akzeptanzbefragungen.

	Code	IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$	$\bar{x}$
Block 1	B1	3	3	2	3	3	3	3	2,86	2,79
	P1	3	3	3	2	2	3	2	2,57	
	A1.1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	A1.2	3	3	3	3	2	2	3	2,71	
	B2	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,82
	P2	3	2	2	2	2	3	3	2,43	
	A2.1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	A2.2	3	3	3	3	3	3	2	2,86	
	B3	3	3	3	2	3	3	2	2,71	2,82
	P3	3	3	2	3	2	3	2	2,57	
	A3.1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	A3.2	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
Block 2	B4	3	3	3	2	3	3	3	2,86	2,82
	P4	3	3	2	2	2	3	2	2,43	
	A4.1	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	A4.2	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	B5	3	3	2	3	3	3	3	2,86	2,76
	P5	3	2	2	3	3	3	2	2,57	
	A5	3	3	3	3	3	3	2	2,86	
	B6	3	3	3	2	3	3	2	2,71	2,71
	P6	2	3	3	2	3	3	3	2,71	
	A6	2	3	3	3	3	2	3	2,71	
	B8	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,69
	P8	2	3	2	3	2	3	2	2,43	
Block 3	A8.1	3	3	2	3	2	3	2	2,57	
	A8.2	3	3	3	1	3	3	3	2,71	
	A8.3	3	3	3	2	3	3	2	2,71	
	B9	3	3	2	3	3	3	3	2,86	2,81
	P9	2	3	3	3	3	3	1	2,57	
	A9	3	3	3	3	3	3	3	3,00	
	B10	3	3	3	3	3	3	3	3,00	2,68
	P10	2	3	2	2	3	3	1	2,29	
	A10.1	3	3	3	3	3	2	1	2,57	
	A10.2	3	3	3	3	3	3	2	2,86	
	$\bar{x}$	2,87	2,93	2,71	2,69	2,77	2,91	2,50	2,77	

Nachfolgend werden die Interrater-Reliabilität der Ergebnisse, die Quer- und Längsschnittanalyse der dritten Interviewrunde sowie die Auswertung der Mindmaps beschrieben.

5.3.3.1 Interrater Reliabilität für Runde 3

Analog zu den Akzeptanzbefragungen in den vorherigen beiden Interviewrunden wurde auch in dieser Runde bei einem von sieben Interviews die Interrater-Reliabilität mittels Cohens-Kappa bestimmt. Dabei wurde wieder die Formel (1) zur Berechnung verwendet. Der berechnete Wert betrug $\kappa = 0,60$, was laut der Literatur als „moderat“ eingestuft wird. Ab einem Wert von 0,61 würde er als „fast substantiell“ betrachtet werden (Landis&Koch, 1977, S. 165), was ihn im oberen Mittelfeld der zu erwartenden Werte platziert.

Bei dieser Interrater-Reliabilität wurde deutlich, dass in fünf Fällen der Interrater weniger streng bewertete (Kodierung ‚grün-3‘ statt ‚gelb-2‘), was zu keinem perfekten Übereinstimmungswert führte, jedoch akzeptabel blieb. Wie weiter unten beschrieben, wurde insgesamt oft strenger bewertet, wenn die Begriffswahl nicht korrekt war. Der Interrater sah aber darin kein Problem und kodierte die Stellen trotzdem als ‚vollständig korrekt‘, da die Antworten gemäß der Musterlösungen inhaltlich zumindest korrekt waren.

5.3.3.2 Querschnittsanalyse

Erster Block: Konzeptidee 1

Die Kodier-Landkarte für die erste Konzeptidee ist in Tabelle 33 zu sehen. Dabei sind die Codes für die einzelnen Phasen der Akzeptanzbefragung (1. Erklärung, 2. Akzeptanz, 3. Paraphrase und 4. Aufgabe) für die Interviewpartner*innen IP15-IP21 dargestellt. In der Spalte rechts außen sind zudem die Mittelwerte ($\bar{x}$) der Codes zu sehen.

Tabelle 33: Kodierungen zur 1. Konzeptidee zur Unterscheidung von kabellosen und kabelgebundenen Systemen in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 1		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Kabellose und kabelgebundene Systeme	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	2	3	3	3	3	2,86
	Paraphrase	3	3	3	2	2	3	2	2,57
	Aufgabe 1	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Aufgabe 2	3	3	3	3	2	2	3	2,71

Wie man anhand der Ergebnisse in Tabelle 33 sehen kann, wurde diese Konzeptidee von den meisten Interviewpartner*innen sehr gut akzeptiert. Es wurde also von den Interviewpartner*innen bestätigt, dass die Erklärung für sie verständlich war und es keine weiteren Fragen dazu gäbe. Einzig bei IP17 findet sich ein gelber Code (2), da die Interviewerin gebeten wurde, den Begriff für das ‚kabelgebundene System‘ zu wiederholen. Ansonsten war die Erklärung laut IP17 verständlich.

Bei der Paraphrase dieser Konzeptidee wurde insbesondere darauf geachtet, ob die Interviewpartner*innen die vorgegebenen Begriffe wiederverwenden oder eigene Begriffe ins Spiel bringen. Dazu wurde das Transkript mit einer Musterantwort – einem sogenannten Musterbeispiel – verglichen. Dieses ist in der nachfolgenden Textbox 21 für die Konzeptidee 1 dargestellt.

Textbox 21: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 1 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Auf dem Bild siehst du eine Lampe, die über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden ist. Wenn du den Schalter bei einer Lampe betätigst, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. Solche elektrischen Systeme bezeichnen wir als **kabelgebundene Systeme**. (Backup: Ähnlich funktioniert es beim Föhn.) Bestimmt hast du schon die neuen Handy-Ladestationen gesehen, bei denen dein Handy ohne Kabel aufgeladen werden kann. Du musst es dafür nur auf die Station legen. Solche elektrischen Systeme bezeichnen wir als **kabellose Systeme**. (Backup: Ähnlich funktioniert es bei elektrischen Zahnbürsten).

Wie in Tabelle 33 ersichtlich ist, sind die Begriffe ‚kabelgebundene Systeme‘ und ‚kabellose Systeme‘ hervorgehoben. Das bedeutet, dass bei der Analyse des Transkripts besonderes Augenmerk auf die Verwendung dieser Begriffe gelegt wird. Für die Analyse ergaben sich unterschiedliche Fälle:

Wurde in der Schüler*innenantwort zwischen kabellosen und kabelgebundenen Systemen, unter Verwendung dieser Begriffe, unterscheiden, wurde die Aussage als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert. Ein gelungenes Beispiel einer Paraphrase, die nach diesem Schema kodiert wurde, ist in diesem Abschnitt mit IP16 ersichtlich:

„Also es gibt zum Einen die kabelgebundenen Geräte, also eben die mit einem Kabel mit einer Steckdose verbunden sind. Und die kabellosen Geräte - moderne Smartphones zum Beispiel, die man auf das Pad darauf legt und die dann so geladen werden.“ (R3-IP16, Pos. 9-11, 00:01:07-00:01:26)

Enthielt die Schüler*innenantwort die Unterscheidung von zwei Systemen, jedoch wurden die Begriffe nur teilweise oder gänzlich durch alternative Begriffe ersetzt, wurde die Aussage nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Ein Beispiel dafür wird in folgender Interviewpassage mit IP19 deutlich. Dabei wurde die Unterscheidung der zwei Systemkategorien übernommen, allerdings wurde nicht vom kabelgebundenen System, sondern vom „Kabelsystem“ gesprochen:

„Also, Sie haben das hier das Kabelsystem genannt. Dabei wird der Strom, die Elektrizität, durch das Kabel in die Lampe übertragen. Und das hier ist ein kabelloses System, wobei die Energie ins Smartphone übertragen wird, ohne dass es sich berührt.“ (R3-IP19, Pos. 15-20, 00:01:10-00:01:32)

IP18 erwähnte ebenfalls den Begriff ‚Kabelsystem‘, obwohl dieser nicht von der Interviewerin genannt wurde. Bei IP21 konnte darüber hinaus nur die Unterscheidung zwischen den kabellosen und kabelgebundenen Systemen beschrieben werden, jedoch die Kategorienbezeichnungen nicht wiederholt werden:

„Also, es gibt zwei (...) Beispiele zu einem System quasi. Das eine ist mit einem Kabel verbunden und das andere ist/ Ich weiß nicht genau, wie ich das beschreiben soll, aber eben nicht mit einem Kabel verbunden.“ (R3-IP21, Pos. 9-11, 00:01:07-00:01:27)

Wäre die Unterscheidung der beiden Systeme nicht korrekt wiedergegeben worden oder wäre sie nicht in der Schüler*innenantwort vorgekommen, wäre die Aussage als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert worden.

Für die beiden Aufgaben zu dieser Konzeptidee wurden die Interviewpartner*innen nach weiteren Alltagsbeispielen für A1.1 Kabelgebundenen Systemen und A1.2 Kabellosen Systemen gefragt. Die erste Aufgabe konnte von allen Interviewpartner*innen problemlos gelöst werden (siehe Tabelle 33). Unter den Beispielen finden sich verschiedene Antworten, wie in Tabelle 34 zu sehen ist:

Tabelle 34: Aufgabe 1.1, Beispiele für kabelgebundene Systeme

IP15	Wecker, Computer, Laptop (mit Kabel)
IP16	Föhn, Glätteisen
IP17	Wasserkocher, Computer, Ventilator
IP18	Lampen, Laptop (mit Kabel)
IP19	Computer, Beamer, Lampen
IP20	Wasserkocher, Fernseher, Konsolen
IP21	Mixer, Fernseher

In der zweiten Aufgabe zur Konzeptidee 1 wurden die Schüler*innen nach Beispielen zu kabellosen Systemen gefragt. Die Antworten der Schüler*innen sind in Tabelle 35 zu sehen.

Tabelle 35: Aufgabe 1.2, Beispiele für kabellose Systeme

IP15	USB-Maus, Bluetooth-Lautsprecher
IP16	Smartphone, iPad
IP17	Smartwatch
IP18	el. Zahnbürste, AirPods, iPhone
IP19	el. Zahnbürste
IP20	el. Zahnbürste
IP21	Kopfhörer, iPad

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

Die meisten Schüler*innen konnten diese Aufgabe erfolgreich beantworten. Nur IP19 und IP20 brauchen etwas Unterstützung, da ihnen auf Anhieb keine Beispiele einfielen. Nachdem die Interviewerin ein Beispiel als Denkanstoß nannte, waren die Interviewpartner*innen allerdings in der Lage, weitere Beispiele aufzuzählen. Dies wird beispielsweise in dieser Passage mit IP19 deutlich:

IP19: „Ich bin mir nicht sicher, ob Bluetooth auch so funktioniert durch Elektrizität, ähm. Eben, Übertragung. (...) Fällt mir jetzt nichts ein. Nein, also, es fällt mir gerade nichts ein.“

I: „Hm (bejahend). Also Smartphone kannst du da drauflegen, auf so ein Ladepad. Da gibt es ähnliche Geräte. Vielleicht kennst du die AirPods?“

IP19: „Ja. (...) Ich kenne ähm sowas für die elektrische Zahnbürste. Das kenne ich.“

(R3-IP19, Pos. 29-40, 00:01:50-00:02:45)

IP19 konnte also zuerst keine Beispiele nennen, nachdem die Interviewerin das Smartphone und die AirPods nannte, erkannte IP19, dass auch eine elektrische Zahnbürste in diese Kategorie fällt.

Erster Block: Konzeptidee 2

Die Kodierungen für die zweite Konzeptidee sind in Tabelle 36 zu sehen.

Tabelle 36: Kodierungen zur 2. Konzeptidee zur Unterscheidung von Energiequellen und -umwandlern in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 2		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Energiequelle und -umwandler	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	3	2	2	2	2	3	3	2,43
	Aufgabe 1	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Aufgabe 2	3	3	3	3	3	3	2	2,86

In Tabelle 36 ist ersichtlich, diese Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen IP15-IP21 gut aufgenommen wurde und es keine Rückfragen gab (Akzeptanz).

Bei der Paraphrase wurde auch dieses Mal wieder ein Musterbeispiel zum Vergleich herangezogen, wobei dieses Mal besonders darauf geachtet wurde, dass die Unterscheidung zwischen Energieumwandlern und Energiequellen von den Interviewpartner*innen erwähnt wurde (siehe Textbox 22).

Textbox 22: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 2 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Die Lampe, der Föhn, das Handy und die elektrische Zahnbürste werden in der Physik als Energieumwandler oder Elektrogeräte bezeichnet. Dabei wird elektrische Energie in eine andere Energieform umgewandelt. Ein Energieübertragungssystem enthält üblicherweise neben einem **Energieumwandler** auch eine **Energiequelle** (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage, Steckdose). Ergänzung: Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z. B. Leiterkabel).

Bei der Analyse dieser Paraphrase ergaben sich wieder drei unterschiedliche Fälle: Enthielt die Schüler*innenaussage die Unterscheidung aller Bestandteile eines elektrischen Systems (Energieumwandler, Energiequelle und ggf. Überträgermedium), so wurde diese als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) kodiert. Dies traf auf die Interviewpartner*innen IP15, IP20 und IP21 zu. Beispielsweise formulierte dies IP21 folgendermaßen:

„Also, es wurden die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler genannt. Das war zum Beispiel – die Energiequelle war die Steckdose. Und der Umwandler: Handy, Kopfhörer.“ (R3-IP21, Pos. 42-48, 00:03:58-00:04:16)

IP20 argumentierte auf ähnliche Weise:

„Also, es gibt Energiequellen wie zum Beispiel die Steckdose. Weil da kommt ja der Strom überhaupt her. Und dann gibt es die Energieumwandler, wie zum Beispiel der Föhn. Da fließt es zuerst durch das Kabel und danach wird darin die Energie umgewandelt. Ich glaube sogar in thermische Energie, beim Föhn.“ (R3-IP20, Pos. 55-62, 00:05:10-00:05:32)

Wurde in der Paraphrase zwar eine Unterscheidung beschrieben, jedoch eine andere Begriffswahl getroffen, so wurde die Aussage nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Dieser Fall trat bei IP16, IP17, IP18 und IP19 auf. Zwar erkannten die Interviewpartner*innen die Unterscheidung korrekt, dennoch lag der Fokus der Auswertung auf der Verwendung der vorgegebenen Begriffe, um zu prüfen, ob diese von den Schüler*innen übernommen und selbst genutzt wurden. Dies ist zum Beispiel in folgender Interviewpassage mit IP17 deutlich:

„Ja, es gibt die Energiequellen. (...) Die zum Beispiel Steckdose, Batterie, oder Solarbatterie. (...) Und es gibt dann Energiebetriebe, ähm, die dann diese Energie in Funktionen umwandeln. Zum Beispiel Föhn, Handystation und Kopfhörer und so weiter. (R3-IP17, Pos. 40-45, 00:03:44-00:04:24)

IP17 konnte den Begriff ‚Energiequelle‘ identifizieren und verschiedene Beispiele dafür nennen. Jedoch wurde anstelle des Begriffs Energieumwandler die Bezeichnung „Energiebetrieb“ verwendet. Die Beispiele für die Energieumwandler wurden jedoch korrekt benannt.

In Tabelle 37 ist ersichtlich, welche alternativen Begriffe die übrigen Interviewpartner*innen verwendeten. Während die meisten (mit Ausnahme von IP19) die Energiequelle korrekt nennen können, wurden für den Energieumwandler unterschiedlichste Begriffe verwendet. Interessanterweise wurde in dieser Interviewrunde der Begriff ‚Energieverbraucher‘ nie genannt. Stattdessen wurden Begriffe wie ‚Energiebetrieb‘, ‚Umwandlungsdings‘ und ‚Energieaufnehmer‘ verwendet.

Tabelle 37: Übersicht der Synonyme für Konzeptidee 2.

	Energiequelle	Energieumwandler
IP16	✓	kein Synonym
IP17	✓	Energiebetrieb
IP18	✓	Umwandlungsdings
IP19	Energieabgeber	Energieaufnehmer

IP16 beschrieb darüber hinaus zwar korrekt, dass es eine Unterscheidung zwischen Energiequellen und einer anderen Kategorie gibt, allerdings fiel der Name dazu nicht mehr ein. Dies wird in folgender Interviewpassage ersichtlich:

„Also, es gibt die Energiequellen, also, das sind zum Beispiel die Steckdose oder Batterien, oder so Photovoltaik-Powerbanks. (...) da [bei der Lampe] wird dann die elektrische Energie, die wird umgewandelt – bei der Lampe zum Beispiel in Strahlungsenergie.“ (R3-IP16, Pos. 25-42, 00:03:05-00:04:00)

Wurden sowohl die Unterscheidung der Bestandteile eines elektrischen Systems als auch die korrekte Begriffswahl vermisst, wurde die Aussage als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert, was in dieser Konzeptidee jedoch nicht vorkam.

Bei den beiden Aufgaben dieser Konzeptidee sollten die Interviewpartner*innen die Begriffe ‚Energiequelle‘ und ‚Energieumwandler‘ jeweils einem kabelgebundenen System (A2.1) und einem kabellosen System (A2.1) zuordnen.

Bei Aufgabe 2.1 funktionierte die Zuordnung der Begriffe am Beispiel des elektrischen Föhns problemlos für alle Schüler*innen.

Bei Aufgabe 2.2 konnte die Zuordnung der Begriffe am Beispiel der elektrischen Zahnbürste ebenfalls bei fast allen Interviewpartner*innen als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert werden. Einzig die Antwort von IP21 wurde als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet, da zunächst nur die Steckdose korrekt als Energiequelle identifiziert wurde. Anstatt die Zahnbürste als Energieumwandler zu erkennen, wurde dafür die Ladestation genannt, wie in folgender Interviewpassage deutlich wird:

„Ähm, die Zahnbürste steht auf dem Energieumwandler. Also, die Ladestation glaube ich, die auch angeschlossen an der Steckdose, an einer Energiequelle, am Kabel.“ (R3-IP21, Pos. 55-62, 00:04:42-00:05:15)

Auf den Hinweis der Interviewerin, die Ladestation könne als Verlängerung der Energiequelle verstanden werden, ergänzte IP21, dass in diesem Fall die Zahnbürste als Energieumwandler fungiere.

Zweiter Block: Konzeptidee 3

Die Kodierungen für die dritte Konzeptidee zum magnetischen Feld sind in Tabelle 38 zu sehen.

Tabelle 38: Kodierungen zur 3. Konzeptidee zum magnetischen Feld in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 3		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Versuch zum B-Feld	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	2	3	3	2	2,71
	Paraphrase	3	3	2	3	2	3	2	2,57
	Aufgabe 1	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Aufgabe 2	3	3	3	3	3	3	3	3,00

In Tabelle 38 ist ersichtlich, diese Konzeptidee von den meisten Interviewpartner*innen gut aufgenommen wurde und es keine Rückfragen gab (Akzeptanz). Nur bei IP18 und IP21 ergaben sich kleine Verständnisschwierigkeiten. Im Fall von IP18 wurde die Erklärung noch einmal wiederholt, nachdem angegeben wurde, sie noch nicht verstanden zu haben. Dies könnte aber auch an der allgemeinen Aufmerksamkeit gelegen haben, da IP8 kurzzeitig abgelenkt wirkte. Nachdem die Erklärung wiederholt wurde, schien IP18 zufrieden. Bei IP21 ergab sich eine ähnliche Situation. IP21 gab zunächst an, die Erklärung mache ein „bisschen Sinn“ und die Interviewerin merkte an, dass IP21 etwas skeptisch wirkte (R3-IP21, Pos. 116, 00:09:45-00:09:54).

Für die Auswertung der Paraphrase wurde auch dieses Mal wieder ein Vergleich mit einem Musterbeispiel herangezogen (siehe Textbox 23). Die Schüler*innen sollten beschreiben, dass sich um einen stromdurchflossenen Leiter ein kreisförmiges Magnetfeld bildet.

Textbox 23: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 3 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein **Magnetfeld**. Bringt man den Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, richtet sich die Kompassnadel senkrecht dazu aus. Daraus kann geschlossen werden, dass das Magnetfeld **kreisförmig um den Leiter** verlaufen muss.

Bei dieser Paraphrase wurde insbesondere darauf geachtet, ob die Schüler*innen in der Lage waren, den Elektronenfluss als Ursache des magnetischen Feldes zu nennen. Dies gelang vier

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

der sieben interviewten Schüler*innen problemlos, weshalb ihre Aussagen als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert wurden. Beispielsweise erklärte IP16:

„Ja. Also, es gibt den Elektronenfluss, der von dem Minus- zum Pluspol geht. Und dadurch entsteht ein Magnetfeld. Und das Magnetfeld geht um den Leiter herum. Und das Magnetfeld beeinflusst den Kompass, also die Kompassnadel. Und - ähm - diese Spitze bei einem Kompass richtet sich immer nach der, also nach diesen Magnetfeldlinien. (R3-IP16, Pos. 107-112, 00:08:57-00:09:22)

Bei drei Interviewpartner*innen (IP17, IP19 und IP21) wurde die Paraphrase allerdings nur als ‚teilweise korrekt‘ (geld-2) bewertet. Bei IP17 und IP19 wurde beispielsweise die Information, dass eine Elektronenbewegung für das Entstehen eines Magnetfeldes notwendig ist, nicht erwähnt. Dies ist in folgender Interviewpassage mit IP19 ersichtlich:

„Wir haben es [das Magnetfeld] (...) eingezeichnet wegen dem Kompass, weil hier magnetische, also sich magnetische Felder sozusagen bilden, die um das Kabel herum/ [verlaufen].“ (R3-IP19, Pos. 128, 00:11:44-00:11:54)

Während IP19 den Kompass als Indiz für das magnetische Feld erwähnte, wurde der stromdurchflossene Leiter nicht als notwendige Vorbedingung genannt.

Bei IP21 wurde die Elektronenbewegung ebenfalls nicht als Ursache für das Magnetfeld genannt. Darüber hinaus kam der Begriff ‚Magnetfeld‘ zunächst nicht explizit in der Paraphrase vor. IP21 beschrieb den Versuch und die zugehörige Abbildung sehr grob und erwähnte das Magnetfeld erst durch eine Hilfestellung der Interviewerin.

Die beiden Aufgaben 3.1 und 3.2 konnten dagegen von allen Schüler*innen korrekt gelöst werden. Alle Schüler*innen erkannten bei Aufgabe 3.1, dass sich bei einem offenen Stromkreis kein Magnetfeld um einen Leiter bildet. Bei Aufgabe 3.2 konnten alle Schüler*innen Beispiele für elektrische Systeme nennen, bei denen die Strommesszange verwendet werden kann, um ein Magnetfeld zu detektieren. Eine Übersicht der genannten Beispiele ist in Tabelle 39 zu sehen:

Tabelle 39: Übersicht der genannten Beispiele aus Aufgabe A3.2.

	Beispiele
IP15	Autobatterien, Tischlampen, Handy
IP16	Ladekabel, Zahnbürste, Föhn, Wasserkocher
IP17	Lampe, Wasserkocher
IP18	Laptop, Handy
IP19	Handyladekabel, Computer, Fernseher
IP20	Fernseher, Ventilator
IP21	Handyladekabel, Küchengeräte

Zweiter Block: Konzeptidee 4

Die Kodierungen für die vierte Konzeptidee zu den Oberflächenladungen sind in Tabelle 40 zu sehen.

Tabelle 40: Kodierungen zur 4. Konzeptidee zu den Oberflächenladungen in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 4		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Oberflächen- ladungen	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	2	3	3	3	2,86
	Paraphrase	3	3	2	2	2	3	2	2,43
	Aufgabe 1	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Aufgabe 2	3	3	3	3	3	3	3	3,00

Wie aus Tabelle 40 hervorgeht, wurde die Erklärung zu dieser Konzeptidee von den meisten Schüler*innen gut aufgenommen (Akzeptanz). Lediglich IP18 äußerte Zweifel an der Erklärung und meinte, dass die Existenz von Oberflächenladungen nicht wirklich vorstellbar sei, wie aus folgender Interviewpassage hervorgeht:

"Doch, doch, schon gut erklärt. Nein, nicht, dass es schlecht erklärt war, aber es ist eben irgendwie unlogisch, dass da irgendwas herumfliegt." (R3-IP18, Pos. 199-208, 00:17:53-00:18:10)

Die Interviewerin wies darauf hin, dass im Anschluss ein Versuch durchgeführt werde, der die Wirkungen der Oberflächenladungen demonstriert. Daraufhin schien IP18 der Erklärung zuzustimmen.

Zur Auswertung der Paraphrase der Konzeptidee 4 wurde das folgende, in Textbox 24 dargestellte Musterbeispiel herangezogen:

Textbox 24: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 4 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: (Im Inneren einer Energiequelle kommt es zu einer Verschiebung von Ladung.) Bei einem äußeren Kontakt entsteht somit ein Überschuss an negativen Ladungen, am anderen ein Überschuss an positiven Ladungen. Diese Ladungen werden als Oberflächenladungen bezeichnet, da sie sich auf der Oberfläche des Leiters befinden. (Die Stärke der Energiequelle bestimmt wie viele Ladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt werden.)

Wesentlich bei dieser Paraphrase war, dass die Interviewpartner*innen beschreiben konnten, dass die Batterie als Energiequelle Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche pumpt, die sich dort verteilen. Dabei entsteht an einem Kontakt eine positive, an der gegenüberliegenden Seite eine negative Gesamtladung.

Diese Paraphrase konnte bei IP15, IP16 und IP20 als ‚korrekt‘ (grün-3) gewertet werden. Beispielsweise beschrieb IP20 die Oberflächenladungen folgendermaßen:

„(...) Und zum Beispiel bei der Batterie – damit man überhaupt von einem negativen und positiven Pol sprechen kann, werden die Ladungen eben in negative und positive getrennt, die [positiven] auf einer Seite und die [negativen] auf einer Seite. Aber das Innere ist eben jetzt nicht so interessant für die Physik, sondern eher das Äußere, und zwar die Oberflächenladungen. Und die sind eben um den Leiter herum, das heißt um das Kabel herum.“ (R3-IP20, Pos. 178, 00:21:15-00:21:41)

Bei IP17, IP18, IP19 und IP21 wurde die Paraphrase nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) gewertet, da ihre Aussagen im Vergleich zum Musterbeispiel unvollständig oder fehlerhaft waren.

Bei IP17 wurde zwar nicht genannt, dass die Ladungstrennung im Inneren der Batterie die Ursache für die Entstehung der Oberflächenladungen ist, was als Zusatzinformation nicht zwingend zu einer schlechteren Bewertung führt. Allerdings verwendete IP17 eine unglückliche Formulierung zur Beschreibung der Verteilung dieser Ladungen:

„Okay, jede Batterie hat die negative (...) und die positive Ladung. Und jedes Kabel umkreist bei der Oberfläche die Ladung, also zum Beispiel die positiven Ladungen. Und die sehen aus wie ein Kreis bei den Oberflächenladungen.“ (R3-IP17, Pos. 177-182, 00:20:29-00:21:05)

Aus der Textpassage geht hervor, dass IP17 Schwierigkeiten mit der Ausdrucksfähigkeit hatte. Im ersten Satz beschrieb IP17, dass die Batterie negative und positive Ladungen erzeugt. Im nächsten Satz wurde die Verteilung dieser Ladungen um das Kabel thematisiert, allerdings wurden die Begriffe dabei vertauscht. Im letzten Satz folgte eine genauere Formulierung, wonach

die Oberflächenladungen kreisförmig auf der Leiteroberfläche angeordnet seien. Aufgrund dieser unpräzisen Beschreibung wurde die Aussage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, obwohl die wesentlichen Inhalte des Musterbeispiels zumindest ansatzweise enthalten sind.

Ein weiteres Beispiel, bei dem die Aussage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert wurde, findet sich bei IP18. In diesem Interview wurde ebenfalls eine unpräzise Formulierung gewählt. IP18 sprach von „positiv und negativ geladene[n] Elektronen“, anstatt allgemein über Ladungen oder Oberflächenladungen zu sprechen:

I: „Kannst du mir nochmal erklären, was denn diese Oberflächenladungen sind?“

IP18: „Naja, positiv und negativ geladene Elektronen.“

I: „Teilchen, oder Ladungen.“

IP18: „Teilchen, die eben um die, um den Energieleiter herumfliegen.“

(R3-IP18, Pos. 209-212, 00:18:16-00:18:21)

Wie aus dem oben genannten Zitat hervorgeht, nutzte IP18 eigenes Vokabular zur Beschreibung der Verteilung der Oberflächenladungen. IP18 sprach davon, dass die Oberflächenladungen „um den Leiter herumfliegen“. Dies weist auf eine Vorstellung einer dynamischen Verteilung der Oberflächenladungen hin. Außerdem führte IP18 den Begriff „Energieleiter“ ein, der auf eine Vorstellung des Energieflusses innerhalb des Kabels schließen lässt (siehe Abschnitt 2.5.5). Die Passage wurde als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert, da sowohl die Annahme, dass Elektronen im Leiter vorhanden sind, als auch das Vorhandensein von Oberflächenladungen um den Leiter als Unterscheidungsmerkmale in der Interviewpassage erkennbar sind.

Das Interview mit IP19 stellte einen weiteren Fall dar, bei dem die Paraphrase aufgrund der verwendeten Begriffe als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert wurde. IP19 beschrieb Ursache und Verteilung der Oberflächenladungen am Leiter korrekt, ersetzte jedoch die Begriffe Minus- und Pluspol der Batterie durch „Südpol“ und „Nordpol“:

„Also, Sie haben mir erklärt, dass jede Batterie einen Südpol und einen Nordpol hat und es sozusagen auf der Oberfläche, zum Beispiel am Südpol, viele negative geladene Teilchen sind. Wenn man, ähm, ein Kabel zu diesem Südpol, wie man hier erkennt, ein Kabel verbindet, dann, ähm, sind hier überall auf der Oberfläche auf jedem kleinsten Millimeter so drumherum eben die negativ geladenen Teilchen.

(R3-IP19, Pos. 228, 00:19:35-00:20:12)

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

Aus dieser Interviewpassage geht nicht hervor, ob dies auf eine fehlende Differenzierung zwischen Elektrizitätslehre und Magnetismus zurückzuführen ist oder ob es sich dabei lediglich um einen Versprecher handelt.

Im Fall von IP21 lag eine besondere Situation vor, da das Interview zu diesem Zeitpunkt durch äußere Störungen beeinträchtigt wurde (siehe Längsschnittanalyse in Abschnitt 5.3.3.3). IP21 wiederholte korrekt, dass negative und positive Oberflächenladungen rund um den Leiter existierten, gab jedoch an, nicht mehr zu wissen, wie diese Oberflächenladungen entstanden. Aufgrund der unvollständigen Paraphrase wurde die Antwort als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Während nicht alle Paraphrasen ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet werden konnten, so trifft dies nicht auf die Aufgaben A4.1 und A4.2 zu. Beide Aufgaben dieser Konzeptideen wurden von allen Interviewpartner*innen korrekt gelöst.

In Aufgabe A4.1 waren alle Schüler*innen in der Lage, die Verteilung der Oberflächenladungen am Leiterkabel anhand eines Beispiels zu beschreiben. Sie konnten die positiven Oberflächenladungen dem oberen Ende des Stromkreises (beim positiven Pol der Batterie) und die negativen Ladungen dem unteren Ende des Stromkreises (beim negativen Pol der Batterie) zuordnen.

In Aufgabe A4.2 gelang es allen Schüler*innen, die genaue Verteilung der Oberflächenladungen rund um den Leiter zu beschreiben, wie aus folgenden Interviewpassagen von IP17 und IP21 hervorgeht:

„Also, sie [die Oberflächenladungen] sind rundherum von dem Kabel.“

(R3-IP17, Pos. 196, 00:22:04-00:22:08)

„Naja, sie [die Oberflächenladungen] sind rundherum um das ganze Kabel.“

(R3-IP21, Pos. 240, 00:20:15-00:20:27)

Teilweise zeigten die Interviewpartner*innen bei dieser Aufgabe auf den Stromkreis und beschrieben die kreisförmige Verteilung, was von der Interviewerin wörtlich wiederholt wurde:

I: „Ja, wenn du es mir beschreibst, wo sind hier die Oberflächenladungen?“

IP15: „So, hier herum.“

I: „Ja, du zeigst es mir schon gut. Also drum herum um das Leiterstück.“

IP15: „Ja.“ (R3-IP15, Pos. 183-186, 00:23:05-00:23:58)

Solche Antworten wurden ebenfalls als ‚korrekt‘ (grün-3) gewertet.

Zweiter Block: Konzeptidee 5

Die Kodierungen für die fünfte Konzeptidee zum elektrischen Feld sind in Tabelle 41 zu sehen.

Tabelle 41: Kodierungen zur 5. Konzeptidee zum elektrischen Feld in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 5		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Versuch zum E-Feld	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	2	3	3	3	3	2,86
	Paraphrase	3	2	2	3	3	3	2	2,57
	Aufgabe	3	3	3	3	3	3	2	2,86

Wie aus Tabelle 41 ersichtlich ist, wurde die Erklärung zum elektrischen Feld von fast allen Schüler*innen gut aufgenommen. Einzig IP17 stellte eine Verständnisfrage zu den Oberflächenladungen. Es schien noch unklar zu sein, dass die Oberflächenladungen statisch sind: Sie bewegen sich nicht wie die Ladungen im Leiterinneren von Plus nach Minus, sondern bleiben an ihren Positionen. Die Interviewerin erklärte dies daraufhin erneut, woraufhin IP17 angab, das nun verstanden zu haben.

Für die Analyse der Paraphrase wurde das in Textbox 25 dargestellte Musterbeispiel herangezogen:

Textbox 25: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 5 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Die Energiequelle pumpt **Oberflächenladungen** auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein **elektrisches Feld** verursachen. Das elektrische Feld kann mithilfe von **Feldlinien** dargestellt werden, die von Plus zu Minus verlaufen. Die Richtung des elektrischen Feldes hat historische Hintergründe.

Wesentlich für die Bewertung dieser Paraphrase war, dass die Schüler*innen beschreiben konnten, dass die Oberflächenladungen die Ursache für ein elektrisches Feld sind, das sich um den Leiter herum bildet. Dieses elektrische Feld kann mit Feldlinien beschrieben werden.

Diese Paraphrase wurden bei vier von sieben Schüler*innen als ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet. Beispielsweise argumentierte IP20 an dieser Stelle:

„Ok, also jetzt ist es ein geschlossener Stromkreis mit einem Energieumwandler, in dem Fall eine Lampe. Und es gibt wieder einen Elektronenfluss, der von Minus nach Plus [ver]läuft. Und drum herum sind die (...) Oberflächenladungen. Und da drinnen [zwischen den Leiterkabeln] entsteht dieses elektrische Feld. In der Mitte ist es relativ gerade, und da draußen wird es immer mehr gekrümmt, und die [Feldlinien] fließen von Plus nach Minus.“ (R3-IP20, Pos. 217-228, 00:29:29-00:30:14)

Selbst wenn IP20 vom „Fließen der Feldlinien“ sprach, enthielt die Aussage alle wesentlichen Informationen, wenn man sie mit dem Musterbeispiel verglich. IP20 beschrieb den Elektronenfluss vom Minus- zum Pluspol der Batterie und schien diesen von den Oberflächenladungen, die sich um den Leiter herum befanden, unterscheiden zu können. Außerdem wurde die Verteilung der Oberflächenladungen korrekt beschrieben. Sie wurden als Ursache des elektrischen Feldes genannt, dessen Verlauf im Detail dargestellt wurde.

Bei den drei übrigen Interviews wurden die Paraphrasen als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Beispielsweise war die Paraphrase von IP16 unvollständig, wie aus folgender Interviewpassage hervorgeht:

„Also die Oberflächenladungen sind bei der Batterie in der Nähe stärker konzentriert als dann im Laufe des Stromkreises. Und wenn man einen Energieumwandler in diesen Stromkreis einschließt, ähm, also, dann gibt es eben keinen Kurzschluss. Und man kann die Elektro-, also das Elektrofild, kann man anhand dieser Linien erkennen. Und das ist aber ein bisschen verschoben. Also, das ist nicht ganz gerade.“ (R3-IP16, Pos. 279-284, 00:23:29-00:24:08)

IP16 beschrieb die Verteilung der Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche zwar korrekt, ließ jedoch die Information aus, dass diese Ladungen das elektrische Feld verursachen. Außerdem verwendete IP16 für das elektrische Feld die Bezeichnung „Elektrofild“.

Im Interview mit IP17 traten ebenfalls einige Schwierigkeiten auf. Zunächst versuchte IP17, die Entstehung des magnetischen Feldes zu erklären. Die Interviewerin unterbrach daraufhin und wies darauf hin, dass es nun um das elektrische Feld gehe. Durch gezielte Nachfragen gelangte IP17 schließlich zu der Erklärung, dass die Oberflächenladungen auf dem Kabel durch die Energiequelle (Batterie) hervorgerufen werden. Abschließend ergänzte die Interviewerin, dass diese Oberflächenladungen das elektrische Feld erzeugen.

Bei IP21 handelte es sich wieder um den besonderen Fall, der in Abschnitt 5.3.3.3 näher beschrieben wird. Zu Beginn der Paraphrase wiederholte IP21 korrekt, dass es negative und positive Oberflächenladungen gibt, die sich rund um den Leiter befinden. Allerdings gab IP21 an, nicht mehr zu wissen, wie diese Oberflächenladungen entstehen. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Interview kurz durch das Eintreten eines Lehrers unterbrochen.

Die Paraphrasen wurden zwar nicht durchgehend als ‚grün‘ kodiert, dennoch zeigte sich kein wesentlicher Einfluss auf die Ergebnisse bei der Bearbeitung der zugehörigen Aufgabe. Eine Übersicht der Resultate ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 42: Übersicht der genannten Beispiele aus der Aufgabe zur Konzeptidee 5.

	Beispiele
IP15	Lampen, Smartphones, elektrische Zahnbürsten, Spielkonsolen
IP16	Föhn, elektrische Zahnbürste, Glätteisen
IP17	Taschenlampe, Drucker
IP18	Lampe, Hochspannungsleitungen, elektrische Zahnbürste
IP19	Batterie, Fernseher, Kühlschrank
IP20	Steckdose, Föhn, Ventilator
IP21	Steckdose, Mixer

Wie man in der Tabelle erkennen kann, waren alle Interviewpartner*innen in der Lage, geeignete Beispiele zu nennen. Einzig IP21 benötigte anfangs etwas Hilfe von der Interviewerin in Form eines Musterbeispiels.

Zweiter Block: Konzeptidee 6 und 7

Die Kodierungen für die sechste Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen sind in Tabelle 43 zu sehen.

Tabelle 43: Kodierungen zur 6. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 6		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Energieübertragung in elektrischen Systemen	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	2	3	3	2	2,71
	Paraphrase	2	3	3	2	3	3	3	2,71
	Aufgabe	2	3	3	3	3	2	3	2,71

Wie man in Tabelle 43 sehen kann, wurde diese Konzeptidee von den meisten Interviewpartner*innen gut aufgenommen. Lediglich bei IP18 und IP21 traten allerdings Unklarheiten auf. IP18 äußerte beispielsweise, dass die Erklärung zwar nachvollziehbar sei, es jedoch schwerfalle, sich vorzustellen, wie die Energie die Energiequelle verlässt und in den Energieumwandler gelangt. Daraufhin wiederholte die Interviewerin die Erklärung, was von IP18 akzeptiert wurde. IP21 gab ebenfalls an, das Konzept sei „sehr kompliziert aber es ging.“ (R3-IP21, Pos. 444, 00:37:21-00:27:25).

Für die Kodierungen der Paraphrase wurde das in Textbox 26 dargestellte Musterbeispiel herangezogen.

Textbox 26: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 6 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Gemeinsam ergeben das magnetische und elektrische Feld das sogenannte **elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld)**. Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der **Energie-Hand-Regel für die linke Hand** hergeleitet werden. Erweiterung: [Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss ebenfalls senkrecht darauf einzeichnen.]

Wesentlich dabei war, dass die Interviewpartner*innen das elektromagnetische Feld als eine Kombination des elektrischen und magnetischen Feldes erkennen sollten und die Energie-Hand-Regel für die linke Hand wiedergeben konnten. Wie man in Tabelle 43 erkennen kann, waren fünf der sieben befragten Schüler*innen in der Lage, diese Paraphrase ‚korrekt‘ (grün-3) wiederzugeben. Ein Beispiel findet sich in folgender Passage aus dem Interview mit IP20:

„Also, man spricht jetzt von dem elektromagnetischen Feld – das ist eine Kombination aus dem elektrischen Feld, das innen drinnen eben verläuft, und dem magnetischen Feld, das um den Leiter herum verläuft. (...) Und dazu gibt es auch diese Linke-Hand-Regel. Und das heißt, dass das elektrische Feld immer der Zeigefinger, der Daumen das magnetische Feld und der Energiefluss der Mittelfinger ist. Und die müssen immer im rechten Winkel aufeinander stehen. Und somit kann man sich eben herleiten, wie die Energie da drumherum eigentlich fließt, nicht innen drinnen [in den Leitern].“ (R3-IP20, Pos. 295-304, 00:40:04-00:41:10)

Die Aussagen von IP15 und IP18 wurden als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Die Erklärung von IP15 enthielt zwar grundsätzlich die wesentlichen Informationen gemäß dem Musterbeispiel, jedoch wurde bei der Anwendung der Energie-Hand-Regel für die linke Hand zunächst die Richtung des Magnetfeldes falsch angegeben. In dem Beispiel zeigte der Daumen in die Ebene hinein, während IP15 angab, dass er aus der Ebene herauszeige. Die Interviewerin wies auf diesen Fehler hin, woraufhin IP15 den restlichen Teil der Regel korrekt erläuterte.

Bei Aufgabe A6 gelang es wieder fünf von sieben Schüler*innen diese ‚korrekt‘ (grün-3) zu lösen. Sie beschrieben die Energieübertagung am Beispiel eines realen Stromkreises mit Batterie und Ventilator.

Nur die Antworten von IP15 und IP20 wurden als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. IP15 beschrieb, dass sich Oberflächenladungen rund um den Leiter befinden und erklärte, dass diese ein elektrisches Feld erzeugen. IP18 hingegen verwendete zunächst eine unzutreffende Formulierung und sprach zunächst fälschlicherweise davon, dass die Oberflächenladungen „fließen“ (R3-IP18, Pos. 454, 00:42:06-00:42:09). Das Magnetfeld und seine Ursache (Elektronenfluss)

wurden jedoch korrekt beschrieben. Zudem wurde die Vorstellung, dass aus dem Zusammenwirken von elektrischem und magnetischem Feld ein Energiefluss resultiert, inhaltlich richtig dargestellt.

Die Antwort von IP20 enthielt zwar alle wesentlichen Informationen, die im Musterbeispiel genannt wurden. Allerdings ging IP20 zunächst irrtümlich davon aus, dass die Energie im vorgegebenen Stromkreis im Kreis fließe, also von der Energiequelle über den Energieumwandler und anschließend wieder zurück zur Quelle. Nachdem die Interviewerin auf diesen Fehler hingewiesen hatte, wurde die Aussage von IP20 korrigiert.

Die siebte Konzeptidee stellte eine Erweiterung der sechsten Konzeptidee dar. Sie wurde nur mit ausgewählten Schüler*innen im Laufe der dritten Interviewrunde besprochen. In Runde drei wurde sie nur im Interview mit IP17 erwähnt. IP17 zeigte Interesse an der mathematischen Beschreibung des Energieflussvektors, weshalb diese Erklärung ebenfalls diskutiert wurde. Die Akzeptanz konnte in diesem Fall mit (grün-3) kodiert werden, da IP17 angab, alles verstanden zu haben, allerdings wurde keine Paraphrase abgefragt (siehe Tabelle 44).

Tabelle 44: Kodierung zur 7. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen II in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 7		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Energieübertragung in elektrischen Systemen II	Erklärung								
	Akzeptanz			3					3,00
	Paraphrase								

Dritter Block: Konzeptidee 8

Die Kodierungen für die achte Konzeptidee zum Vergleich von Gleichstrom- und Wechselstromkreisen sind in Tabelle 45 zu sehen.

Tabelle 45: Kodierungen zur 8. Konzeptidee zu Gleichstrom- und Wechselstromkreisen in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 8		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Gleichstrom- und Wechselstromkreise	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	2	3	2	3	2	3	2	2,43
	Aufgabe 1	3	3	2	3	2	3	2	2,57
	Aufgabe 2	3	3	3	1	3	3	3	2,71
	Aufgabe 3	3	3	3	2	3	3	2	2,71

Wie man in Tabelle 45 erkennen kann, wurde die 8. Konzeptidee von allen Interviewpartner*innen gut aufgenommen (Akzeptanz). Es kamen keine Verständnisfragen seitens der Schüler*innen auf.

Zur Auswertung der Paraphrase wurde wieder ein Musterbeispiel zum Vergleich herangezogen, welches in Textbox 27 zu sehen ist.

Textbox 27: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 8 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: In **Gleichstromkreisen** bewegen sich die Elektronen gerichtet vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle. Bei **Wechselstromkreisen** hingegen bewegen sie sich hin- und her.

Erweiterung: [Ein elektrisches System besteht aus einer Energiequelle und einem Energieumwandler. Außerdem wird manchmal ein Übertragermedium (z. B. Leiterkabel) benötigt. Die Energiequelle (z. B. Batterie) pumpt Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche, die ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter hervorrufen. Bei einem geschlossenen Stromkreis entsteht außerdem ein Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld um den Leiter erzeugt. Gemeinsam ergeben das elektrische und das magnetische Feld um den Leiter das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden.]

Damit die Paraphrase als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert werden konnte, musste die Unterscheidung von Gleich- und Wechselstromkreisen gemäß dem Musterbeispiel erwähnt worden sein. Die Schüler*innen sollten beschreiben können, dass sich Elektronen in Gleichstromkreisen gerichtet vom Minus- zum Pluspol bewegen, während sie sich bei Wechselstromkreisen hin- und herbewegen. Dies wurde bei drei Interviews (IP16, IP18 und IP20) vollständig und korrekt umgesetzt. Ein Beispiel einer vollständigen Erklärung findet sich in dieser Interviewpassage mit IP20:

„Also, es gibt Gleichstrom. Das ist, wenn die Elektronen nur in eine Richtung fließen. Und dann gibt es den Wechselstrom. Das ist, wenn die Elektronen/ Also, die [Batterie polt] (polen) ja 50-mal in der Sekunde um. Und die fließen nicht wirklich, sondern bewegen sich immer nur ein bisschen nach vorne und nach hinten. Und das wird eben anders dargestellt. Die Energiequelle wird jetzt mit einem Kreis und einer Welle dargestellt. Nur eben, dass es nicht eindeutig ist, sondern, dass es immer umgepolt wird. Und es ist nicht mehr ein einfacher Pfeil, sondern ein Pfeil, der in beide Richtungen zeigt, weil eben kein eindeutiger in eine Richtung – ein Elektronenfluss da ist.“ (R3-IP20, Pos. 371-388, 00:59:49-01:00:19)

Wenn in einer Paraphrase bestimmte Inhalte des Musterbeispiels ausgelassen oder nicht korrekt wiedergegeben worden waren, die wesentlichen Informationen jedoch enthalten blieben, wurde die Passage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Dies traf auf die Interviews mit IP15, IP17, IP19 und IP21 zu.

IP15 beschrieb zunächst korrekt, dass sich Elektronen in Wechselstromkreisen hin- und herbewegen. Zudem wurde richtig angegeben, dass es eine zweite Art von Stromkreisen gebe. Die

Bezeichnung ‚Gleichstromkreis‘ wurde jedoch nicht verwendet. Darüber hinaus wurde nicht korrekt beschrieben, dass sich die Elektronen in einem Gleichstromkreis außen von einem Pol der Batterie zum anderen bewegen. Stattdessen verwendete IP15 folgende Formulierung:

„(...)die Minuspole werden dann in eine Richtung gelenkt und die positiven auch.“

(R3-IP15, Pos. 372, 00:54:09-00:54:16)

Aus der Aussage geht hervor, dass IP15 kein vollständiges Verständnis über den elektrischen Strom in einem einfachen Stromkreis aufweist. Da aber zumindest der Wechselstromkreis korrekt beschrieben wurde, konnte diese Aussage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert werden. Im Interview mit IP17 und IP19 trat ein ähnliches Problem auf. Der Wechselstromkreis wurde korrekt beschrieben, allerdings konnte auch hier der Gleichstromkreis nicht beim Namen genannt werden. Stattdessen wurde bei IP17 von der "regelmäßigen Stromleitung" (R3-IP17, Pos. 494, 00:52:37-00:52:54) und bei IP19 vom „Leichtstrom“ (R3-IP19, Pos. 476, 00:48:30-00:48:34) gesprochen.

Beim Interview mit IP21 ergaben sich ebenfalls Schwierigkeiten. IP21 zeigte Unsicherheiten bei der Verwendung der Begriffe ‚Oberflächenladung‘ und ‚Ladung im Leiterinneren‘, was sich darin äußerte, dass Begriffe mehrfach verwechselt und Aussagen selbst korrigiert wurden. Die grundlegende Unterscheidung zwischen Wechsel- und Gleichstromkreisen wurde jedoch beschrieben, weshalb diese Aussage als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert wurde.

Die 8. Konzeptidee enthielt drei Aufgaben, die auf die Auswirkungen einer Umpolung auf das elektrische, magnetische und elektromagnetische Feld (und somit den Energiefluss) abzielten. Die erste Aufgabe wurde bei IP15, IP16, IP18 und IP20 als ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet. Diese Schüler*innen beschrieben, dass sich durch die Umpolung der Energiequelle die Richtung des Stromflusses änderte. In der Folge änderte sich auch die Richtung des magnetischen Feldes. Im angegebenen Beispiel zeigten die magnetischen Feldlinien nach der Umpolung aus der Ebene hinaus.

Als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) wurden die Aussagen von IP17, IP19 und IP21 bewertet. Diese enthielten entweder nicht alle wesentlichen Informationen oder wiesen teilweise fehlerhafte Angaben auf. IP17 schien zu Beginn der Aufgabenstellung A8.1 das magnetische Feld mit dem elektrischen Feld zu verwechseln. Anstatt anzugeben, dass sich das Magnetfeld beim Umpolen aus der Ebene hinausdreht, gab IP17 an, dass es nach unten zeigen müsse, also in die entgegengesetzte Richtung, die das elektrische Feld ursprünglich hatte. IP17 vermutete zwar korrekt eine Richtungsumkehr, verwechselte jedoch zunächst das elektrische und magnetische Feld. Erst nachdem die Interviewerin erneut darauf hinwies, dass es um das magnetische Feld geht, und

die Herleitung mit der Linken-Hand-Regel wiederholte, gelangte IP17 schließlich zur richtigen Antwort.

Bei IP21 ergab sich ein ähnlicher Fall: Zunächst beschrieb IP21 korrekt, dass sich die Richtung der Feldlinien umdrehen, wenn es zu einer Umpolung der Energiequelle kommt. Als Ursache gab IP21 allerdings die Änderung der (Oberflächen-)Ladung an:

„Naja, da die positive und negative Ladung anders ist. Und dadurch gehen auch die Pfeile in die andere Richtung.“ (R3-IP21, Pos. 595, 00:59:23-00:56:28)

Da diese Argumentation nur für das elektrische Feld korrekt war, wies die Interviewerin IP21 erneut darauf hin, dass es in der Aufgabe um das magnetische Feld ging. Daraufhin erkannte IP21 den Fehler und konnte den Stromfluss als Ursache für das Magnetfeld nennen. Mit leichter Unterstützung gelangte IP21 schließlich zur richtigen Antwort, dass sich die Richtung der magnetischen Feldlinien durch die Umpolung des Stromflusses ebenfalls umkehren muss.

Beim Interview mit IP19 trat eine andere Schwierigkeit auf. Zunächst wurde von IP19 angenommen, dass sich das magnetische Feld bei einer Umpolung der Energiequelle nicht verändert. Erst als die Interviewerin nachfragte, was die Ursache des Magnetfeldes ist, bemerkte IP19, dass das Magnetfeld die Richtung ändern müsste, da die Elektronenrichtung beim Umpolen verändert wird (ähnlich wie oben bei IP21). Trotz der anfänglichen Schwierigkeiten gelangte IP19 letztendlich zu korrekten Aussage, wie aus folgendem Zitat hervorgeht:

IP19: „Ich glaube, das magnetische Feld würde sich auch umdrehen. Also, der [Elektronen-] Fluss würde sich auch umdrehen.“ (R3-IP19, Pos. 485-512, 00:50:24-00:50:27)

Bei der zweiten Aufgabe (A8.2) konnten dagegen fast alle Aussagen als ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet werden. Mit der Ausnahme von IP18 gelang es allen Interviewpartner*innen zu beschreiben, dass sich die Richtung des elektrischen Feldes ändert, da sich die Verteilung der Oberflächenladungen ändert, wenn die Energiequelle umgepolt wird.

Die einzige Ausnahme bildete dabei IP18. In der entsprechenden Interviewpassage beschrieb IP18, dass das elektrische Feld selbst bei der Umpolung der Energiequelle in der gleichen Richtung („von oben nach unten“) verlaufen müsse. Wenn das elektrische Feld ursprünglich von den positiven zu den negativen Oberflächenladungen verlief, müsse es nach der Umpolung von den negativen zu den positiven Ladungen verlaufen. Diese Argumentation lässt sich aus folgendem Abschnitt entnehmen:

I: „Es muss in die andere Richtung sich (drehen), so ist es. Was für eine Auswirkung hätte es auf das elektrische Feld, das hier in der Mitte eingezeichnet ist?“
IP18: „Eigentlich keine.“ (...)

I: „Ja, und wenn jetzt diese Oberflächenladungen sich ändern bei der Umpolung?“

IP18: „Von Minus zu Plus.“

(R3-IP18, Pos. 527-540, 00:47:18-00:47:28)

Dieser Fall ist besonders interessant, da dieselbe Person die Aufgaben A8.1 und A8.3 richtig beantwortete. Er wurde daher in Abschnitt 5.3.3.3 ausführlicher diskutiert.

Die letzte Aufgabe dieser Konzeptidee (A8.3) wurde von fünf der sieben befragten Schüler*innen korrekt beantwortet und entsprechend (grün-3) kodiert. Die Befragten beschrieben, dass die Richtung des Energieflusses unverändert blieb, da sowohl die elektrischen als auch die magnetischen Feldlinien ihre Richtung änderten.

Nur bei IP18 und IP21 wurden die Aussagen als „teilweise korrekt“ (gelb-2) kodiert. Zu Beginn der Aufgabe antwortete IP18, dass die Richtung des Energieflusses bei einer Umpolung der Energiequelle umgekehrt sein müsste, nannte jedoch keine Begründung dafür. Schrittweise ging die Interviewerin mit IP18 die einzelnen Felder nochmals durch, insbesondere da die letzte Aufgabe A8.2 falsch beantwortet worden war. Am Ende der Erklärung zeigte IP18 mithilfe der Linken-Hand-Regel korrekt auf, dass der Energiefluss bei einer Umpolung der Energiequelle weiterhin von der Energiequelle zum Energieumwandler verlaufen müsse, da sich sowohl die Richtung des magnetischen als auch des elektrischen Feldes ändere.

Bei IP21 ergab sich ein ähnlicher Fall. Zu Beginn nahm auch IP21 fälschlicherweise an, dass der Energiefluss bei einer Umpolung der Energiequelle in die andere Richtung zeigen müsste. Daraufhin verwies die Interviewerin nochmal auf die Energie-Hand-Regel, woraufhin IP21 letztendlich doch zu der richtigen Lösung gelangte.

Dritter Block: Konzeptidee 9

Die Kodierungen für die neunte Konzeptidee zur Energieerhaltung sind in Tabelle 46 zu sehen.

Tabelle 46: Kodierungen zur 9. Konzeptidee zur Energieerhaltung in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 9		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Energie- erhaltung	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	2	3	3	3	3	2,86
	Paraphrase	2	3	3	3	3	3	1	2,57
	Aufgabe	3	3	3	3	3	3	3	3,00

Die Akzeptanz dieser Konzeptidee ist sehr hoch, es gab nur eine Rückfrage bei Schüler*in IP17. Dabei wurde die Interviewerin gebeten, die Erklärung nochmal zu wiederholen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass IP17 kurzzeitig abgelenkt schien. Nach der Wiederholung der Erklärung gab IP17 jedoch an, diese verständlich zu finden.

Für die Paraphrase wurde das in Textbox 28 beschriebene Musterbeispiel zum Vergleich herangezogen.

Textbox 28: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 9 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: [Die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler findet durch das elektromagnetische Feld statt.]

Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht (in einem idealen Stromkreis) der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird (*Energieerhaltung*). In der Realität wird ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben.

Damit diese Paraphrase als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert wurde, mussten die Interviewpartner*innen beschreiben, dass die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wurde, der Menge an Energie entsprach, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wurde, und dass in einem realen Stromkreis ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wurde.

Dies war bei IP16, IP17, IP18, IP19 und IP20 der Fall. Beispielsweise argumentierte IP19:

„Also, von der Energiequelle kommt meistens – also nicht unbedingt in der Realität, aber in der Theorie – kommt alle Energie (...) die von der Energiequelle abstammt, auch im Energieumwandler an. Nur kann es in [der] Realität auch passieren, dass diese Energie auch in Wärmeenergie umgewandelt werden kann und zum Beispiel das Kabel erhitzt werden kann.“ (R3-IP19, Pos. 583-586, 00:55:37-00:56:03)

Aus diesem Zitat ging hervor, dass IP19 den Unterschied zwischen einem idealen Stromkreis und einem realen Stromkreis erkannte. Während bei einem idealen Stromkreis („in der Theorie“) die gesamte Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen werden konnte, sah es in realen Stromkreisen („in der Realität“) anders aus: Dort wurde ein Teil der Energie auch an die Umgebung abgegeben, und zwar in Form von Wärmeenergie.

Eine ähnliche, wenn auch etwas ungenauere Beschreibung, fand sich bei IP17:

„(...) Von der Energiequelle wird der genaue Wert von Energie an den Energieumwandler geleitet. Aber ein Teil davon wird dann der Umgebung verteilt, also als Wärme. (R3-IP17, Pos. 586, 00:59:31-00:59:41)

IP17 äußerte, dass die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler „geleitet“ werde. Ein Teil der Energie werde jedoch in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben, oder wie IP17 es ausdrückte, „verteilt“.

Wenn die Paraphrase nicht alle wesentlichen Informationen des Musterbeispiels enthielt, aber dennoch nicht vollständig inkorrekt war, wurde sie als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Dies traf auf IP15 zu, wie aus folgendem Zitat hervorgeht:

„(...) die Zahnbürste ist eben die Energiequelle. Und/ nein, der Energieumwandler.
(...) Und die Steckdose beziehungsweise der Adapter da, ähm, ist die Energiequelle.
(...) Dadurch wird eben die Zahnbürste aufgeladen und ein bisschen von [der]
Energie geht verloren wegen der/ Zum Beispiel, wenn sich das Kabel da erhitzt.“
(R3-IP15, Pos. 427-432, 00:58:52-00:59:33)

Die Paraphrase begann mit einer Verwechslung zwischen der Energiequelle und dem Energieumwandler, wobei IP15 sich selbst korrigierte. Anschließend wurde die Energieübertragung nur sehr ungenau beschrieben: Statt anzugeben, dass die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wurde, nicht der Menge entspricht, die beim Energieumwandler ankommt, erklärte IP15, dass Energie teilweise „verloren“ geht, weil sich „das Kabel da erhitzt“. Wurden die inhaltlichen und sprachlichen Anforderungen im Vergleich zum Musterbeispiel nur mangelhaft oder gar nicht erfüllt, wurde die Paraphrase als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert. Dies traf bei nur auf ein Interview zu. IP21 formulierte folgendermaßen:

„Also die Energiequelle hat eine gewisse Anzahl an Strom, die sie abgeben kann
(...) und es reicht manchmal nicht für das, für den Umwandler, glaube ich.“ (R3-IP21,
Pos. 645-647, 00:59:35-00:59:57)

IP21 griff bei der Formulierung dieser Paraphrase offenbar auf Präkonzepte zurück oder entwickelte eine ad hoc Idee (siehe Abschnitt 2.5.2). Statt über die Menge an Energie zu sprechen, die von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen werde, sprach IP21 vom elektrischen Strom, der von der Energiequelle „abgegeben“ werde. Weiterhin äußerte IP21, dass dieser Strom manchmal „nicht für das, für den Umwandler“ ausreiche. Dies deutete darauf hin, dass eine Stromverbrauchsvorstellung zugrunde liegen könnte (siehe Abschnitt 2.5.2). IP21 beschrieb, dass die Energiequelle Strom liefere, der dazu verwendet werde, um den Energieumwandler zu betreiben. Zum einen wurde somit nicht über die eigentliche Konzeptidee E9 gesprochen, da die Energie nicht erwähnt wurde, zum anderen schien IP21 auf eine Verbrauchervorstellung zurückzugreifen.

Die 9. Konzeptidee endete mit einer Aufgabe (A9), bei der die Interviewpartner*innen beschreiben sollten, woran man an einfachen elektrischen Geräten (Föhn oder elektrische Zahnbürste) erkennen kann, dass Energie übertragen wurde. Als Antwort sollten die Befragten angeben können, dass die Energieübertragung nur indirekt über ihre Wirkungen beobachtbar ist, beim Föhn beispielsweise durch das Hinausströmen warmer Luft, bei der Zahnbürste durch das Blinken einer LED während des Ladevorgangs. Dies gelang allen Interviewpartner*innen problemlos, weshalb die Aussagen als ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet wurden.

Dritter Block: Konzeptidee 10

Die Kodierungen für die zehnte Konzeptidee zum Rucksackmodell als gängige Schüler*innen-vorstellung zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen sind in Tabelle 47 zu sehen.

Tabelle 47: Kodierungen zur 10. Konzeptidee zum Rucksackmodell in der dritten Interviewrunde.

KONZEPTIDEE 10		IP15	IP16	IP17	IP18	IP19	IP20	IP21	$\bar{x}$
Rucksack- modell	Erklärung								
	Akzeptanz	3	3	3	3	3	3	3	3,00
	Paraphrase	2	3	2	2	3	3	1	2,29
	Aufgabe 1	3	3	3	3	3	2	1	2,57
	Aufgabe 2	3	3	3	3	3	3	2	2,86

Wie man anhand Tabelle 47 erkennen kann, wurde die Erklärung dieser Konzeptidee von allen Schüler*innen akzeptiert. Die Akzeptanz wurde durchwegs (grün-3) kodiert, es kamen also keine Verständnisfragen seitens der Befragten auf.

Für die Paraphrase wurde das in Textbox 29 beschriebene Musterbeispiel zum Vergleich verwendet.

Textbox 29: Musterbeispiel für die Paraphrase bei Konzeptidee 10 in der dritten Interviewrunde.

Musterbeispiel: Die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler findet durch das elektromagnetische Feld statt. Dies geschieht in Lichtgeschwindigkeit, also sehr schnell.

Damit eine Paraphrase als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert werden konnte, mussten die Befragten beschreiben, dass die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler mit Lichtgeschwindigkeit erfolgt. Dies gelang drei Befragten: IP16, IP19 und IP20. So formulierte beispielsweise IP19 dies wie folgt:

„Die Energie (...) wird in Lichtgeschwindigkeit (...) übertragen, ja. Deswegen kann der Mensch es [den Energieübertragungsprozess] durch seine Sinne nicht wirklich erfassen. Er kann es nicht erfassen, deswegen würde man denken: Wüsste man durch die Physik nicht, dass es [die Energieübertragung] nicht zeitgleich ist, würde man denken, dass es zeitgleich wäre, was es aber nicht ist.“ (R3-IP19, Pos. 609-612, 00:58:00-00:58:26)

Ein wenig anders formulierte dies IP20:

Also zum Beispiel beim Beispiel vom Ventilator: Wenn wir es [das System] jetzt betrachten würden, würden wir sagen, es [der Ventilator] geht sofort an. Aber es dauert schon ein bisschen länger, und zwar die Länge von der

Lichtgeschwindigkeit. (...) Und deswegen – weil wir Menschen das nicht so mitverfolgen können, weil es wirklich extrem schnell ist – scheint das so, als würde es [der Ventilator] direkt nach dem Anschließen angehen. (R3-IP20, Pos. 437-444, 01:06:51-01:07:20)

IP21 interpretierte die Lichtgeschwindigkeit zwar fälschlicherweise als Zeitdauer, dennoch sind die wesentlichen Informationen des Musterbeispiels enthalten: Die Energie wird nicht instantan übertragen, sondern benötigt eine gewisse Zeit, da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Aussagen, die die inhaltlichen und sprachlichen Anforderungen im Vergleich zum Musterbeispiel nur teilweise erfüllen, wurden als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert. Dies betrifft die Interviews mit IP15, IP17 und IP18.

Beispielsweise formulierte IP15 die Erklärung folgendermaßen:

„(...) es dauert so dreihundert Millionen Meter pro Sekunde, bis, also richtig schnell, bis der Strom in den Energieverbraucher fließt.“ (R3-IP15, Pos. 466, 01:01:37-01:01:55)

Hier wurde zwar das Konzept angesprochen, dass die Energieübertragung nicht sofort stattfindet, sondern dass die Energie mit Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld übertragen wird, allerdings wurden zwei Fehler gemacht: Zum einen wurde die Lichtgeschwindigkeit, ähnlich wie bei IP20, fälschlicherweise als Zeitdauer interpretiert. Zum anderen bezeichnete IP15 den Energieumwandler fälschlicherweise als „Energieverbraucher“.

Bei IP17 findet sich ebenfalls eine ungenaue Formulierung:

„Ähm, wir können, also, wenn wir, also, wenn wir was [eine Energiequelle] einschalten, werden wir nicht mal merken, wann es – also – wann es [die Energieübertragung] genau begonnen hat, weil es sich in Lichtgeschwindigkeit schon eingeschaltet hat und [der Ventilator sich] zum Bewegen angefangen hat.“ (R3-IP17, Pos. 626, 01:02:50-01:02:51)

Hierbei beschrieb IP17, dass der Energieübertragungsprozess nicht direkt beobachtbar sei, da dieser in Lichtgeschwindigkeit stattfindet, weshalb ein Ventilator scheinbar sofort zu drehen beginnt. Allerdings gelang es IP17 nicht, dies klar auszudrücken. Präziser wäre gewesen, wenn IP17 erwähnt hätte, dass die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler durch das elektromagnetische Feld erfolgt und dieser Vorgang mit Lichtgeschwindigkeit geschieht. Deshalb wurde die Aussage nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

IP18 hingegen gab an, dass die Energie mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werde, bezog dies jedoch nicht auf elektrische Systeme, sondern führte andere Beispiele an. Dadurch handelt es

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

sich nicht um eine genaue Paraphrase der Erklärung, sondern um eine Aussage, die vor allem neue, eigenständige Elemente enthält, wie aus dieser Interviewpassage hervorgeht:

„Also, dass sich Energie mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Und (...) Lichtgeschwindigkeit haben wir bis jetzt noch nicht geschafft zu fahren. Oder zu fliegen, je nachdem, also Menschen. Und das ist eigentlich zu schnell für uns. Also, für unsere Reaktionen.“ (R3-IP18, Pos. 628-632, 00:53:08-00:53:37)

Da diese Aussage nicht alle wesentlichen Informationen gemäß dem Musterbeispiel enthält, wurde sie nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Aussagen, die die inhaltlichen und sprachlichen Anforderungen im Vergleich zum Musterbeispiel nur unzureichend oder gar nicht erfüllten, wurden als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert. Dies traf bei der Paraphrase zu dieser Konzeptidee ausschließlich auf das Interview mit IP21 zu. In dieser Passage beschrieb IP21 die Lichtgeschwindigkeit fälschlicherweise als eine Größe, die von einem Ort zum anderen fließt. Tatsächlich hätte sie jedoch als Geschwindigkeit beschrieben werden sollen, mit der sich die Energie durch das elektromagnetische Feld ausbreitet. Diese Verwechslung wird im folgenden Zitat deutlich:

„Naja, also die Lichtgeschwindigkeit braucht eine gewisse Zeit, bis sie ankommt. Für uns ist es aber so quasi nichts – Zeit.“ (R3-IP21, Pos. 697, 01:04:25-01:04:34)

Da diese Aussage gröbere Fehler beinhaltet, wurde sie als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) bewertet.

Die 10. Konzeptidee endete mit zwei Aufgaben (A10.1 und A10.2). In der ersten Aufgabe sollten die Schüler*innen erläutern, dass die Elektronen zwar für den Elektronenfluss und damit für die Entstehung eines magnetischen Feldes verantwortlich sind, welches wiederum zum elektromagnetischen Feld beiträgt, sie aber nicht allein für die Energieübertragung verantwortlich sind. Diese Aufgabe wurde von fünf der sieben befragten Schüler*innen ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) beantwortet. So antwortet beispielsweise IP17 auf die Frage, wie man einer Person vermitteln könne, dass die Elektronen nicht die einzige Ursache der Energieübertragung seien, Folgendes:

„Ähm, es [die Energie] wird ja durch den Energiefluss übertragen, zu den, also, zu den Lampen. (...) Also, von dem Schalter. Und das passiert in der Lichtgeschwindigkeit.“ (R3-IP17, Pos. 642-644, 01:04:20-01:04:30)

IP18 nannte die elektromagnetischen Felder als Ursache der Energieübertragung:

„Weil es Magnetfelder und elektrische Felder gibt. (...) Und dann wird die Energie, der Energiefluss, eben in dem elektromagnetischen Feld [übertragen]/ Da passiert der.“ (R3-IP18, Pos. 648-650, 00:54:52-00:55:05)

Diese Aussagen wurden daher als ‚korrekt‘ (grün-3) gewertet. Im Gegensatz dazu wurden Aussagen, die unvollständig oder teilweise falsch sind, als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) gewertet. Dies traf bei Aufgabe A10.1 auf die Antwort von IP20 zu. IP20 beschrieb zunächst kurz, dass dies mit dem „elektrischen Feld“ und den „Oberflächenladungen“ zusammenhänge. Auf Nachfrage, ob nur das elektrische Feld gemeint sei, korrigierte sich IP20 und ergänzte „das elektromagnetische Feld“ (R3-IP21, Pos. 445-464, 1:08:13-1:10:35). Da IP20 an dieser Stelle keine weiteren Ausführungen lieferte, stellte die Interviewerin die Frage erneut und führte IP20 Schritt für Schritt durch die Lösung der Aufgabe. Die Antwort wurde als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet, da das Grundwissen zu den wesentlichen Konzepten vorhanden war, jedoch nicht detailliert beschrieben wurde.

Die Aufgabe A10.1 wurde dagegen bei IP21 als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) kodiert. Hierbei waren kaum bis gar keine Ansätze zur Lösung der Antwort vorhanden. Hierbei handelte es sich allerdings um einen speziellen Fall, der in Abschnitt 5.3.3.3 näher erläutert wird, und der nicht repräsentativ für die Beantwortung dieser Frage ist.

Die letzte Aufgabe dieser Konzeptidee (A10.2) wurde von fast allen Interviewpartner*innen zufriedenstellend beantwortet und konnte somit als ‚korrekt‘ (grün-3) kodiert werden.

Sechs der sieben Befragten gaben im vorliegenden Beispiel korrekt an, dass in Wechselstromkreisen nicht allein die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich sind, sondern das elektromagnetische Feld. Dies wird etwa in der folgenden Interviewpassage mit IP19 deutlich:

„Naja, wenn es [die Stromrichtung] sich ständig wechselt – nämlich 50-mal in einer Sekunde – wäre es nicht möglich, dass sie [die Elektronen] alle dorthin [zum Energieumwandler] [an]kommen (...). Deswegen muss der Energiefluss da mithelfen (...). (R3-IP19, Pos. 660, 01:02:08-01:02:34)

Nur bei IP21 wurde die Aufgabe als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. IP21 gab zwar an, dass die Energieübertragung im Wechselstromkreis „durch das elektromagnetische Feld“ (R3-IP21, Pos. 781, 01:11:14–01:11:17) erfolgt, beschrieb jedoch auf Nachfrage der Interviewerin den Energiefluss auf eine ungewöhnliche Weise:

"Er [der Energiefluss] geht wieder von positiv zu negativ. Also zur negativen Ladung." (R3-IP21, Pos. 776-793, 01:11:33-01:11:50)

IP21 beschrieb in dieser Aussage, dass der Energiefluss von Plus nach Minus verläuft, statt von der Energiequelle zum Energieumwandler. Deshalb wurde diese Aussage lediglich als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

5.3.3.3 Längsschnittanalyse

Im vorherigen Abschnitt wurde die Querschnittsanalyse der dritten Interviewrunde behandelt. In diesem Abschnitt folgt nun eine Längsschnittanalyse, bei der zwei spezifische Fälle genauer untersucht werden, um den Interviewverlauf einzelner Schüler*innen genauer nachvollziehen zu können. Die Analyse konzentriert sich auf zwei der sieben Interviews aus der dritten Runde, die als Fallbeispiele dienen: eines, das sehr erfolgreich verlief, und ein weiteres, das größere Herausforderungen aufwies.

Erste Längsschnittanalyse mit einem positiven Beispiel: Interview mit IP16

Als erster Fall wird das Interview mit IP16 diskutiert. Dieses fand am 27.09.2022 um 15:28 Uhr statt und dauerte knapp eine Stunde.

Das Interview mit IP16 erzielte einen sehr hohen Durchschnittswert von $\bar{x} = 2,93$ von 3,00 bei der Längsschnittanalyse der Kodierungen (siehe Tabelle 32). Dieser Fall dient als Positivbeispiel, um ein gelungenes Interview zu beschreiben und zu analysieren, was besonders gut verlief.

Wie aus Tabelle 32 ersichtlich ist, wurden die Akzeptanz, die Paraphrase und die Aufgaben bei der ersten Konzeptidee (Konzeptidee zur Unterscheidung von kabellosen und kabelgebundenen Systemen) als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet.

Bei der zweiten Konzeptidee (Konzeptidee zur Unterscheidung von Energiequellen und -umwandlern) wurden die Akzeptanz und die Aufgaben als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet, die Paraphrase jedoch nur als teilweise korrekt. IP16 verwendete den Begriff ‚Energiequelle‘ korrekt, konnte jedoch den Begriff ‚Energieumwandler‘ nicht abrufen. Es wurde auch kein alternativer Begriff genannt, da IP16 angab, sich nicht mehr an die zweite Kategorie erinnern zu können.

Die dritte und vierte Konzeptidee (Konzeptideen zum magnetischen Feld und den Oberflächenladungen) wurden ebenfalls als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet. Es gab keine Rückfragen zur Akzeptanz, und die Paraphrasen enthielten gemäß der Musterlösungen alle wesentlichen Aspekte. Die zugehörigen Aufgaben wurden ebenfalls korrekt gelöst.

Die fünfte Konzeptidee (Konzeptidee zum elektrischen Feld) wurde von IP16 gut aufgenommen, es gab keine Rückfragen, weshalb die Akzeptanz mit ‚grün-3‘ kodiert wurde. Die Paraphrase wurde jedoch nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. Wie bereits in der Querschnittsanalyse oben erwähnt, beschrieb IP16 zwar die Verteilung der Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche korrekt, erwähnte jedoch nicht, dass diese Ladungen die Ursache für das elektrische Feld sind. Darüber hinaus verwendete IP16 statt des Ausdrucks ‚elektrisches Feld‘

die Formulierung ‚Elektrofeld‘. Die Aufgabe konnte jedoch wieder richtig von IP16 gelöst werden und wurde offenbar nicht durch diese fachlich unpräzise Paraphrase beeinflusst.

Auch die übrigen Konzeptideen wurden durchwegs als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet. Es traten keine weiteren Schwierigkeiten auf, und IP16 war in der Lage, alle Paraphrasen und Aufgaben gut wiederzugeben beziehungsweise zu lösen.

Wie man an diesem Positivbeispiel sehen kann, zeigt IP16 durchweg eine herausragende Leistung während dieses Interviews. Es ist zudem erwähnenswert, dass IP16 in der Vorerhebung zum Interview angab, die Note ‚Sehr gut‘ erhalten zu haben und ein hohes Interesse von 4 von 5 aufwies, was einem sehr starken Interesse entspricht (siehe Tabelle 28). Diese Informationen sind bei der Datenanalyse zu berücksichtigen, da sie zeigen, dass IP16 nicht nur im Physikunterricht gute Leistungen erzielt, sondern auch generell ein starkes Interesse an Physik zeigt, was möglicherweise das Ergebnis in diesem Interview positiv beeinflusst hat.

Zweite Längsschnittanalyse mit einem weniger positiven Beispiel: Interview mit IP21

Als zweiter Fall wird das Interview mit IP21 näher beleuchtet. Dieses fand am 20.10.2022 um 15:15 Uhr statt und dauerte eine Stunde und 13 Minuten. Das Interview mit IP16 erzielte einen niedrigen Durchschnittswert von $\bar{x} = 2,50$ von 3,00 bei der Längsschnittanalyse der Kodierungen.

Das Interview fand auf Wunsch von IP21 zwischen dem regulären Unterricht und Nachmittagskursen am eigenen Schulstandort statt und es wurde, wie bei den anderen Interviews, keine Pause zwischen Block zwei und drei eingehalten. Diese Entscheidungen wirkten sich allerdings merklich auf den Interviewverlauf aus, da IP21, im Gegensatz zu den anderen Interviewpartner*innen, zunehmend abgelenkt und unkonzentriert wirkte. Zum einen schien IP21 unruhig zu sein, da die Interviewerin gegen Ende des Interviews immer wieder nach der Uhrzeit gefragt wurde, um nicht zu spät zum Nachmittagskurs zu kommen. Zum anderen schien sich IP21 nicht ganz auf das Interview einzulassen und schaute stattdessen immer wieder in den Raum und ließ sich von Geräuschen oder anderen Störungen leicht ablenken. Diese Einflüsse machen sich auch auf die Antworten von IP21 bei der Akzeptanzbefragung bemerkbar (siehe Tabelle 32). Wenngleich der erste Block noch einigermaßen gut verlief – es wurden die meisten Stellen mit ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet – so schien die Konzentration im Interviewverlauf immer mehr abzunehmen. Der Fall IP21 stellt daher eine klare Ausnahme gegenüber der anderen sechs Interviews in dieser Interviewrunde dar und muss daher auch als solche in der Gesamtbewertung angesehen werden. Dieser Fall stellt ein interessantes Beispiel für die Anwendung des LLAs im realen Unterrichtskontext dar, in dem mit bis zu 28 Schüler*innen pro Lerngruppe

zu rechnen ist – darunter auch solche, die leicht ablenkbar oder allgemein unkonzentriert sind. Im Folgenden wird der Fall IP21 daher chronologisch dargestellt und ausführlich analysiert.

Zu Beginn des Interviews teilte IP21 der Interviewerin mit, dass im Anschluss ein Nachmittagskurs besucht werde und das Interview daher nicht zu lange dauern solle. Die Interviewerin erinnerte daraufhin an die zuvor übermittelten Informationen, dass das Interview normalerweise 1 bis 1,5 Stunden dauert, worin IP21 zustimmte.

Die Erklärung zur ersten Konzeptidee (Konzeptidee zur Unterscheidung von kabellosen und kabelgebundenen Systemen) wurde von IP21 akzeptiert. Es folgten keine Rückfragen, weshalb diese Stelle mit (grün-3) kodiert wurde.

Die darauffolgende Paraphrase konnte allerdings nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet werden, da IP21 zunächst nicht die vorgegebenen Begriffe (kabelgebundene und kabellose Systeme) verwendete, sondern die Unterscheidung der beiden Systeme umschrieb:

„Also, es gibt zwei (...) Beispiele zu einem System quasi. Das eine ist mit einem Kabel verbunden und das andere ist/ Ich weiß nicht genau, wie ich das beschreiben soll, aber eben nicht mit einem Kabel verbunden.“ (R3-IP21, Pos. 9-11, 00:01:07-00:01:27)

Erst als die Interviewerin nachfragte, wie diese beiden Systeme heißen, konnte IP21 dies Schritt für Schritt rekonstruieren. Da aber die Grundidee der Unterscheidung in zwei Systeme in der Paraphrase vorkam, wurde diese Stelle zumindest als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert.

Die Aufgaben A1.1 und A1.2 wurden als ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet, da IP21 sowohl Beispiele für kabelgebundene als auch kabellose Systeme benennen konnte. Dies deutet darauf hin, dass keine grundsätzlichen Schwierigkeiten bei der Unterscheidung der beiden Systemarten bestehen und IP21 diese auch in alltagsnahen Anwendungen erkennen konnte. Die Herausforderung schien vielmehr darin zu liegen, sich die neu eingeführten Begriffe zu merken und diese aktiv in den eigenen Erklärungen zu verwenden.

Bei der zweiten Konzeptidee (Konzeptidee zur Unterscheidung von Energiequellen und -umwandlern) wurde die Erklärung von IP21 ebenfalls gut angenommen und es folgten keine Rückfragen. Die Paraphrase enthielt alle wesentlichen Informationen gemäß dem Musterbeispiel und konnte somit als ‚vollständig korrekt‘ (grün-3) bewertet werden:

„Also, es wurden die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler genannt. (...) Das war zum Beispiel – die Energiequelle war die Steckdose und der Umwandler: Handy, Kopfhörer.“ (R3-IP21, Pos. 42-48, 00:04:04-00:04:16)

Wie aus diesem Zitat ersichtlich ist, unterschied IP21 zwischen den beiden Begriffen „Energiequelle“ und „Energieumwandler“ und konnte diese auch korrekt zwei Beispielen zuordnen.

Hierbei wurden, anders als bei der vorausgegangenen Konzeptidee, auch die vorgegebenen Begriffe verwendet und nicht auf Alternativformulierungen zurückgegriffen. Die zugehörige Aufgabe A2.1 konnte ebenfalls korrekt beantwortet werden, da IP21 beim elektrischen Föhn so gleich die Begriffe richtig zuordnete. Bei Aufgabe A2.2 schien IP21 allerdings Schwierigkeiten damit zu haben, bei der elektrischen Zahnbürste (einem kabellosen System) dieselbe Zuordnung zu treffen. Erst mit einer kleinen Hilfestellung gelang dies letztendlich doch noch.

Ab der dritten Konzeptidee (Konzeptidee zum magnetischen Feld) traten Probleme mit der Akzeptanz auf. IP21 gab an, dass die Erklärung „etwas kompliziert“ sei und die Interviewerin merkte an, dass IP21 etwas skeptisch wirkte (R3-IP21, Pos. 115-122, 00:09:45-00:10:07). Daher wurde diese Stelle mit dem Code ‚gelb-2‘ bewertet. Wenig überraschend konnte auch die darauffolgende Paraphrase nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert werden. Wie bereits bei der Querschnittsanalyse beschrieben, konnte IP21 die Elektronenbewegung nicht als Ursache für das entstehende Feld benennen und erwähnte zudem den Fachbegriff ‚Magnetfeld‘ nicht explizit, wie aus folgender Interviewpassage hervorgeht:

„Also es [das Kabel] ist verbunden, also durch den Stromkreis, den geschlossenen. Und die zwei Kreise [die Magnetfeldlinien] sind/ Also, ich weiß es nicht mehr ganz genau, aber der Kompass ist immer in eine andere Richtung ausgerichtet, wenn er auf einem anderen Fleck quasi ist.“ (R3-IP21, Pos. 124-127, 00:10:14-00:10:36)

Aus der Paraphrase wird deutlich, dass IP21 die Auswirkungen auf den Kompass beschreiben konnte, etwa, dass dieser je nach Position eine unterschiedliche Richtung anzeigt. Ansätze der Erklärung durch die Interviewerin wurden ebenfalls aufgegriffen: So scheinen die erwähnten „Kreise“ auf die Magnetfeldlinien zu verweisen, dies wurde jedoch nicht näher ausgeführt. Erst nach gezielten Rückfragen durch die Interviewerin konnte IP21 das Magnetfeld benennen:

I: „Und was ist das Grüne da nochmal gewesen? Was ist hier um den Leiter nochmal herum gewesen?“

IP21: „Der Strom? Nicht der Stromkreis?“

I: „Nein, der Strom ist ja im Kabel.“

IP21: „Achso.“

I: „Aber drum herum. Irgendwas muss ja den Kompass beeinflusst haben. Wie haben wir das genannt?“

IP21: „Das weiß ich nicht mehr.“

I: „Das hat etwas mit Magneten zu tun.“

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

IP21: „Magnetfeld?“

I: „Ja genau, das Magnetfeld.“ (...)

(R3-IP21, Pos. 129-139, 00:10:37-00:11:07)

Die zugehörigen Aufgaben A3.1 und A3.2 wurden jedoch korrekt (grün-3) beantwortet. In der ersten Aufgabe konnte IP21 richtig beschreiben, dass der Kompass bei einem offenen Stromkreis nicht ausschlägt, da sich um den Leiter kein Magnetfeld bildet. IP21 schien hier also die Idee zu akzeptieren, dass ein stromdurchflossener Leiter von einem Magnetfeld umgeben ist, verwendete aber teils unscharfe Formulierungen. IP21 scheiterte bei dem Versuch, für Aufgabe A3.2 Alltagsbeispiele zu nennen, in denen sich Magnetfelder um elektrische Systeme ausbilden.

Bei der vierten Konzeptidee (Oberflächenladungen) gab es nach der Erklärung keine Rückfragen. Das Interview wurde jedoch während der Paraphrase kurzzeitig gestört, als eine Lehrperson unerwartet den Raum betrat. IP21 schaute daraufhin mehrfach zu der Lehrperson und schien sich nicht auf die Aufgabenstellung konzentrieren zu können. Die Interviewerin stoppte das Interview kurz und wartete, bis die Lehrperson den Raum wieder verließ. Diese Störung könnte sich auf die Paraphrase ausgewirkt haben. Im Vergleich zum Musterbeispiel erwähnte IP21 nicht alle wesentlichen Informationen, weshalb die Paraphrase nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) kodiert wurde. IP21 wiederholte zwar korrekt, dass es negative und positive Oberflächenladungen gibt, die sich rund um den Leiter befinden, wusste aber nicht mehr, wie die Oberflächenladungen entstehen. Die darauffolgenden Aufgaben A4.1 und A4.2 wurden wiederum korrekt beantwortet. IP21 konnte die Position und Verteilung der Oberflächenladungen am Leiter richtig zuordnen und beschreiben.

Bei der fünften Konzeptidee (Konzeptidee zum elektrischen Feld) wurde zwar die Akzeptanz mit (grün-3) bewertet, die Paraphrase und die Aufgabe (A5) dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2). Bei der Paraphrase verwechselte IP21 das magnetische mit dem elektrischen Feld. Als IP21 von der Interviewerin nochmals gefragt wurde, um welches Feld es gerade geht, korrigierte IP21 diesen Fehler sofort.

Solche Verwechslungen traten häufig auf, könnten aber auch auf die nachlassende Konzentrationsfähigkeit von IP21 zurückzuführen sein. Dies wird besonders bei der nachfolgenden Aufgabe (A5) deutlich, als IP21 die Interviewerin bat, die Frage zu wiederholen. Erst mit einigen Hilfestellungen der Interviewerin konnte IP21 diese Aufgabe letztendlich doch noch lösen (siehe dazu auch Kapitel 5.3.3.2). Obwohl das Interview nicht abgebrochen wurde, zeigte sich ab diesem Zeitpunkt deutlich, dass IP21 nicht unter denselben Ausgangsbedingungen wie die

übrigen Interviewpartner*innen agierte und daher in der Auswertung gesondert betrachtet werden muss.

Bei der sechsten Konzeptidee (zur Energieübertragung in elektrischen Systemen) wiederholte sich die gleiche Situation wie bei der Akzeptanz der dritten Konzeptidee. IP21 gab an, die Erklärung sei „sehr kompliziert, aber es ging“ (R3-IP21, Pos. 444, 00:37:21-00:37:25). Die nachfolgende Paraphrase und die Aufgabe wurden jedoch wieder zufriedenstellend beschrieben. IP21 war in der Lage zu erklären, dass der Energiefluss durch das elektromagnetische Feld stattfindet. Zudem konnte IP21 die Richtung des Energieflusses mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand herleiten. In der darauffolgenden Aufgabe (A6), bei einer Anwendung mit einem realen Stromkreis, konnte IP21 erklären, dass der Energiefluss durch das elektrische und magnetische Feld erfolgt (siehe dazu auch Kapitel 5.3.3.2).

Die siebte Konzeptidee (Konzeptidee zur Vertiefung der Energieübertragung in elektrischen Systemen) wurde mit IP21 nicht behandelt, da sich hier schon abzeichnete, dass diese zu anspruchsvoll war. Stattdessen wurde direkt mit der achten Konzeptidee (Gleichstrom- und Wechselstromkreise) fortgefahren. Hierbei gab IP21 an, dass die Erklärung verständlich war, weshalb die Akzeptanz mit ‚grün-3‘ kodiert wurde. Die Paraphrase wurde dagegen nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. IP21 schien unsicher zu sein bei der Verwendung der Begriffe ‚Oberflächenladung‘ und ‚Ladung‘ (im Leiterinneren). Ständig besserte sich IP21 selbst aus und verwechselte die Begriffe miteinander. Dies geht aus folgender Interviewpassage hervor:

IP21: „Also, durch den Wechselstrom wechselt sich die (...) Richtung von den positiven und den negativen Ladungen. Und/“

I: „Welche Art von Ladungen meinst du jetzt damit?“

IP21: „Naja von der Energiequelle ausgehend die positive Ladung und die negative.“

I: „Genau, was für eine besondere Art von Ladung ist das? (...) Die [Ladungen] befinden sich auf einer bestimmten Stelle im Stromkreis, deswegen haben sie einen besonderen Namen. Wenn sie sich auf der Oberfläche befinden/“

IP21: „Oberflächenladungen.“

(R3-IP21, Pos. 566-571, 00:53:56-00:54:45)

Hier wird deutlich, dass IP21 keine klare Vorstellung von Oberflächenladungen im Gegensatz zu den elektrischen Ladungen im Leiterinneren hat. Anstatt zu erklären, dass sich aufgrund der Umpolung der Energiequelle auch die Verteilung der (statischen) Oberflächenladungen an der

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

Leiteroberfläche ändert, sprach IP21 davon, dass sich ihre „Richtung“ wechselt. Dahinter könnte die Vorstellung stecken, dass sich die Oberflächenladungen, ähnlich wie die Elektronen im Leiterinneren, auf der Leiteroberfläche bewegen. Dies könnte gegebenenfalls mit einer Simulation des einfachen Stromkreises besser dargestellt werden, in der sich nur die Ladungen im Leiterinneren bewegen, nicht jedoch die Oberflächenladungen. Dies wurde auch im weiteren Gesprächsverlauf deutlich. Als das Gespräch wieder auf die Unterscheidung von Wechsel- und Gleichstromkreisen gelenkt wurde, schien sich IP21 erneut unsicher zu sein, wo sich welche Ladungen befinden und wie sie sich verhalten:

I: "(...) Du hast gerade über den Wechselstrom gesprochen."

IP21: „Hm (bejahend).“

I: „Sagst du mir das nochmal kurz im Vergleich zum anderen Stromkreis?“

IP21: „Ähm, also beim anderen Stromkreis [Gleichstromkreis] fließen die ((4))/ Fließen, ähm, Ladungen, die Oberflächen/ Ist es die Oberflächenladung? Nein, die normale Ladung.“

I: „Was ist im Stromkreis drinnen? Schau nochmal hin?“

IP21: „Elektronen?“

I: „Hm (bejahend).“

IP21: „In eine Richtung nur.“

I: „Genau.“

IP21: „Und durch diesen Wechselstrom bewegen sie sich immer hin und her.“

I: „Hm (bejahend). Oberflächenladungen auf der Oberfläche, Elektronen im Inneren.“

IP21: „(...)Okay.“

(R3-IP21, Pos. 576-587, 00:54:55-00:55:39)

IP21 sprach zunächst davon, dass die Ladungen im Stromkreis „fließen“, ohne klar zwischen den Ladungen und den Oberflächenladungen zu unterscheiden. Wiederholt verbesserte IP21 sich jedoch und nutzte diese Begriffe teilweise synonym.

Eine weitere Begriffsverwechslung trat in der folgenden Aufgabe (A8.1) auf, als IP21 das elektrische und das magnetische Feld miteinander verwechselte. Zunächst beschrieb IP21, dass sich

bei der Umpolung der Batterie die Verteilung der Oberflächenladung ändert, was auch die Richtung der Feldlinien umkehren würde. Diese Erklärung gilt jedoch nur für das elektrische Feld, nicht für das magnetische Feld. Als IP21 auf diesen Fehler von der Interviewerin hingewiesen wurde, wurde dieser Fehler korrigiert. IP21 erkannte dann, dass eine Umkehrung des Stromflusses im Leiter auch eine Richtungsänderung des Magnetfeldes zur Folge hat. Da die Erklärung jedoch zunächst auf das elektrische Feld statt das magnetische Feld bezogen war, wurde diese Antwort nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet. Erst durch den Hinweis der Interviewerin konnte IP21 diesen Fehler ausbessern.

Die nächste Aufgabe (A8.2) konnte wieder fehlerfrei von IP21 beantwortet werden, da es sich um eine Wiederholung der Erklärung zum elektrischen Feld handelte, die versehentlich bei der vorherigen Aufgabe gegeben wurde.

Die dritte Aufgabe der achten Konzeptidee (A8.3) bereitete IP21 erneut Probleme: IP21 ging zunächst davon aus, dass der Energiefluss bei einer Umpolung der Energiequelle in die andere Richtung zeigen müsste, ohne dies zu begründen. Die Interviewerin erinnerte IP21 in diesem Zusammenhang noch einmal an die Energie-Hand-Regel, woraufhin IP21 letztendlich zur richtigen Lösung gelangte. Aufgrund dieser notwendigen Unterstützung wurde die Aufgabe als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Bei der neunten Konzeptidee (Konzeptidee zur Energieerhaltung) ergab sich ein interessanter Fall: Sowohl die Akzeptanz (B9) als auch die Aufgabe (A9) wurden als ‚korrekt‘ (grün-3) bewertet, die Paraphrase (P9) hingegen als ‚nicht korrekt‘ (rot-1). IP21 gab zunächst an, dass die Erklärung dieser Konzeptidee verständlich sei. In der anschließenden Paraphrase verwendete IP21 jedoch alternative Formulierungen, die nicht in der Erklärung erwähnt wurden. Wie bereits oben bei der Querschnittsanalyse beschrieben, argumentierte IP21:

„Also die Energiequelle hat eine gewisse Anzahl an Strom, die sie abgeben kann (...) und es reicht manchmal nicht für das, für den Umwandler, glaube ich.“ (R3-IP21, Pos. 645-647, 00:59:35-00:59:57)

Wie aus diesem Zitat hervorgeht, beschrieb IP21 die Batterie als konstante Stromquelle. Die Batterie wurde als Quelle einer bestimmten Menge an Energie oder Strom angesehen, die von einem elektrischen Gerät (hier als „Umwandler“ bezeichnet) genutzt wird. Die grundlegende Idee, dass die über das elektromagnetische Feld übertragene Energiemenge der Energiemenge entspricht, die vom Energieumwandler empfangen wird, wurde hier nicht erwähnt. Diese Erklärung wurde ergänzt durch die Feststellung, dass in realen Stromkreisen ein Teil der Energie an die Umgebung abgegeben wird. IP21 griff zumindest Teilaspekte dieser Erklärung in der Erklärung auf. In der oben genannten Interviewpassage wurde beschrieben, dass die Menge an

Energie, die beim Energieumwandler ankommt (in einem realen Stromkreis), nicht immer der Menge an Energie entspricht, die von der Energiequelle ausgeht. Allerdings wurde in dieser Beschreibung die wichtige Information ausgelassen, dass die Energie nicht einfach ‚verloren‘ geht, sondern als Wärme an die Umgebung abgegeben wird, was zum Beispiel durch die Erwärmung der Kabel bemerkt werden kann. Zudem schien sich in dieser Interviewpassage eine Verbrauchervorstellung zu verbergen, da IP21 davon sprach, dass „eine gewisse Menge an Strom“ von der Energiequelle abgegeben wird, die der Umwandler benötigte, um in Betrieb genommen zu werden.

Bei der darauffolgenden Aufgabe (A9) erkannte IP21 jedoch wiederum korrekt, dass eine erfolgte Energieübertragung an den Wirkungen des Stromkreises erkannt werden konnte. IP21 drückte dies folgendermaßen aus:

„(...) wenn er [der Föhn] funktioniert. (...) Es kommt Luft raus.“ (R3-IP21, Pos. 658-661, 01:01:06-01:01:14).

Die letzte Konzeptidee (Konzeptidee zum Rucksackmodell) begann zunächst damit, dass die Erklärung von IP21 gut aufgenommen wurde. Es gab keine Rückfragen und IP21 sagte, die Erklärung sei verständlich. Allerdings wurden die Paraphrase (P10) und die erste Aufgabe (A10.1) als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) bewertet. Die zweite Aufgabe (A10.2) wurde als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) eingestuft.

Wie bereits in Kapitel 5.3.3.2 beschrieben, ging IP21 bei der Paraphrase (P10) fälschlicherweise davon aus, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht das Tempo der Energieübertragung beschreibt, sondern eine Größe mit Substanzcharakter ist, die von einem Ort zum anderen fließt. Die zugehörige Aufgabe (A10.1) konnte von IP21 auch nicht korrekt beantwortet werden. Hier griff IP21 erneut auf Präkonzepte oder ad hoc Vorstellungen zurück, anstatt das vorgegebene Erklärungsmodell mit elektromagnetischen Feldern zu verwenden. Dies wird in der folgenden Interviewpassage deutlich, in der IP21 auf die Frage, wie man einer Person erklären kann, dass ein einzelnes Elektron nicht allein für die Energieübertragung in einem elektrischen Stromkreis verantwortlich ist, folgendes antwortete:

„Naja, weil es [das Elektron] viel zu langsam ist, um die Zeit aufzuholen, wie wir den Lichtschalter quasi betätigen und ja, viel, viel mehr Elektronen im Spiel sein müssten quasi.“ (R3-IP21, Pos. 727, 01:06:46-01:06:57)

In dieser Aussage wird argumentiert, dass mehr als ein Elektron für die Energieübertragung benötigt wird, da ein einzelnes Elektron nicht schnell genug wäre, um sich von der Energiequelle zum Energieumwandler zu bewegen. Der Fokus liegt hier auf den Elektronen, ohne dass

IP21 den Erklärungsansatz mithilfe von elektromagnetischen Feldern erwähnte. Selbst nachdem die Interviewerin IP21 darauf hinwies, das neue Erklärungsmodell für die Aufgabenbeantwortung zu verwenden, konnte diese nicht gemäß dem Musterbeispiel zufriedenstellend beantwortet werden.

In der letzten Aufgabe wurde IP21 gefragt, wie man einer Person erklären könnte, dass Elektronen auch in Wechselstromkreisen nicht allein für die Energieübertragung verantwortlich sind. Wie bereits in Kapitel 5.3.3.2 beschrieben, erkannte IP21 richtig, dass die Elektronen im Leiterinneren hin- und her bewegen und daher nicht lange Strecken im Stromkreis zurücklegen können (womit sie als Übertragermedium der Energie gemäß dem Rucksackmodell ausgeschlossen sind). Zudem beschrieb IP21 zutreffend, dass im Wechselstromkreis auch eine Energieübertragung durch elektromagnetische Felder stattfindet, jedoch wurde der Weg der Energie auf seltsame Weise beschrieben:

"Er [der Energiefluss] geht wieder von positiv zu negativ. Also zur negativen Ladung." (R3-IP21, Pos. 776-793, 01:11:33-01:11:50)

Die Aussage wurde daher nur als ‚teilweise korrekt‘ (gelb-2) bewertet.

Insgesamt lässt sich zum Fall von IP21 folgendes Fazit ziehen: Obwohl IP21 vor dem Interview angab, in Physik die Note ‚Gut‘ (2) erhalten zu haben, war das Ergebnis des Interviews nicht so, wie erwartet. Mehrere Einflussfaktoren beeinflussten die Ergebnisse: Zum einen unterbrach eine eintretende Lehrperson das Interview unerwartet in der Mitte des Interviews. Zum anderen war der Zeitpunkt der Befragung ungünstig gewählt, da sie zwischen regulärem Unterricht und Nachmittagsunterricht stattfand. Dies führte gegen Ende des Interviews dazu, dass IP21 immer wieder auf die Uhr schaute und ungeduldiger wurde. Wiederholtes Blicken auf die Uhr sowie unpräzise Antworten deuteten darauf hin, dass IP21 gedanklich nicht mehr vollständig bei der Sache war. Während die Verwechslung von Begriffen nicht allein auf die nachlassende Konzentration zurückzuführen ist, sondern auch auf ein mögliches fehlendes Verständnis der Inhalte, zeigt die wiederholte Erklärung und Aufgabenstellung ein deutliches Zeichen dafür.

Es sprechen mehrere Gründe dafür, IP21 nicht in die Hauptauswertung einzubeziehen: Die Konzentration war deutlich eingeschränkt, insbesondere im dritten Block, in dem IP21 mehrfach nach der Uhrzeit fragte und kaum noch inhaltlich angemessene Aussagen machte. Zudem zeigt die restliche Stichprobe dieser Interviewrunde eine auffallend homogene Leistungsstruktur mit insgesamt guten Ergebnissen. Es ist kaum möglich, einen klaren Punkt zu bestimmen, ab dem die Daten bei IP21 als verzerrt gelten müssen. In einem schriftlichen Testverfahren hätte der Fall vermutlich aufgrund fehlender Bearbeitungsbereitschaft ausgeschlossen werden müssen. Gleichzeitig sprechen auch Argumente dafür, IP21 nicht vollständig auszuschließen:

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

Zu Beginn des Interviews wurden mehrere Passagen grün kodiert, was auf ein grundsätzliches Verständnis und eine teilweise Akzeptanz des Konzepts hinweist. Außerdem liegen bereits Transkript und Codierung vor, die methodisch nicht ignoriert werden sollten. Eine mögliche Lösung besteht darin, lediglich die eindeutig beeinträchtigten Passagen auszuklammern oder den Fall getrennt zu betrachten. Für die laufende Analyse wurde entschieden, IP21 nicht in die Hauptauswertung aufzunehmen, jedoch separat zu diskutieren. Diese Entscheidung ermöglicht eine saubere Trennung der Datenbasis für eine realistische Bewertung des Unterrichtsdesigns.

Für die Planung der Implementationsstudie zur LLA im realen Klassensetting lassen sich aus diesen Längsschnittanalysen interessante Schlussfolgerungen ziehen: Es sollte darauf geachtet werden, genügend Gelegenheiten zur Wiederholung und Festigung zu schaffen. Zudem sollten geeignete Scaffolding-Techniken implementiert werden, um den Umgang mit neuen Begriffen für die Schüler*innen zu erleichtern.

5.3.3.4 Auswertung der Mindmaps

Zwischen dem zweiten und dritten Abschnitt der dritten Interviewrunde wurden die Teilnehmenden gebeten, ein Mind-Map zu erstellen. Dabei sollten sie die bisher behandelten Begriffe strukturiert aufschreiben und anordnen. Dies half dabei, die neuen Begriffe zu wiederholen und miteinander in Verbindung zu bringen. Die erstellten Mindmaps sollten anschließend als Unterstützung dienen, falls es im dritten und letzten Abschnitt zu Verständnisproblemen seitens der Schüler*innen kommen sollte. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser Mindmaps präsentiert. Es handelt sich hierbei ausschließlich um Rekonstruktionen der Originale.

Mindmap von IP21:

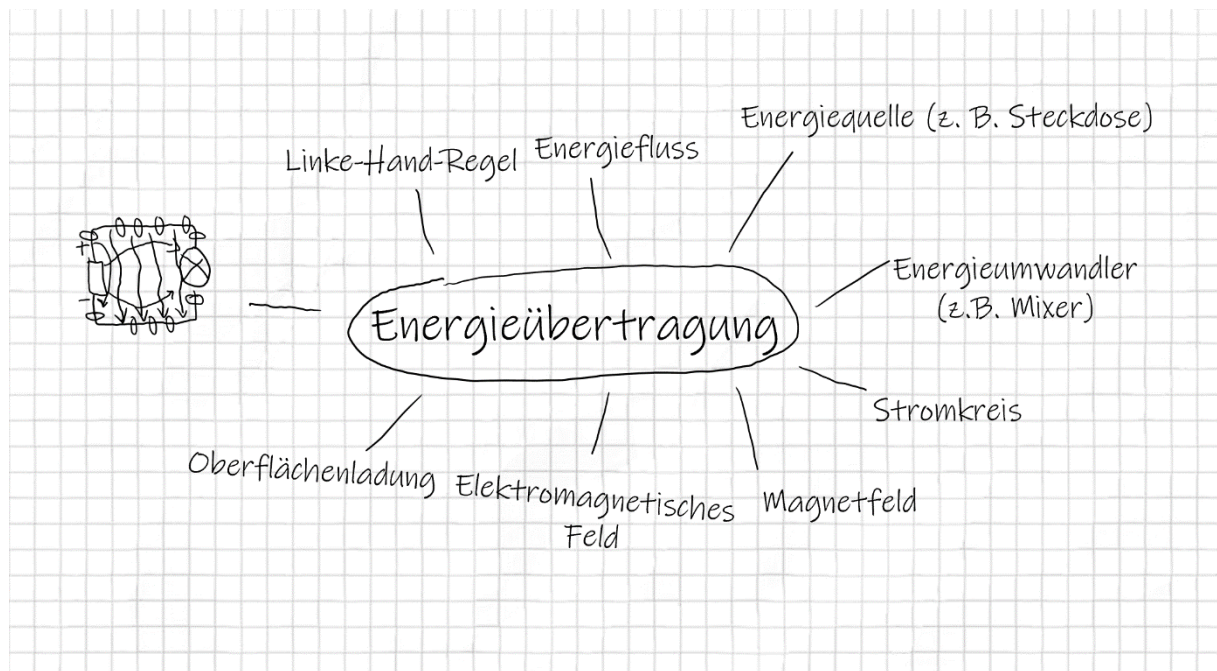


Abbildung 43: Rekonstruierte Mindmap von IP21.

Das erste hier dargestellte Mindmap stammt von Interviewpartner*in IP21. In der Mitte befindet sich der zentrale Begriff ‚Energieübertragung‘, von dem aus mehrere Äste abgehen, die verschiedene Schlüsselwörter aus dem Interview umfassen.

Diese Äste beinhalten durchgehend Begriffe aus dem LLA wie beispielsweise ‚elektromagnetisches Feld‘, ‚Energiefluss‘ und ‚Energiequelle‘. Diese Auswahl zeigt, dass IP21 die im Interview besprochenen Konzepte korrekt wiedergegeben konnte. Auffällig ist, dass keine zusätzlichen Notizen oder Anmerkungen hinzugefügt wurden, was darauf hinweisen könnte, dass IP21 sich stark auf die Schlüsselbegriffe konzentrierte, ohne weiterführende Details festzuhalten.

Besonders hervorzuheben ist, dass IP21 auch eine Skizze des elektromagnetischen Feldes in einem einfachen Stromkreis anfertigte. Diese Skizze veranschaulicht den Energiefluss und demonstriert, dass IP21 in der Lage war, das Konzept visuell darzustellen.

5.3 Dritte Runde der Akzeptanzbefragungen

Mindmap von IP20:

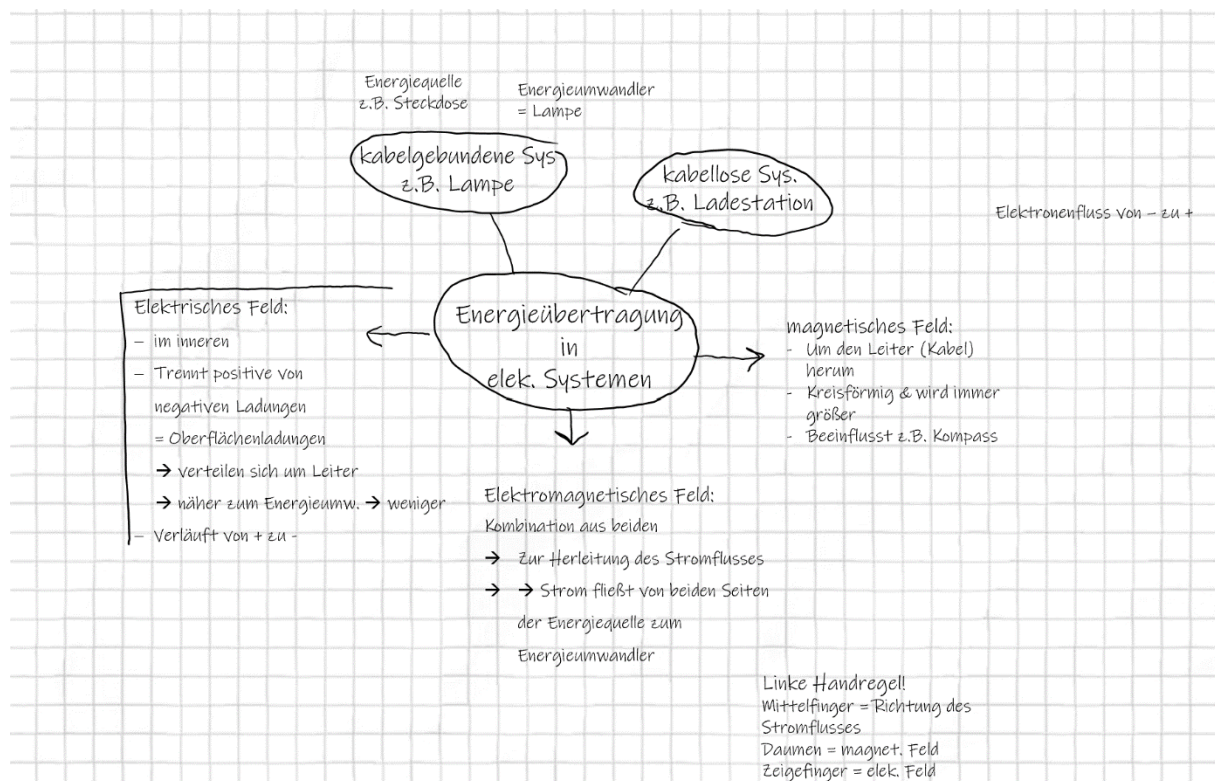


Abbildung 44: Rekonstruierte Mindmap von IP20.

Das zweite hier dargestellte Mindmap stammt von Interviewpartner*in IP20. Zentral in der Mitte steht der Begriff ‚Energieübertragung in elektrischen Systemen‘, von dem mehrere Äste abgehen.

Der erste Ast wurde mit ‚kabelgebundene Systeme‘ beschriftet, während der zweite Ast ‚kabellose Systeme‘ thematisiert. Beide Äste beinhalten direkt konkrete Beispiele, was zeigt, dass IP20 diese beiden Kategorien klar voneinander abgrenzt und praktisch anwendbare Beispiele dazu geben kann.

Zusätzlich wurde zwischen ‚Energiequelle‘ und ‚Energieumwandler‘ unterschieden, was auf ein Verständnis der unterschiedlichen Komponenten eines elektrischen Systems hinweisen könnte.

Der dritte und vierte Ast beschäftigen sich mit der Unterscheidung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern. Beide Äste enthalten zahlreiche Notizen, die auf eine detaillierte Auseinandersetzung mit diesen Konzepten hinweisen.

Der fünfte Ast behandelt das elektromagnetische Feld als Kombination des elektrischen und magnetischen Feldes. Hier passierte IP20 jedoch ein fachlicher Fehler: Es wurde notiert, dass das elektromagnetische Feld zur Herleitung des Stromflusses dient und dass der Strom von

beiden Seiten der Energiequelle zum Energieumwandler fließt. Dies zeigt eine Verwechslung zwischen dem Stromfluss und dem Energiefluss.

Trotz dieses Fehlers zeigte IP20 an einer anderen Stelle ein gutes Verständnis der Linken-Hand-Regel. Hier beschrieb IP20 detailliert, welcher Finger für welche physikalische Größe verwendet wird.

Außerdem findet sich am Rand der Mindmap die Bemerkung, dass der Elektronenfluss von Minus nach Plus verläuft, was fachlich korrekt ist.

Auffällig ist der Kontrast zwischen IP20 und IP21: Während IP21 zentrale Begriffe knapp und korrekt zusammenfasst und zusätzlich eine Skizze erstellt, zeigt IP20 eine sehr detaillierte Auseinandersetzung, allerdings mit einem fachlichen Missverständnis hinsichtlich des Energieflusses. Der Vergleich verdeutlicht, dass ein umfangreicheres Mindmap nicht zwangsläufig mit fachlich korrekterem Verständnis einhergeht.

Mindmap 3 von IP16:

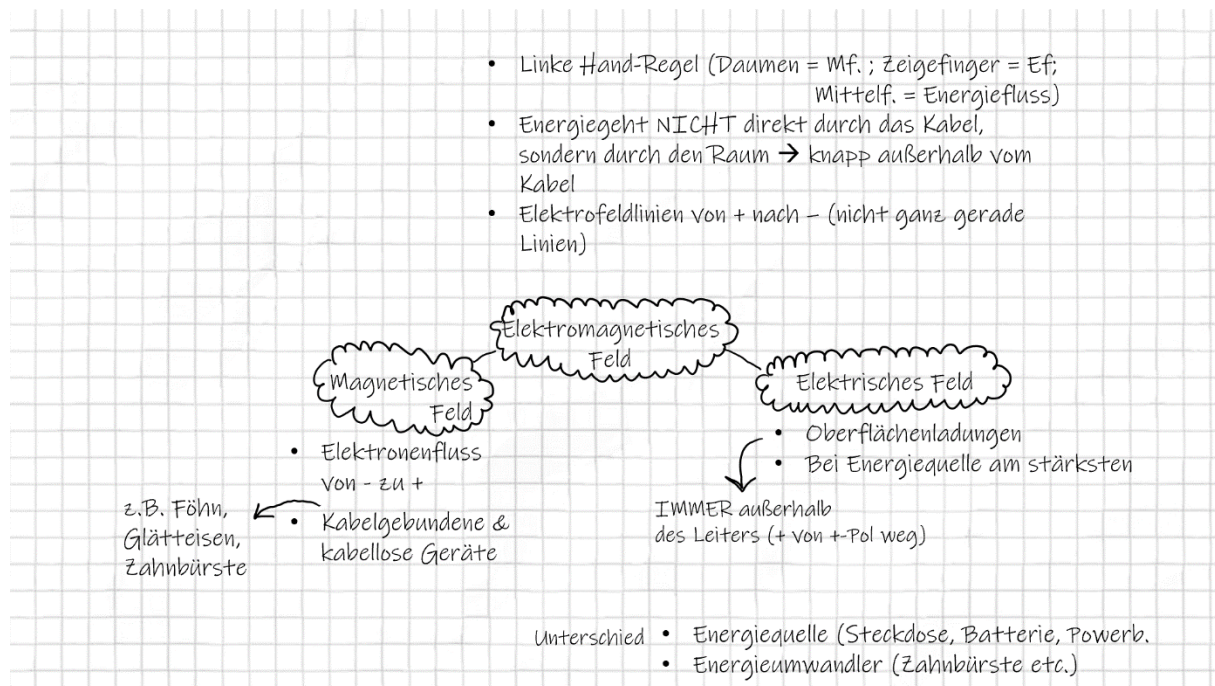


Abbildung 45: Rekonstruierte Mindmap von IP16.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Mindmap von IP16 sehr detailliert gestaltet ist, insbesondere im Vergleich zu den anderen Mindmaps. Zentral steht der Begriff ‚elektromagnetisches Feld‘. Von diesem Begriff gehen zwei Hauptäste ab: ‚Magnetisches Feld‘ und ‚elektrisches Feld‘.

Unter dem Ast ‚Magnetisches Feld‘ notierte IP16 wichtige Eigenschaften, beispielsweise dass der Elektronenfluss von Minus nach Plus verläuft. Auffällig ist jedoch die Erwähnung von ‚kabelgebundenen und kabellosen Geräte‘ unter diesem Ast. Hier wurden zwar Beispiele genannt, aber es fehlt die klare Unterscheidung zwischen kabelgebundenen und kabellosen elektrischen Geräten. Zudem sollte hier eigentlich von ‚Systemen‘ anstatt von ‚Geräten‘ die Rede sein.

Unter dem Ast ‚elektrisches Feld‘ wurden die Oberflächenladungen thematisiert, wobei korrekt erwähnt wurde, dass diese immer außerhalb des Leiters vorkommen. Es wurde jedoch geschrieben, dass die Oberflächenladungen bei der Energiequelle am stärksten sind, was nur für einen geschlossenen Stromkreis zutrifft. In einem offenen Stromkreis ist die Verteilung gleichmäßig, aber dieses Detail wurde im Interview ohnehin nicht explizit thematisiert.

Am Rand der Mindmap wurde zudem vermerkt, dass zwischen Energiequellen und Energieumwandlern unterschieden wird, und es wurden entsprechende Beispiele angeführt.

Oben in der Mindmap sind noch drei Bulletpoints zu finden: die Linke-Hand-Regel, die Aussage, dass Energie nicht direkt durch die Kabel geht, sondern durch den Raum, sowie dass

„Elektrofeldlinien“ von Plus nach Minus verlaufen (hier sind vermutlich elektrische Feldlinien gemeint). Warum diese Punkte nicht beim elektrischen Feld stehen, ist unklar.

Insgesamt verdeutlicht die Mindmap von IP16, dass zahlreiche Begriffe korrekt wiedergegeben wurden, jedoch einige Zuordnungen ungenau oder nicht ganz passend erfolgten.

Die übrigen Mindmaps ähneln den hier dargestellten in Struktur und Begriffsauswahl stark, weshalb auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wurde. Sie zeigen insgesamt eine ausführliche Wiedergabe zentraler Inhalte des Lehr-Lern-Arrangements, unterscheiden sich jedoch kaum in Bezug auf die inhaltliche Tiefe oder Strukturierung.

5.3.4 Diskussion und Überarbeitung des LLAs nach Runde 3

In diesem Abschnitt werden die Änderungen des Lehr-Lern-Arrangements basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Inhaltsanalyse der dritten Interviewrunde detailliert beschrieben und begründet. Dabei fließen erneut Rückmeldungen von Expert*innen der Fachdidaktik ein. Wie weiter oben beschrieben, zeigte sich in der dritten Interviewrunde insgesamt eine durchgängige Akzeptanz zentraler Konzepte und Begrifflichkeiten durch die Interviewpartner*innen. Zwar ergaben sich in Einzelfällen Unklarheiten, insbesondere bei der Unterscheidung von Energiefluss und Stromfluss, jedoch wurde diesen bereits in der Überarbeitung des Materials für Runde 3 gezielt begegnet. Selbst bei der teils strikten Auswertung der Begriffswahl, etwa bei den gelb markierten Kodierungen in den Paraphrasen, ergibt sich ein durchweg positives Gesamtbild. Dies gilt umso mehr, wenn man die Daten von IP21 von der Gesamtanalyse ausschließt.

Auf Grundlage dieser Einschätzung wurde entschieden, nach der dritten Runde keine weitere Interviewrunde mehr durchzuführen, sondern stattdessen eine Implementation im Klassensetting vorzunehmen. Die erhobenen Daten liefern eine tragfähige Grundlage für den nächsten Schritt im Forschungsprozess. Zudem ermöglicht die Implementationsstudie, die in den Interviews entwickelten Materialien und Strategien unter realistischen Bedingungen zu erproben und weiterzuentwickeln.

5.3.4.1 Übersicht der Änderungen anhand der Ergebnisse aus Runde 3

Erster Block: Elektrische Energieübertragungssysteme

Basierend auf den Ergebnissen der dritten Interviewrunde lassen sich konkrete Verbesserungsvorschläge für die Erstellung einer Lehrer*innenhandreichung ableiten.

In der dritten Interviewrunde zeigte sich, dass die Begriffe „Energieumwandler“ und „Energiequelle“ nicht von allen Schüler*innen konsistent verwendet wurden. Stattdessen griffen einige

auf alltagsnahe oder unspezifische Ausdrücke zurück, was darauf hindeutet, dass die fachsprachlichen Begriffe entweder nicht ausreichend etabliert oder nicht als notwendig für die Beschreibung physikalischer Zusammenhänge wahrgenommen wurden. Die Verwendung alternativer Begriffe wie ‚Kabelsystem‘ anstelle von ‚kabelgebundenen System‘ ist auch ein Beispiel dafür und verdeutlicht, dass bei der Begriffswahl Unsicherheiten bestanden.

Diese Beobachtungen unterstreichen die Bedeutung einer klaren und konsistenten fachsprachlichen Kommunikation im Unterricht. Eine einheitliche Verwendung zentraler Begriffe kann den Lernenden nicht nur als sprachlicher Anker dienen, sondern auch dazu beitragen, ein vertieftes Verständnis fachlicher Konzepte zu entwickeln. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde in der Lehrer*innenhandreichung zu Beginn ein didaktischer Hinweis ergänzt. Dieser empfiehlt Lehrpersonen, zentrale Begriffe bereits zu Beginn der Unterrichtseinheit einzuführen und einheitlich zu verwenden. Auf diese Weise soll eine sprachliche Kohärenz im Unterricht gefördert und potenziellen Missverständnissen entgegengewirkt werden.

Insgesamt wurde dieser Interviewblock von den meisten Interviewpartner*innen aber positiv aufgenommen, weshalb nur wenige Verbesserungsvorschläge notwendig sind, die für die Erstellung der Lehrer*innenhandreichung berücksichtigt werden sollten.

Zweiter Block: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen)

Im zweiten Block zur Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen) wurden im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse ebenfalls mehrere Aspekte identifiziert, die zur Verbesserung der Verständlichkeit in der Lehrer*innenhandreichung für die geplante Auswertung des LLAs im realen Klassensetting beitragen können.

Eine Erkenntnis aus den Interviewergebnissen war, dass in der Konzeptidee zum Magnetfeld bei IP17 und IP19 die Rolle der Elektronen als Ursache des Magnetfeldes nicht ausreichend klar dargestellt wurde. Zur besseren Vermittlung dieses Konzepts wurde in der Lehrer*innenhandreichung besonderer Wert darauf gelegt, die Elektronenbewegung als Ursache des Magnetfeldes expliziter zu erwähnen.

Des Weiteren zeigte das Interview mit IP18, dass die Visualisierung von Oberflächenladungen als herausfordernd wahrgenommen wurde. Die Darstellung wurde daher vereinfacht. Eine ergänzende Demonstration wäre ebenfalls denkbar, wurde jedoch aufgrund des Einzelergebnisses und des erheblichen Änderungsaufwands vorerst nicht umgesetzt. Dieser Aspekt könnte aber in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter untersucht werden.

Zudem zeigten sich in der Begriffswahl vereinzelt Schwierigkeiten: So verwendeten IP17, IP18 und IP19 die Begriffe ‚Nord- und Südpol‘ anstelle von ‚positiv und negativ geladenen Oberflä-

chenladungen‘. Ein ähnliches Problem zeigte sich in der Terminologie bei IP16, der den Ausdruck ‚Elektrofeld‘ statt ‚elektrisches Feld‘ verwendete. Für die Handreichung wurde, wie oben beschrieben, ein Hinweis eingefügt, der auf eine konsistente Begriffswahl seitens der Lehrpersonen hinweist.

Zusätzlich wurde im Rahmen der Mindmap-Aktivität zwischen dem zweiten und dritten Interviewblock deutlich, dass die Schüler*innen Zeit benötigen, um sich mit den neuen Begriffen vertraut zu machen. Die Lehrer*innenhandreichung sollte daher gezielt darauf hinweisen, für diese Aktivität ausreichend Zeit einzuplanen, da sie den Lernenden hilft, ihre Gedanken zu strukturieren und zentrale Konzepte zu vernetzen.

Dritter Block: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung)

Aus dem dritten Block der dritten Interviewrunde können ebenfalls einige gezielte Empfehlungen für die Ausarbeitung der Lehrer*innenhandreichung abgeleitet werden. Insgesamt wurde dieser Block von den meisten Schüler*innen positiv aufgenommen, was sich in den durchweg positiven Interviewaussagen widerspiegelt. Entsprechend waren nur wenige Anpassungen notwendig.

Ein zentrales Ergebnis betrifft die Unterscheidung zwischen Gleich- und Wechselstromkreisen. In mehreren Interviews zeigte sich, dass dieser Unterschied nicht allen Schüler*innen vertraut war. Es wird daher empfohlen, diesen Aspekt im Unterricht explizit aufzugreifen. In der Lehrer*innenhandreichung wurde entsprechend vermerkt, dass dieser Punkt keinesfalls übersprungen werden darf, sondern nochmals gemeinsam mit den Schüler*innen reflektiert und gefestigt werden sollte. Dies gilt auch, falls die Unterscheidung von Gleich- und Wechselstromkreisen bereits zuvor im Unterricht behandelt wurde.

Zusätzlich wurde in den Interviews deutlich, dass die Einbindung von Alltagsbeispielen für die Steigerung des Interesses der Schüler*innen wichtig ist. In der Lehrer*innenhandreichung wurden daher verschiedenste Kontexte eingebaut, beispielsweise in Form von Bilderkarten.

5.3.4.2 Zusätzliche Änderungsvorschläge

Im Rahmen eines Forschungsseminars für Doktoranden an der Universität Wien (520033-1, 2022W SE, Forschung in der Physikdidaktik) fand am 17.01.2023 eine Präsentation der Ergebnisse der dritten Interviewrunde mit Kollegen der Fachdidaktik statt. Im Anschluss an den Vortrag wurden in einer Diskussion auf Basis der Interviewergebnisse weitere Anpassungsvorschläge für das Lehr-Lern-Arrangement erarbeitet. An der Diskussion nahmen Doktorand*in-

nen, eine Postdoktorandin sowie ein Professor der Physikdidaktik teil. Eine detaillierte Aufstellung der übernommenen Änderungsvorschläge für das Lehr-Lern-Arrangement ist in der folgenden Liste zu finden.

Übernommene Änderungsvorschläge:

- Im Forschungsseminar wurde festgestellt, dass in den Schaltskizzen ein Problem mit der korrekten Anbindung der Batterie auftritt. Es wurde angeregt, die Verbindung zum Leiterkabel deutlicher zu kennzeichnen, was in der Lehrer*innenhandreichung umgesetzt wird.
- Es wurde von den Kolleg*innen angemerkt, dass die Energiequelle für den Wechselstromkreis in Abbildung 12 im Interviewleitfaden geändert werden sollte, um den Unterschied zwischen einem Gleich- und Wechselstromkreis klarer darzustellen. Diese Anmerkung wurde ebenfalls bei der Gestaltung der Lehrer*innenhandreichung berücksichtigt.
- In der Diskussion wurde besprochen, dass zur Konzeptidee der Oberflächenladungen ein Hinweis hinzugefügt werden sollte, dass diese Ladungen statisch sind. Dieser Aspekt sollte zudem in den Daten überprüft werden, insbesondere in Bezug darauf, ob diese Information möglicherweise in bestimmten Interviews nicht erwähnt wurde. Es stellte sich heraus, dass dies nicht auf die gelb oder rot markierten Fälle zutrifft. Bei der Erstellung der Lehrer*innenhandreichung wurde darauf geachtet, dass dieser Punkt deutlich erklärt wird.

5.3.4.3 Abschließende Reflexion zur dritten Runde

In der dritten Interviewrunde wurden, wie bereits in den vorangegangenen Runden, gezielte Leitfragen analysiert, die zwei zentrale Aspekte beleuchten sollten: Erstens, ob die Ergebnisse hinreichend überzeugend sind, um die Austestung des LLAs im realen Klassensetting zu beginnen, und zweitens, welchen Einfluss die Einführung der neuen Konzeptidee zu Oberflächenladungen auf das Verständnis der Schüler*innen in Bezug auf das elektrische Feld sowie die Energieübertragung durch elektromagnetische Felder hatte. Die Ergebnisse dieser Analyse werden nachfolgend detailliert dargestellt.

1) Sind die Ergebnisse der dritten Interviewrunde ausreichend zufriedenstellend, um die Austestung des Lehr-Lern-Arrangements im realen Klassensetting durchzuführen oder ist eine weitere Interviewrunde notwendig?

Die Ergebnisse der dritten Interviewrunde deuten darauf hin, dass mit der Implementationsstudie im realen Klassensetting begonnen werden kann. Alle Konzeptideen erzielten hohe Mittelwerte (siehe Tabelle 32), was darauf hindeutet, dass das LLA von den Schüler*innen gut aufgenommen wurde.

Auf Grundlage der positiven Ergebnisse der dritten Interviewrunde wird im nächsten Schritt eine Implementationsstudie im realen Klassensetting angestrebt, um das Unterrichtsdesign in größerem Umfang zu erproben. Ziel ist es, weiterführende Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie das Design unter authentischen Unterrichtsbedingungen wirkt und ob sich die bisherigen Erfolge bestätigen lassen. Dabei fließen spezifische Anpassungen, die sich aus der finalen Interviewrunde ergeben haben, und in Abschnitt 5.3.4 ausführlich dargestellt wurden, in die Erstellung der Lehrer*innenhandreichung ein und werden bei der Planung entsprechend berücksichtigt.

*1) Welchen Einfluss hat die Implementierung der neuen Konzeptidee zu Oberflächenladungen auf das Verständnis von Schüler*innen bezüglich des elektrischen Feldes und der Energieübertragung durch elektromagnetische Felder?*

Die Implementierung der neuen Konzeptidee zu Oberflächenladungen hatte einen nachweisbaren Einfluss auf das Verständnis der Schüler*innen bezüglich des elektrischen Feldes und der Energieübertragung durch elektromagnetische Felder. In Tabelle 32 zeigt sich, dass die Einführung dieser Konzeptidee (Mittelwert: 2,82 von 3,00) zu verbesserten Ergebnissen bei der fünften Konzeptidee zum elektrischen Feld führte. Im Vergleich zu früheren Runden stieg der Mittelwert von 2,57 in der zweiten Runde auf 2,76 in der dritten Runde an. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die neue Konzeptidee einen positiven Beitrag zum Verständnis der Schüler*innen leistet. Sie wird daher in der geplanten Austestung des LLAs im realen Klassensetting beibehalten.

5.4 Stärken und Schwächen der Interviewstudie

Die Interviewstudie weist mehrere Stärken auf, die auf die Methodik und die Umsetzung zurückzuführen sind. Besonders hervorzuheben ist der iterative Charakter der Untersuchung: Der Interviewleitfaden wurde nach jeder Runde überarbeitet, was zu einer transparenten, empirischen Optimierung des Unterrichtsdesigns führte.

Ein weiterer zentraler Vorteil liegt in der detaillierten qualitativen Analyse, die mithilfe der Methode der Qualitativen Inhaltsanalyse durchgeführt wurde. Diese ermöglichte eine differenzierte Auswertung der Schüler*innenantworten und erlaubte es, Akzeptanz, Paraphrasen und Aufgabenlösungen systematisch zu bewerten.

Die Zusammensetzung der Stichprobe trug ebenfalls zur Qualität der Studie bei: Die Teilnahme von Schüler*innen aus verschiedenen Schulstufen (10. und 11.) sowie aus unterschiedlichen Schultypen sorgte für eine gewisse Diversität in der Datenbasis.

Zudem erwiesen sich die gezielten inhaltlichen Anpassungen, wie etwa die Einführung neuer Konzeptideen (z. B. zu Oberflächenladungen) oder die Überarbeitung der Visualisierungen, als sinnvoll: Sie führten zu einem besseren Verständnis bei den Lernenden.

Gleichzeitig sind auch einige Limitationen zu beachten, die die Aussagekraft der Ergebnisse einschränken. Die wohl größte Schwäche liegt in der Stichprobengröße: Mit lediglich sieben Schüler*innen pro Runde ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt.

Hinzu kommt der Einfluss äußerer Faktoren, die in Einzelfällen die Interviewqualität beeinträchtigten. So kam es beispielsweise bei IP21 in der dritten Runde zu Konzentrationsverlusten durch Zeitdruck und Störungen (siehe 5.3.3.1.2). Die regionale Beschränkung auf Wiener Schulen stellt eine weitere Einschränkung dar. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bundesländer oder Bildungssysteme bleibt offen.

Darüber hinaus kann die Fokussierung auf Einzelinterviews kritisch betrachtet werden: Zwar ermöglichen sie eine kontrollierte Gesprächssituation, bilden aber nicht die soziale Dynamik eines Klassenraums ab. Diese könnte sich in Gruppeninterviews anders auf das Antwortverhalten auswirken.

Ein weiterer Schwachpunkt besteht in der fehlenden systematischen Erfassung des Vorwissens der Schüler*innen. Unterschiedliche individuelle Voraussetzungen wurden zwar erkannt, konnten aber nicht in die Auswertung einbezogen werden, was potenziell zu einer Verzerrung der Ergebnisse führte.

Schließlich ist auch die strenge Kodierungspraxis kritisch zu reflektieren. In einigen Fällen wurden Aussagen aufgrund ungenauer Begriffswahl durch Schüler*innen nicht grün kodiert. Diese Entscheidung erfolgte bewusst, da nicht ausgeschlossen werden konnte, dass hinter der terminologischen Ungenauigkeit ein konzeptuelles Missverständnis steht. Es geht dabei also nicht nur um alternative Formulierungen (z. B. ‚Energieverbraucher‘ statt ‚Energieumwandler‘), sondern möglicherweise auch um unterschiedliche fachliche Vorstellungen (z. B. ‚Elektronenfluss‘ statt ‚Energiefluss‘). Solche Fälle wurden in den Ergebnissen genau dokumentiert.

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse der Interviewstudie als vielversprechend für die Weiterentwicklung des Unterrichtsdesigns bewerten, insbesondere aufgrund der iterativen Vorgehensweise und der starken Praxisorientierung durch die Durchführung mit Schüler*innen im Mikro-Unterrichtssetting. Dennoch sollten bei der Interpretation einige Einschränkungen berücksichtigt werden, wie etwa die geringe Stichprobengröße, die fehlende Erfassung der Vorkenntnisse der Teilnehmenden sowie die vergleichsweise strenge Kodierung. Gerade diese Aspekte bieten jedoch wertvolle Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsarbeiten.

Implementationsstudie im realen Klassensetting

Kapitel 6 stellt die Implementationsstudie vor, in der das im Rahmen der Interviewstudie weiterentwickelte Lehr-Lern-Arrangement (LLA) unter realen schulischen Bedingungen erprobt wurde. Im Fokus stehen die empirische Evaluation anhand eines Prä- und Posttests, die Erprobung einer digitalen Simulation sowie eine Analyse der Rückmeldungen der beteiligten Lehrpersonen. Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst die Entwicklung und Umsetzung des LLAs, das Untersuchungsdesign, präsentieren die Ergebnisse und diskutieren diese im Hinblick auf die Leitfragen sowie Stärken und Schwächen der Untersuchung.

6.1 Vorbemerkungen

Nachdem in Kapitel 5 im Rahmen der Interviewstudie das Lehr-Lern-Arrangement (LLA) zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in drei Zyklen des Design-Based Research erprobt und auf Grundlage der jeweiligen Ergebnisse iterativ weiterentwickelt wurde, erfolgte auf Basis der dritten Interviewrunde die Entscheidung, das LLA im Rahmen einer Implementationsstudie unter realen Unterrichtsbedingungen zu erproben. Diese Studie markiert die dritte Phase des Forschungsprojekts (siehe Abbildung 30 in Kapitel 4.3).

Ziel dieses Projektabschnitts ist es, das auf den Erkenntnissen der Interviewstudie basierende Unterrichtsdesign für den schulischen Einsatz aufzubereiten, geeignete Materialien zu entwickeln sowie das Konzept in mehreren Klassen zu erproben und umfassend zu evaluieren. Dabei

wird zusätzlich Feedback von den teilnehmenden Lehrpersonen eingeholt und analysiert werden, um die praktische Umsetzbarkeit des Unterrichtsdesigns zu bewerten.

Spezifische Ziele in diesem Zusammenhang sind:

- 1) *Die Evaluation des Lernfortschritts der Schüler*innen durch ein Prä- und Posttest-Design:* Der Wissensstand der Schüler*innen soll mithilfe von Paper-Pencil-Fragebögen vor und nach des LLAs bestimmt werden, um zu beurteilen zu können, ob es nach der Intervention zu einem Wissenszuwachs gekommen ist.
- 2) *Das Einholen von Feedback zur Durchführbarkeit im Klassensetting durch die Lehrpersonen:* Die teilnehmenden Lehrkräfte, welche das LLA mit ihren Klassen austesten, sollen ihre Erfahrungen und Einschätzungen zur praktischen Umsetzung des LLAs im Unterricht im Rahmen von Einzelinterviews teilen, um mögliche Verbesserungspotenziale zu identifizieren.
- 3) *Die Evaluation einer Simulation zur Energieübertragung in elektrischen Systemen, die in Kooperation mit der ETH Zürich entstanden ist:* Die Simulation wurde in Zusammenarbeit mit Roman Binder von der ETH Zürich entwickelt und soll hinsichtlich ihrer Bedienung und Einsetzungsmöglichkeit im Unterricht analysiert und bewertet werden.

In diesem Zusammenhang ist die Relevanz dieser Untersuchung für die Teilnehmer*innen und die Physikdidaktik besonders hervorzuheben. Zum einen profitieren die beteiligten Schüler*innen und Lehrkräfte direkt von der Teilnahme an dieser Studie, da sie innovative Unterrichtsmaterialien ausprobieren und aktiv an der Entwicklung dieser Materialien mitwirken können. Zum anderen liefern die Ergebnisse dieser Untersuchung wichtige Erkenntnisse für die physikdidaktische Forschung, indem sie Evidenzen zur Durchführbarkeit des LLAs zur Energieübertragung in elektrischen Systemen sammeln. Diese Evidenzen tragen dazu bei, die in vorigen Kapiteln beschriebene Forschungslücke zu schließen, da es bislang kein empirisch evaluiertes Unterrichtsdesign für die 11. Schulstufe mit dem Fokus auf Energieübertragung in elektrischen Systemen durch elektromagnetische Felder im deutschsprachigen Raum gibt.

6.2 Design des LLAs

Dieses Kapitel behandelt die Konzeption des im Rahmen dieser Studie entwickelten Lehr-Lern-Arrangements (LLA). Ziel ist es, Aufbau und Struktur des LLA systematisch darzustellen. Dazu wird zunächst eine Gesamtübersicht des LLA gegeben (Abschnitt 6.2.1), gefolgt von der Beschreibung der zugrunde liegenden Lehr- und Lernziele (Abschnitt 6.2.2). Im Anschluss werden die eingesetzten methodischen Ansätze sowie die verwendeten Materialien erläutert (Abschnitt 6.2.3). Abschließend folgt eine detaillierte Darstellung der Implementierung und des Ablaufs des LLA im Unterricht (Abschnitt 6.2.4).

6.2.1 Beschreibung des entwickelten LLAs

Allgemeine Bemerkungen:

Das LLA wurde für den Einsatz im regulären Unterricht der 11. Schulstufe konzipiert. Es basiert auf den Ergebnissen der Interviewstudie (siehe Kapitel 5). Ziel dieses LLAs ist es, das Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen für Schüler*innen verständlich zu machen. Darüber hinaus soll geprüft werden, inwiefern die erstellten Abläufe und Materialien für die Teilnehmer*innen nützlich sind und ob gegebenenfalls Anpassungen erforderlich sind. Die Materialien des LLA befinden sich im Anhang dieser Arbeit¹⁸.

Benötigte Vorkenntnisse:

Das LLA richtet sich primär an Schüler*innen der 7. Klasse (11. Schuljahr), kann jedoch auch in der 6. Klasse (10. Schuljahr) erfolgreich eingesetzt werden, wie die Interviewstudie gezeigt hat. Diese Flexibilität ergibt sich daraus, dass die Inhalte zu Energie und Energieübertragung im österreichischen Lehrplan (BGBl. Nr. 88/1985) für beide Schulstufen vorgesehen sind. Somit können die Lehrpersonen selbst entscheiden, wann sie das LLA einsetzen möchten. In diesem Fall ist es aber unerlässlich, eine entsprechende Vorarbeit im Unterricht zu leisten, um die Schüler*innen auf die zu behandelnden Konzepte adäquat vorzubereiten zu können.

Um das LLA erfolgreich durchzuführen, sollten die Schüler*innen zuvor die Grundlagen der Elektrizitätslehre in der Schule behandelt haben, einschließlich der Wirkungen des elektrischen Stroms, eines einfachen Stromkreises sowie der Begriffe Stromstärke, Spannung und elektrischer Widerstand. Zusätzlich sollten sie Kenntnisse über die elektrische Energie und Leistung haben, einschließlich der Energiebereitstellung durch Batterien und Photovoltaik. Ein weiteres

¹⁸ Die Materialien, insbesondere die Videos, können unter diesem Link digital abgerufen werden: <https://phaidra.univie.ac.at/o:2154461>.

erforderliches Thema sind die Grundphänomene statischer elektrischer und magnetischer Felder, der Feldbegriff sowie die Erklärungen, dass Ladungen die Ursache elektrischer Felder und Ströme die Ursache magnetischer Felder sind. Sollte dieser letzte Punkt zum Thema Felder noch nicht behandelt worden sein, muss dies bei der Durchführung des LLAs berücksichtigt werden und gegebenenfalls zusätzliche Zeit zum Üben eingeplant werden.

Im Folgenden wird die auf den Erkenntnissen aus Kapitel 5 basierende Lehrer*innenhandreichung vorgestellt. Sie wurde den Lehrpersonen, die an der Implementationsstudie teilnahmen, sowohl in digitaler als auch in gedruckter Form zur Verfügung gestellt. Die finale Version mit dem entsprechenden Layout ist im Anhang dieser Arbeit zu finden.

Verwendete Icons in der Lehrer*innenhandreichung:

In der Lehrer*innenhandreichung wurden zur besseren Übersicht bestimmte Icons verwendet, die den Lehrpersonen dabei helfen sollen, auf einen Blick zu erkennen, ob es sich um ein Kognitives Stoppschild, einen Versuch, Digitale Inhalte oder andere Inhalte handelt. Die Icons und ihre Erklärungen sind der folgenden Tabelle 48 zu entnehmen:

Tabelle 48: Erklärung der Icons, die in der Lehrer*innenhandreichung verwendet werden.

<i>Icon</i>	<i>Kurzbezeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>
	Kognitive Stoppschilder	<i>Kennzeichnen Stellen, die sich in der Vorerhebung als problematisch herausgestellt haben; Es wird auf mögliche Fehlerquellen hingewiesen</i>
	Versuche	<i>Demonstrationsversuche und Hands-On-Versuche</i>
	Digitale Inhalte	<i>(Ergänzende) Inhalte mit digitalen Endgeräten</i>
	Übungen / Aufgaben	<i>Übungen zum Vertiefen und Festigen der Inhalte</i>
	Arbeitsblatt / Textblatt	<i>Material für die Schüler*innen</i>
	Zusatzinfos	<i>Weiterführende Informationen für besonders interessierte Schüler*innen zur Ergänzung und Erweiterung des Wissens</i>
	Konzeptidee	<i>Zugrundeliegende Konzeptidee; Kann als Merksatz ins Heft eingetragen werden.</i>

Block 1: Elektrische Energieübertragungssysteme

Der erste Block des LLAs umfasst eine Unterrichtseinheit, die zirka 50 Minuten dauert. Ein Überblick der behandelten Inhalte ist in Tabelle 49 zu sehen.

Tabelle 49: Inhalte zu Block 1, Sequenz 1.1 und 1.2.

Inhalte		Materialien
1.1	Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme	PPT, Bilderkarten 1.1 (optional)
1.2	Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium	PPT, Bilderkarten 1.2 (optional)

In dieser Unterrichtssequenz sollen die Schüler*innen zunächst mit der Idee vertraut gemacht werden, dass in elektrischen Systemen Energie übertragen werden kann. Dies wird anhand einiger Alltagskontexte besprochen und veranschaulicht.

1.1 Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme

Die folgende Tabelle 50 gibt einen Überblick über die einzelnen Schritte der geplanten Unterrichtssequenz und dient den Lehrpersonen als strukturierende Orientierung. Zu jedem Schritt sind zudem die jeweils benötigten Materialien aufgeführt.

Tabelle 50: Überblick über die Schritte zu Block 1, Sequenz 1.1

Schritte		Materialien
1)	Begriffsklärung: Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme	PPT
2)	Übung und Festigung der neuen Begriffe	Bilderkarten 1.1 (optional)
3)	Formulierung eines Merksatzes	

1) Begriffsklärung: Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme

Zu Beginn der Unterrichtssequenz werden einige fundamentale Begriffe mit den Schüler*innen eingeführt, die im gesamten Unterrichtsdesign konsistent weiterverwendet werden sollten. Als Einstieg werden den Schüler*innen dazu verschiedene elektrische Systeme gezeigt, die in zwei unterschiedliche Kategorien geteilt werden können: Kabellose oder kabelgebundene Systeme. Zur visuellen Unterstützung sollen an dieser Stelle Bilder von elektrischen Systemen gezeigt werden (siehe Abbildung 1).

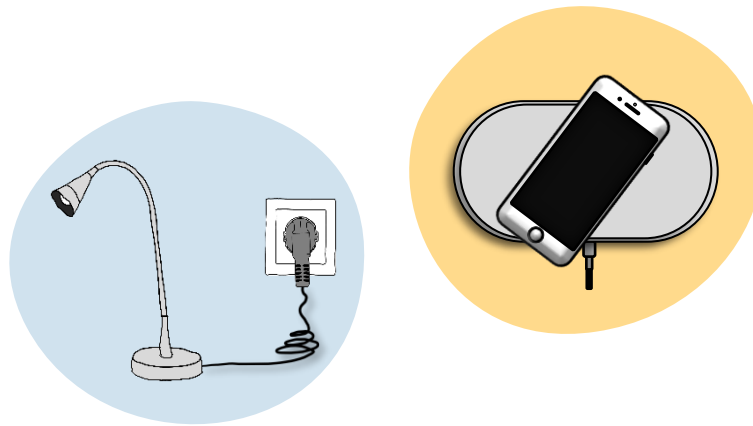


Abbildung 46: Kabelgebundene und kabellose Systeme. Links ist eine Tischlampe zu sehen, die über ein Kabel mit der Steckdose verbunden ist. Rechts ist ein Smartphone zu sehen, bei dem der Akku kabellos am Ladepad geladen werden kann.

Die meisten Schüler*innen sollten zu diesem Zeitpunkt schon mit einfachen Stromkreisen vertraut sein und gleich erkennen, dass in manchen Bildern die Verbindungskabel fehlen. Falls von den Schüler*innen nichts kommt, kann an dieser Stelle auch direkt die Definition der beiden Begriffe von der Lehrperson vorgegeben werden.

Am Beispiel der Tischlampe kann beispielsweise mit den Schüler*innen besprochen werden, dass diese über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden ist. Wenn der Schalter bei einer Lampe betätigt wird, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. Solche elektrischen Systeme werden als ‚kabelgebundene Systeme‘ bezeichnet. Dies kann anschließend für ähnliche elektrische Systeme, wie beispielsweise einem elektrischen Föhn, wiederholt werden. Die Schüler*innen können noch weitere Beispiele aus ihrem Alltag nennen.

In diesem Schritt soll die Energieumwandlung noch nicht im Detail diskutiert werden. Stattdessen soll an den Wirkungen der elektrischen Systeme festgemacht werden, dass Energie übertragen wurde (z. B. wenn der Föhn in der Steckdose angesteckt wird, lässt er sich einschalten und warme Luft strömt heraus).

Analog wird dies für die zweite Kategorie an elektrischen Systemen wiederholt: „Bestimmt hast du schon die neuen Smartphone-Ladestationen gesehen, bei denen dein Smartphone ohne Kabel aufgeladen werden kann. Du musst es dafür nur auf die Station legen. Solche elektrischen Systeme bezeichnen wir als ‚kabellose Systeme‘. Als weitere Beispiele bieten sich AirPods, elektrische Zahnbürsten oder andere Gegenstände aus der Alltagswelt der Schüler*innen an.

2) Übung und Festigung der neuen Begriffe



Zum Üben und Festigen sollten an dieser Stelle die *Bilderkarten 1.1* an der Tafel befestigt werden. Im Plenum werden dafür die Bilder nach und nach in die zwei Kategorien (kabelloses System – rechte Tafelseite, kabelgebundenes System – linke Tafelseite) eingeteilt. Es können auch gemeinsam weitere Beispiele gesucht werden.

Alternativ kann dies auch in der Form eines Spiels mit den Schüler*innen behandelt werden. Jede*r erhält ein Bild und soll sich, je nach zugehöriger Kategorie (Energiequelle / Energieumwandler), entweder auf die rechte oder linke Seite der Klasse stellen. Anschließend wird mit den Schüler*innen besprochen, warum sie sich für die eine oder andere Seite der Klasse entschieden haben.

3) Formulierung eines Merksatzes

Zusammenfassend lässt sich dies als Merksatz im Heft folgendermaßen eintragen:



Die Energieübertragung kann in **kabelgebundenen** Systemen (z. B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) *oder* **kabellosen** Systemen (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Smartphone, ...) stattfinden.

1.2 Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium

Tabelle 50 liefert eine Übersicht der Schritte der Sequenz 1.2 und listet die benötigten Materialien auf:

Tabelle 51: Überblick über die Schritte zu Block 1, Sequenz 1.2

Schritte		Materialien
1)	Begriffsklärung: Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium	<i>PPT</i>
2)	Übung und Festigung der neuen Begriffe	<i>Bilderkarten 1.2 (optional)</i>
3)	Formulierung eines Merksatzes	

1) Begriffsklärung: Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium

Im Folgenden werden die Bestandteile der elektrischen Systeme eingehender mit den Schüler*innen besprochen, insbesondere die Begriffe Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium.

Da viele Schüler*innen bereits Vorwissen zu elektrischen Stromkreisen mitbringen und vielleicht andere Begriffe gewohnt sind (z. B. ‚Verbraucher‘ statt ‚Energieumwandler‘, ‚Spannungsquelle‘ statt ‚Energiequelle‘, ...), sollte hier eine Entscheidung getroffen werden, wie man damit umgehen möchte. Es wird empfohlen, Begriffe wie ‚Verbraucher‘ eher zu vermeiden, da sie den Verbrauch der Energie (oder Strom) am elektrischen Gerät suggerieren und somit zu Verständnisschwierigkeiten führen könnten. In diesem Unterrichtsdesign wird daher stets vom ‚Energieumwandler‘ gesprochen, um seine Eigenschaft, Energie umwandeln zu können, hervorzuheben. Letztendlich ist es aber entscheidend, dass die Lehrperson konsistent mit ihrer Begriffswahl bleibt.

Für die Einführung der drei Begriffe können die Lampe, der Föhn, das Smartphone und die elektrische Zahnbürste als Beispiele für Energieumwandler genannt werden. Zur Erklärung des Begriffs kann hier ergänzt werden, dass bei einem solchen Energieumwandler elektrische Energie in eine andere Energieform umgewandelt wird. Neben einem Energieumwandler enthält ein Energieübertragungssystem üblicherweise auch eine Energiequelle. Als Beispiele können der Generator, die Batterie, die Solarzelle und die Steckdose genannt werden. Weiters wird besprochen, dass einige elektrische Systeme zusätzlich ein Überträgermedium in Form eines Leiterkabels benötigen.

Als konkretes Beispiel kann wieder die Tischlampe besprochen werden: „Die Lampe ist über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden. Die Steckdose wird in diesem Beispiel als Energiequelle bezeichnet, da sie das elektrische System mit elektrischer Energie versorgt. (Hinweis: Die Energie der Steckdose kommt von einem Kraftwerk, eine weitere Energiequelle). Die Tischlampe bezeichnen wir als Energieumwandler, da sie elektrische Energie in Strahlungs- und Innere Energie umwandelt.“

2) Übung und Festigung der neuen Begriffe



Zum Üben und Festigen kann an dieser Stelle im Plenum eine Liste an Energiequellen und Energieumwandlern erstellt werden (z. B. Energiequelle – rechte Tafelseite, Energieumwandler – linke Tafelseite).

Auch an dieser Stelle kann wieder eine ähnliche Übung wie bei 1.1 durchgeführt werden.



Zum Üben und Festigen bietet es sich an dieser Stelle an, weitere Beispiele für elektrische Systeme mit den Schüler*innen zu besprechen und die Zuordnung der Begriffe Energiequelle und Energieumwandler zu üben (siehe Bilderkarten 1.2 und Abbildung 2).

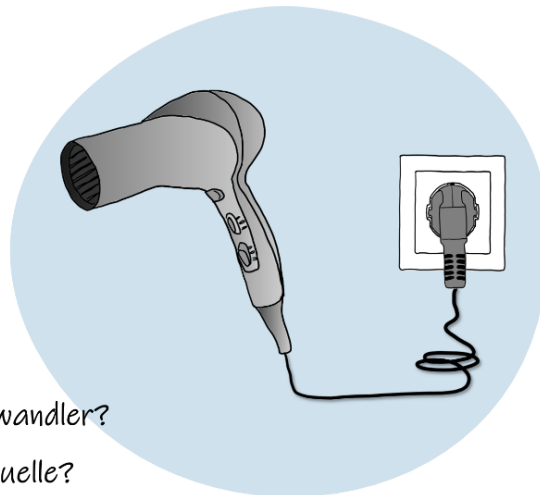


Abbildung 47: Zuordnung der Begriffe Energiequelle und -umwandler an einem Beispiel. Der elektrische Föhn stellt dabei den Energieumwandler und die Steckdose die Energiequelle dar.

3) Formulierung eines Merksatzes

Ins Heft lässt sich ein entsprechender Merksatz eintragen, der zu einem späteren Zeitpunkt immer wieder herangezogen werden kann:



Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer **Energiequelle** (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem **Energieumwandler** (z. B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z. B. Leiterkabel).

Block 2: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I

Der zweite Block dieses Unterrichtsdesigns umfasst drei Unterrichtseinheiten zu je 50 Minuten. Ein Überblick der behandelten Inhalte ist in Tabelle 52 zu sehen.

Tabelle 52: Inhalte zu Block 2, Sequenz 2.1-2.3

Inhalte		Materialien
2.1	Das magnetische Feld	PPT, Versuch 1, Arbeitsblatt 2.1, Strommesszange (optional)
2.2	Das elektrische Feld und die Oberflächenladungen	PPT, Versuch 2, Arbeitsblatt 2.2, ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad)
2.3	Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss	PPT, Textblatt 2.3, Arbeitsblatt 2.3, ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad), Versuch 3

Im zweiten Block werden physikalische Felder thematisiert. Die meisten Schüler*innen haben schon einmal von diesem Begriff gehört, können ihn aber nicht klar definieren. Damit alle Schüler*innen auf dem gleichen Stand sind, ist es wichtig, dass diese Unterrichtssequenz nicht übersprungen wird, auch wenn Teile davon schon in ähnlicher Form in Unterricht durchgeführt worden sind (z. B. der Ørsted-Versuch). Die Interviewstudie hat gezeigt, dass Schüler*innen viele Fragen zu den nachfolgenden Versuchen haben und es eine wichtige Erfahrung für sie ist, die Versuche selbst durchführen zu können.

In dieser Unterrichtssequenz sollen die Schüler*innen erkennen, dass es um elektrische Systeme elektromagnetische Felder gibt, die für die Energieübertragung verantwortlich sind. Zur besseren Übersicht wird zunächst das magnetische und anschließend das elektrische Feld einzeln betrachtet. Dazu wird der Raum um den elektrischen Stromkreis genauer unter die Lupe genommen.

2.1 Das magnetische Feld

Eine Übersicht der Schritte, die im Block 2 zur Sequenz 2.1 zum magnetischen Feld behandelt werden sollen, ist in Tabelle 53 zu sehen:

Tabelle 53: Überblick über die Schritte zu Block 2, Sequenz 2.1

Schritte		Materialien
1)	Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld	<i>PPT, Versuch 1, Arbeitsblatt 2.1</i>
2)	Erklärung durch Lehrperson	<i>PPT, Arbeitsblatt 2.1</i>
3)	Übungen zum magnetischen Feld	<i>PPT, Versuch 1.1 (optional)</i>
4)	Formulierung eines Merksatzes	

1) Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld

Zuerst wird ein einfacher Versuch zum Magnetfeld durchgeführt. Idealerweise sollte er als Hands-on-Versuch in Kleingruppen gemacht werden, da dies wesentlich zur Konzeptbildung der Schüler*innen beitragen kann.



Versuch 1: Das magnetische Feld.

Material: 1 Batterie¹⁹, 1 Kabel mit Krokoklemmen, 1 Kompass

Durchführung: Der Kompass wird unter ein Kabel des geöffneten Stromkreises gehalten. Dabei sollte die Kompassnadel entlang des Leiterkabels zeigen (siehe Abbildung 48a). Anschließend wird der Stromkreis geschlossen und die Kompassnadel beobachtet (siehe Abbildung 48b). Der Versuch kann an mehreren Stellen um den Stromkreis wiederholt werden.

Hinweis: Da es sich um einen Kurzschluss handelt, sollte der Versuch nur kurz durchgeführt werden. Die Schüler*innen sollen die Kabel von der Batterie trennen, sobald die Kompassnadel ausgelenkt wurde.

HANDS-ON

¹⁹ Für die Durchführung wird eine 4,5 V Batterie empfohlen (siehe Materialliste).

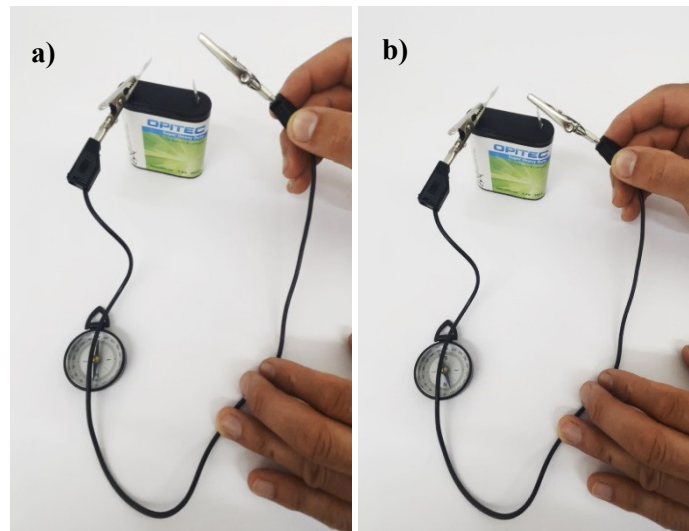


Abbildung 48: Kompass-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes. **a)** Der Kompass wird in einem offenen Stromkreis unter ein Leiterkabel gelegt und zeigt nach Norden. **b)** Der Kompass lenkt sich unter dem stromdurchflossenen Leiter senkrecht zum Kabel aus.

Im Plenum sollten die Beobachtungen und Erklärungen der Schüler*innen festgehalten werden. Vielleicht erwähnen die Schüler*innen dabei, dass die Kompassnadel, abhängig von ihrer Position im Stromkreis, in unterschiedliche Richtungen gezeigt hat.

2) Erklärung durch Lehrperson

Als Erklärungsmodell für diese Beobachtung wird das magnetische Feld mithilfe einer Feldlinienendarstellung eingeführt. Den Schüler*innen wird erklärt, dass um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld entsteht. Bringt man den Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, so richtet sich die Kompassnadel senkrecht²⁰ dazu aus. Daraus kann geschlossen werden, dass das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter verlaufen muss (siehe Abbildung 49).

²⁰ Falls die Kompassnadel nicht im 90° Winkel, sondern eher im 45° Winkel abgelenkt wird, sollte hier auch noch das Erdmagnetfeld beachtet werden!

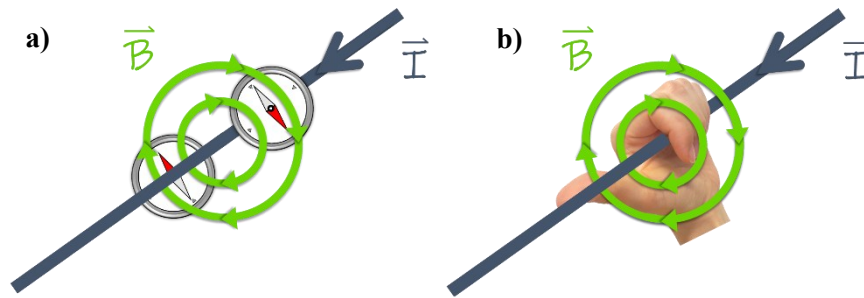


Abbildung 49: Magnetische Feldlinien beim Kompass-Versuch. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines elektrischen Leiters, durch den ein Strom I fließt. Um den Leiter entsteht ein Magnetfeld, das mit kreisförmigen Magnetfeldlinien dargestellt werden kann. **a)** Ein Kompass wird an verschiedene Positionen gehalten und man kann erkennen, dass sich die Nadel entlang des Magnetfelds ausrichtet. **b)** Die Richtung des Magnetfeldes kann mit der linken Hand bestimmt werden: Der Daumen zeigt am Kabel entlang in die Elektronenflussrichtung, die übrigen Finger krümmen sich um das Leiterkabel in Richtung des Magnetfeldes.

Das magnetische Feld kann mit Magnetfeldlinien beschrieben werden. Dabei sollten die Schüler*innen aber deutlich darauf hingewiesen werden, dass die Feldlinien nur eine Anschauungshilfe darstellen, mit denen man einige Eigenschaften von magnetischen Feldern gut beschreiben kann. Die Richtung des Magnetfeldes kann dabei durch die Linke-Hand-Regel besprochen werden: Der Daumen der linken Hand wird in Richtung der Elektronenflussrichtung (von Minus zu Plus) gehalten. Die übrigen Finger krümmen sich um den Leiter und zeigen in die Richtung des Feldverlaufs.

3) Übungen zum magnetischen Feld

Im nächsten Schritt sollte mit den Schüler*innen eine Verständnisaufgabe besprochen werden:



Frage: Warum richtet sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht aus?

Die Schüler*innen sollten erkennen, dass es nur ein Magnetfeld gibt, wenn der Stromkreis geschlossen ist und somit ein Elektronenfluss im Inneren des Leiters zustande kommt. Der Kompass wird daher nur senkrecht zum Leiter ausgelenkt, wenn es ein Magnetfeld um den Leiter gibt.

Als Vertiefung kann die Strommesszange mit den Schüler*innen besprochen werden:



Versuch 1.1: Die Strommesszange

Material: 1 Batterie²¹, 1 Kabel mit Krokodklemmen, 1 Lämpchen, 1 Strommesszange, ggf. 1 Ventilator

Durchführung: Die Strommesszange wird eingeschaltet, indem das Rädchen auf ‚20A‘ gedreht wird. Über den Knopf ‚Select‘ muss noch Gleichstrom ‚DC‘ ausgewählt werden. Das Display sollte anfangs eine Stromstärke von $I = 0.000\text{ A}$ anzeigen²². Der Stromkreis wird geschlossen, indem beide Anschlüsse der Batterie mit beiden Anschlüssen der Lampe verbunden werden²³. Anschließend wird die Strommesszange an verschiedenen Positionen (vor bzw. hinter dem Energieumwandler) um das Leiterkabel gehalten und der Wert abgelesen (siehe Abbildung 50a und b).

Erklärung: Eine Strommesszange (siehe Abbildung 51) ist ein Gerät, das im Haushalt oder auf der Baustelle überall dort zur Anwendung kommt, wo man elektrische Ströme messen möchte. Wenn die Zange um ein Kabel gehalten wird, misst sie das Magnetfeld, das um den stromdurchflossenen Leiter entsteht. Aus der Stärke des Magnetfeldes wird die Stromstärke berechnet, die am Display abzulesen ist. Die Messung kann man an verschiedenen Positionen im Stromkreis wiederholen, um zu zeigen, dass in einem einfachen Stromkreis die Gesamtstromstärke überall gleich groß ist.

HANDS-ON

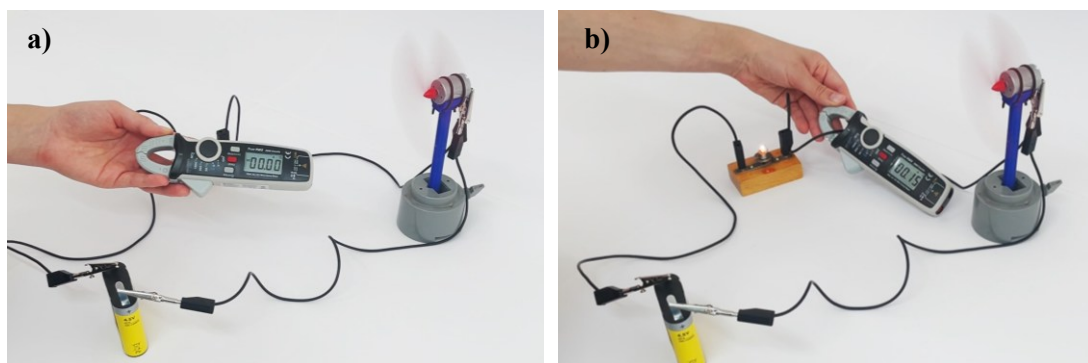


Abbildung 50: Stromzangen-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes. **a)** Das Display der Stromzange zeigt 00.00 A an, wenn sie nicht um ein Kabel gehalten wird. **b)** Das Display der Stromzange zeigt 00.15 A an, wenn die Stromzange um ein Kabel gehalten wird.

²¹ Empfohlen wird eine 4,5 V Batterie (siehe Materialliste).

²² Falls das Display nicht eine Stromstärke von $I = 0.000\text{ A}$ anzeigt, weil in der Nähe elektrische Geräte mit Magnetfeldern vorhanden sind, muss noch auf ‚Zero‘ gedrückt werden.

²³ Hier kann auch ein Ventilator in Serie geschaltet werden, damit die Messung auch zwischen zwei Energieumwandlern erfolgen kann.

Zur Erklärung kann wieder das magnetische Feld mithilfe von Magnetfeldlinien dargestellt werden, wie in Abbildung 51 zu sehen ist:

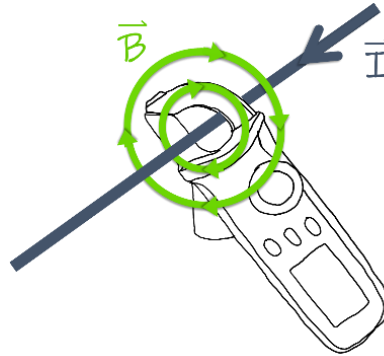


Abbildung 51: Magnetische Feldlinien beim Stromzangen-Versuch. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines elektrischen Leiters, durch den ein Strom I fließt. Um den Leiter entsteht ein Magnetfeld, das mit kreisförmigen Magnetfeldlinien dargestellt werden kann. Die Strommesszange wird um den Leiter gehalten und bestimmt die Stromstärke über das Magnetfeld.

Video zum Versuch 1.2: Die Strommesszange



Falls keine Strommesszange für eine reale Demonstration vorhanden ist, gibt es in der Power-Point-Präsentation alternativ ein Video.

4) Formulierung eines Merksatzes

Als Merksatz kann noch folgende Formulierung ins Heft eingetragen werden:



Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **magnetisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden.

2.2 Das elektrische Feld und die Oberflächenladungen

Die Schritte, die zur Durchführung der Sequenz 2.2 in Block 2 zu befolgen sind, können Tabelle 54 entnommen werden:

Tabelle 54: Überblick über die Schritte zu Block 2, Sequenz 2.2

Schritte		Materialien
1)	Kognitives Stoppschild	<i>PPT</i>
2)	Wiederholung und Vertiefung zu elektrischen Energiequellen	<i>PPT</i>
3)	Kognitives Stoppschild	<i>PPT</i>
4)	Oberflächenladungen in einem offenen Stromkreis	<i>PPT</i>
5)	Formulierung eines Merksatzes	
6)	Demo-Versuch zum elektrischen Feld	<i>Versuch 2, Arbeitsblatt 2.2, ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad)</i>
7)	Erklärung durch Lehrperson	<i>Arbeitsblatt 2.2</i>
8)	Elektrisches Feld in einem offenen und geschlossenen Stromkreis	<i>PPT</i>
9)	Übungen zum elektrischen Feld	
10)	Formulierung eines Merksatzes	

1) Kognitives Stoppschild

Zu Beginn dieses Abschnitts sollten die Schüler*innen darauf aufmerksam gemacht werden, dass in weiterer Folge eine zweite Art von Feld besprochen wird, das sich vom magnetischen Feld unterscheidet. Die Ergebnisse der Interviewstudie haben gezeigt, dass ein Kognitives Stoppschild an dieser Stelle hilfreich sein kann, um Schüler*innen vor der Verwechslung vom magnetischen und elektrischen Feld zu warnen. Dieses könnte folgendermaßen lauten:



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Bisher haben wir vom magnetischen Feld um den Leiter gesprochen. Nun schauen wir uns ein anderes Feld genauer an. Dieses unterscheidet sich in Ursache, Form und Richtung vom magnetischen Feld!

2) Wiederholung und Vertiefung zu elektrischen Energiequellen

Um das elektrische Feld einzuführen wird zunächst ein kleiner Exkurs zu Oberflächenladungen vorgenommen. Mit den Schüler*innen wird wiederholt, dass es verschiedene Arten von Energiequellen (z. B. Generator, Batterie, Solarzelle, ...) gibt. Ergänzend dazu wird erklärt, dass elektrische Energiequellen immer dieselbe Wirkung haben (auch wenn sie sich äußerlich voneinander unterscheiden): Es kommt zu einer Verschiebung von Ladung im Inneren. Bei einem Pol entsteht somit ein Überschuss an negativ geladenen Elektronen. Am anderen Pol fehlen diese Elektronen, was insgesamt zu einer positiven Ladung führt. Die Ladungen werden als Oberflächenladungen bezeichnet, da sie sich auf der Oberfläche des Leiters befinden (siehe Abbildung 52). Die Stärke der Energiequelle bestimmt wie viele Ladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt werden.

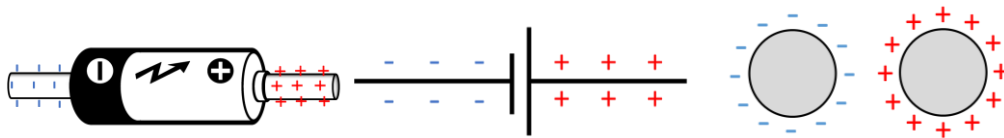


Abbildung 52: Unterschiedliche Darstellungen für Oberflächenladungen. Links ist eine Batterie zu sehen, an deren Polen sich negative und positive Oberflächenladungen sammeln. In der Mitte ist die Darstellung der Batterie als Schaltsymbol zu sehen. Rechts ist ein Querschnitt des Leiters zu sehen, der mit dem positiven und negativen Pol der Batterie verbunden ist. Man kann erkennen, dass sich die Oberflächenladungen rund um den Leiter verteilen.

3) Kognitives Stoppschild

Die Ergebnisse der Interviewstudie haben gezeigt, dass manche Schüler*innen die Oberflächenladungen mit den Ladungen im Leiterinneren verwechseln, wenn dies nicht explizit besprochen wurde. Es ist daher sinnvoll, an dieser Stelle ein kognitives Stoppschild einzubauen, das die Schüler*innen auf diese Verwechslungsgefahr hinweisen soll:



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Beachte, dass die Oberflächenladungen von den Ladungen im Inneren des Leiters zu unterscheiden sind!

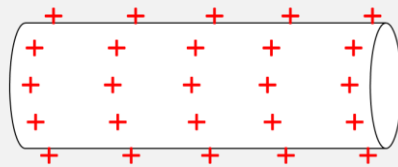


Abbildung 53: Abschnitt eines Leiters mit positiven Oberflächenladungen. Die positiven Ladungen an der Oberfläche werden mit einem Plus „+“ rund um den Leiter dargestellt, negative mit einem Minus „-“.

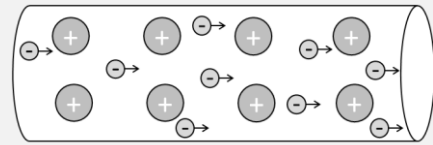


Abbildung 54: Abschnitt eines Leiters mit Ladungen im Leiterinneren. Die Ladungen im Inneren des Leiters werden eingekreist und grau gezeichnet, um sie von den Oberflächenladungen zu unterscheiden.

Es bietet sich auch an, diese Ladungen durch unterschiedliche Darstellungsformen zu unterscheiden. Die Oberflächenladungen werden in diesem Unterrichtsdesign immer mit einem roten Plus „+“ oder blauen Minus „-“ gekennzeichnet (siehe Abbildung 53), während die Ladungen im Leiterinneren als eingekreiste, graue Plus „+“ bzw. Minus „-“ dargestellt werden. Diese Darstellungsformen sollen den Schüler*innen helfen, Oberflächenladungen und Ladungen im Leiterinneren klar voneinander unterscheiden zu können.

4) Oberflächenladungen in einem offenen Stromkreis

Als nächstes kann mit den Schüler*innen besprochen werden, wie sich die Oberflächenladungen auf einem Kabel verteilen, dass mit der Energiequelle verbunden ist (siehe Abbildung 55).

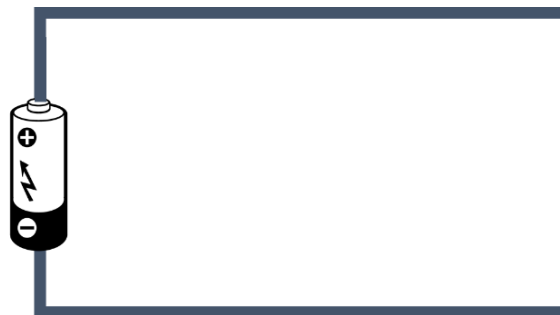


Abbildung 55: Einfacher Stromkreis mit Batterie und Kabeln.

Die Schüler*innen sollen zunächst alleine überlegen, wie sich die Oberflächenladungen verteilen könnten, wenn die Anschlüsse der Batterie jeweils mit einem losen Kabel verbunden sind. Zur Auflösung kann die Musterlösung (siehe Abbildung 56) mit den Schüler*innen besprochen werden. Am Pluspol der Batterie verteilen sich positive Oberflächenladungen,

während sich am Minuspol negative Oberflächenladungen gleichmäßig entlang des gesamten Kabels verteilen. Sie sind rund um den Leiter angeordnet und statisch, d.h. sie bewegen sich nicht wie die Elektronen im Leiterinneren bei einem geschlossenen Stromkreis!



Abbildung 56: Oberflächenladungen in einem offenen Stromkreis. Die Ladungen verteilen sich im ersten Moment gleichmäßig entlang der Kabel und und bleiben dann statisch auf der Leiteroberfläche. Zu beachten ist, dass die Ladungen hier exemplarisch an einer Seite des Leiters gezeichnet werden, sich aber tatsächlich rund um den Leiter anordnen (siehe Abbildung 53).

5) Formulierung eines Merksatzes

Die Oberflächenladungen werden im nächsten Schritt als Ursache eines elektrischen Feldes interpretiert. Man könnte an dieser Stelle schon im Heft einen Merksatz festhalten aber mit den Schüler*innen besprechen, dass der zweite Satz erst im Folgenden besprochen wird:



Energiequellen pumpen **Oberflächenladungen** auf die Leiteroberfläche. Diese generieren ein elektrisches Feld.

6) Demo-Versuch zum elektrischen Feld

Im nächsten Schritt lernen die Schüler*innen das elektrische Feld näher kennen. Dazu wird ein Demonstrationsversuch mit einer Hochspannungsquelle gezeigt.

Video zum Versuch 2: Das elektrische Feld.



Alternativ zu Versuch 2 kann an dieser Stelle auch ein Video²⁴ des Versuchs gezeigt werden. Dieses kann entweder gemeinsam mit der Klasse am Beamer oder in Einzel- bzw. Paararbeit mit digitalen Endgeräten (z. B. iPads) erfolgen.

²⁴ Zur Verfügung stehen drei Versuchsvideos mit verschiedenen Variationen: 1) Durchführung mit einem geschlossenen Stromkreis und einem Strohhalm, 2) Durchführung mit einem offenen Stromkreis und einem Strohhalm und 3) Durchführung mit einem geschlossenen Stromkreis und einem Alufolienstück. Dabei sollte jedenfalls Variation 1 mit den Schüler*innen angeschaut werden. Die anderen beiden Variationen sind optional.



DEMO-
VERSUCH

Versuch 2: Das elektrische Feld.

Material: Stromkreis mit isolierten Hochspannungskabeln, vier Reihenwiderstände ($U = 6,5 \text{ kV}$; $R = 5 \times 3,3 \text{ M}\Omega$) und ein Strohalm, der an einem bunten Faden²⁵ befestigt wird²⁶

Durchführung: Der Versuch wird, wie in den Abbildungen unten zu sehen, aufgebaut. An einem Faden wird ein kurzer Strohalm befestigt und in die Nähe des Leiterkabels gebracht. Es bietet sich an, den Faden an einem Holzspieß o. ä. zu befestigen. Der Strohalm wird zuerst an die äußeren Widerstände gehalten und anschließend zum mittleren Widerstand gebracht (siehe Video).

Hinweis: Da bei dem Versuch eine sehr hohe Spannung benötigt wird, ist es wichtig, dass die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen (siehe Box unten) getroffen werden. Alternativ kann an dieser Stelle ein Video gezeigt werden.

Sicherheitshinweise für den Hochspannungsversuch:

- Gleichstrom ab 120V, Wechselstrom ab 50V (bei 50Hz) und allgemein Strom ab 50mA sind lebensbedrohlich.
- Der Versuch darf nur von Lehrkräften nach einer Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden. Alternativ steht ein Video zur Verfügung.
- Elektrische Stromkreise mit hohen Spannungen oder Strömen sollten nur mit einer Hand bedient werden, um einen Stromfluss über das Herz zu vermeiden. Die zweite Hand kann hinter dem Rücken platziert werden.
- Personen mit Herzschrittmacher dürfen sich nicht in der Nähe aufhalten, da starke elektromagnetische Felder auftreten können.
- Brandgefahr besteht durch Kurzschlussströme, Leckströme, Funkenüberschlag oder überbeanspruchte Bauteile. Das Bereithalten von Wasser, Sand, Feuerlöscher oder Feuerdecke ist daher eine wichtige Vorsichtsmaßnahme! Vor dem Löschen eines Brandes muss sichergestellt werden, dass keine Spannung anliegt.
- Die Verkabelungen sollten vor der Inbetriebnahme von einer zweiten Person geprüft werden. Sogenannte ‚Stolperdrähte‘ sind zu vermeiden.
- Für den Versuch sind ausschließlich hochspannungstaugliche Kabel und isolierte Stecker zu verwenden.
- Nach dem Ausschalten des Geräts kann noch eine hohe Spannung anliegen (Kondensator) – Vorsicht!

7) Erklärung durch Lehrperson

²⁵ Es wird die Verwendung eines roten Fadens empfohlen, damit die Schüler*innen ihn klar erkennen können.

²⁶ Alternativ kann statt einem Strohalm auch ein kleines Alufolienstück verwendet werden (siehe Video). Dabei kann die Anziehung und Abstoßung am Leiter beobachtet werden, die unterschiedlichen Ladungen sind aber nicht erkennbar.

Den Schüler*innen wird im Anschluss an den Versuch erklärt, dass um einen Leiter, der mit einer Energiequelle verbunden ist, ein elektrisches Feld entsteht. Dies wird durch die Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche hervorgerufen. Bringt man einen Strohhalm oder ein kleines Stück Alufolie in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung (Anziehung / Abstoßung) beobachtet werden (siehe Abbildung 57). Beim Strohhalm kann zudem die unterschiedliche Ladungsart an den äußeren Widerständen beobachtet werden – je nachdem, welche Seite des Strohhalms zum Widerstand gedreht ist.

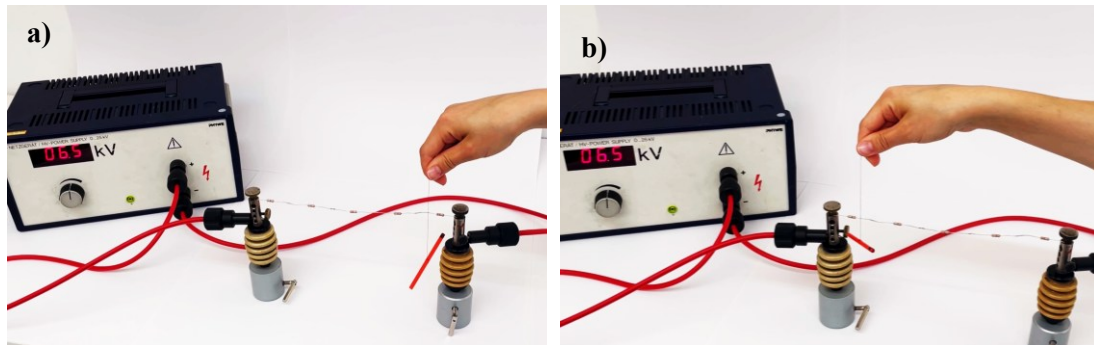


Abbildung 57: Versuch zum elektrischen Feld. Zu sehen ist eine Hochspannungsquelle, die mit fünf in Serie geschalteten Ohm'schen Widerständen über ein Stativ verbunden ist. An die Widerstände wird ein Strohhalm gehalten, der über einen Faden aufgehängt wird. **a)** das schwarz angemalte Ende des Strohhalms wendet sich dem Widerstand rechts außen zu. **b)** das andere Ende des Strohhalms wendet sich dem Widerstand links außen zu.

8) Elektrisches Feld in einem offenen und geschlossenen Stromkreis

Anschließend wird näher auf die Oberflächenladungen als Ursache des elektrischen Feldes eingegangen: Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen²⁷. Das elektrische Feld kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden, die von Plus zu Minus verlaufen (siehe Abbildung 58)²⁸. Das elektrische Feld der Oberflächenladungen verursacht einen Stromfluss im elektrischen Stromkreis, sobald er geschlossen vorliegt, also jeder Anschluss der Energiequelle mit je einem Anschluss des Energieumwandlers verbunden ist (siehe Abbildung 59).

²⁷ Die Oberflächenladungen im offenen Stromkreis verteilen sich gleichmäßig entlang des gesamten Kabels, das mit dem jeweiligen Pol der Energiequelle verbunden ist. Bei einem geschlossenen Stromkreis ist diese Verteilung etwas komplizierter [siehe auch Galili und Goihbarg (2005); Härtel (2021); Jackson (1996)], wird aber hier vereinfacht dargestellt.

²⁸ Der Einfachheit halber wird darauf verzichtet, die elektrischen Feldlinien außerhalb des Stromkreises zu zeichnen. Stattdessen werden die Feldlinien nur zwischen den Leiterkabeln dargestellt.

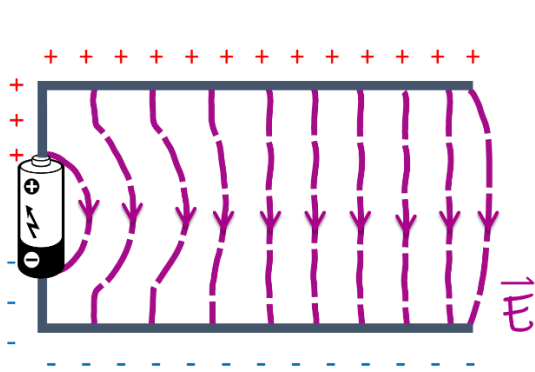


Abbildung 58: Darstellung des elektrischen Feldes im offenen Stromkreis.

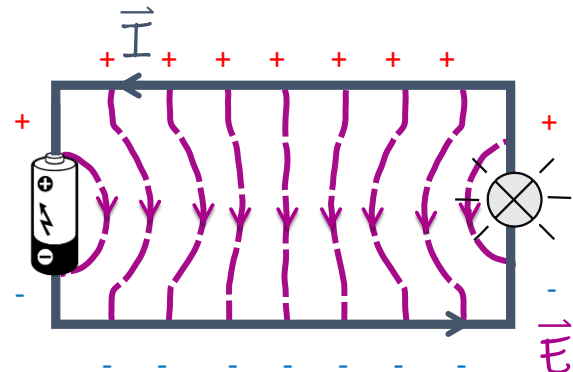


Abbildung 59: Darstellung des elektrischen Feldes im geschlossenen Stromkreis.

9) Übungen zum elektrischen Feld



Im Plenum können noch weitere elektrische Systeme mit den Schüler*innen gesammelt werden, bei denen ebenfalls ein elektrisches Feld entsteht. Beispiele, die oft von Schüler*innen genannt werden sind unter anderem: Lampen, Smartphones, elektrische Zahnbürsten, Spielekonsolen, Glätteisen, Föhn, Taschenlampen, Drucker, Lampen, Hochspannungsleitungen, Batterien, Fernseher, Mixer. Aus dieser Sammlung soll deutlich werden, dass alle elektrischen Systeme auch von elektrischen Feldern umgeben sind.

10) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann ein entsprechender Eintrag gemacht werden:



Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **elektrisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.

2.3 Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss

Die Schritte, für die Durchführung der Sequenz 2.2 in Block 2, sind in Tabelle 55 ersichtlich:

Tabelle 55: Überblick über die Schritte zu Block 2, Sequenz 2.3

Schritte	Materialien
1) Kognitives Stoppschild	<i>PPT</i>
2) Erklärung durch Lehrperson	<i>Textblatt 2.3</i>
3) Übungen zur Energie-Hand-Regel	<i>Arbeitsblatt 2.3</i>
4) Simulation zum Elektromagnetischen Feld	<i>ggf. digitales Endgerät (z. B. Ipad)</i>
5) Optionale Erweiterung: Poynting Vektor	
6) Formulierung eines Merksatzes	
7) Kognitives Stoppschild	<i>PPT</i>
8) Hands-On-Versuch zur Energieübertragung	<i>Versuch 3</i>
9) Optionale Erweiterung: Mind-Map	

1) Kognitives Stoppschild

Zu Beginn dieses Abschnitts sollte wieder ein kognitives Stoppschild eingebaut werden. Den Schüler*innen sollte klar gemacht werden, dass das elektromagnetische Feld, das im folgenden besprochen wird, kein neues, drittes Feld ist, sondern vielmehr die kombinierte Wirkung des elektrischen und magnetischen Feldes darstellt. Es wird empfohlen die folgende Wortwahl zu wählen:



KOGNITIVES STOPPSCHILD:

- Bis jetzt haben wir einzeln über das elektrische und das magnetische Feld gesprochen, wobei jedes seine eigene Ursache, Form und Richtung hat.
- Wissenschaftler*innen verwenden den Begriff „elektromagnetisches Feld“ (kurz: EM-Feld), um die Kombination dieser beiden Felder zu benennen.
- Aber lass dich nicht verwirren! Das elektromagnetische Feld hat keine Richtung wie das elektrische und das magnetische Feld und wird daher auch nicht durch einen der Pfeile in der Abbildung dargestellt! Der Ausdruck "elektromagnetisches Feld" bedeutet einfach "die kombinierte Wirkung des elektrischen und des magnetischen Feldes".

2) Erklärung durch Lehrperson

Nun kann das elektromagnetische Feld genauer besprochen werden. Mit den Schüler*innen sollte zunächst wiederholt werden, dass sie bereits das elektrische Feld, welches durch die Oberflächenladungen entsteht, und das magnetische Feld, welches durch den Stromfluss im Leiter zustande kommt, kennengelernt haben. Neu hinzu kommt nun die Kombination der beiden Feldern: Gemeinsam ergeben das magnetische und das elektrische Feld das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand (siehe Abbildung 60) hergeleitet werden: Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss ebenfalls senkrecht darauf einzeichnen²⁹.

Mit den Schüler*innen sollte besprochen werden, dass die Energie von der Batterie durch das elektromagnetische Feld bis zum Energieumwandler übertragen wird. Dies kann meist direkt an der Energieumwandlung beobachtet werden (z. B. Lämpchen leuchtet).

An dieser Stelle kann das Textblatt 2.3 ausgegeben werden, um Abbildung 61 gemeinsam zu besprechen.

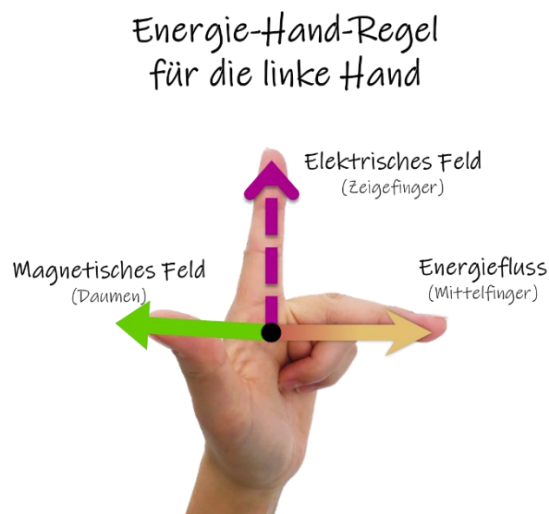


Abbildung 60: Energie-Hand-Regel für die linke Hand.

²⁹ Es ist wesentlich, dass hier die Linke-Hand-Regel und nicht die Rechte-Hand-Regel verwendet wird, da in diesem Unterrichtsdesign durchwegs die physikalische Stromrichtung (Elektronenflussrichtung vom Minus- zum Pluspol der Batterie) verwendet wird.

3) Übungen zur Energie-Hand-Regel



Die Energie-Hand-Regel für die linke Hand sollte unbedingt mit den Schüler*innen an zwei oder drei Stellen anhand Abbildung 61 eingeübt werden. Manche Schüler*innen sind vielleicht mit der Rechten-Hand-Regel vertraut und müssen sich hier ggf. umgewöhnen. Als Hilfestellung bietet es sich daher an, auf die Fingerspitzen die Abkürzungen der Felder (El, B, En) und zu schreiben.

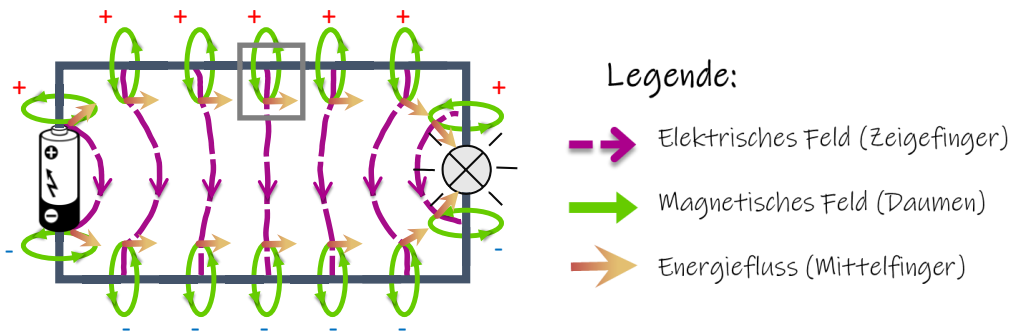


Abbildung 61: Konstruktion des Energieflusses im einfachen Stromkreis mithilfe des elektromagnetischen Feldes.

4) Simulation zum Elektromagnetischen Feld

Simulation zum EM-Feld:



Zur Visualisierung kann an dieser Stelle eine Simulation zum EM-Feld verwendet werden. Es wird empfohlen, die Anwendung zunächst mit den Schüler*innen zu öffnen und ihnen dann Zeit zu geben, sie näher zu erkunden.



schmidro.it.ch.io/etransp-m

5) Optionale Erweiterung: Poynting Vektor



Der Poynting Vektor beschreibt das Kreuzprodukt aus dem elektrischen und magnetischen Feld: $\vec{S} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right) (\vec{E} \times \vec{B})$.³⁰

³⁰ Mit besonders leistungsstarken Klassen kann die mathematische Beschreibung des Energieflusses besprochen werden. Dies könnte aber auch auf einige Schüler*innen abschreckend wirken, weshalb es sich anbietet, diese Erweiterung als Differenzierungsmöglichkeit einzubauen.

6) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann noch folgender Merksatz notiert werden:



Die Energieübertragung findet durch das **elektromagnetische Feld** statt. Dies kann mit dem **Energiefluss** beschrieben werden.

7) Kognitives Stoppschild

Die Interviewstudie hat ergeben, dass es wichtig ist, den Unterschied zwischen dem Energiefluss und dem Stromfluss explizit anzusprechen. Hierzu eignet sich wieder ein kognitives Stoppschild.



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Der Energiefluss beschreibt den Fluss der Energie, der Stromfluss den Fluss des Stromes!

8) Hands-On-Versuch zur Energieübertragung

Zur Übung und Festigung kann an dieser Stelle ein kleiner Versuch durchgeführt werden. Dazu wird ein einfacher Stromkreis mit einer Batterie und einem Ventilator aufgebaut. Die Schüler*innen sollten diesen Versuch möglichst selbst durchführen und ihre Ideen in einer Paararbeit diskutieren. Erst dann wird die Auflösung im Plenum besprochen.



Versuch 3: Das elektromagnetische Feld.

Material: 4,5 V Batterie, 2 Kabel mit Klemmen, 1 Ventilator

Durchführung: Die Batterie wird über zwei Kabeln mit dem Ventilator verbunden. Daraufhin beginnt der Ventilator sich zu drehen.

Hinweis: Statt Ventilatoren können auch kleine Lämpchen verwendet werden.

Aufgabenstellung: Betätigst du den Schalter bei einem Ventilator, so scheint dieser sofort anzugehen. Woher kommt die Energie, um den Ventilator zu betreiben und wie wird diese übertragen? Verwende für deine Erklärung das vorgestellte Konzept.

LÖSUNG: Die Energie wird über das EM-Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen.

HANDS-ON

Was hier schön verdeutlicht werden kann, ist, dass der Energieübertragungsprozess erst dann ermöglicht wird, wenn es sowohl ein E-Feld als auch ein B-Feld gibt. Das E-Feld kommt durch den Anschluss an eine Energiequelle zustande. Das B-Feld wird erst durch einen Stromfluss

(AC oder DC) hervorgerufen. Erst wenn diese Bedingungen bestehen, kann Energie durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen werden!

9) Optionale Erweiterung: Mind-Map



Zur Erweiterung kann an dieser Stelle ein Mind-Map von den Schüler*innen erstellt werden. Es bietet sich an, dieses später als Deckblatt für die Unterlagen zu verwenden. Die Schüler*innen sollen alle bisher besprochenen Begriffe zu Papier bringen und miteinander verknüpfen, um eine Hilfestellung für künftige Aufgaben zu haben. Zum Schluss können die wichtigsten Begriffe mit einem Farbstift markiert werden. Es ist wichtig für diese Aktivität genug Zeit einzuplanen.

Block 3: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II

Der dritte und letzte Block dieses Unterrichtsdesigns umfasst zwei Unterrichtseinheiten zu je 50 Minuten. Ein Überblick der behandelten Inhalte ist in Tabelle 56 zu sehen.

Tabelle 56: Inhalte zu Block 3, Sequenz 3.1-3.2

Inhalte		Materialien
3.1	Gleich- vs. Wechselstromkreise	<i>PPT, Video zum Wechselstromkreis, ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad)</i>
3.2	Energieerhaltung und Prozess der Energieübertragung	<i>PPT, Textblatt 3.2</i>

In diesem Abschnitt soll mit den Schüler*innen besprochen werden, dass die Energieübertragung sowohl in Gleich- als auch in Wechselstromkreisen erfolgen kann.

3.1 Gleich-vs. Wechselstromkreise

Die Schritte, für die Durchführung der Sequenz 3.1 in Block 3, sind in Tabelle 57 ersichtlich:

Tabelle 57: Überblick über die Schritte zu Block 3, Sequenz 3.1

Schritte		Materialien
1)	Wiederholung und Vertiefung der Energieübertragung mittels EM-Felder	<i>PPT</i>
2)	Erklärung durch Lehrperson: Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen	<i>PPT</i>
3)	Video zum Wechselstromkreis	<i>ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad)</i>
4)	Optionale Erweiterung: Wechselstromkreise mittels EM-Wellen beschreiben	
5)	Formulierung eines Merksatzes	

1) Wiederholung und Vertiefung der Energieübertragung mittels EM-Felder

Mit den Schüler*innen wird zunächst wiederholt, dass ein elektrisches System aus einer Energiequelle und einem Energieumwandler besteht. Außerdem wird manchmal ein Übertragemedium (z. B. Leiterkabel) benötigt. Die Energiequelle (z. B. Batterie) pumpt Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche, die ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter hervorrufen. Bei einem geschlossenen Stromkreis entsteht außerdem ein Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld um den Leiter erzeugt. Gemeinsam ergeben das elektrische und das magnetische Feld um

den Leiter das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden (siehe Abbildung 60).



Die Schüler*innen sollen an dieser Stelle die Richtung des Energieflusses mit Hilfe der Energie-Hand-Regel an einer Stelle im Stromkreis herleiten, um die Inhalte der letzten Einheit zu wiederholen.

2) Erklärung durch Lehrperson: Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen

Ergänzt wird nun die Unterscheidung zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen. Wir empfehlen dafür die folgende Formulierung zu wählen: „In Gleichstromkreisen bewegen sich die Elektronen im Leiterinneren³¹ gerichtet vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle. Bei Wechselstromkreisen hingegen bewegen sie sich hin- und her“ (siehe Abbildung 62).

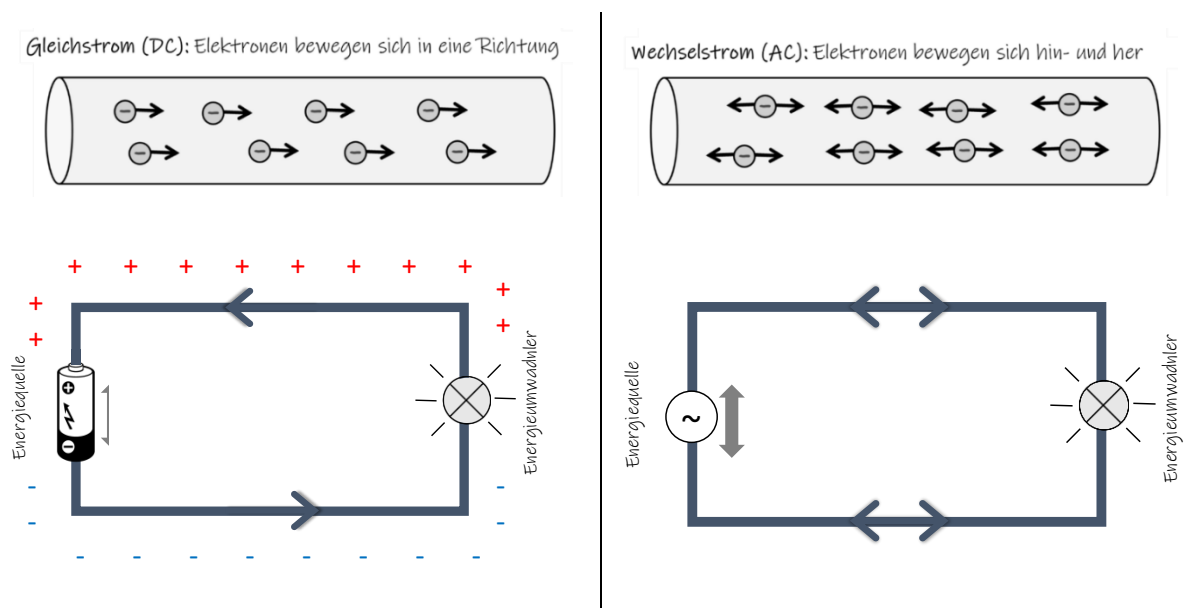


Abbildung 62: Gegenüberstellung eines Gleichstrom- und Wechselstromkreises. Oben ist jeweils ein Ausschnitt des Leiterkabels zu sehen, unten der geschlossene Gleich- bzw. Wechselstromkreis. Die Stromrichtung I ist mit grauen Pfeilen markiert.

Einigen Schüler*innen ist diese Unterscheidung vielleicht schon von früheren Unterrichtsstunden bekannt. Es ist dennoch essenziell, dass dieser Punkt nicht übersprungen wird, da davon ausgegangen werden kann, dass mindestens eine*n Schüler*in den Gleich- und Wechselstromkreis nicht klar voneinander unterscheiden kann.

³¹ Es ist wichtig, immer wieder mit den Schüler*innen einzuüben, dass die Elektronen im Leiterinneren den Stromfluss bilden. Diese sind von den stationären Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche zu unterscheiden.

Zum Einüben des Wechsels zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen sollten gezielte Schritt-für-Schritt Fragen gestellt werden.

Frage 1: Was verändert sich beim magnetischen Feld, wenn die Energiequelle umgepolt wird?

Antwort: Der Elektronenfluss im Leiterinneren verläuft immer vom Minus- zum Pluspol. Wird die Batterie also umgedreht, kehrt sich auch der Elektronenfluss um. Mithilfe der Linken-Hand-Regel kann die Richtung des Magnetfeldverlaufs bestimmt werden: Der Daumen zeigt in Richtung des Elektronenflusses und die übrigen Finger krümmen sich um den Leiter und zeigen damit die Richtung des Magnetfeldes an. Das Magnetfeld verläuft jetzt also andersherum.

Frage 2: Was verändert sich beim elektrischen Feld, wenn die Energiequelle umgepolt wird?

Antwort: Wenn die Batterie umgedreht wird, verteilen sich die Oberflächenladungen auch anders: Am positiven Pol der Batterie werden positive Oberflächenladungen, am negativen Pol der Batterie werden negative Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt. Dies führt zu einer Umkehrung des elektrischen Feldes, das immer von den positiven zu den negativen Ladungen verlaufen muss.

Frage 3: Was verändert sich beim Energiefluss, wenn die Energiequelle umgepolt wird?

Antwort: Wenn die Batterie umgedreht wird, kehrt sich die Richtung des elektrischen und magnetischen Feldes um (siehe **Frage 1** und **2**). Mithilfe der Energie-Hand-Regel für die Linke Hand kann nun die Richtung des Energieflusses bestimmt werden: Der Daumen zeigt in Richtung des Magnetfeldes, der Zeigefinger in Richtung des elektrischen Feldes und der Mittelfinger in Richtung des Energieflusses. Da sich sowohl die Richtung des elektrischen als auch des magnetischen Feldes umgekehrt haben, zeigt der Energiefluss weiterhin in dieselbe Richtung: von der Energiequelle zum Energieumwandler.

Mit den Schüler*innen kann nun besprochen werden, dass ein realer Wechselstromkreis in der Regel nicht aus einer Batterie besteht, die man ständig ein- und ausbauen muss. Stattdessen polt die Wechselstromquelle von selbst 100-mal in der Sekunde um. Dafür wird ein eigenes Schaltsymbol verwendet (siehe Abbildung 62).

3) Video zum Wechselstromkreis



Video zum Wechselstromkreis: Zur Visualisierung des Wechselstromkreises kann an dieser Stelle ein Videoausschnitt des YouTube Kanals ‚Veritasium‘ mit den Schüler*innen geschaut werden. Dabei sollte das Video immer wieder gestoppt werden, um die Inhalte genau mit der Klasse zu besprechen.

4) Optionale Erweiterung: Wechselstromkreise mittels EM-Wellen beschreiben



Zur Erweiterung kann an dieser Stelle mit den Schüler*innen besprochen werden, dass im Wechselstromkreis von einer elektromagnetischen Welle die Rede ist, die sich von der Energiequelle zum Energieumwandler ausbreitet und dadurch Energie überträgt. Dass dies auch in kabellosen Systemen stattfinden kann, ist nur noch ein kleiner Schritt.

5) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann anschließend folgender Merksatz festgehalten werden:



Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld erfolgt sowohl bei **Gleich-** als auch **Wechselstromkreisen**.

3.2 Energieerhaltung und Prozess der Energieübertragung

Die Schritte, für die Durchführung der Sequenz 3.2 in Block 3, sind in Tabelle 58 ersichtlich:

Tabelle 58: Überblick über die Schritte zu Block 3, Sequenz 3.2

Schritte		Materialien
1)	Erklärung durch Lehrperson: Energieerhaltung	
2)	Veranschaulichung der Energieübertragung	<i>PPT</i>
3)	Übungen zur Energieerhaltung und -übertragung	
4)	Formulierung eines Merksatzes	
5)	Erklärung durch Lehrperson: Prozess der Energieübertragung	
6)	Formulierung eines Merksatzes	
7)	Rucksackmodell	<i>PPT</i>
8)	Übung zum Wechselstromkreis	

1) Erklärung durch Lehrperson: Energieerhaltung

In dieser Sequenz wird der Energieerhaltungssatz besprochen und auf das Konzept angewendet. Den Schüler*innen wird dafür erklärt, dass die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler durch das elektromagnetische Feld stattfindet. Dabei sollte möglichst die folgende Formulierung gewählt werden: „Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht (in einem idealen Stromkreis) der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird (Energieerhaltung).“ Wichtig ist dabei zu betonen, dass in der Realität wird ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Dies bedeutet aber nicht, dass die Energie „verbraucht“ wird.

2) Veranschaulichung der Energieübertragung

Zur Veranschaulichung kann an dieser Stelle ein Bild eines elektrischen Föhns gezeigt werden. Die Schüler*innen werden im Plenum gefragt, wie man an diesem Föhn erkennen kann, dass Energie übertragen wurde. Die Schüler*innen werden darauf unterschiedliche Antworten geben, beispielsweise „er lässt sich einschalten“ oder „er bläst warme Luft heraus“. Dies wird folgendermaßen interpretiert: „Wir können anhand der Wirkung am Energieumwandler erkennen, dass Energie übertragen wurde. Dies geschieht mithilfe des elektromagnetischen Feldes. Alternativ kann eine elektrische Zahnbürste gezeigt werden. Wird diese auf die Ladestation gestellt und ist diese mit der Steckdose verbunden, so leuchtet in der Regel eine LED auf, die

kennzeichnet, dass Energie übertragen wird. Sind ausreichende Materialien vorhanden, kann dies auch in Kleingruppen beobachtet und besprochen werden.

3) Übungen zur Energieerhaltung und -übertragung



Zum Üben können die Schüler*innen weitere Energieumwandler nennen und beschreiben, woran man die Energieübertragung erkennen kann. Beispiele: Elektrischer Föhn, AirPods, Glätteisen, ...

4) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann nun folgender Merksatz aufgeschrieben werden:



Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie **umgewandelt** (z. B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).

5) Erklärung durch Lehrperson: Prozess der Energieübertragung

Im nächsten Schritt lernen die Schüler*innen mehr über den Prozess der Energieübertragung. Die Lehrperson erklärt, dass die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler durch das elektromagnetische Feld stattfindet. Dies geschieht in Lichtgeschwindigkeit, also sehr schnell.

6) Formulierung eines Merksatzes

Die Schüler*innen können dazu den folgenden Merksatz im Heft eintragen:



Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld findet in Lichtgeschwindigkeit statt.

7) Rucksackmodell

Da das sogenannte ‚Rucksackmodell‘³² (siehe Abbildung 63) eine gängige Vorstellung bei Schüler*innen ist, wird anschließend auf die Bedeutung der Elektronen im elektrischen Stromkreis eingegangen. Die Schüler*innen sollen erkennen, dass Elektronen für die Energieübertragung zwar wichtig, aber nicht ausschließlich dafür verantwortlich sind. Vielmehr sind sie die Ursache des Magnetfeldes, das gemeinsam mit dem elektrischen Feld das elektromagnetische Feld formt, welches für die Energieübertragung erforderlich ist.

³² **Rucksackmodell:** Laut Härtel (2021) glauben einige Schüler*innen, dass die Elektronen im Stromkreis bei der Batterie mit Energie ‚betankt‘ werden und diese bis zum elektrischen Gerät tragen, wo sie ‚abgeladen‘ wird. Dann bewegen sie sich wieder zur Batterie, um erneut mit Energie ‚betankt‘ zu werden.

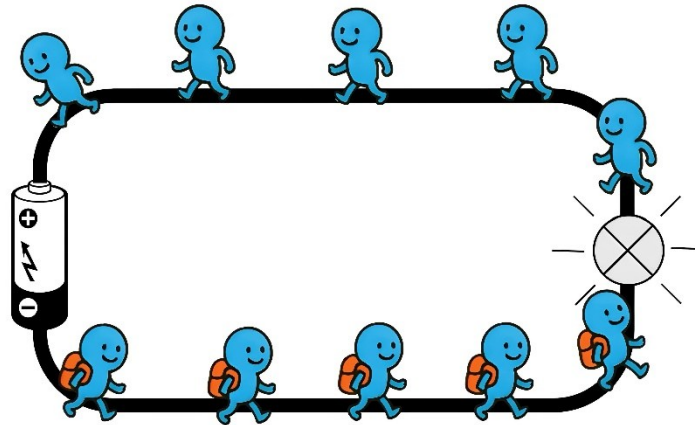


Abbildung 63: Rucksackmodell nach Härtel (Härtel, 1985). Zu sehen sind die Elektronen als kleine Wesen, die an der Batterie mit Energie beladen werden. Diese Energiepakete laden sie am Energieumwandler ab. Anschließend gehen die kleinen Wesen wieder zurück zur Batterie, um neu beladen zu werden.³³

Zunächst wird mit den Schüler*innen besprochen, dass sich die Elektronen im Leiterinneren bei einem geschlossenen Stromkreis mit einem ‚Bummeltempo‘ von $5 \times \frac{10^{-5}m}{s}$ vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle bewegen.

Anschließend werden die Schüler*innen gebeten, auf folgende Aussage zu antworten, indem sie das neu erlernte Konzept verwenden:

Frage : Manche Leute behaupten, dass die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich sind, indem sie die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler transportieren. Haben diese Leute Recht?

Antwort: Nein, denn die Energieübertragung findet durch das elektromagnetische Feld statt. Die Elektronen sind nur insofern wichtig, dass sie durch ihre Bewegung ein Magnetfeld hervorrufen.

³³ Die Abbildung wurde aus bildrechtlichen Gründen in dieser Arbeit durch eine inhaltsgleiche Darstellung ersetzt.

8) Übung zum Wechselstromkreis

Darüber hinaus kann noch eine Übung mit den Schüler*innen zum Wechselstromkreis gemacht werden:



Frage: In Wechselstromkreisen bewegen sich die Elektronen hin und her. Erkläre, warum die Elektronen auch in diesem Fall nicht für die Energieübertragung verantwortlich sein können.

Antwort: Die Elektronen nahe bei der Energiequelle kommen bei einem Wechselstromkreis niemals am Energieumwandler an, sondern bewegen sich nur hin und her. Dadurch verursachen sie ein wechselndes Magnetfeld, welches gemeinsam mit dem elektrischen Feld ein EM-Feld formt. Durch das EM-Feld kann die Energie übertragen werden.

6.2.2 Zielsetzung des LLAs

Das inhaltliche Ziel dieses LLAs ist es, das Thema Energieübertragung für Schüler*innen der Sekundarstufe II verständlich zu machen. Um dies zu erreichen, sollen die Lehrenden die Konzeptideen gemäß der Lehrer*innenhandreichung in ihrem Unterricht implementieren.

Zur Überprüfung der Zielerreichung werden zwei Methoden angewandt. Erstens wird die Leistung der Schüler*innen bei einem Wissenstest im Prä- und Posttestformat bewertet. Dieser Vergleich ermöglicht eine objektive Messung des Lernfortschritts und zeigt, in welchem Maße die Schüler*innen die Lerninhalte verinnerlicht haben. Zweitens wird das Feedback der beteiligten Lehrpersonen im Rahmen durchgeführter Interviews herangezogen. Diese qualitative Methode bietet tiefere Einblicke in die praktische Anwendbarkeit und die Effektivität des LLAs aus Sicht der Lehrenden.

Durch diese zweigleisige Überprüfung können sowohl quantitative als auch qualitative Daten gesammelt werden, die ein umfassendes Bild über die Wirksamkeit des LLAs zeichnen. So kann sichergestellt werden, dass die gesetzten Lehr- und Lernziele erreicht und gegebenenfalls notwendige Anpassungen vorgenommen werden können.

6.2.3 Methodische Ansätze und Materialien

In diesem LLAs wird bewusst auf Methodenvielfalt verzichtet, um ein vergleichbares Unterrichtssetting zwischen den teilnehmenden Klassen sicherzustellen und somit die Validität der Ergebnisse zu gewährleisten. Obwohl beispielsweise Hattie (2015) in seiner umfassenden Meta-Analyse zeigt, dass verschiedene Unterrichtsmethoden den Lernerfolg der Schüler*innen unterschiedlich beeinflussen können, liegt der Schwerpunkt dieser Studie auf den inhaltlichen

Aspekten des LLAs. Dazu müssen vergleichbare Bedingungen geschaffen werden, um die inhaltlichen Fragestellungen präzise zu untersuchen. Den Lehrpersonen soll es später frei bleiben, jene Methoden zu wählen, die am besten zu ihren jeweiligen Klassen passen.

Designrichtlinien bezüglich der Methodik:

Der Fokus liegt auf einem lehrer*innenzentrierten Unterricht, der durch Hands-on-Versuche, eine Mind-Map-Aktivität und den Einsatz eines Concept-Cartoons ergänzt wird. Die teilnehmenden Lehrpersonen sollen sich genau an die Lehrer*innenhandreichung halten und möglichst nicht davon abweichen. Darüber hinaus sollen sie kontinuierlich Aufzeichnungen (in Form von handschriftlichen Notizen oder Sprachaufzeichnungen) darüber führen, was gut funktioniert hat und was nicht, um diese Informationen für die Nachbesprechung bereitzuhalten.

Designrichtlinien bezüglich der Materialien:

Die teilnehmenden Lehrpersonen erhalten eine Lehrer*innenhandreichung, die durch entsprechende Arbeitsblätter (inklusive Musterlösungen) und einer PowerPoint-Präsentation (PPT) ergänzt wird. Alle Materialien werden sowohl digital als auch analog (mit Ausnahme der PPT) zur Verfügung gestellt.

Das vorliegende Unterrichtsdesign ist so konzipiert, dass die Durchführbarkeit auch für Schulen mit begrenztem Budget realisierbar ist. Die Hands-on-Versuche sind mit minimalem Materialaufwand durchführbar, was die Umsetzung erleichtert. Für die Durchführung im Rahmen dieser Implementationsstudie stehen den teilnehmenden Klassen alle Versuchsmaterialien zur Verfügung.

Obwohl das Unterrichtsdesign einige digitale Materialien beinhaltet, ist deren Einsatz nicht zwingend erforderlich. Für Schulen ohne digitale Endgeräte werden alternative Materialien bereitgestellt, um sicherzustellen, dass alle Schüler*innen gleichermaßen vom LLA profitieren können. Eine Übersicht der Materialien für dieses LLA findet sich in der nachfolgenden Tabelle:

Tabelle 59: Übersicht der benötigten und optionalen Materialien für die Durchführung des LLAs.

Benötigte Materialien:	Optionale Materialien:
– Acht einfache Stromkreise mit Kabeln, einer Batterie, einem Lämpchen und ggf. einem Elektromotor – Acht bewegliche Kompassnadeln – Arbeitsblätter – Lehrer*innenhandreichung – Power-Point-Präsentation Digitale Materialien: https://phaidra.univie.ac.at/o:2154461	– Kärtchen mit elektrischen Geräten (kabellos / Kabelgebunden) – Kärtchen mit Zuordnung der Begriffe: (Energiequelle / Energieumwandler) – Fünf Widerstände (3,3 MΩ) – Eine Hochspannungsquelle (ca. 6,5 V) – Eine Strommesszange – je nach Verfügbarkeit bis zu acht elektrische Zahnbürsten mit Ladestation (inkl. LED-Licht)

6.2.4 Implementierung und Ablauf des LLAs

Vorbesprechung mit den Lehrpersonen:

Im Rahmen eines Vorbesprechungstermins (etwa ein bis zwei Wochen vor der Durchführung des LLAs) wurden mit allen teilnehmenden Lehrpersonen einzelne Besprechungen durchgeführt. Dabei wurden die Schritte zur Planung und Vorbereitung der Implementierung sowie der Zeitplan des LLAs detailliert besprochen.

Zu Beginn des Gesprächs wurde den Lehrpersonen für ihre Teilnahme an der Studie zur Energieübertragung in elektrischen Systemen gedankt. Den Lehrpersonen wurde ein Infoblatt ausgehändigt, das alle wichtigen Informationen zur Durchführung des LLAs enthielt. Zusätzlich wurde ihnen die Lehrer*innenhandreichung mit allen relevanten Unterrichtsmaterialien sowie eine Kiste mit den Versuchsmaterialien und ausgedruckten Arbeitsblättern (siehe Abbildung 64) überreicht.



Abbildung 64: Kisten mit Versuchsmaterialien für die Durchführung des LLAs.

Der Zeitplan (siehe Abbildung 65) der Durchführung des LLAs wurde ebenfalls vorgestellt und ausführlich mit den teilnehmenden Lehrpersonen besprochen. Diese Vorbesprechungen fanden im September 2023 statt.

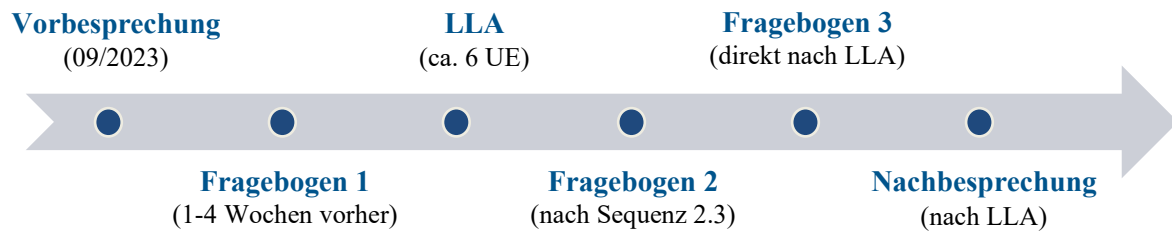


Abbildung 65: Zeitplan für die Durchführung des Lehr-Lern-Arrangement (LLA).

Die Lehrpersonen wurden angewiesen, den Fragebogen 1 (Prätest) etwa ein bis vier Wochen vor Beginn des Unterrichts nach dem LLAs an die Schüler*innen auszugeben. Dabei wurde betont, dass der Zeitpunkt nicht zu weit in der Vergangenheit liegen darf, um Effekte durch den dazwischenliegenden Unterricht zu vermeiden. Idealerweise sollte der Fragebogen in der vorherigen Unterrichtsstunde oder spätestens zwei Stunden vorher ausgegeben werden, um sicherzustellen, dass jede*r Schüler*in den Fragebogen ausfüllt, auch wenn jemand gefehlt hat.

Mit den Lehrpersonen wurde besprochen, dass die Durchführung des LLAs auf sechs Unterrichtseinheiten zu je 50 Minuten angelegt ist. Nach der Sequenz 2.3 sollte der Fragebogen 2 ausgegeben werden, um die Simulation zur Energieübertragung in elektrischen Systemen zu evaluieren. Am Ende des LLAs sollte der Fragebogen 3 (Posttest) ausgeteilt werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass dieser unmittelbar nach der letzten Unterrichtssequenz ausgefüllt wurde, um Verzerrungen durch zeitliche Verzögerungen zu vermeiden.

Nach Abschluss der letzten Unterrichtseinheit wurde ein Nachbesprechungstermin mit den teilnehmenden Lehrpersonen angesetzt. Ziel dieses Termins war es, Feedback zur Durchführung einzuholen und eventuelle Verbesserungsvorschläge zu besprechen.

Durchführung der Fragebögen:

Die Lehrpersonen erhielten im Infoblatt detaillierte Anweisungen zur Durchführung der Fragebögen mit den Schüler*innen. Im Folgenden werden diese kurz vorgestellt.

Durchführung des Prätests (Fragebogen 1):

Die Lehrpersonen wurden dazu instruiert, den Fragebogen 1 (Prätest) während der Unterrichtszeit von den Schüler*innen ausfüllen zu lassen, um sicherzustellen, dass dieser eigenständig und ohne zusätzliche Hilfsmittel bearbeitet wurde. Wie oben beschrieben, sollte der Fragebogen spätestens vier Wochen vor der Durchführung des LLAs an die Schüler*innen ausgegeben werden, idealerweise ein bis zwei Unterrichtseinheiten vor der ersten Stunde der Studie.

Die Lehrpersonen wurden gebeten, den Schüler*innen klarzumachen, dass sie den Fragebogen ehrlich, eigenständig und vollständig ausfüllen sollten, da es erfahrungsgemäß häufig zu einer hohen Ausfallquote bei Fragebögen kommt. Zudem sollten die Schüler*innen darüber informiert werden, dass ihre Antworten anonym erhoben wurden und keinen Einfluss auf ihre Physiknote hatten.

Es wurde empfohlen, genügend Zeit für die Durchführung einzuplanen und dabei bewusst nicht von einem ‚Test‘ zu sprechen, um den Schüler*innen nicht das Gefühl einer Prüfungssituation zu vermitteln.

Die Lehrpersonen wurden darüber aufgeklärt, dass die Schüler*innen zu Beginn des Fragebogens gemäß einer Anleitung einen Code erstellen sollten, um die Ergebnisse der Fragebögen 1 und 2 einer Person zuordnen zu können. Dies war wesentlich für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Der Fragebogen durfte nicht mit den Schüler*innen besprochen werden, da dies dem Unterrichtskonzept vorgreifen würde. Zudem wurden einige Fragen auch im zweiten Fragebogen erneut verwendet.

Am Ende des Fragebogens mussten die Schüler*innen ankreuzen, ob sie bereits eine Einverständniserklärung abgegeben hatten. Im Zweifelsfall sollten die Lehrpersonen eine Liste bereithalten, um dies zu überprüfen. Es bestand die Möglichkeit, die Einverständniserklärung in Einzelfällen nachzureichen. Nur jene Antworten wurden für die Auswertung herangezogen, bei denen eine Einverständniserklärung vorlag. Abgaben ohne Einverständnis wurden gelöscht.

Reflexion der einzelnen Stunden durch die Lehrperson:

Die teilnehmenden Lehrpersonen wurden gebeten, ein Tagebuch (entweder schriftlich oder als Audionachricht) über jede Stunde zu führen. Dafür konnten sie sich an den folgenden Leitfragen orientieren:

- *Was hat in dieser Stunde gut funktioniert? Wo gab es Schwierigkeiten?*
- *Wie ging es mir während der Stunden? Wie ging es den Schüler*innen?*
- *Waren die Materialien nützlich oder sollten Sie verändert werden (wenn ja, in welcher Form)?*

Die Aufzeichnungen sollten vor dem Nachbesprechungstermin an die Studienleitung geschickt werden, idealerweise direkt nach jeder Stunde. Diese Aufzeichnungen dienten als Grundlage für das Gespräch am Ende des LLAs.

Durchführung des Fragebogens 2 zur Simulation:

Die Lehrpersonen wurden darüber informiert, dass während der Unterrichtssequenz ‚2.3 Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss‘ von den Schüler*innen eine neu entwickelte Simulation verwendet werden sollte. Im Anschluss daran sollte ein kurzer Fragebogen zur Evaluation an die Schüler*innen ausgegeben werden.

Durchführung des Posttests (Fragebogen 3):

Die Lehrpersonen wurden darüber informiert, dass der Fragebogen 3 (Posttest) erneut während der Unterrichtszeit ausgefüllt werden sollte, um sicherzustellen, dass die Schüler*innen ihn selbstständig und ohne Hilfsmittel bearbeiten. Wie oben beschrieben, musste der Fragebogen spätestens vier Wochen nach der Durchführung des LLAs an die Schüler*innen ausgegeben werden, idealerweise jedoch direkt im Anschluss an die letzte Unterrichtssequenz der Studie. Es wurde erneut betont, dass den Schüler*innen klargemacht werden sollte, den Fragebogen ehrlich, eigenständig und vollständig auszufüllen. Zudem mussten die Schüler*innen darüber informiert werden, dass ihre Antworten anonym seien und keinen Einfluss auf ihre Physiknoten hätten.

Für die Durchführung des Fragebogens sollte ausreichend Zeit eingeplant werden. Um bei den Schüler*innen nicht den Eindruck einer Testsituation zu erwecken, wurde empfohlen, nicht von einem ‚Test‘ zu sprechen. Die beiden Fragebögen durften erst nachbesprochen werden, wenn alle Schüler*innen der teilnehmenden Schule den Posttest absolviert hatten, um zu verhindern, dass Schüler*innen anderer Klassen die richtigen Antworten verrieten.

Strukturierung des LLAs

Die Lehrpersonen wurden bereits im Rahmen des Vorbesprechungstermins umfassend über den Aufbau und die Inhalte des LLAs informiert. Dabei wurde auch die in Abschnitt 6.2.1 beschriebene Lehrer*innenhandreichung ausführlich erläutert.

Im Zuge dessen erhielten die Lehrpersonen einen Überblick über das LLA, das aus sechs Unterrichtssequenzen mit insgesamt sechs Unterrichtseinheiten (UE) besteht. Thematisch gliedert es sich durch die Überschriften ‚Elektrische Energieübertragungssysteme‘ (ca. 1 UE), ‚Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen)‘ (ca. 3 UE) und ‚Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung)‘ (ca. 2 UE). Die Lehrer*innenhandreichung bietet eine fachliche Strukturierung, erläuternde Hintergrundinformationen sowie mögliche Formulierungen für den Unterricht. Eine Unterrichtseinheit umfasst jeweils 50 Minuten (siehe Tabelle 60).

Tabelle 60: Übersicht der Inhalte des LLAs, unterteilt in drei Blöcken.

Block 1	Elektrische Energieübertragungssysteme	ca. 1 UE
1.1	Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme	
1.2	Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium	
Block 2	Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I	ca. 3 UE
2.1	Das magnetische Feld	
2.2	Das elektrische Feld und die Oberflächenladungen	
2.3	Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss	
Block 3	Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II	ca. 2 UE
3.1	Gleich- vs. Wechselstromkreise	
3.2	Energieerhaltung und Prozess der Energieübertragung	

6.3 Untersuchungsdesign und -methodik

Das Untersuchungsdesign dieser Studie zur Evaluation eines LLAs zur Energieübertragung in elektrischen Systemen berücksichtigt mehrere zentrale Aspekte, die im Folgenden näher erläutert werden. Zunächst werden die Leitfragen und Hypothesen vorgestellt (siehe Abschnitt 6.1.4). Es folgt die Beschreibung der Auswahl der Studienteilnehmer*innen (siehe Abschnitt 6.1.5), einschließlich relevanter Klassenmerkmale und der angewandten Rekrutierungsstrategie. Die eingesetzten Methoden der Datenerhebung (Fragebögen und Lehrer*inneninterviews) werden im Abschnitt 6.1.6 ausführlich beschrieben. Anschließend wird die Vorgehensweise bei der Datenanalyse erläutert (siehe Abschnitt 6.1.7), einschließlich quantitativer und qualitativer Verfahren sowie der berücksichtigten Gütekriterien. Abschließend behandelt Abschnitt 6.1.9 die ethischen Grundlagen, die während der gesamten Studie eine zentrale Rolle spielten.

6.3.1 Leitfragen für die Implementationsstudie

Für die Implementationsstudie wurden zwei Leitfragen entwickelt, die zentrale Teilaspekte der übergeordneten Forschungsfrage aus dem Forschungszyklus (siehe Abschnitt 4.2) aufgreifen. Die Leitfragen dienen der inhaltlichen und methodischen Strukturierung dieses Projektabschnitts und werden am Ende des Kapitels (siehe Abschnitt 6.5.3) diskutiert.

- *Wie sieht ein Unterrichtsdesign zur Energieübertragung in elektrischen Systemen aus, welches für Schüler*innen der Sekundarstufe II verständlich und anwendbar ist?*

Die erste Leitfrage deckt sich inhaltlich mit einer der beiden zentralen Forschungsfragen dieses Projekts (siehe Textbox 6 in Kapitel 4.2) und zielt darauf ab, ein Unterrichtsdesign zu entwickeln und zu erproben, das geeignet ist, das Verständnis der Schüler*innen für Energieübertragung in elektrischen Systemen zu fördern.

Hypothese: Schüler*innen, die nach dem neuen Unterrichtsdesign unterrichtet werden, zeigen nach der Intervention signifikant höhere Leistungen in Verständnisaufgaben zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen im Vergleich zu vorher (gemessen durch Prä- und Posttests).

Die zugehörige Hypothese untersucht die Ausgangsvorstellungen der Schüler*innen zu Beginn der Intervention und prüft, inwieweit der Unterricht dazu beiträgt, diese zu verändern. Es wird erwartet, dass die Schüler*innen nach dem Unterricht ein klareres und präziseres Verständnis zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen entwickelt haben, was zu einer signifikanten Steigerung der Leistung beim Posttest im Vergleich zum Prätest führen sollte.

- *Welche Veränderungen im Verständnis der Schüler*innen zur Energieübertragung zeigen sich vor und nach der Durchführung des Lehr-Lern-Arrangements (LLAs)?*

Die zweite Leitfrage zielt darauf ab, die qualitativen Veränderungen in den Vorstellungen der Schüler*innen zu untersuchen, die durch den Unterricht hervorgerufen werden. Indem die Vorstellungen vor und nach dem Unterricht verglichen werden, kann festgestellt werden, welche spezifischen Schüler*innenvorstellungen existieren und wie effektiv der Unterricht dabei ist, diese zu korrigieren. Dies ermöglicht es, den Einfluss des Unterrichtsdesigns auf das konzeptionelle Verständnis der Schüler*innen detailliert zu analysieren.

Hypothese 1: Vor dem Unterricht haben Schüler*innen häufige Fehlvorstellungen zur Energieübertragung in elektrischen Systemen, die nach dem Unterricht signifikant reduziert sind.

Diese Hypothese untersucht die Ausgangsvorstellungen der Schüler*innen vor Beginn des Unterrichts und prüft, inwieweit der neue Unterrichtsansatz dazu beiträgt, diese Fehlvorstellungen zu korrigieren. Es wird erwartet, dass die Schüler*innen nach dem Unterricht ein klareres und präziseres Verständnis entwickeln, was zu einer signifikanten Reduktion der ursprünglichen Fehlvorstellungen bezüglich der Energieübertragung in elektrischen Systemen führt.

Hypothese 2: Der Posttest zeigt, dass Schüler*innen nach dem Unterricht ein differenzierteres und wissenschaftlich korrektes Verständnis der Energieübertragung in elektrischen Systemen haben.

Die zweite Hypothese geht davon aus, dass der Unterricht nicht nur Fehlvorstellungen reduziert, sondern auch das gesamte Verständnis der Schüler*innen für das Thema vertieft und differenziert. Der Vergleich der Ergebnisse von Prä- und Posttests soll zeigen, dass die Schüler*innen nach dem Unterricht in der Lage sind, komplexere und wissenschaftlich korrekte Erklärungen zur Energieübertragung in elektrischen Systemen zu geben.

6.3.2 Auswahl der Studienteilnehmer*innen

Die Studie zur Evaluation des LLAs zur Energieübertragung in elektrischen Systemen wurde mit sieben AHS-Klassen der Sekundarstufe II im Zeitraum von Oktober 2023 bis Jänner 2024 durchgeführt. Eine Übersicht der teilnehmenden Klassen ist in Tabelle 61 zu sehen.

Tabelle 61: Übersicht der sieben teilnehmenden Klassen an der Studie.

Klasse	Lehrperson	Schule	Schultyp und -klasse	Anzahl Schüler*innen
1	SIM-1	1	7 RG	14
2	RIS-1	2	7 anw/bnw	12
3	RIS-2	2	7 adg	18
4	RIS-3	2	7 bdg	12
5	SEY-1	3	7 RG	26
6	SEY-2	3	7 G	15
7	KOV-1	4	7 G	31

Die Studie wurde mit sieben Klassen aus Wien durchgeführt, die von vier verschiedenen Lehrpersonen unterrichtet wurden. Insgesamt nahmen 128 Schüler*innen an der Studie teil, wie aus Tabelle 61 hervorgeht.

Die Rekrutierung der Lehrpersonen und Klassen erfolgte auf verschiedene Arten:

- 1) **Plus Lucis Fortbildungswoche:** Die erste Rekrutierungsmaßnahme fand während der Plus Lucis Fortbildungswoche statt, die vom 20. bis 22. Februar 2023 an der Fakultät für Physik der Universität Wien stattfand. Dort wurde aktiv für die Teilnahme an der Studie geworben.

- 2) **Persönliche Kontakte:** Zusätzlich wurden Lehrpersonen durch persönliche Kontakte angeworben. Zum Beispiel unterrichtet Lehrperson 1 an einem bilingualen Gymnasium, das bereits an der Interviewstudie beteiligt war.

Bei der Rekrutierung der Klassen wurde darauf geachtet, dass alle Schüler*innen die 11. Schulstufe (7. Klasse) besuchen. Die Lehrpersonen sollten nicht im ersten Dienstjahr sein und Offenheit gegenüber dem neuen Unterrichtsdesign mitbringen. Verschiedene Schultypen wurden ausgewählt, um eine möglichst diverse Ausgangslage zu gewährleisten. Die Abkürzungen der Schultypen sind wie folgt definiert:

RG: Realgymnasium

G: Gymnasium

anw/bnw: naturwissenschaftlicher Zweig

adg/bdg: darstellende Geometrie-Zweig

Zur Teilnahme an der Studie mussten alle teilnehmenden Schüler*innen eine Einverständniserklärung ihrer Erziehungsberechtigten vorlegen. Falls keine Einverständniserklärung vorlag, wurden den betroffenen Schüler*innen keine Fragebögen ausgehändigt. Diese Schüler*innen durften dennoch am Unterricht teilnehmen, um sicherzustellen, dass ihnen dadurch kein Nachteil entstand. Dies betraf jedoch nur einzelne Personen.

6.3.3 Datenerhebung

Die Datenerhebung während der Erprobung des LLAs im realen Klassensetting erfolgte auf zwei Arten: Einerseits wurden drei Fragebögen zu verschiedenen Zeitpunkten an die Schüler*innen ausgegeben (siehe dazu auch Abbildung 65). Andererseits wurden Einzelinterviews mit den teilnehmenden Lehrpersonen durchgeführt, wobei jeweils ein Vorbesprechungs- und ein Nachbesprechungstermin eingehalten wurde.

Fragebögen

a) Zweck und Struktur

Die Fragebögen wurden verwendet, um sowohl das Vorwissen der Schüler*innen als auch deren Erfahrungen und Rückmeldungen während und nach der Intervention zu erfassen. Es wurden drei Fragebögen entwickelt und ausgegeben, die jeweils spezifische Aspekte des LLAs behandelten. Die vollständigen Fragebögen sind in Anhang dieser Arbeit ersichtlich.

1. **Fragebogen 1 (Prätest):** Dieser wurde kurz vor der Intervention ausgegeben (maximal eine Woche vorher). Ziel war es, das Vorwissen der Schüler*innen zu erfassen. Der Fragebogen enthielt 12 Fragen, darunter drei Multiple-Choice-Fragen und neun offene Fragen (eine davon war eine Zeichenaufgabe).
2. **Fragebogen 2:** Dieser wurde nach der Sequenz 2.3 ausgegeben und diente der Erhebung der Nutzerfreundlichkeit der Simulation zur Energieübertragung in elektrischen Systemen, die in Kooperation mit Roman Binder von der ETH Zürich entwickelt wurde. Die Schüler*innen beantworteten 13 Fragen auf einer Likert-Skala und hatten zusätzlich die Möglichkeit, allgemeine Anmerkungen in einer offenen Frage zu hinterlassen.
3. **Fragebogen 3 (Posttest):** Dieser wurde spätestens eine Woche nach der Intervention ausgegeben. Er umfasste 15 Fragen, darunter drei Multiple-Choice-Fragen und zwölf offene Fragen, von denen zwölf identisch mit den Fragen aus dem Prätest waren. Die drei neu hinzugefügten Fragen umfassten Konzepte, die die Schüler*innen erst im Rahmen der Unterrichtssequenz gelernt hatten (beispielsweise zu den Oberflächenladungen). Zudem wurden anonymisiert Basisinformationen wie Interesse an Physik, letzte Physiknote, Geschlecht und Alter erfasst. Am Ende enthielt der Fragebogen zudem ein Abschlussfeedback mit drei offenen Fragen zum LLA:
 - Was hat dir besonders gut am Unterrichtskonzept gefallen?
 - Was sollte deiner Meinung nach am Unterrichtskonzept verbessert werden?
 - Was denkst du ist die Grundidee des Unterrichtskonzepts?

b) Inhalte der Fragebögen

Die Fragebögen 1 und 3 wurden auf Basis der Inhalte des Lehr-Lern-Arrangements (LLA) eigens erstellt. Sie umfassten Fragen zu allen drei Blöcken des LLAs und waren entsprechend gegliedert:

1. Elektrische Energieübertragungssysteme
2. Energieübertragung I
3. Energieübertragung II

c) Verteilung und Rücklaufquote

Die Fragebögen wurden von den Lehrpersonen der Klassen ausgeteilt, die zuvor detaillierte Anweisungen zur Durchführung erhalten hatten (siehe Abschnitt 6.2.4). Die Rücklaufquote der Fragebögen ist in Tabelle 62 ersichtlich.

6.3.4 Datenanalyse Fragebogen 1 und 3

6.3.4.1 Quantitative Analyse

Im Rahmen der quantitativen Analyse wurden die Daten aus den Prä- und Posttests der sieben teilnehmenden Klassen Schritt für Schritt ausgewertet. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Bereinigung der Fragebögen:

Zu Beginn der quantitativen Analyse wurden die Fragebögen bereinigt, indem nur jene Schüler*innen berücksichtigt wurden, die sowohl den Prä- als auch den Posttest vollständig ausgefüllt hatten. Schüler*innen, die dies nicht taten, wurden aus der Analyse ausgeschlossen. Des Weiteren wurde der Fragebogen mit dem Identifikationscode RIS-3_04ZH10 entfernt, da dieser nur teilweise beantwortet wurde. Nach diesen Bereinigungen standen insgesamt 106 Fragebögen für die quantitative Analyse zur Verfügung.

Die Anzahl der Schüler*innen pro Klasse, die für die quantitative Analyse berücksichtigt wurden, ist in Tabelle 62 dargestellt.

Tabelle 62: Übersicht der Schüler*innen, die den Fragebogen 1, Fragebogen 3 und den Fragebogen 1 und 3 ausgefüllt haben.

Klassenkürzel	Anzahl der Schüler*innen in der Klasse	Anzahl der Schüler*innen Fragebogen 1	Anzahl der Schüler*innen Fragebogen 3	Anzahl der Schüler*innen Fragebogen 1, 3
SIM-1	14	14	14	14
RIS-1	12	11	10	9
RIS-2	18	16	15	13
RIS-3	12	11	10	8
SEY-1	26	24	24	23
SEY-2	15	13	11	11
KOV-1	31	30	28	28
GESAMT	128	119	112	106

- **Klasse SIM-1:** Hier nahmen 14 Schüler*innen teil, die sowohl Fragebogen 1 als auch Fragebogen 3 vollständig ausfüllten.
- **Klasse RIS-1:** In dieser Klasse gab es 12 Schüler*innen, von denen 11 den Fragebogen 1 und 10 den Fragebogen 3 ausfüllten. Letztendlich konnten jedoch nur die Daten von 9 Schüler*innen für die Analyse verwendet werden, da sie beide Fragebögen vollständig beantwortet hatten.
- **Klasse RIS-2:** Von 18 Schüler*innen in dieser Klasse füllten 16 den Fragebogen 1 und 15 den Fragebogen 3 aus. Insgesamt wurden die Daten von 13 Schüler*innen berücksichtigt.

- **Klasse RIS-3:** Diese Klasse hatte 12 Schüler*innen, von denen 11 den Fragebogen 1 und 10 den Fragebogen 3 beantworteten. Letztendlich konnten nur die Daten von 8 Schüler*innen in die Analyse einfließen.
- **Klasse SEY-1:** Hier gab es 26 Schüler*innen, von denen 24 den Fragebogen 1 und ebenso viele den Fragebogen 3 ausfüllten. Es wurden die Daten von 23 Schüler*innen verwendet.
- **Klasse SEY-2:** In dieser Klasse nahmen 15 Schüler*innen teil, von denen 13 den Fragebogen 1 und 11 den Fragebogen 3 ausfüllten. Insgesamt konnten die Daten von 11 Schüler*innen berücksichtigt werden.
- **Klasse KOV-1:** Von den 31 Schüler*innen in dieser Klasse füllten 30 den Fragebogen 1 und 28 den Fragebogen 3 aus. Es wurden die Daten von 28 Schüler*innen in die Analyse einbezogen.

Die gesamte Stichprobe dieser Studie umfasste ursprünglich 128 Schüler*innen. Von diesen füllten 119 den Fragebogen 1 und 112 den Fragebogen 3 aus. Die übrigen Schüler*innen füllten die Fragebögen aus verschiedensten Gründen nicht aus. Dazu zählten unter anderem Krankmeldungen, schulische Entschuldigungen, private Gründe, fehlende Einverständniserklärungen oder eine generelle Nichtteilnahme an der Studie. Letztlich wurden die Daten von 106 Schüler*innen, die beide Fragebögen vollständig ausgefüllt hatten, für die quantitative Analyse berücksichtigt.

Fragen auswählen Teil 1:

In einem ersten Schritt der Frageauswahl wurden nur jene Fragen berücksichtigt, die sowohl im Prä- als auch im Posttest vorkamen. Dies führte zu einer Auswahl von 13 Items pro Fragebogen. Dabei wurden zweiteilige Fragen (z. B. F1_10a und b bzw. F3_12a und b) jeweils als eigenständige Items gezählt. Eine Übersicht aller Fragen, die zur Analyse herangezogen wurden, findet sich in der nachstehenden Tabelle 63:

Tabelle 63: Initiale Übersicht der Fragen, die für die quantitative Analyse des Prä- und Posttests herangezogen wurden. Die Abkürzung ‚MC‘ steht für ‚Multiple Choice‘.

Fragebogen 1 (F1) – Prätest	Fragebogen 3 (F3) – Posttest	Kurzbeschreibung Item
F1_1	F3_1	<i>Kabelgebundenes System</i>
F1_2	F3_2	<i>Kabelloses System</i>
F1_3	F3_3	<i>Energieumwandler</i>
F1_4	F3_4	<i>Energiequelle</i>
F1_5	F3_5	<i>Magnetisches Feld Definition</i>
F1_6	F3_6	<i>Magnetisches Feld (MC)</i>
F1_7	F3_9	<i>Felder um Stromkreis (MC)</i>
F1_8	F3_10	<i>Elektrisches Feld (MC)</i>
F1_9	F3_11	<i>Elektrisches Feld Definition</i>
F1_10a	F3_12a	<i>Weg der Energie (Zeichnung)</i>
F1_10b	F3_12b	<i>Weg der Energie (Begründung)</i>
F1_11	F3_13	<i>Gleich- und Wechselstrom</i>
F1_12	F3_14	<i>Elektrischer Föhn</i>

Fragen auswählen Teil 2

Im zweiten Schritt der Frageauswahl wurden nur jene Fragen berücksichtigt, die mit den Codes 0, 1, 2 oder 3 bewertet werden konnten. Daher wurden die Items F1_10b bzw. F3_12b und F1_12 bzw. F3_14 aus der quantitativen Analyse ausgeschlossen. Eine genaue Analyse dieser Fragen kann in Abschnitt 6.4.1.2 im Rahmen der qualitativen Analyse nachgelesen werden. Die aktualisierte Übersicht der Fragen, die zur Analyse herangezogen wurden, findet sich in der nachstehenden Tabelle:

Tabelle 64: Finale Übersicht der Fragen, die für die quantitative Analyse des Prä- und Posttests herangezogen wurden. Die Abkürzung ‚MC‘ steht für ‚Multiple Choice‘.

Fragebogen 1 (F1) – Prätest	Fragebogen 3 (F3) – Posttest	Kurzbeschreibung Item
F1_1	F3_1	<i>Kabelgebundenes System</i>
F1_2	F3_2	<i>Kabelloses System</i>
F1_3	F3_3	<i>Energieumwandler</i>
F1_4	F3_4	<i>Energiequelle</i>
F1_5	F3_5	<i>Magnetisches Feld Definition</i>
F1_6	F3_6	<i>Magnetisches Feld (MC)</i>
F1_7	F3_9	<i>Felder um Stromkreis (MC)</i>
F1_8	F3_10	<i>Elektrisches Feld (MC)</i>
F1_9	F3_11	<i>Elektrisches Feld Definition</i>
F1_10a	F3_12a	<i>Weg der Energie (Zeichnung)</i>
F1_11	F3_13	<i>Gleich- und Wechselstrom</i>

Umbenennung der Codes:

Für die Analyse wurden die Codes wie folgt umbenannt (siehe Tabelle 65):

Tabelle 65: Übersicht der neuen Codebezeichnungen für die quantitative Analyse des Prä- und Posttests.

Vorher	Nachher
0	1
1	1
2	2
3	3

Die Umbenennung wurde vorgenommen, da Fragen, die von den Schüler*innen nicht beantwortet wurden (vormals mit 0-weiß kodiert) im Rahmen der quantitativen Analyse als ‚nicht korrekt‘ (rot-1) interpretiert wurden.

Berechnung statistischer Kennwerte:

a) Berechnung der Mittelwerte $\bar{x}$, Standardabweichungen σ , Varianzen σ^2 und Standardfehler SE

Die Berechnung der Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen (σ), Varianzen (σ^2) und Standardfehler (SE) wurde durchgeführt, um grundlegende statistische Kennwerte zu ermitteln.

b) Ermittlung der Normalverteilung der Daten

Zur Überprüfung der Normalverteilung wurde der Shapiro-Wilk-Test angewendet. Hier wurde jeweils die Gesamtzahl der erreichten Punkte pro Schüler*in für die Analyse herangezogen. Der Shapiro-Wilk-Test zeigte sowohl im Prätest als auch im Posttest eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung (Prätest: $W(212) = .75, p < .001$; Posttest: $W(212) = .74, p < .001$). Da die p-Werte kleiner als α waren, wurde die Nullhypothese der Normalverteilung verworfen. Daher wurden für die weitere Analyse nicht-parametrische Tests gewählt, wie der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test und die Berechnung der Effektstärke nach Cohens d.

c) Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test:

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wurde angewendet, um die Wahrscheinlichkeit zu messen, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den Prä- und Posttestgruppen nur rein zufällig sind. In diesem Zusammenhang wird die statistische Signifikanz durch den sogenannten p-Wert bestimmt. Dies wurde mit der Statistik-Software R analysiert.

Dabei wurden einerseits für jedes einzelne Item die p-Werte ausgerechnet (Minimale Punktezahl = 1, Maximale Punktezahl = 3 → Mittelwert aller Schüler*innenantworten für den Prä- vs. den Posttest). Andererseits wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Gesamtpunktezahl, die beim Prä- und Posttest erreicht werden konnte ($P=33$), berechnet. Dabei wurden nur die Items berücksichtigt, die in beiden Test vorkommen und für die eine quantitative Analyse durchgeführt werden konnte (siehe Erklärung oben).

Die folgenden Hypothesen wurden in diesem Zusammenhang getestet:

- **Nullhypothese (H_0):** Es gibt keinen Unterschied zwischen den Gruppen; der Mittelwert des Prätests ist gleich dem Mittelwert des Posttests.
- **Alternativhypothese (H_1):** Es gibt einen Unterschied; der Mittelwert des Prätests ist vom Mittelwert des Posttests unterschiedlich.

Ein Ergebnis wurde als statistisch signifikant angesehen, wenn der p-Wert unter 0,05 lag. Lag der Wert also unter 0,05 konnte die Nullhypothese nicht verworfen werden. Dies war bei fast allen Items der Fall, mit Ausnahme von Item 8.

d) Effektstärke nach Cohen:

Rasch definiert die Effektstärke folgendermaßen:

„Das Effektstärkenmaß d ist die standardisierte Distanz zwischen zwei Stichprobenmittelwerten.“ (Rasch, 2021, S. 53)

Die Effektstärke nach Cohen (1988) wurde im Rahmen dieser Studie verwendet, um die standardisierte Differenz zwischen den Mittelwerten der beiden Gruppen (Prä- und Posttest) zu bestimmen.

Die Interpretation des d -Werts erfolgte nach folgenden Richtlinien:

- Ein d -Wert von 0 bedeutet, dass es keinen Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden Gruppen gibt.
- Ein kleiner d -Wert (z. B. 0,2) deutet auf einen kleinen Unterschied zwischen den Mittelwerten hin.
- Ein mittlerer d -Wert (z. B. 0,5) deutet auf einen moderaten Unterschied hin.
- Ein großer d -Wert (z. B. 0,8 oder größer) deutet auf einen großen Unterschied hin.

Der d -Wert ermöglicht es also, den Unterschied zwischen den Mittelwerten in einer Weise zu interpretieren, die unabhängig von den Einheiten der ursprünglichen Messungen ist. Das bedeutet, dass der d -Wert es ermöglicht, den Effektgröße unabhängig von der Skala der gemessenen Variablen zu verstehen, was ihn zu einem nützlichen Maß für den Vergleich von Gruppen macht.

Für die Berechnung wurde die folgende Formel herangezogen (Rasch, 2021, S. 53):

$$d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\hat{\sigma}_x} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}_{x_1}^2 + \hat{\sigma}_{x_2}^2}{2}}} \quad (8)$$

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$...empirische Mittelwerte der Stichproben

$\hat{\sigma}_x$...aus den Daten geschätzte Populationsstreuung

$\hat{\sigma}_{x_1}^2$...geschätzte Varianz der Stichprobe 1

$\hat{\sigma}_{x_2}^2$...geschätzte Varianz der Stichprobe 2

Beim Vergleich der Gesamtpunktezahl von Prä- und Posttest wurde ein d -Wert von 1,58 erzielt, was gemäß Cohens Konvention (1988) auf einen großen Effekt ($d > 0.8$) hinweist.

Darstellung der Ergebnisse:

Die Ergebnisse wurden in Form von Balkendiagrammen mit Fehlerbalken (Standardfehler) dargestellt, um die Unterschiede zwischen den Prä- und Posttestgruppen visuell zu verdeutlichen. Dies kann in Abschnitt 6.4.1 genau nachgelesen werden.

Tabelle 66: Übersicht der Anzahl der Schüler*innen, die den Fragebogen 1-3 ausgefüllt haben.

Klassenkürzel	Anzahl der Schüler*innen Fragebogen 1	Anzahl der Schüler*innen Fragebogen 2	Anzahl der Schüler*innen Fragebogen 3
SIM-1	14	12	14
RIS-1	11	0	10
RIS-2	16	0	15
RIS-3	11	12	10
SEY-1	24	25	24
SEY-2	13	14	11
KOV-1	30	26	28
GESAMT	119	89	112

Von insgesamt 128 Schüler*innen füllten 119 Schüler*innen den Fragebogen 1, 89 Schüler*innen den Fragebogen 2 und 112 Schüler*innen den Fragebogen 3 aus. Die Lehrperson RIS gab den Fragebogen 2 nur an eine ihrer Klassen aus, da ihr nach eigener Aussage die Zeit für die Durchführung fehlte. Nicht alle Fragebögen wurden von allen Schüler*innen ausgefüllt, was unter anderem auf Krankheitsfälle, versäumte Stunden oder in einzelnen Fällen auf die freiwillige Nichtteilnahme an der Studie zurückzuführen ist.

Lehrer*inneninterviews

a) Zweck und Struktur

Die Interviews mit den Lehrpersonen dienten dazu, tiefere Einblicke in die Umsetzung und Wahrnehmung des LLAs zu gewinnen. Es wurden sowohl Vorbesprechungen als auch ausführliche Nachbesprechungstermine mit den Lehrpersonen durchgeführt.

b) Interviewleitfaden

Die Nachbesprechungstermine folgten einem offenen Leitfadenschema und umfassten folgende Gliederung:

1. Rahmeninformationen: Genauer Durchführungszeitraum
2. Allgemeiner Eindruck
3. Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr
4. Durchführung von Block 1
5. Durchführung von Block 2
6. Durchführung von Block 3
7. Wie schätzt du das Material ein?

Optional:

8. Wie konzepttreu bist du deiner Einschätzung nach insgesamt vorgegangen?

c) Durchführung der Interviews

Die Interviews wurden zu den in Tabelle 67 angegebenen Zeitpunkten und Dauern durchgeführt.

Tabelle 67: Rahmenbedingungen zu den Nachbesprechungen mit den Lehrpersonen.

Kürzel Lehrperson	Durchführung Interview	Interviewdauer (Minuten)
SIM	27.11.2023	28:16
RIS	07.12.2023	52:29
SEY	19.01.2024	34:45
KOV	23.01.2024	43:47

6.3.4.2 Qualitative Analyse

Im Rahmen der Untersuchung wurde neben der quantitativen Analyse auch eine qualitative Analyse durchgeführt, da nicht alle Items für die quantitative Analyse berücksichtigt werden konnten (etwa weil einzelne Fragen nur im Posttest gestellt wurden und so kein Vergleich mit dem Prätest möglich war). Zudem liefert die qualitative Analyse der offenen Fragen tiefere Einblicke in die Denkstrukturen und Begründungsmuster der Schüler*innen, wie sie mit einer rein quantitativen Analyse nicht möglich wären.

Fragebogen und Items:

Der Prätest bestand aus 12 Fragen, der Posttest aus 15 Fragen, wobei 12 Fragen in beiden Tests identisch waren. Zu beachten ist, dass Item 10 im Prätest bzw. Item 12 im Posttest jeweils aus einer Teilfrage a) und b) besteht.

Wie bereits in Abschnitt 6.3.4.1 Quantitative Analyse beschrieben, wurden 11 der Fragen aus dem Prä- und Posttest quantitativ analysiert (für eine genaue Übersicht siehe Tabelle 64). Diese Fragen konnten miteinander verglichen werden, da sie demselben Kodierschema folgten.

Ausschluss von offenen Fragen:

Die Items F1_10b bzw. F3_12b (Begründung zur Frage, warum der Weg der Energie in Item F1_10a bzw. F3_12a so gezeichnet wurde) und F1_12 bzw. F3_14 (Frage zum elektrischen Föhn) wurden von der quantitativen Analyse ausgeschlossen, da es sich um offene Fragen handelte, die sehr individuell zu beantworten waren. Diese konnten daher nur qualitativ analysiert werden.

Zudem wurden die drei Items, die nur im Posttest vorkamen (Item F3_7, F3_8 und F3_15), gesondert analysiert, da hier kein Vergleich mit dem Prätest möglich war. Diese Fragen wurden nur im Posttest gestellt, da sie spezifisch auf das neue Unterrichtsdesign abgestimmt waren und beim Prätest kein Vorwissen der Schüler*innen vorausgesetzt werden konnte.

Übersicht der qualitativen Analyse:

Eine Übersicht aller Items, die aufgrund der oben beschriebenen Überlegungen für die qualitative Analyse herangezogen wurden, ist in Tabelle 68 zu sehen:

Tabelle 68: Übersicht der Fragen, die für die qualitative Analyse des Prä- und Posttests herangezogen wurden.

Fragebogen 1 (F1) Prätest	Fragebogen 3 (F3) Posttest	Kurzbeschreibung Item
F1_10b	F3_12b	<i>Weg der Energie (Begründung)</i>
F1_12	F3_14	<i>Elektrischer Föhn</i>
/	F3_7	<i>Kompassversuch</i>
/	F3_8	<i>Oberflächenladungen</i>
/	F3_15	<i>Rucksackmodell</i>

Analyseverfahren:

Für die Analyse wurde folgendermaßen vorgegangen:

Die Items F1_10b bzw. F3_12b und F1_12 bzw. F3_14 waren offene Fragen. Daher wurden die Begründungen in Kategorien gemäß einem induktiven Kodierleitfaden gefasst, um einen Überblick darüber zu erhalten, ob es bestimmte Mehrheiten unter den Antworten der Schüler*innen gab. Der Kodierleitfaden wurde anhand der Schüler*innenantworten erstellt, da die Fragen für diese Austestung eigens entwickelt wurden.

Items F3_7, F3_8 und F3_15 wurden mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) wie bereits im Kapitel X beschrieben, ausgewertet. Es wurden dieses Mal die folgenden Farbcodes (siehe Tabelle 69), analog zu Kapitel 5, verwendet:

Tabelle 69: Bewertungsschema für die Analyse der Schüler*innenantworten.

3	Die Aussage ist vollständig korrekt
2	Die Aussage ist teilweise korrekt oder nur mit Hilfe korrekt
1	Die Aussage ist nicht korrekt
0	Die Aussage wurde ausgelassen

Zusätzlich wurden den Farbcodes Zahlen von 0-3 zugeordnet, um die Auswertung zu erleichtern. Die Ergebnisse wurden als Balkendiagramme pro Klasse dargestellt, um einen Überblick darüber zu erhalten, welche Codes am häufigsten vergeben wurden.

6.3.4.3 Gütekriterien

In diesem Abschnitt werden die wissenschaftlichen Gütekriterien Reliabilität, Validität und Objektivität erläutert, die für die Qualität und Zuverlässigkeit dieser Studie von entscheidender Bedeutung sind.

Interrater-Reliabilität

Um die Reliabilität dieser Studie sicherzustellen, wurde ein Interrater-Reliabilitätsverfahren angewendet. Dies ist besonders wichtig bei der Bewertung der Antworten auf die eingesetzten Fragebögen, da somit sichergestellt werden kann, dass die Kodierung der Antworten durch verschiedene Rater konsistent erfolgt.

Datenmaterial

Jeder Schüler*in / jedem Schüler wurde ein sechstelliger, anonymisierter Code zugeordnet, der auf der ersten Seite des Fragebogens oben rechts in der Ecke angegeben ist.

Die Datensätze pro Schüler*in bestehen jeweils aus einem Prätest (Fragebogen 1) und einem Posttest (Fragebogen 3)³⁴.

Die Fragebögen wurden nach Klassen getrennt in PDF-Dokumenten nach dem folgendem Schema abgespeichert:

z. B. SEY-2 Fragebogen1 für den Fragebogen 1 der Klasse 2 von Lehrperson SEY

Der Prätest bestand aus zwölf Fragen, der Posttest aus fünfzehn Fragen. Die zwölf Fragen des Prätest kamen auch im Posttest vor. Drei Fragen im Prätest und Posttest waren Multiple-Choice Fragen, die nicht für das Interrater relevant sind. Es blieben also neun Fragen im Prätest und 12 Fragen im Posttest, für die ein Interrater durchzuführen war:

Tabelle 70: Übersicht der Fragen, die für das Interrater verwendet wurden.

Fragebogen 1 (F1)	Fragebogen 3 (F3)	Kurzbeschreibung Item
F1_1	F3_1	Kabelgebundenes System
F1_2	F3_2	Kabelloses System
F1_3	F3_3	Energieumwandler
F1_4	F3_4	Energiequelle
F1_5	F3_5	Magnetisches Feld Definition
F1_9	F3_11	Elektrisches Feld Definition
F1_10a	F3_12a	Weg der Energie (Zeichnung)
F1_10b	F3_12b	Weg der Energie (Begründung)
F1_11	F3_13	Gleich- und Wechselstrom
F1_12	F3_14	Elektrischer Föhn
/	F3_7	Kompass im Stromkreis
/	F3_8	Oberflächenladungen
/	F3_15	Rolle der Elektronen

Da die grün markierten Fragen im Prä- und Posttest identisch sind und derselbe Kodierleitfaden (siehe Anhang) zur Anwendung kam, wurde entschieden, ausschließlich die Posttest-Antworten zu kodieren.

³⁴ Hinweis: Der Fragebogen 2 wurde für das Interrater nicht berücksichtigt, da er sich mit der Evaluation der Simulation zur Energieübertragung mittels elektromagnetischen Feldern beschäftigte und somit getrennt betrachtet werden musste.

Um die Konsistenz der Kodierung zwischen Prä- und Posttest zu gewährleisten, wurden zusätzlich die Fragen F1_1, F1_2 und F1_3 als repräsentative Stichprobe auch im Prätest kodiert.

Auswahl der Fragebögen

Insgesamt füllten 106 Schüler*innen den Fragebogen 1 und Fragebogen 3 aus. Die Gesamt datenmenge entspricht somit 212 Fragebögen. 21 Fragebögen (entspricht ca. 10% des Datenmaterials) wurden per Zufallsgenerator für das Interrater ausgewählt. Folgende Fragebogennummern wurden dabei ausgewählt:

KOV-1_02EN12; KOV-1_04EN20; KOV-1_06RG93; KOV-1_09EN22; KOV-1_09EN61; KOV-1_11EN51; KOV-1_11EN60; RIS-1_05YR85; RIS-1_10EN97; RIS-2_10RG12; RIS-2_11SA65; RIS-3_01EN76; SEY_2_09EN67; SEY-1_03EN69; SEY-1_10AZ06; SEY-1_11EN62; SEY-2_09EN23; SIM-1_05EN62; SIM-1_07IV99; SIM-1_10EN28; SIM-1_11EN06

Auswahl der Interrater:

Es wurden ausschließlich Personen aus der Fachdidaktik Physik für die Bewertung der Fragebögen hinzugezogen. Alle drei Interrater haben ein Lehramtsstudium für Physik abgeschlossen und befanden sich zum Zeitpunkt der Durchführung des Interrates im Doktoratsstudium der Naturwissenschaften mit Schwerpunkt Physikdidaktik.

Aufteilung der Items auf drei Interrater:

In der folgenden Tabelle findet sich ein Überblick über die Fragebögen, die durch die drei Expert*innen kodiert wurden:

Tabelle 71: Übersicht der Fragebögen, die von den drei Interratern kodiert wurden.

Interrater 1:	Interrater 2:	Interrater 3:
KOV-1_09EN61	KOV-1_11EN51	RIS-2_11SA65
KOV-1_06RG93	KOV-1_09EN22	RIS-2_10RG12
KOV-1_04EN20	KOV-1_11EN60	RIS-3_01EN76
RIS-1_10EN97	KOV-1_02EN12	SEY-1_03EN69
SEY-1_10AZ06	RIS-1_05YR85	SEY-2_09EN23
SIM-1_07IV99	SEY-1_11EN62	SIM-1_05EN62
SIM-1_10EN28	SEY_2_09EN67	SIM-1_11EN06

Durchführung des Interrate:

Die Interrater erhielten einen Kodierleitfaden, nach dem sie die Kodierungen vornehmen sollten (siehe Anhang dieser Arbeit). Die Codes (z. B. 3, 2, 1, 0 oder Begriffe) sollten von den Ratern in einer Excel-Tabelle eingetragen werden. Sollte zu einer Frage keine Antwort vorhanden sein, sollte das entsprechende Feld mit ‚0‘ kodiert werden. Falls **Mehrfachkodierungen** möglich waren, war dies bei der jeweiligen Frage im Kodierleitfaden **rot** gekennzeichnet. In diesem Fall sollten die Codes durch ein Beistrich getrennt angegeben werden (z. B. Licht, Wärme).

Ergebnisse des Interrate:

Die Übereinstimmung zwischen den Interratern und der eigenen Bewertung der Antworten wurde anhand des Cohens-Kappa-Koeffizient (Landis & Koch, 1977) bewertet (siehe dazu auch die detaillierte Erklärung in Kapitel 5). Hierbei wurden sowohl die prozentuale Übereinstimmung der Kodierungen (p_0) als auch die erwartete Übereinstimmung durch Zufall (p_e) berücksichtigt.

Interrater 1 wies eine prozentuale Übereinstimmung der Kodierungen von $p_0 = 80,36\%$ auf. Der Kappa-Koeffizient für diesen Interrater betrug $\kappa = 0,69$, was laut Literatur als „substantial“ beschrieben wird (Landis & Koch, 1977). Dies deutet darauf hin, dass eine hohe Übereinstimmung zwischen den Bewertungen von Interrater 1 und den Bewertungen durch die Studienleitung vorliegt.

Interrater 2 erzielte eine prozentuale Übereinstimmung von $p_0 = 79,46\%$. Der Kappa-Koeffizient betrug $\kappa = 0,71$ und kann gemäß Literatur ebenfalls in der Kategorie „substantial“ eingeordnet werden (Landis & Koch, 1977).

Interrater 3 zeigte eine prozentuale Übereinstimmung von $p_0 = 81,25\%$. Auch hier betrug der Kappa-Koeffizient $\kappa = 0,71$, was als „substantial“ einzuordnen ist (Landis & Koch, 1977).

Alle drei Interrater wiesen somit eine hohe Übereinstimmung bei der Kodierung der Fragebögen auf. Diese Ergebnisse bestätigen, dass die Kodierung der Antworten auf den Fragebögen konsistent und zuverlässig durchgeführt wurde.

Validität

In der durchgeführten Studie wurden sowohl die inhaltliche Validität als auch die Kriteriumsvalidität berücksichtigt.

Bei der Entwicklung der Fragebögen wurde darauf geachtet, sämtliche relevanten Aspekte des LLAs abzubilden. Die Items wurden so gestaltet, dass sie zentrale Inhalte differenziert erfassen, wodurch eine hohe inhaltliche Validität sichergestellt werden konnte.

Zur Überprüfung der Kriteriumsvalidität wurde zudem ein Verfahren gewählt, bei dem identische Fragen sowohl im Prätest (Fragebogen 1) als auch im Posttest (Fragebogen 3) verwendet wurden. Dieser Ansatz ermöglichte einen direkten Vergleich der Antworten auf dieselben Fragen zu verschiedenen Zeitpunkten. Der Vergleich der Antworten zwischen Prätest und Posttest lieferte Hinweise darauf, ob die Tests dieselben Inhalte zuverlässig messen und ob die beobachteten Veränderungen in den Antworten tatsächlich auf die durchgeführte Intervention zurückzuführen sind.

Objektivität

Um die Objektivität in der vorliegenden Studie zu gewährleisten, wurden klare Richtlinien für die Durchführung und Auswertung der Tests befolgt:

Die Testdurchführung wurde standardisiert, um sicherzustellen, dass alle Teilnehmenden unter identischen Bedingungen getestet werden. Diese Standardisierung umfasste einheitliche Instruktionen und Bedingungen, die im Rahmen der Vorbesprechung mit den Lehrpersonen festgelegt wurden, um sicherzustellen, dass keine Verzerrungen durch unterschiedliche Testbedingungen auftreten. Dabei war es beispielsweise notwendig, dass der Prätest nicht zu lange vor der Intervention ausgegeben wurde und die Schüler*innen genügend Zeit für das Ausfüllen des Fragebogens hatten.

Zur Gewährleistung der Objektivität in der Auswertung wurde ein detaillierter Kodierleitfaden erstellt. Zusätzlich kam ein Interrater-Reliabilitätsverfahren zur Anwendung, um die Konsistenz und Unabhängigkeit der Bewertungen durch verschiedene Interrater zu überprüfen. Durch diese Maßnahmen wurde sichergestellt, dass die Auswertung der Antworten nicht von den individuellen Einschätzungen der Interrater beeinflusst wird, sondern auf einheitlichen und klar definierten Kriterien basiert.

6.3.5 Datenanalyse Fragebogen 2

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise der Analyse des zweiten Fragebogens beschrieben.

Stichprobe:

Das Datenset umfasste eine Stichprobengröße von insgesamt $N = 87$ Fragebögen, die von den Klassen RIS-3, SIM-1, KOV-1, SEY-1 und SEY-2 ausgefüllt wurden. Die Klassen RIS-1 und RIS-2 füllten den Fragebogen, laut Angaben des Lehrers, aufgrund von Zeitmangel nicht aus.

Merkmale des Fragebogens:

Die Schüler*innen beantworteten den im Anhang beigefügten Fragebogen, der ursprünglich an der ETH Zürich für ein anderes Projekt entwickelt worden war. Dabei wurden nur wenige Anpassungen vom Original vorgenommen: Statt des Begriffs „System“ wurde durchgehend der Begriff „Simulation“ verwendet, um den Fragebogen gezielter auf den Verwendungszweck, die Überprüfung der Anwendbarkeit der neu entwickelten Simulation zur Energieübertragung in elektrischen Systemen, anzupassen. Der Fragebogen nutzt eine fünfstufige Likert-Skala (1= stimme überhaupt nicht zu; 5 = stimme voll zu).

Für die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse wurden einerseits gängige statistische Kennwerte berechnet und andererseits Balkendiagramme zur besseren Übersicht erstellt.

Berechnung statistischer Kennwerte:

Für die Analyse wurden die Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen (σ), Varianzen (σ^2) und Mediane ($\tilde{x}$) berechnet.

In der Analyse der Daten (siehe Abschnitt 6.3.4.2) werden folgende Schwellenwerte für die Standardabweichung (σ) und Varianz (σ^2) verwendet, um von einer erheblichen oder moderaten Streuung der Antworten in Bezug auf die Varianz und Standardabweichung zu sprechen:

a) **Geringe Streuung:** $\sigma \leq 1,00$; $\sigma^2 \leq 1,00$

Wenn die Standardabweichung oder Varianz in diesem Bereich liegen, deutet dies darauf hin, dass die Antworten relativ homogen sind und wenig Variation aufweisen. In solchen Fällen ist die Streuung der Antworten gering.

b) **Moderate Streuung:** $\sigma > 1,00$ bis $\leq 1,20$; $\sigma^2 > 1,00$ bis $\leq 1,44$

Werte in diesem Bereich deuten auf eine moderate Streuung der Antworten hin. Es gibt eine merkliche, aber nicht übermäßige Variation in den Bewertungen.

c) **Erhebliche Streuung:** $\sigma > 1,20$; $\sigma^2 > 1,44$

Wenn die Standardabweichung oder Varianz in diesem Bereich liegen, bedeutet dies, dass die Antworten eine erhebliche Variation aufweisen. Hier zeigt sich, dass die Meinungen der Befragten stark auseinandergehen.

Da die Likert-Skalen im 2. Fragebogen ordinal verteilt und nicht normalverteilt sind, können für die statistische Auswertung nur nicht-parametrische Tests in Betracht gezogen. Allerdings wurden diese in diesem Fall nicht durchgeführt, da der Schwerpunkt der Analyse auf den Fragebögen 1 und 3 (Prä- und Posttest) lag. Ziel war es, ein allgemeines Stimmungsbild zur Anwendbarkeit der Simulation zu erfassen.

Darstellung der Ergebnisse:

Zur Visualisierung der Ergebnisse wurden Balkendiagramme erstellt, die die relativen Häufigkeiten der Antworten darstellen. Diese relativen Häufigkeiten basieren direkt auf den Daten der Stichprobe und repräsentieren den Anteil jeder Antwortkategorie an der Gesamtstichprobe. Da die Daten direkt aus der Stichprobe stammen, gibt es keine statistische Schätzung oder Unsicherheit bezüglich dieser Werte. Die relativen Häufigkeiten geben somit ein klares Bild über die Verteilung der Antworten in der untersuchten Gruppe.

6.3.6 Ethische Aspekte und Datenschutz

Ethische Aspekte

a) Freiwilligkeit und informierte Zustimmung

Bereits vor der Ausgabe des ersten Fragebogens wurde die informierte Zustimmung der Teilnehmer*innen durch die Einholung einer Einverständniserklärung der Erziehungsberechtigten sichergestellt. Nur Schüler*innen, deren Einverständniserklärung vorlag, durften die Fragebögen 1-3 ausfüllen. Fragebögen von Schüler*innen ohne Einverständniserklärung wurden vor der Auswertung vernichtet. Dies wurde einerseits durch die Lehrpersonen der Klassen kontrolliert, die die Einverständniserklärungen einsammelten, und andererseits wurden die Schüler*innen zu Beginn jedes Fragebogens nochmal explizit gefragt, ob sie die Einverständniserklärungen abgegeben hatten.

Die Teilnahme an der Studie war freiwillig und es wurde betont, dass den Teilnehmer*innen keine Nachteile entstehen würden, wenn sie nicht daran teilnehmen. Schüler*innen, die nicht an der Studie teilnehmen wollten, durften weiterhin dem Unterricht beiwohnen, jedoch nicht die Fragebögen 1-3 ausfüllen.

*b) Schutz der Teilnehmer*innen*

Um die Identität der Teilnehmer*innen zu schützen, wurden bei jedem Fragebogen anonymisierte Codes verwendet. Der Code bestand aus einem sechsstelligen Schema und wurde individuell von jeder Schüler*in nach einer bestimmten Vorlage selbst erstellt (siehe Abbildung 66):

Code:				Muster:	02	EN	51
Dein Geburtsmonat:	-	-		Dein Geburtsmonat:	z.B. Februar: <u>02</u>		
Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	-	-		Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	z.B. WI <u>EN</u>		
Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	-	-		Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	z.B. (0676) <u>518</u> 5188		

Abbildung 66: Kodierschema zur Erstellung eines sechsstelligen Codes zur Wahrung der Identität der teilnehmenden Schüler*innen.

Dieser sechsstellige Code stellte sicher, dass keine personenbezogenen Daten (wie beispielsweise Namen) der Schüler*innen zurückverfolgt werden konnten. Zudem ermöglichte die Code-Generierung das ‚Matching‘ von Prä- und Posttests, um Vergleiche bei der Analyse herzustellen, ohne die Identität der Schüler*innen zu kennen.

Datenschutz

a) Datenspeicherung und -sicherung

Die Daten wurden analog durch Paper-Pencil-Tests erhoben. Anschließend wurden die gesammelten Daten digitalisiert und in einem kennwortgeschützten Ordner gespeichert. Nach Beendigung der Studie werden alle Daten vernichtet, um die Privatsphäre der Teilnehmer*innen zu schützen.

b) Anonymisierung der Daten

Zu keinem Zeitpunkt wurden Namen, Adressen oder sonstige personenbezogene Daten der Schüler*innen erhoben. Durch die Verwendung der anonymisierten Codes konnte eine durchgängige Anonymität gewährleistet werden.

c) Zugriffsbeschränkungen

Der Zugang zu den Daten war streng limitiert (siehe Abbildung 67). Ausschließlich die Studienleitung sowie die Studienassistent*innen, die bei der Digitalisierung der Daten halfen, hatten Zugang. Zusätzlich hatten die Interrater, die zur Wahrung der Validität der Daten hinzugezogen wurden, Zugang zu den anonymisierten Daten.

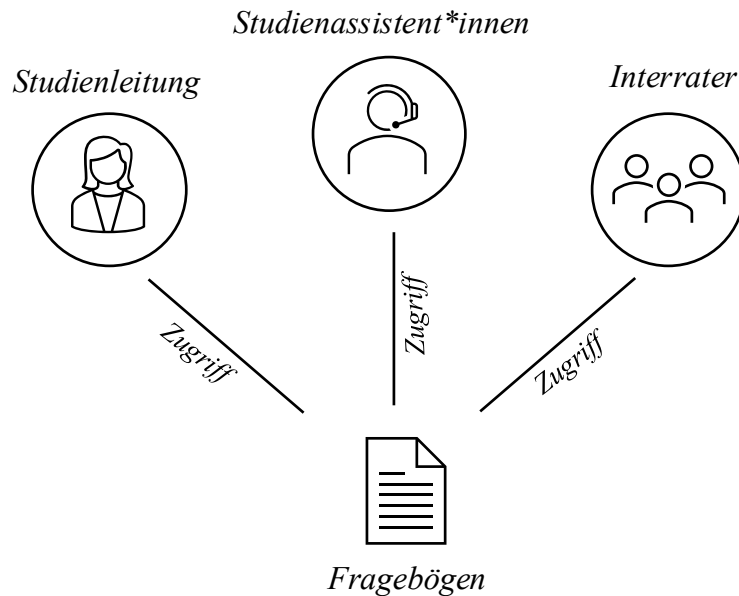


Abbildung 67: Übersicht der Zugriffsberechtigungen auf das Datenmaterial der Studie.

6.4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Implementationsstudie im realen Klassensetting umfassend dargestellt und analysiert. Es beginnt mit den Ergebnissen des Prä- und Posttests in Abschnitt 6.4.1, welche sowohl qualitativ (Abschnitt 6.4.1.2) als auch quantitativ (Abschnitt 6.4.1.1) untersucht werden.

Anschließend werden die Resultate des zweiten Fragebogens in Abschnitt 6.4.2 präsentiert, der sich auf die Nutzerfreundlichkeit der verwendeten Simulation zur Energieübertragung konzentriert.

Den Abschluss bilden die Interviews mit den Lehrpersonen in Abschnitt 6.4.3, die in ausführlichen Einzelanalysen dargestellt werden. Jedes Interview wird detailliert nach festen Themenbereichen ausgewertet, um die Perspektiven der Lehrpersonen auf das LLA und deren Umsetzung im Unterricht zu beleuchten. Hierzu gehören Rahmeninformationen, allgemeine Eindrücke, die Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr, die Durchführung der einzelnen Unterrichtsblöcke sowie die Einschätzung des verwendeten Materials.

6.4.1 Ergebnisse des Fragebogens 1 und 3

6.4.1.1 Quantitative Analyse

Im Folgenden wird die Analyse der Gesamtpunkte aus dem Prä- und Posttest sowie der einzelnen Fragen präsentiert. Dabei wurde immer die Stichprobe von N=106 Schüler*innen, wie oben beschrieben, verwendet. Für die Analyse wurde die in Abschnitt 6.4.1 erläuterte Vorgehensweise verwendet. Eine Übersicht der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für alle Items ist in Abbildung 68 zu sehen.

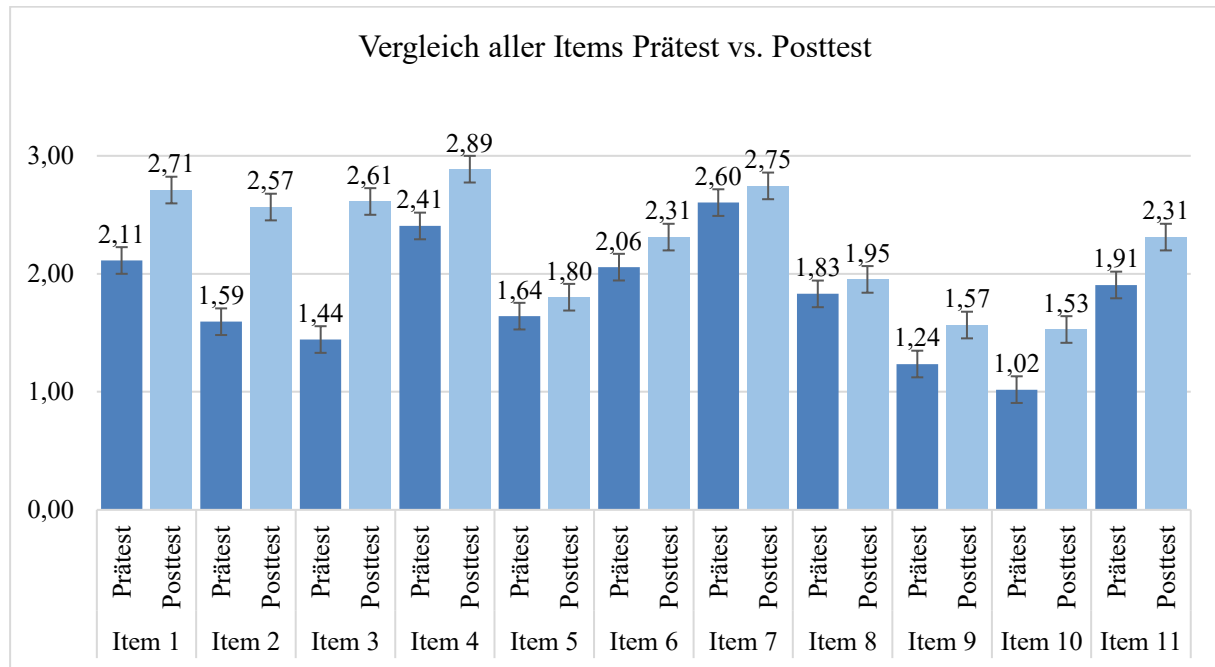


Abbildung 68: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für alle Items. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Vergleich Prä- vs. Posttest: Gesamtpunkte

In folgender Abbildung 69 ist der Vergleich der erreichten Gesamtpunktezah aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest dargestellt. Pro Test und Schüler*in konnten maximal 33 Punkte erreicht werden.

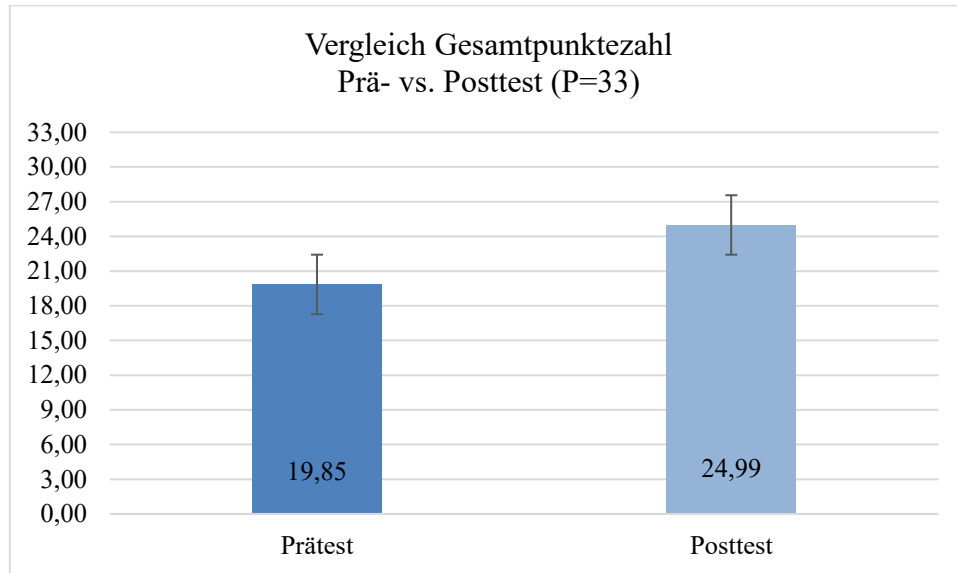


Abbildung 69: Vergleich der erreichten Gesamtpunktezah aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab $< 0,0001$ (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,92$ was auf einen starken Effekt hinweist. In nachfolgender Tabelle 72 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 72: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Gesamtpunktezah aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest.

<i>Vergleich Gesamtpunktezah (P=33)</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	19,85	24,99
Varianz	σ^2	10,03	11,27
Standardabweichung	σ	3,17	3,36
Standardfehler	SE	0,31	0,33
Signifikanz	p	$< 0,0001$ (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,92 (starker Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 1 – Kabelgebundene Systeme

In Abbildung 70 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 1 zu kabelgebundenen Systemen zu sehen.

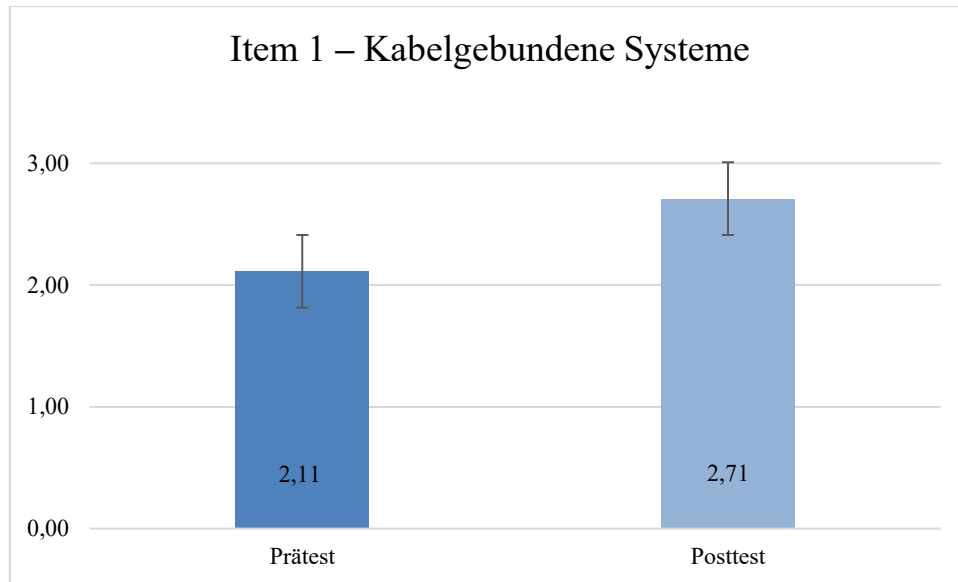


Abbildung 70: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 1 zu kabelgebundenen Systemen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab $< 0,0001$ (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,89$ was auf einen starken Effekt hinweist. In Tabelle 73 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 73: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 1 zu kabelgebundenen Systemen.

<i>Item 1 – Kabelgebundene Systeme</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	2,11	2,71
Varianz	σ^2	0,90	0,44
Standardabweichung	σ	0,95	0,66
Standardfehler	SE	0,09	0,06
Signifikanz	p	$< 0,0001$ (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,89 (starker Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 2 – Kabellose Systeme

In Abbildung 71 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 2 zu kabellosen Systemen zu sehen.

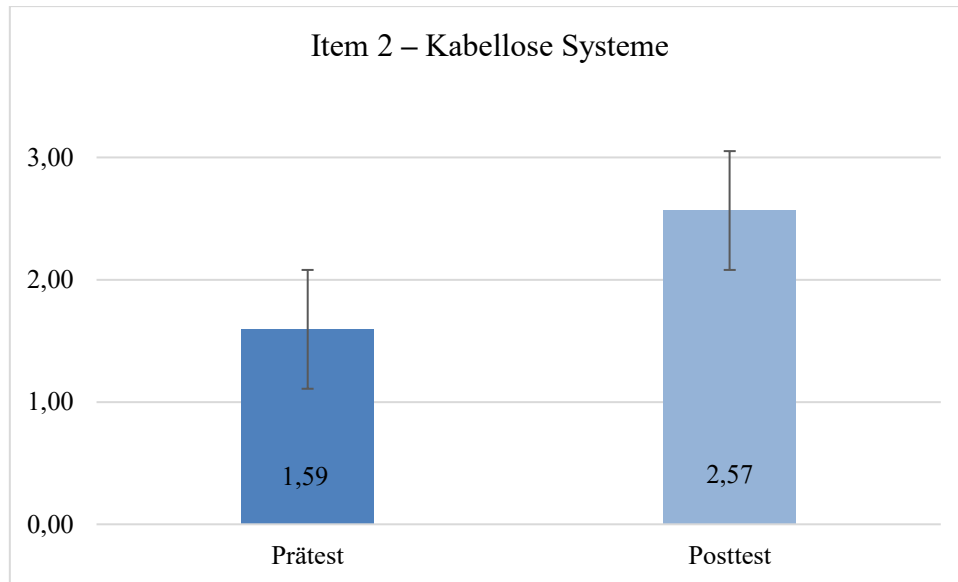


Abbildung 71: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 2 zu kabellosen Systemen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab $< 0,0001$ (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 1,46$ was auf einen starken Effekt hinweist. In Tabelle 74 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 74: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 2 zu kabellosen Systemen.

<i>Item 2 – Kabellose Systeme</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	1,59	2,57
Varianz	σ^2	0,81	0,51
Standardabweichung	σ	0,90	0,72
Standardfehler	SE	0,09	0,07
Signifikanz	p	$< 0,0001$ (statistisch signifikant)	
Cohens	d	1,46 (starker Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 3 – Energieumwandler

In Abbildung 72 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 3 zu Energieumwandlern zu sehen.

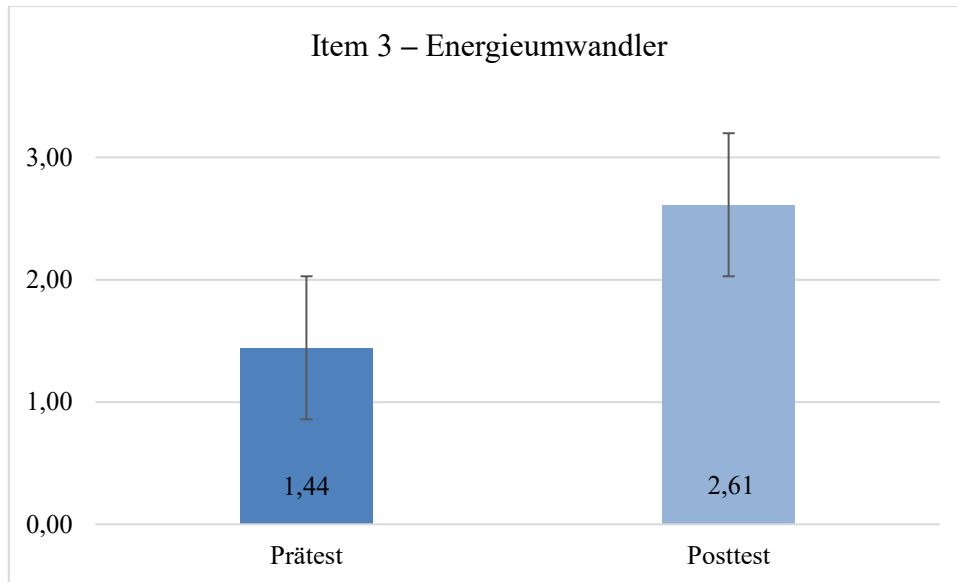


Abbildung 72: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 3 zu Energieumwandlern. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab $< 0,0001$ (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 1,84$ was auf einen starken Effekt hinweist. In Tabelle 75 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 75: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 3 zu Energieumwandlern.

<i>Item 3 – Energieumwandler</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	1,44	2,61
Varianz	σ^2	0,65	0,62
Standardabweichung	σ	0,81	0,79
Standardfehler	SE	0,08	0,08
Signifikanz	p	< 0,0001 (statistisch signifikant)	
Cohens	d	1,84 (starker Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 4 – Energiequelle

In Abbildung 73 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 4 zu Energiequellen zu sehen.

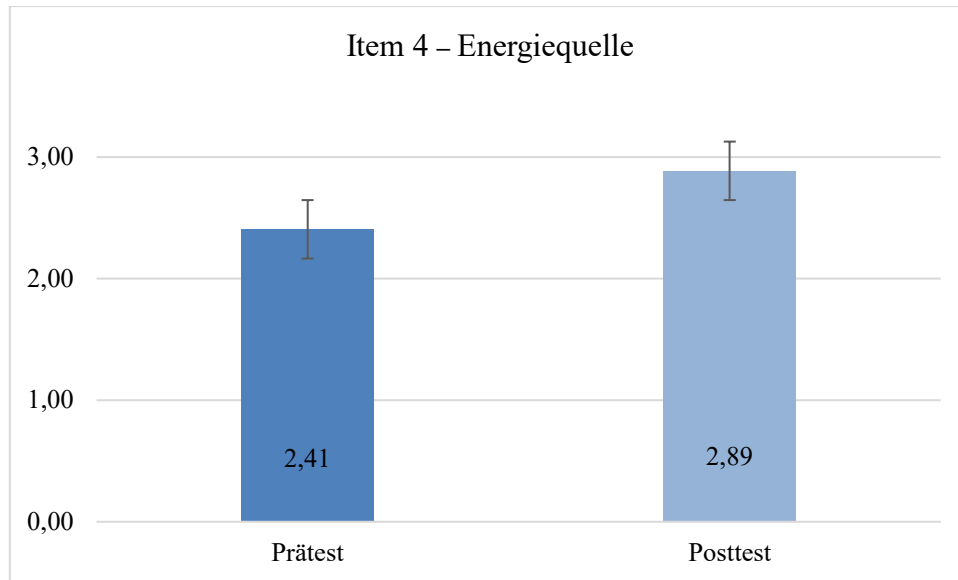


Abbildung 73: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 4 zu Energiequellen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab $< 0,0001$ (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,95$ was auf einen starken Effekt hinweist. In Tabelle 76 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 76: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 4 zu Energiequellen.

<i>Item 4 – Energiequellen</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	2,41	2,89
Varianz	σ^2	0,80	0,22
Standardabweichung	σ	0,89	0,46
Standardfehler	SE	0,09	0,05
Signifikanz	p	$< 0,0001$ (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,95 (starker Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 5 – Magnetisches Feld Definition

In Abbildung 74 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 5 zur Definition des magnetischen Feldes zu sehen.

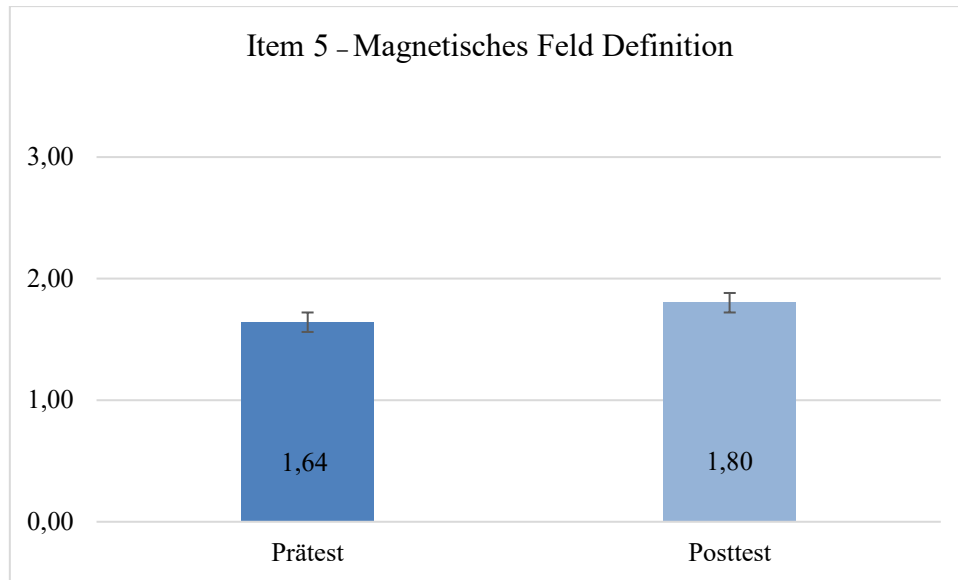


Abbildung 74: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 5 zur Definition des magnetischen Feldes. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab 0,039 (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,27$ was auf einen geringen Effekt hinweist. In Tabelle 77 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 77: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 5 zur Definition des magnetischen Feldes.

<i>Item 5 – Magnetisches Feld Definition</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	1,64	1,80
Varianz	σ^2	0,59	0,60
Standardabweichung	σ	0,77	0,77
Standardfehler	SE	0,07	0,08
Signifikanz	p	0,039 (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,27 (geringer Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 6 – Magnetisches Feld (Multiple Choice)

In Abbildung 75 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 6 zum magnetischen Feld (Multiple Choice) zu sehen.

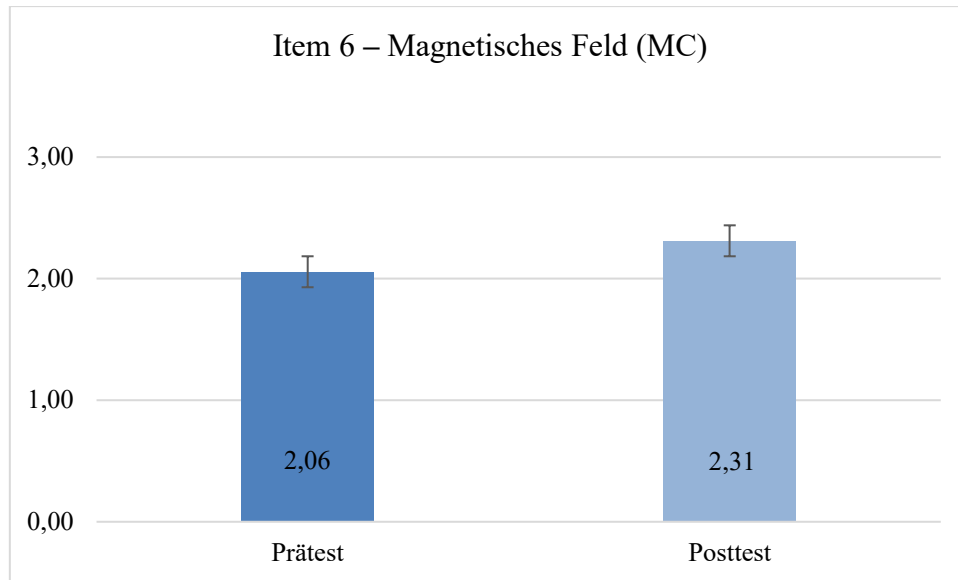


Abbildung 75: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 6 zum magnetischen Feld (Multiple Choice). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab 0,002 (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,61$ was auf einen mittleren Effekt hinweist. In Tabelle 78 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 78: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 6 zum magnetischen Feld (Multiple Choice).

<i>Item 6 – Magnetisches Feld (MC)</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	2,06	2,31
Varianz	σ^2	0,47	0,37
Standardabweichung	σ	0,69	0,61
Standardfehler	SE	0,07	0,06
Signifikanz	p	0,002 (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,61 (mittlerer Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 7 – Felder um den Stromkreis (Multiple Choice)

In Abbildung 76 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 7 zu Feldern um den Stromkreis (Multiple Choice) zu sehen.

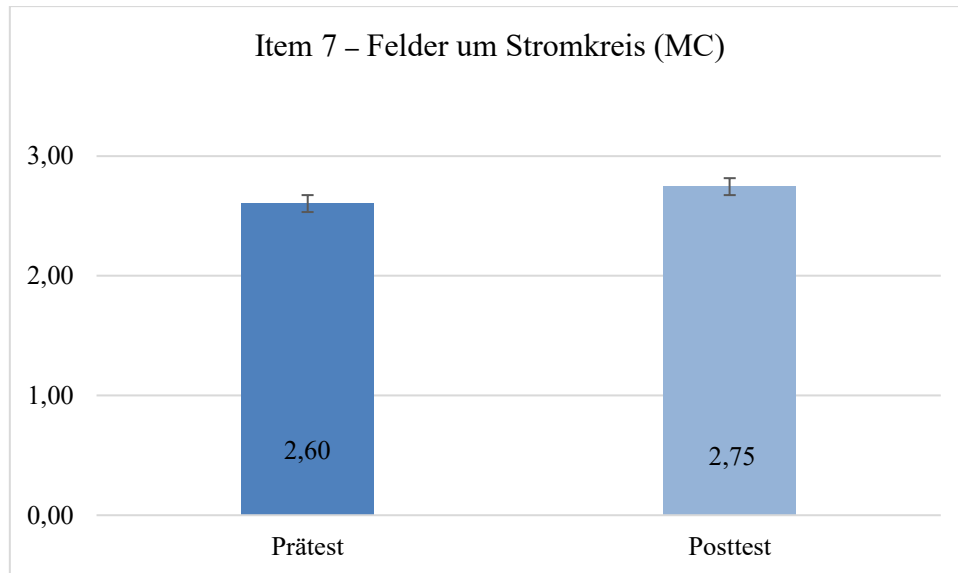


Abbildung 76: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 7 zu Feldern um den Stromkreis (Multiple Choice). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab 0,016 (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,63$ was auf einen mittleren Effekt hinweist. In Tabelle 79 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 79: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 7 zu Feldern um den Stromkreis (Multiple Choice).

<i>Item 7 – Felder um Stromkreis (MC)</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	2,60	2,75
Varianz	σ^2	0,26	0,19
Standardabweichung	σ	0,51	0,44
Standardfehler	SE	0,05	0,04
Signifikanz	p	0,016 (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,63 (mittlerer Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 8 – Elektrisches Feld (Multiple Choice)

In Abbildung 77 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 8 zum elektrischen Feld (Multiple Choice) zu sehen.

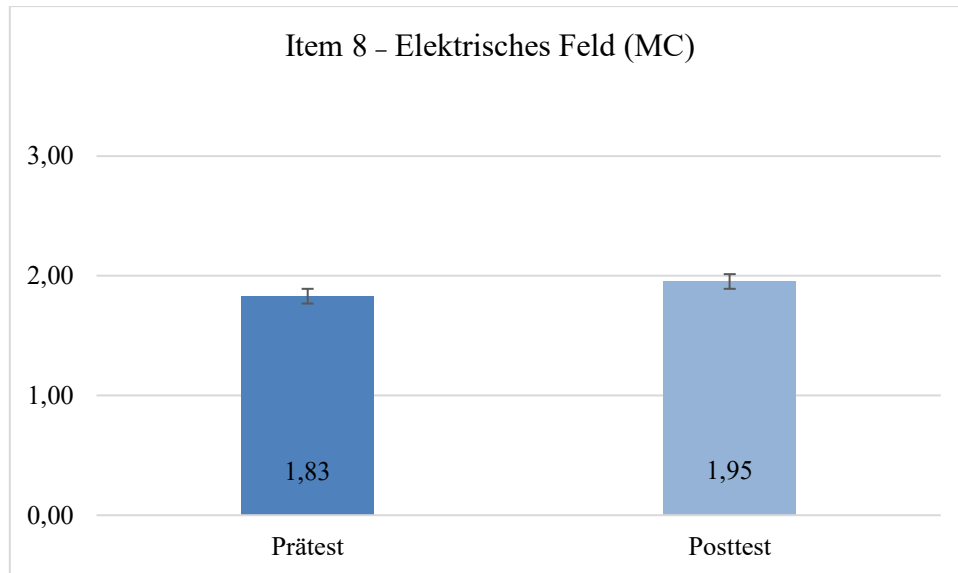


Abbildung 77: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 8 zum elektrischen Feld (Multiple Choice). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab 0,083 (statistisch nicht signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,48$ was auf einen geringen Effekt hinweist. In Tabelle 80 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 80: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 8 zum elektrischen Feld (Multiple Choice).

<i>Item 8 – Elektrisches Feld (MC)</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	1,83	1,95
Varianz	σ^2	0,20	0,31
Standardabweichung	σ	0,45	0,56
Standardfehler	SE	0,04	0,05
Signifikanz	p	0,083 (nicht signifikant)	
Cohens	d	0,48 (mittlerer Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 9 – Elektrisches Feld Definition

In Abbildung 78 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 9 zur Definition des elektrischen Feldes zu sehen.

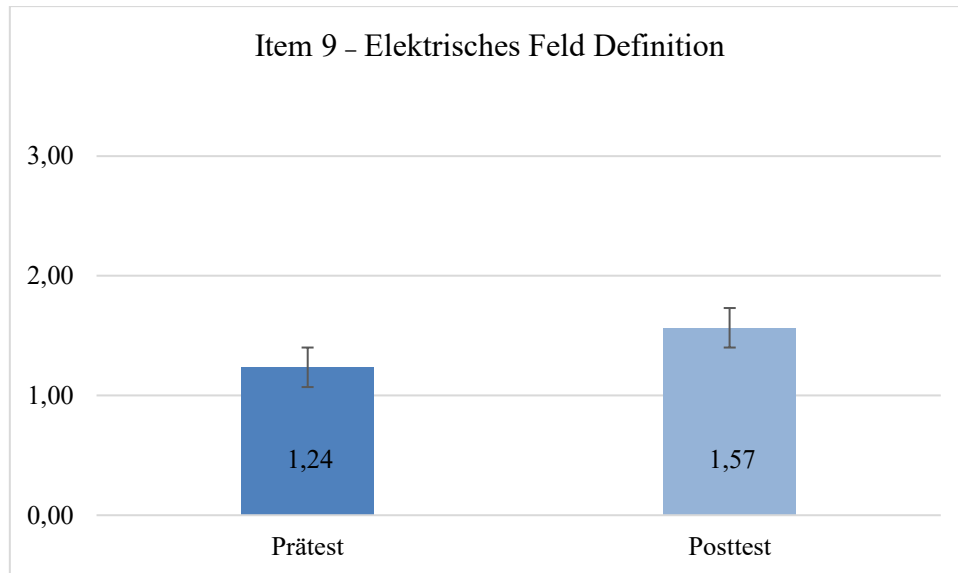


Abbildung 78: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 9 zur Definition des elektrischen Feldes. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab $< 0,0001$ (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,92$ was auf einen starken Effekt hinweist. In Tabelle 81 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 81: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für Item 9 zur Definition des elektrischen Feldes.

<i>Item 9 – Elektrisches Feld Definition</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	1,24	1,57
Varianz	σ^2	0,24	0,48
Standardabweichung	σ	0,49	0,69
Standardfehler	SE	0,05	0,07
Signifikanz	p	$< 0,0001$ (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,92 (starker Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 10 – Weg der Energie (Zeichnung)

In Abbildung 79 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 10 zum Weg der Energie (Zeichnung) zu sehen.

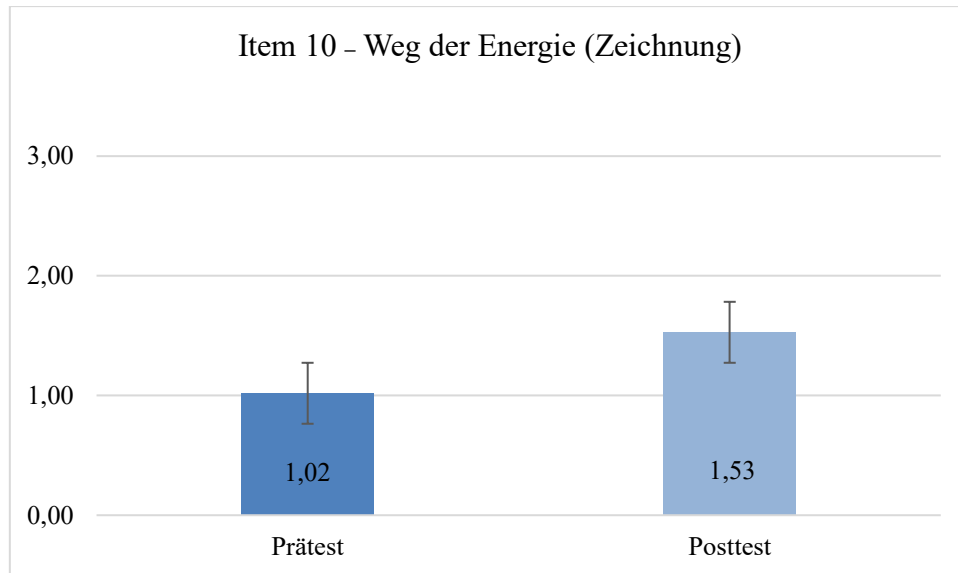


Abbildung 79: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 10 zum Weg der Energie (Zeichnung). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab $< 0,0001$ (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 1,24$ was auf einen starken Effekt hinweist. In Tabelle 82 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 82: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für Item 10 zum Weg der Energie (Zeichnung).

<i>Item 10 – Weg der Energie (Zeichnung)</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	1,02	1,53
Varianz	σ^2	0,04	0,78
Standardabweichung	σ	0,19	0,89
Standardfehler	SE	0,02	0,09
Signifikanz	p	$< 0,0001$ (statistisch signifikant)	
Cohens	d	1,24 (starker Effekt)	

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item 11 – Gleich- und Wechselstromkreise

In Abbildung 80 ist der Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 11 zu Gleich- und Wechselstromkreisen zu sehen.

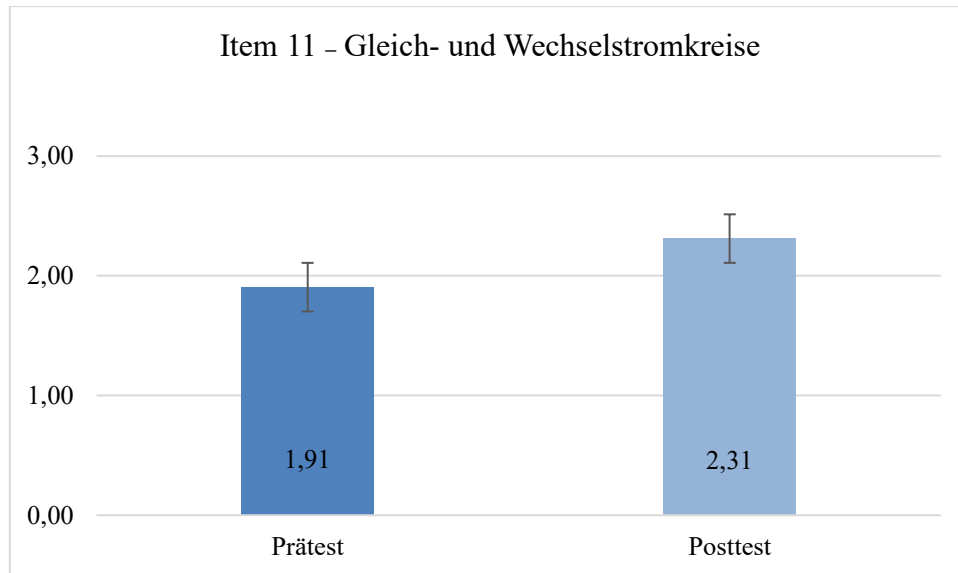


Abbildung 80: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 11 zu Gleich- und Wechselstromkreisen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Die Berechnung des p-Werts ergab 0,0002 (statistisch signifikant). Der d-Wert betrug $d = 0,48$ was auf einen geringen Effekt hinweist. In Tabelle 83 können zudem weitere statistische Kennwerte, wie der Mittelwert ($\bar{x}$), die Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ) und Standardfehler (SE), entnommen werden.

Tabelle 83: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für Item 11 zu Gleich- und Wechselstromkreisen.

<i>Item 11 – Gleich- und Wechselstromkreise</i>			
		Prätest	Posttest
Mittelwert	$\bar{x}$	1,91	2,31
Varianz	σ^2	0,89	0,79
Standardabweichung	σ	0,94	0,89
Standardfehler	SE	0,09	0,09
Signifikanz	p	0,0002 (statistisch signifikant)	
Cohens	d	0,48 (geringer Effekt)	

6.4.1.2 Qualitative Analyse

Die qualitative Analyse wurde gemäß den in Abschnitt 6.3.4.2 beschriebenen Methoden durchgeführt. Eine Übersicht aller Items, die für die qualitative Analyse herangezogen wurden, findet sich in Tabelle 68.

Item F1_10b bzw. F3_12b – Weg der Energie (Begründung)

Das erste Item, das qualitativ analysiert wurde, ist das Item 10b aus dem Prätest bzw. 12b aus dem Posttest (siehe Fragebögen im Anhang). Dieses Item besteht aus zwei Teilen: In der Teilfrage 10a bzw. 12a sollten die Schüler*innen den Weg der Energie in einer Skizze eines einfachen Stromkreises, bestehend aus einer Energiequelle, Leiterkabeln und einem Energieumwandler, zeichnen. Diese Aufgabe wurde im Rahmen der quantitativen Analyse (siehe Abschnitt oben) ausgewertet und beschrieben. Die zweite Teilfrage 10b bzw. 12b fragte nach einer Begründung für die Zeichnung. Hier wurde für die Analyse ein qualitativer Zugang gewählt, um zu ergründen, welche Argumentationen die Schüler*innen am häufigsten wählten, um ihre Zeichnungen zu erklären. Dabei wurde nach dem im Kodiermanual (siehe Anhang) beschriebenen Vorgehen gearbeitet. Die Antworten der Schüler*innen wurden in induktive Kategorien klassifiziert, die sich erst im Auswerteprozess ergaben (es gab keine Referenz zur Literatur, da die Aufgabe für diese Studie neu erstellt wurde). Die Antwortkategorien und die Anzahl der Schüler*innen, denen diese Kategorien zugeordnet werden konnten, sind in Abbildung 81 und Abbildung 82 dargestellt.

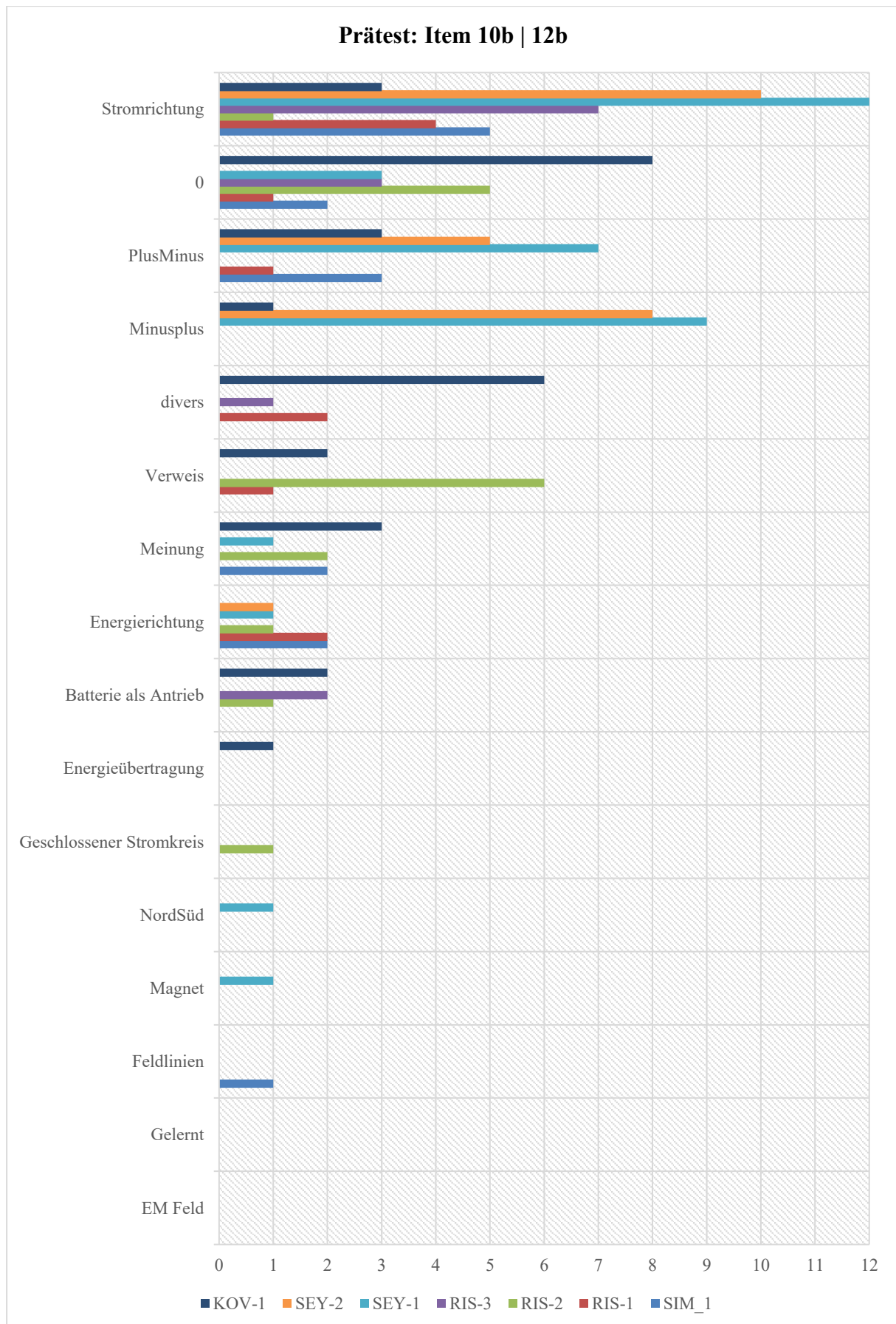


Abbildung 81: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Prätest.

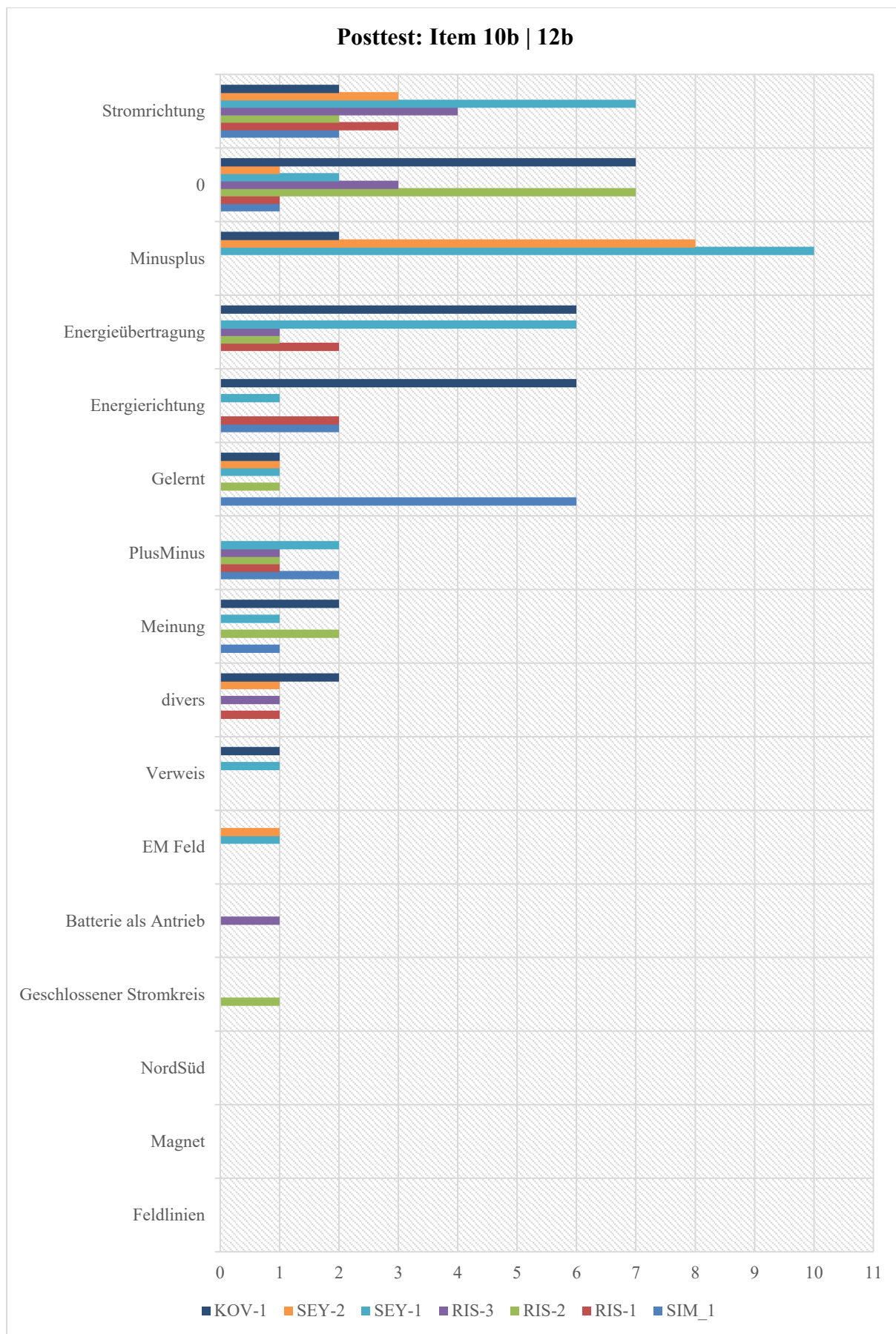


Abbildung 82: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Posttest.

In Abbildung 81 und Abbildung 82 ist ersichtlich, wie viele Schüler*innenantworten welcher Antwortenkategorie gemäß dem Kodiermanual zugeordnet werden können. Eine genaue Übersicht findet sich auch in Tabelle 84 für den Prätest und Tabelle 85 für den Posttest.

Tabelle 84: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Prätest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.

Codes Klassen	SIM_1	RIS-1	RIS-2	RIS-3	SEY-1	SEY-2	KOV-1	Gesamt
Stromrichtung	5	4	1	7	12	10	3	42
0	2	1	5	3	3	0	8	22
PlusMinus	3	1	0	0	7	5	3	19
Minusplus	0	0	0	0	9	8	1	18
Verweis	0	1	6	0	0	0	2	9
divers	0	2	0	1	0	0	6	9
Meinung	2	0	2	0	1	0	3	8
Energierichtung	2	2	1	0	1	1	0	7
Batterie als Antrieb	0	0	1	2	0	0	2	5
Feldlinien	1	0	0	0	0	0	0	1
Magnet	0	0	0	0	1	0	0	1
NordSüd	0	0	0	0	1	0	0	1
Geschlossener Stromkreis	0	0	1	0	0	0	0	1
Energieübertragung	0	0	0	0	0	0	1	1
EM-Feld	0	0	0	0	0	0	0	0
Gelernt	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 85: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Posttest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.

Codes Klassen	SIM_1	RIS-1	RIS-2	RIS-3	SEY-1	SEY-2	KOV-1	Gesamt
Stromrichtung	2	3	2	4	7	3	2	23
0	1	1	7	3	2	1	7	22
Minusplus	0	0	0	0	10	8	2	20
Energieübertragung	0	2	1	1	6	0	6	16
Energierichtung	2	2	0	0	1	0	6	11
Gelernt	6	0	1	0	1	1	1	10
PlusMinus	2	1	1	1	2	0	0	7
Meinung	1	0	2	0	1	0	2	6
divers	0	1	0	1	0	1	2	5
EM-Feld	0	0	0	0	1	1	0	2
Verweis	0	0	0	0	1	0	1	2
Geschlossener Stromkreis	0	0	1	0	0	0	0	1
Batterie als Antrieb	0	0	0	1	0	0	0	1
Feldlinien	0	0	0	0	0	0	0	0
Magnet	0	0	0	0	0	0	0	0
NordSüd	0	0	0	0	0	0	0	0

In den Tabellen ist zu erkennen, dass im Prätest die häufigste Kategorie die ‚Stromrichtung‘ mit 42 Nennungen ist. Die Schüler*innen, denen diese Antwortkategorie zugeordnet wurde, begründeten ihre Zeichnung mit der Richtung des Stromflusses.

Darauf folgt die Kategorie ‚0‘ mit 22 Nennungen, was für eine fehlende Antwort steht. Die Kategorie ‚PlusMinus‘ wurde 19-mal genannt, gefolgt von ‚Minusplus‘ mit 18 Nennungen. Diese beiden Kategorien beziehen sich auf eine Begründung, bei der explizit die Richtung des Energieflusses entweder vom Plus- zum Minuspol oder vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle beschrieben wurde.

Im Posttest ist ebenfalls die ‚Stromrichtung‘ mit 23 Nennungen die häufigste Kategorie. Die Kategorie ‚0‘ wurde auch hier 22-mal genannt. Die Kategorie ‚Minusplus‘ erscheint 20-mal, gefolgt von ‚Energieübertragung‘ mit 16 Nennungen.

Am seltensten genannt wurden im Prätest Kategorien wie ‚EM Feld‘ (der Energiefluss wird durch das elektromagnetische Feld beschrieben), ‚Gelernt‘ (die Schüler*innen geben an, die Inhalte so gelernt zu haben), ‚Geschlossener Stromkreis‘ (die Schüler*innen begründen ihre Antwort mit der Tatsache, dass es sich um einen geschlossenen Stromkreis handelt), ‚Energieübertragung‘ (die Schüler*innen begründen ihre Zeichnung mit der Energieübertragung) und ‚Feldlinien‘ (die Schüler*innen beziehen sich auf Felder und ihre Darstellungsformen). Diese Kategorien wurden entweder nur einmal oder gar nicht genannt, was darauf hinweist, dass diese Konzepte bei den Schüler*innen weniger präsent waren.

Insgesamt ist bei diesem Item hervorzuheben, dass die Begründungen sehr spärlich ausfielen. Die meisten Schüler*innen antworten in wenigen Worten und formulierten keine vollständigen Sätze für ihre Begründungen. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse (siehe Abschnitt 6.5.1.1 Fragebogen 1 und 3) berücksichtigt werden.

Item F1_12 bzw. F3_14 – Elektrischer Föhn

Das zweite Item, das qualitativ analysiert wurde, ist das Item 12 aus dem Prätest bzw. 14 aus dem Posttest (siehe Fragebögen im Anhang). Darin ging es um die Frage, woran man bei einem elektrischen Föhn erkennen kann, dass Energie übertragen worden ist. Analog zum vorherigen Item wurden hier die Antworten der Schüler*innen in einem offenen Frageformat gesammelt und anschließend induktiv Kategorien zugeordnet, die im Kodiermanual (siehe Anhang) beschrieben sind.

Die Antwortkategorien und die Anzahl der Schüler*innen, denen diese Kategorien zugeordnet werden konnten, sind in Abbildung 83 und Abbildung 84 dargestellt.

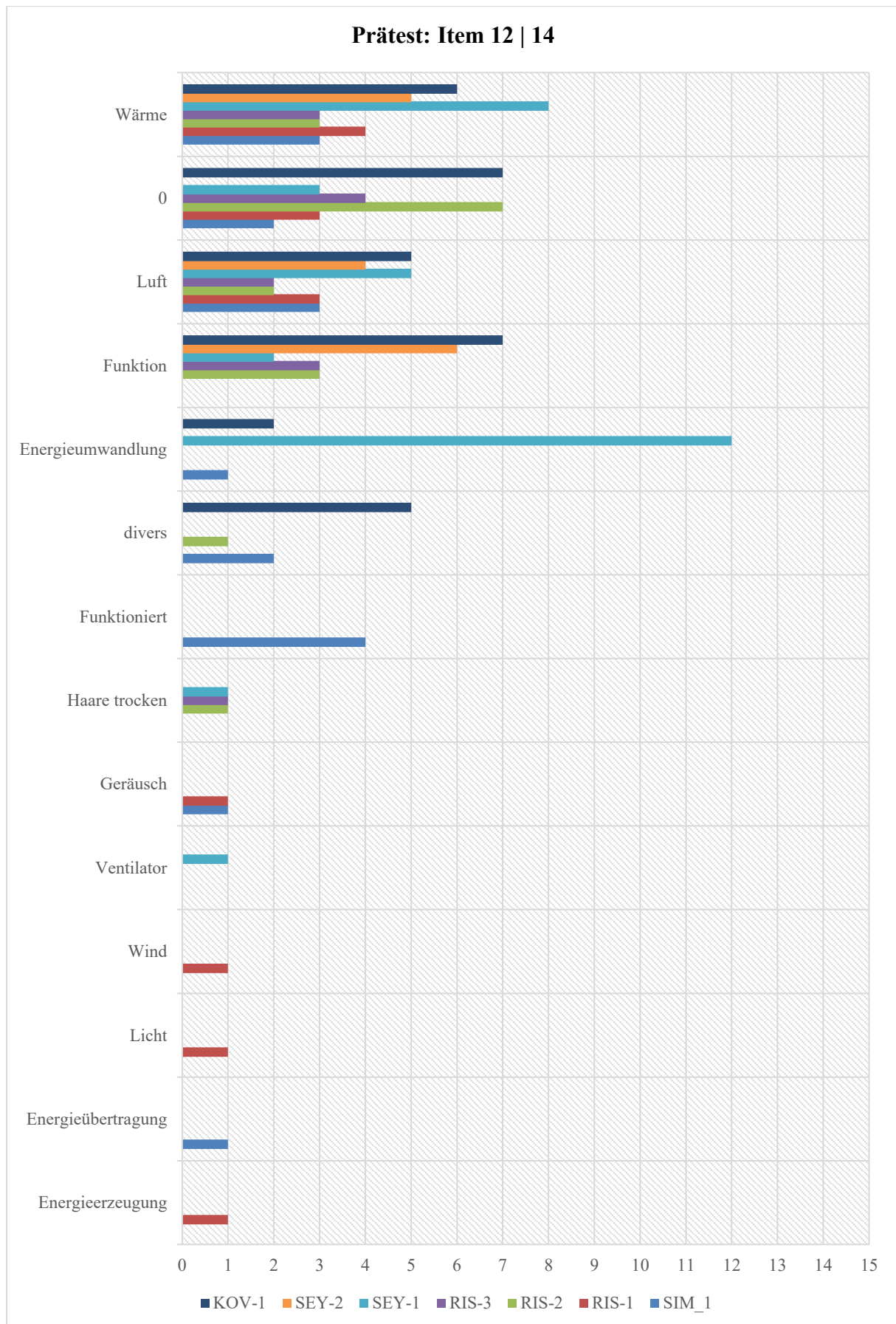


Abbildung 83: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Prätest.

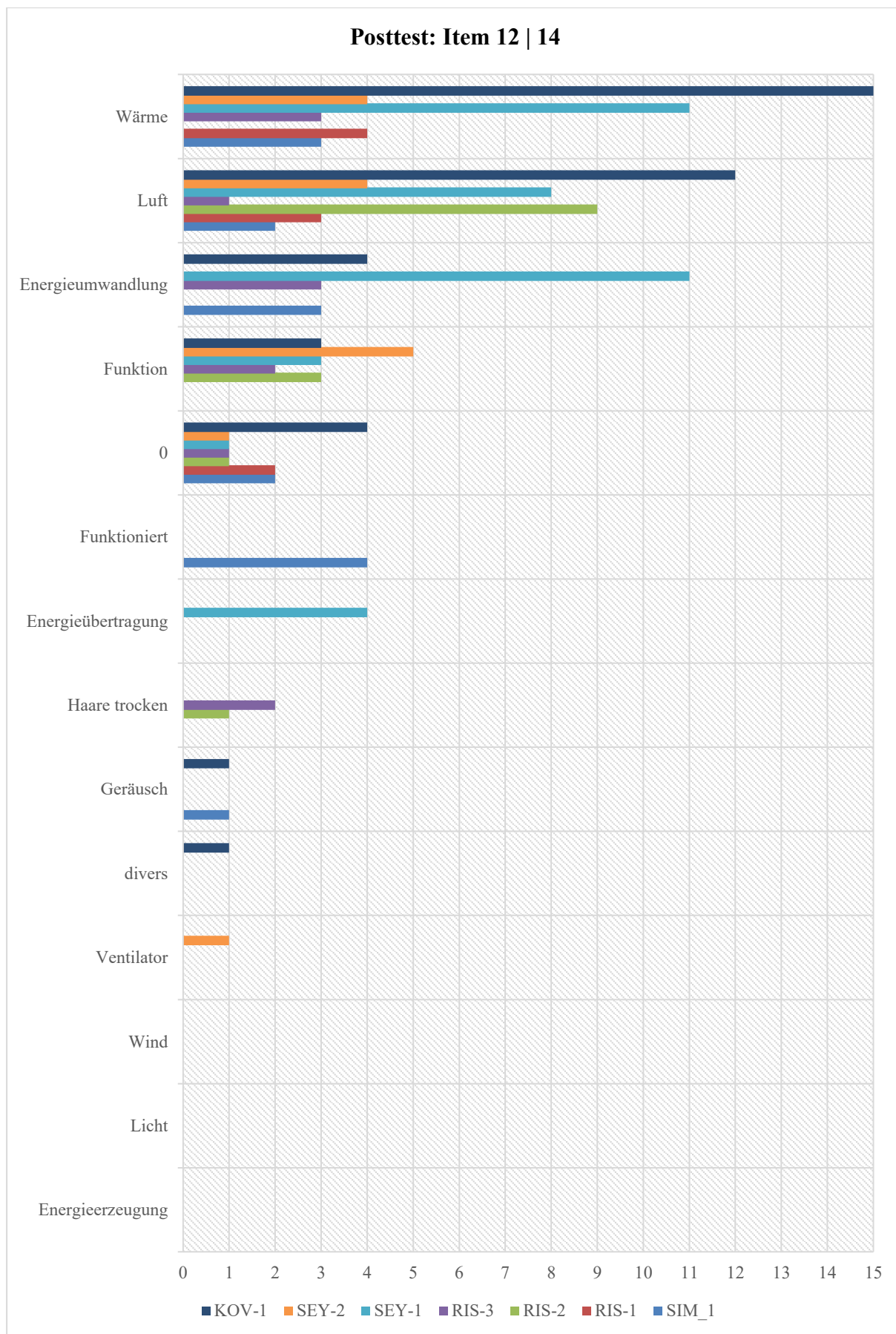


Abbildung 84: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Posttest.

Abbildung 83 und Abbildung 84 veranschaulichen die Anzahl der Schüler*innenantworten, die den jeweiligen Antwortkategorien gemäß dem Kodiermanual zugeordnet wurden. Eine detaillierte Übersicht der Zuordnungen ist auch in Tabelle 86 für den Prätest und Tabelle 87 für den Posttest zu finden.

Tabelle 86: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Prätest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.

Codes Klassen	SIM_1	RIS-1	RIS-2	RIS-3	SEY-1	SEY-2	KOV-1	Gesamt
Wärme	3	4	3	3	8	5	6	32
0	2	3	7	4	3	0	7	26
Luft	3	3	2	2	5	4	5	24
Funktion	0	0	3	3	2	6	7	21
Energieumwandlung	1	0	0	0	12	0	2	15
divers	2	0	1	0	0	0	5	8
Funktioniert	4	0	0	0	0	0	0	4
Haare trocken	0	0	1	1	1	0	0	3
Geräusch	1	1	0	0	0	0	0	2
Energieerzeugung	0	1	0	0	0	0	0	1
Energieübertragung	1	0	0	0	0	0	0	1
Licht	0	1	0	0	0	0	0	1
Wind	0	1	0	0	0	0	0	1
Ventilator	0	0	0	0	1	0	0	1

Tabelle 87: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Posttest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.

Codes Klassen	SIM_1	RIS-1	RIS-2	RIS-3	SEY-1	SEY-2	KOV-1	Gesamt
Wärme	3	4	0	3	11	4	15	40
Luft	2	3	9	1	8	4	12	39
Energieumwandlung	3	0	0	3	11	0	4	21
Funktion	0	0	3	2	3	5	3	16
0	2	2	1	1	1	1	4	12
Energieübertragung	0	0	0	0	4	0	0	4
Funktioniert	4	0	0	0	0	0	0	4
Haare trocken	0	0	1	2	0	0	0	3
Geräusch	1	0	0	0	0	0	1	2
Ventilator	0	0	0	0	0	1	0	1
divers	0	0	0	0	0	0	1	1
Energieerzeugung	0	0	0	0	0	0	0	0
Licht	0	0	0	0	0	0	0	0
Wind	0	0	0	0	0	0	0	0

In den Tabellen ist zu erkennen, dass im Prätest die häufigste Kategorie ‚Wärme‘ mit 32 Nennungen ist. Schüler*innen, denen diese Kategorie zugeordnet wurden, beschrieben die Wirkung des Föhns durch die von ihm ausgehende Wärme(energie).

Darauf folgt die Kategorie ‚0‘ mit 26 Nennungen, was für eine fehlende Antwort steht. Die Kategorie ‚Luft‘ wurde 24-mal genannt, gefolgt von ‚Funktion‘ mit 21 Nennungen. Diese Kategorien beziehen sich auf die Begründung, dass der Föhn Wärme abgibt, Luft bewegt oder seine grundsätzliche Funktion zeigt, dass Energie übertragen wurde.

Im Posttest ist ebenfalls die ‚Wärme‘ mit 40 Nennungen die häufigste Kategorie. Die Kategorie ‚Luft‘ wurde 39-mal genannt. Die Kategorie ‚Energieumwandlung‘ erscheint 21-mal, gefolgt von ‚Funktion‘ mit 16 Nennungen. Die Kategorie ‚0‘ wurde 12-mal genannt, was erneut eine fehlende Antwort darstellt.

Am seltensten genannt wurden im Prätest Kategorien wie ‚Energieerzeugung‘, ‚Energieübertragung‘, ‚Licht‘, ‚Wind‘ und ‚Ventilator‘. Diese Kategorien wurden entweder nur einmal oder gar nicht genannt, was darauf hinweist, dass diese Konzepte bei den Schüler*innen weniger präsent waren. Im Posttest sind die seltensten Kategorien ‚Ventilator‘, ‚divers‘ und ‚Geräusch‘, die jeweils nur ein- bis zweimal genannt wurden, sowie ‚Energieerzeugung‘, ‚Licht‘ und ‚Wind‘, die gar nicht genannt wurden.

Insgesamt ist bei diesem Item hervorzuheben, dass die Begründungen der Schüler*innen im Prätest und Posttest überwiegend auf leicht erkennbare physikalische Phänomene wie Wärme und Luftbewegung basieren. Dies deutet darauf hin, dass diese Konzepte für die Schüler*innen am einfachsten nachvollziehbar sind.

Item F3_7 – Kompassversuch

Das dritte Item, das in diesem Abschnitt behandelt wird, ist das Item 7, das ausschließlich im Posttest vorkam und daher nicht im Prätest enthalten war. Zunächst wurde den Schüler*innen ein Bild eines einfachen elektrischen Stromkreises mit einer Batterie, zwei Kabeln und einem Lämpchen gezeigt. Die Aufgabe bestand nun darin zu beschreiben und zu begründen, was mit einem Kompass passieren wird, der unter eines der Kabel gelegt wird (die vollständige Aufgabenstellung kann dem Fragebogen 3 bzw. dem Posttest im Anhang entnommen werden).

Zu beachten ist, dass dieses Item nur im Posttest eingesetzt wurde, da es nicht vorausgesetzt werden konnte, dass die Schüler*innen diesen Versuch bereits im Unterricht durchgeführt hatten und ihnen somit die entsprechende Erfahrung fehlte.

Die Antworten der Schüler*innen wurden durch eine qualitative Inhaltsanalyse nach der Methode von Kuckartz (siehe Abschnitt 3.4) ausgewertet. Dabei wurde jede Antwort gemäß dem

Kodierleitfaden (siehe Anhang) in eine der folgenden Kategorien eingeteilt: Code 0 für fehlende Antworten, Code 1 für nicht korrekte Aussagen, Code 2 für teilweise korrekte Aussagen und Code 3 für vollständig korrekte Aussagen. Die Ergebnisse dieser Kategorisierung sind in Abbildung 85 dargestellt.

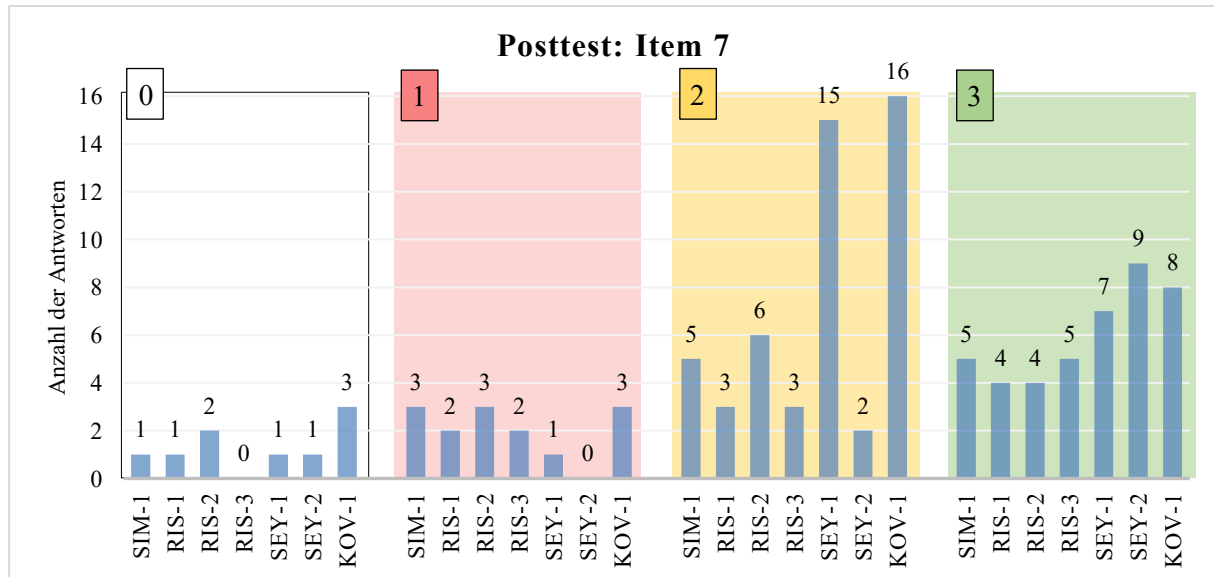


Abbildung 85: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 7 aus dem Posttest.

Insgesamt beantworteten 115 Schüler*innen aus sieben verschiedenen Klassen dieses Item. Der Mittelwert der Antworten betrug $\bar{x} = 2,09$, die Varianz lag bei $\sigma^2 = 0,79$ und die Standardabweichung betrug $\sigma = 0,89$. Tabelle 39 liefert weitere statistische Kennwerte, einschließlich Mittelwert, Varianz und Standardabweichung für jede Klasse.

Tabelle 88: Statistische Kennwerte (Mittelwert $\bar{x}$, Varianz σ^2 und Standardabweichung σ) für die Ergebnisse des Items 7 aus dem Posttest.

Klasse	$\bar{x}$	σ^2	σ
SIM-1	2,00	0,92	0,96
RIS-1	2,00	1,11	1,05
RIS-2	1,80	1,03	1,01
RIS-3	2,30	0,68	0,82
SEY-1	2,16	0,47	0,69
SEY-2	2,58	0,81	0,90
KOV-1	1,97	0,79	0,89

In der Tabelle und Abbildung ist zu erkennen, dass die Schüler*innenantworten eine relativ gleichmäßige Verteilung der Ergebnisse aufweisen, mit einem Mittelwert von rund 2,09. Die Varianz und Standardabweichung zeigen eine gewisse Streuung in den Antworten.

Item F3_8 – Oberflächenladungen

Das Item 8 wurde ausschließlich im Posttest eingesetzt. Die Schüler*innen erhielten eine Schaltskizze eines offener Stromkreises, bestehend aus einer Batterie und zwei Kabeln. Darauf waren positive und negative Oberflächenladungen zu sehen (siehe Fragebogen 3 bzw. Posttest im Anhang). Die Aufgabe bestand darin zu beschreiben, was Oberflächenladungen sind und welche Rolle sie in einem Stromkreis spielen. Auch dieses Item wurde erst im Posttest eingesetzt, da nicht vorausgesetzt werden konnte, dass die Schüler*innen bereits Vorwissen zum Thema Oberflächenladungen mitbrachten.

Die Antworten wurden gemäß der qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) ausgewertet, wie bereits in Kapitel 5 beschrieben. Jede Antwort wurde anhand des Kodierleitfadens kategorisiert und die Ergebnisse sind in Abbildung 86 dargestellt.

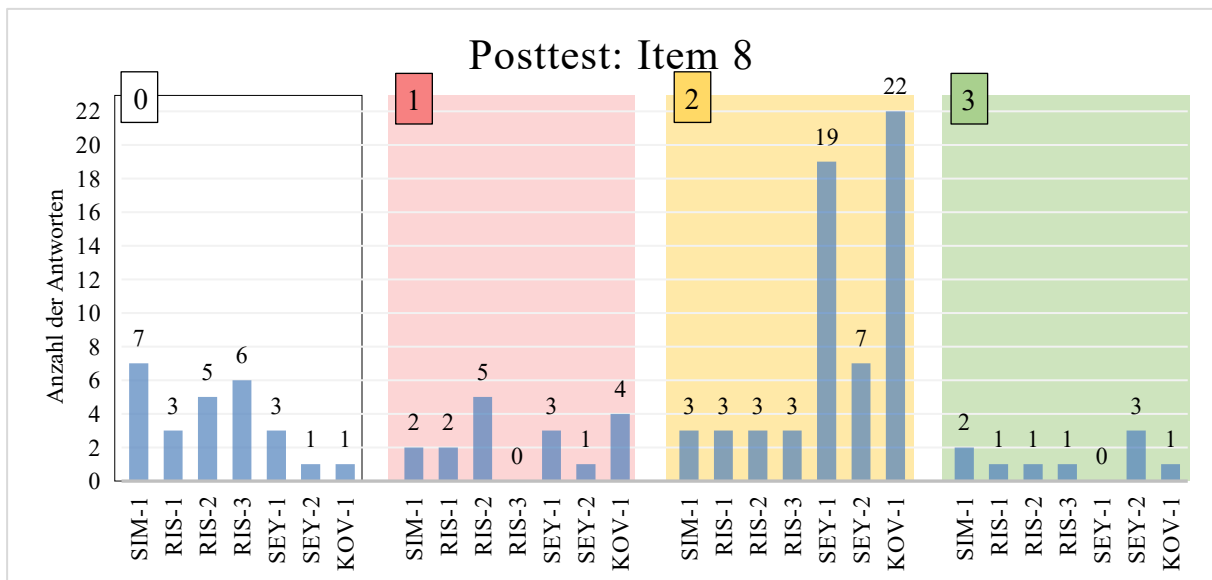


Abbildung 86: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 8 aus dem Posttest.

Insgesamt beantworteten 112 Schüler*innen aus sieben verschiedenen Klassen dieses Item. Der Mittelwert der Antworten betrug $\bar{x} = 1,46$, die Varianz lag bei $\sigma^2 = 0,88$ und die Standardabweichung betrug $\sigma = 0,94$. Tabelle 91 zeigt zusätzliche statistische Kennwerte für jede Klasse, einschließlich Mittelwert, Varianz und Standardabweichung.

Tabelle 89: Statistische Kennwerte (Mittelwert $\bar{x}$, Varianz σ^2 und Standardabweichung σ) für die Ergebnisse des Items 8 aus dem Posttest.

Klasse	$\bar{x}$	σ^2	σ
SIM-1	1,00	1,38	1,18
RIS-1	1,22	1,19	1,09
RIS-2	1,00	0,92	0,96
RIS-3	0,90	1,43	1,20
SEY-1	1,64	0,49	0,70
SEY-2	2,00	0,73	0,85
KOV-1	1,82	0,30	0,55

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Antworten der Schüler*innen zum Item 8 eine relativ breite Verteilung aufweisen. Der Mittelwert von etwa 1,46 deutet darauf hin, dass die durchschnittliche Bewertung der Antworten eher im mittleren Bereich liegt. Gleichzeitig verdeutlichen die Varianz und die Standardabweichung, dass es Unterschiede in den Verständnissen und Erklärungen der Schüler*innen zum Konzept der Oberflächenladungen gibt.

Item F3_15 – Rucksackmodell

Das Item 15 behandelt die sogenannte „Rucksackmodell“-Vorstellung, eine gängige Schüler*innenvorstellung zum Energieübertragungsprozess in elektrischen Stromkreisen (siehe Abschnitt X). In diesem Item, das im Fragebogen 3 bzw. Posttest zu finden ist (siehe Anhang), erhalten die Schüler*innen folgenden Text: „Manche Leute behaupten, dass die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich sind, indem sie die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler transportieren. Ihre Aufgabe besteht nun darin, eine Erklärung zu formulieren, ob diese Leute Recht haben.“ Das Item wurde ausschließlich im Posttest verwendet, da davon ausgegangen wurde, dass die Schüler*innen im Prätest nicht über die Kenntnisse verfügten, die durch das neue Unterrichtsdesign vermittelt wurden.

Zur Auswertung der Antworten wurde eine qualitative Inhaltsanalyse nach den gleichen Kriterien durchgeführt wie bei den vorherigen Items. Die Antworten wurden gemäß dem Kodierleitfaden in folgende Kategorien eingeordnet: Code 0 – Fehlende Antwort, Code 1 – Nicht korrekte Aussagen, Code 2 – Teilweise korrekte Aussagen, Code 3 – Vollständig korrekte Aussagen. Die detaillierten Ergebnisse sind in Abbildung 87 dargestellt.

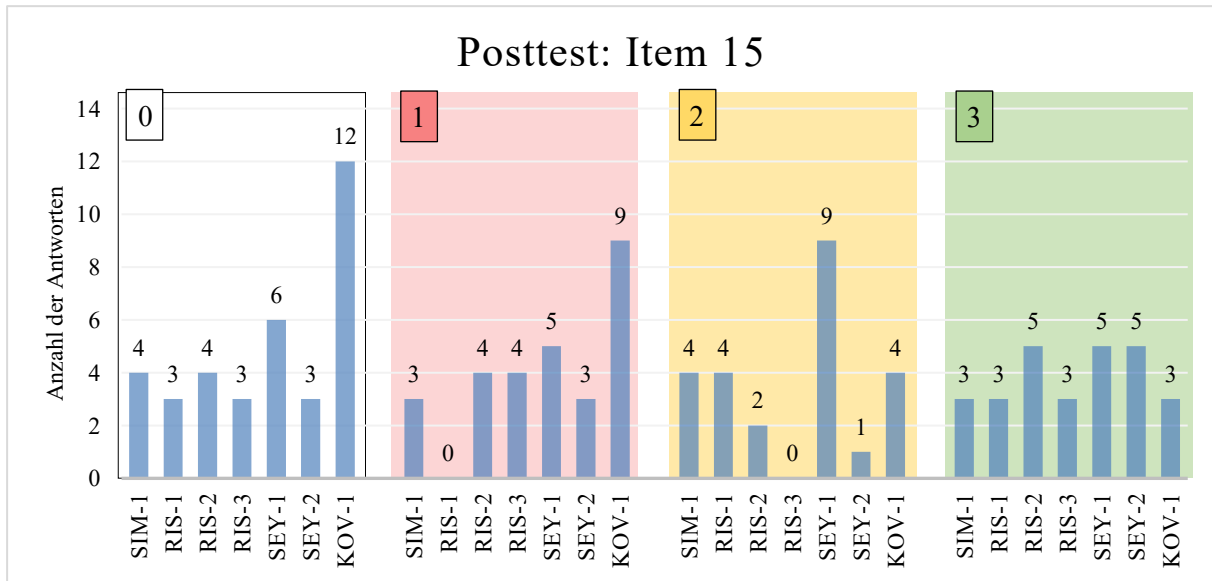


Abbildung 87: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 8 aus dem Posttest.

Dieses Item beantworteten 114 Schüler*innen aus sieben verschiedenen Klassen. Der Mittelwert der Antworten betrug $\bar{x} = 1,38$, die Varianz lag bei $\sigma^2 = 1,33$ und die Standardabweichung betrug $\sigma = 1,16$. Tabelle 911 zeigt zusätzliche statistische Kennwerte für jede Klasse, einschließlich Mittelwert, Varianz und Standardabweichung.

Tabelle 90: Statistische Kennwerte (Mittelwert $\bar{x}$, Varianz σ^2 und Standardabweichung σ) für die Ergebnisse des Items 15 aus dem Posttest.

Klasse	$\bar{x}$	σ^2	σ
SIM-1	1,43	1,34	1,16
RIS-1	1,70	1,57	1,25
RIS-2	1,53	1,55	1,25
RIS-3	1,30	1,57	1,25
SEY-1	1,52	1,18	1,08
SEY-2	1,67	1,70	1,30
KOV-1	0,93	1,03	1,02

In den Ergebnissen zeigt sich, dass die Schüler*innenantworten eine breite Verteilung aufweisen. Der Mittelwert von etwa 1,38 deutet darauf hin, dass die durchschnittliche Bewertung der Antworten eher im mittleren Bereich liegt. Die hohe Varianz und Standardabweichung weisen auf eine große Streuung in den Antworten hin. Besonders auffällig sind die Unterschiede in den Mittelwerten zwischen den Klassen. So zeigen einige Klassen wie RIS-1 und SEY-2 höhere Mittelwerte, was auf eine bessere durchschnittliche Bewertung der Antworten hindeutet, während Klassen wie KOV-1 niedrigere Mittelwerte aufweisen, was auf größere Unsicherheiten oder Missverständnisse bei den Schüler*innen dieser Klassen schließen lässt.

6.4.2 Ergebnisse des Fragebogens 2

Im Folgenden wird die Analyse der Ergebnisse des Fragebogens 2 präsentiert. Dabei wurde immer die Stichprobe von $N = 87$ Datensätzen, wie oben beschrieben, verwendet. Für die Analyse wurde die in Abschnitt 6.3.4.2 erläuterte Vorgehensweise verwendet.

Tabelle 91: Übersicht der statistischen Kennwerte für den Fragebogen 2, der eine fünfstufige Likert-Skala nutzte. Zu sehen sind die ermittelten Mittelwerte ($\bar{x}$), Varianzen (σ^2), Standardabweichungen (σ) und Mediane ($\tilde{x}$) für die Gesamtstichprobe $N = 87$.

<i>Frage</i>	$\bar{x}$	σ^2	σ	$\tilde{x}$
1. Ich denke, dass ich die Simulation gerne häufig benutzen würde.	2,47	1,35	1,16	2,00
2. Ich fand die Simulation unnötig kompliziert.	2,23	1,20	1,10	2,00
3. Ich fand die Simulation einfach zu benutzen.	3,72	1,30	1,14	4,00
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer Person, die sich damit gut auskennt benötigen, um die Simulation benutzen zu können.	2,02	1,34	1,16	2,00
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in dieser Simulation haben alle gut zusammengepasst.	3,90	1,00	1,00	4,00
6. Ich denke, die Simulation enthielt zu viele Unstimmigkeiten.	2,02	1,12	1,06	2,00
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit dieser Simulation sehr schnell lernen.	3,68	1,34	1,16	4,00
8. Ich fand die Simulation sehr umständlich zu nutzen.	2,45	1,41	1,19	2,00
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der Simulation sehr sicher.	3,51	1,65	1,28	4,00
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die Simulation zu verwenden.	2,49	1,46	1,21	2,00
11. Ich fände es gut, wenn meine Lehrpersonen die Simulation im Unterricht verwenden würden.	3,54	1,62	1,27	4,00
12. Mithilfe der Simulation würde ich besser lernen als im normalen Unterricht.	2,95	1,28	1,13	3,00
13. Die Simulation würde das Lernen in Physik interessanter machen.	3,21	1,65	1,29	3,00
14. Zusätzliche Anmerkungen (optional):	<i>offene Frage</i>			
GESAMT	2,94	1,36	1,16	2,92

Fragen 1 - 14

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fragen 1 – 14 mit ihren relativen Häufigkeitsverteilungen in Diagrammen dargestellt und anhand der Daten aus Tabelle 91 beschrieben.

Frage 1

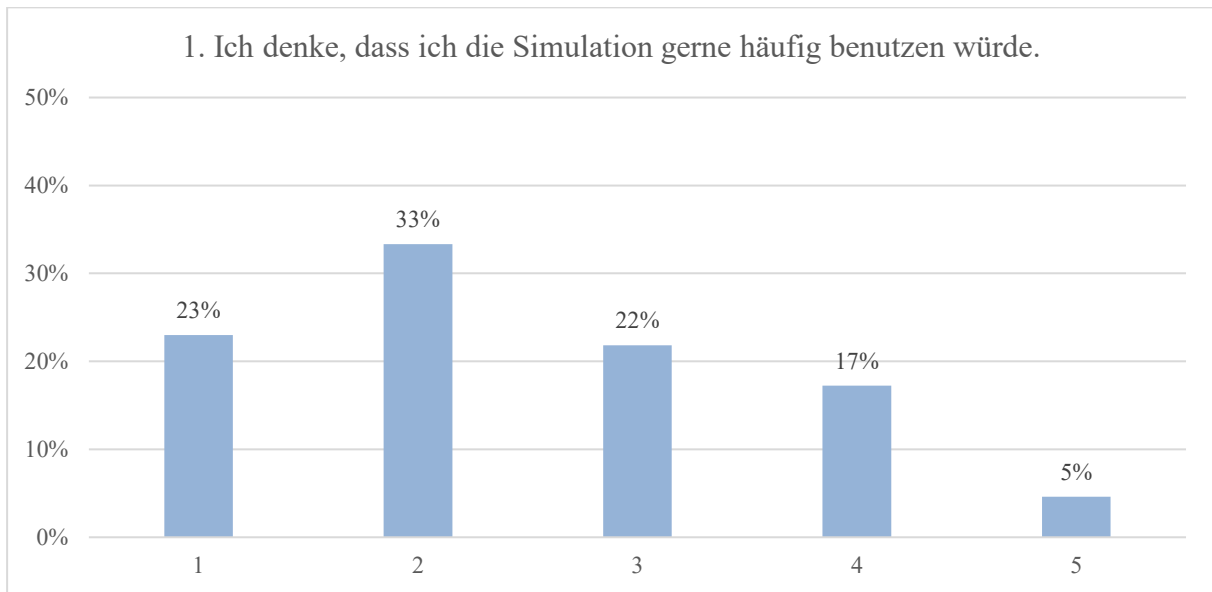


Abbildung 88: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 1 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Bei der Frage, ob die Befragten denken, dass sie die Simulation gerne häufig benutzen würden, liegt der Mittelwert bei $\bar{x} = 2,47$ (siehe Tabelle 91), was auf eine eher geringe Bereitschaft zur häufigen Nutzung der Simulation hinweist. Die Varianz ist $\sigma^2 = 1,35$, und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,16$, was auf eine moderate Streuung der Antworten hindeutet. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 2,00$, was bedeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 2 oder niedriger beantwortet haben. Insgesamt zeigt sich bei Frage 1 somit, dass die Befragten eine eher geringe Bereitschaft haben, die Simulation regelmäßig zu nutzen, wobei es eine moderate Variation in den Antworten gibt.

Frage 2

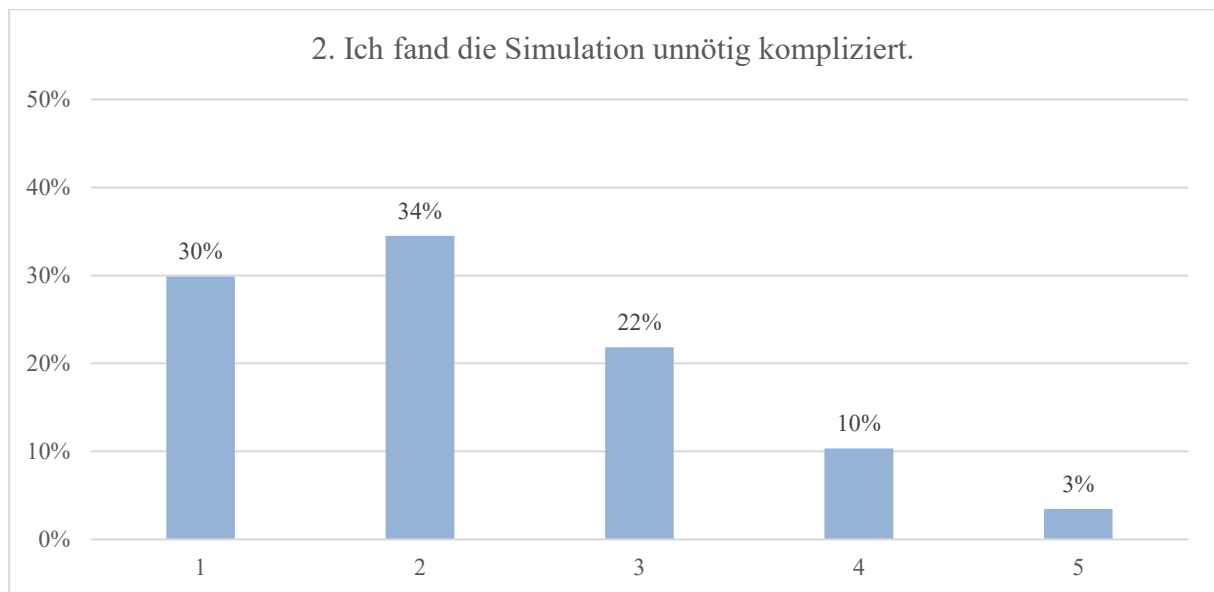


Abbildung 89: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 2 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,23$ und einem Median von $\tilde{x} = 2,00$ (siehe Tabelle 91) deuten die Antworten der Schüler*innen bei Frage 2 darauf hin, dass sie eher nicht der Meinung sind, dass die Simulation unnötig kompliziert ist. Stattdessen empfindet die Mehrheit die Komplexität der Simulation als akzeptabel. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,20$ und die Standardabweichung $\sigma = 1,10$, was auf eine moderate Streuung der Bewertungen hinweist.

Frage 3

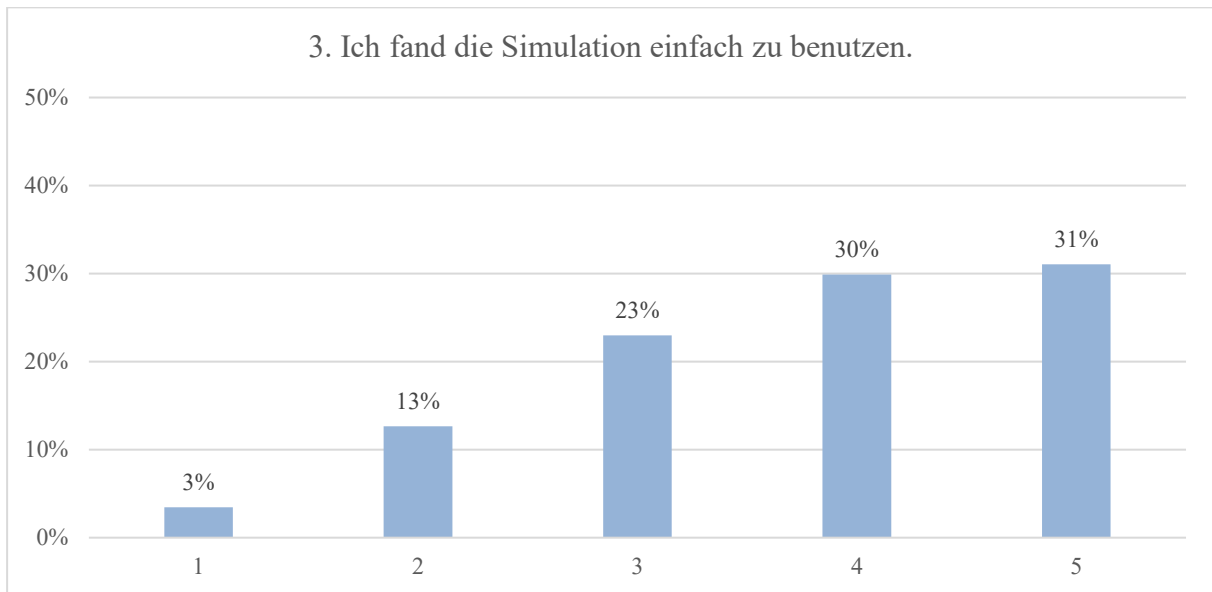


Abbildung 90: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 3 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Der Mittelwert von Frage 3 liegt bei $\bar{x} = 3,72$ (siehe Tabelle 91), was darauf hinweist, dass die befragten Schüler*innen überwiegend der Meinung sind, dass die Simulation einfach zu benutzen ist. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,30$ und die Standardabweichung $\sigma = 1,14$, was auf eine moderate Streuung der Antworten hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 4,00$, was darauf hindeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 4 oder höher beantwortet hat.

Frage 4

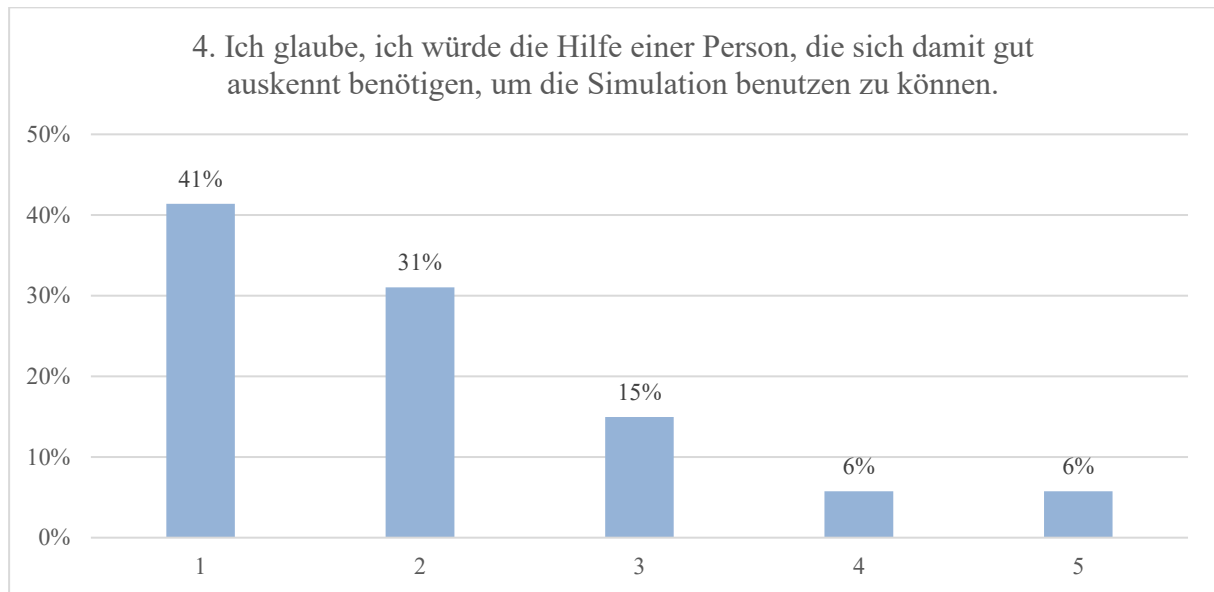


Abbildung 91: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 4 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,02$ (siehe Tabelle 91) zeigen die Befragten bei Frage 4 eine starke Ablehnung der Notwendigkeit, Hilfe von jemandem mit Fachkenntnissen zu benötigen. Stattdessen ist die Mehrheit der befragten Schüler*innen der Meinung, die Simulation auch ohne externe Unterstützung gut nutzen zu können. Die Varianz liegt bei $\sigma^2 = 1,34$ und die Standardabweichung bei $\sigma = 1,16$, was auf eine moderate Streuung der Antworten hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 2,00$, was bedeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 2 oder niedriger beantwortet hat.

Frage 5

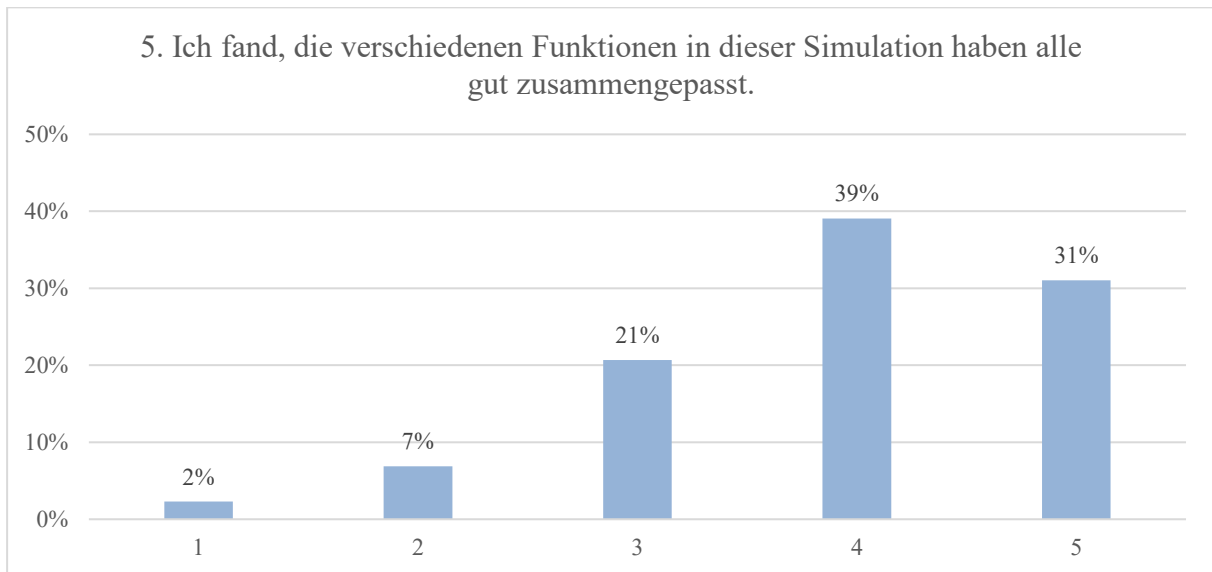


Abbildung 92: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 5 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Der Mittelwert bei Frage 5 beträgt $\bar{x} = 3,90$ (siehe Tabelle 91), was darauf hinweist, dass die Befragten überwiegend der Meinung sind, dass die Funktionen der Simulation gut zusammenpassen. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,00$ und die Standardabweichung $\sigma = 1,00$, was auf eine relativ geringe Streuung in den Bewertungen hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 4,00$, was darauf hindeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 4 oder höher beantwortet hat.

Frage 6

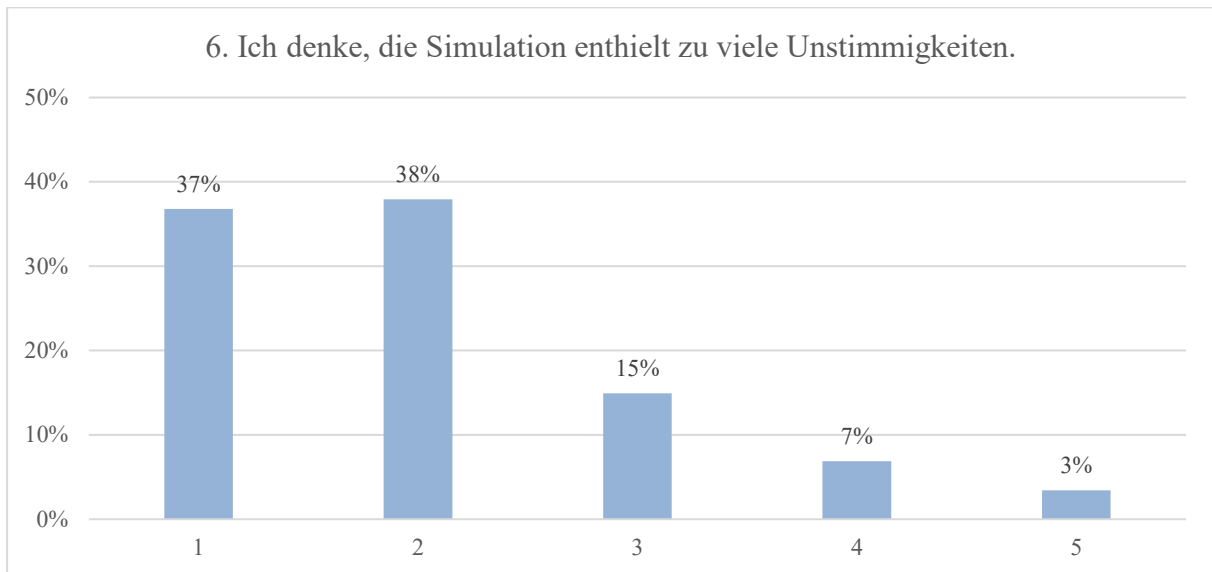


Abbildung 93: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 6 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,02$ (siehe Tabelle 91) zeigen die befragten Schüler*innen insgesamt eine starke Ablehnung der Behauptung, dass die Simulation zu viele Unstimmigkeiten enthält. Die Befragten empfanden die Simulation also insgesamt nicht als unstimmig. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,12$ und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,06$, was auf eine geringe Streuung der Antworten hindeutet. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 2,00$, was bedeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 2 oder niedriger beantwortet hat.

Frage 7

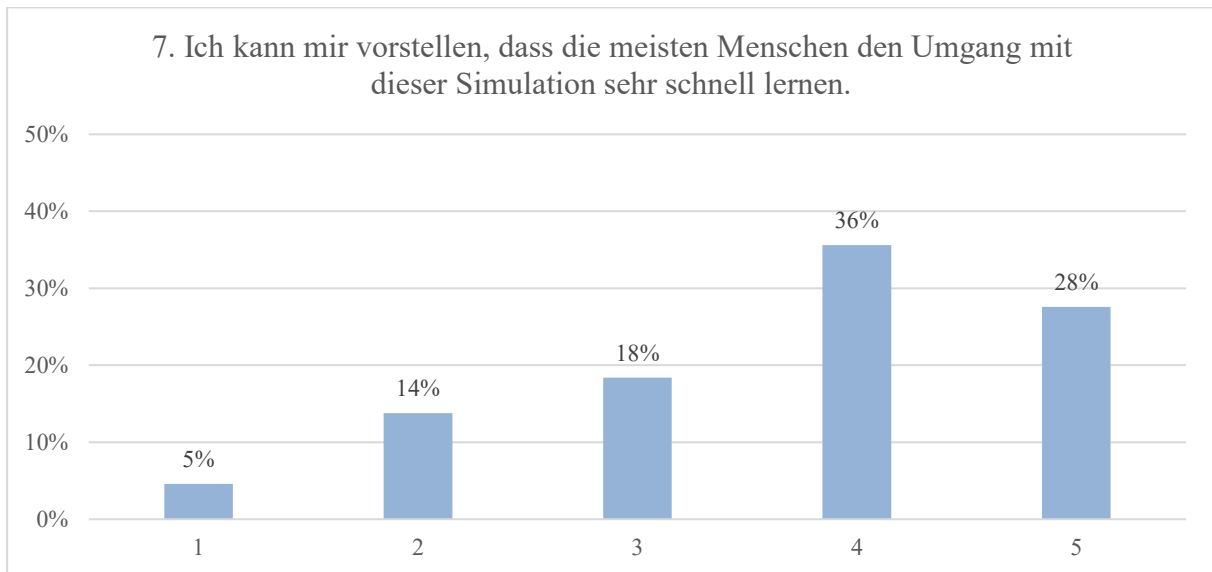


Abbildung 94: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 7 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Der Mittelwert bei Frage 7 liegt bei $\bar{x} = 3,68$ (siehe Tabelle 91), was darauf hinweist, dass die Schüler*innen überwiegend glauben, dass die meisten Menschen den Umgang mit der Simulation schnell lernen können. Jedoch ist zu beachten, dass die Varianz $\sigma^2 = 1,41$ und die Standardabweichung $\sigma = 1,19$ beträgt, was auf eine erhebliche Streuung der Bewertungen hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 2,00$, was darauf hindeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 2 oder niedriger beantwortet hat.

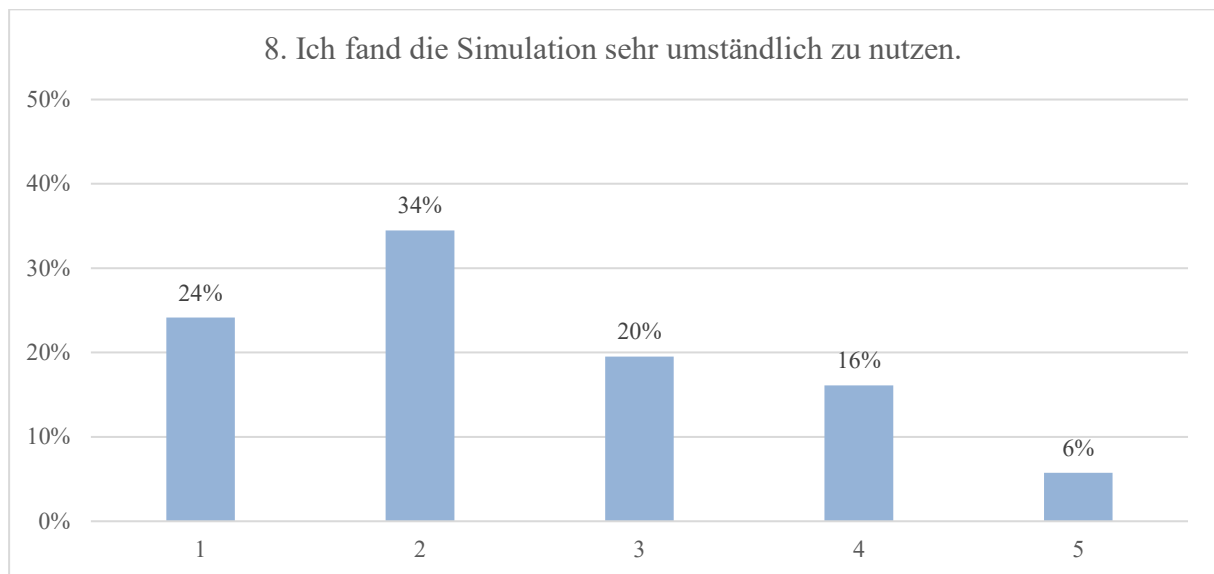
Frage 8

Abbildung 95: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 8 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,45$ (siehe Tabelle 91) bei Frage 8, stimmen die Befragten eher nicht zu, dass die Simulation umständlich zu nutzen ist. Stattdessen empfindet die Mehrheit die Nutzung der Simulation als nicht besonders umständlich. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,41$ und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,19$, was auf eine erhebliche Streuung der Bewertungen hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 2,00$, was darauf hindeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 2 oder niedriger beantwortet hat. Zusammenfassend wurde die Nutzung der Simulation nicht als besonders umständlich empfunden, mit einer deutlichen Streuung in den Antworten.

Frage 9

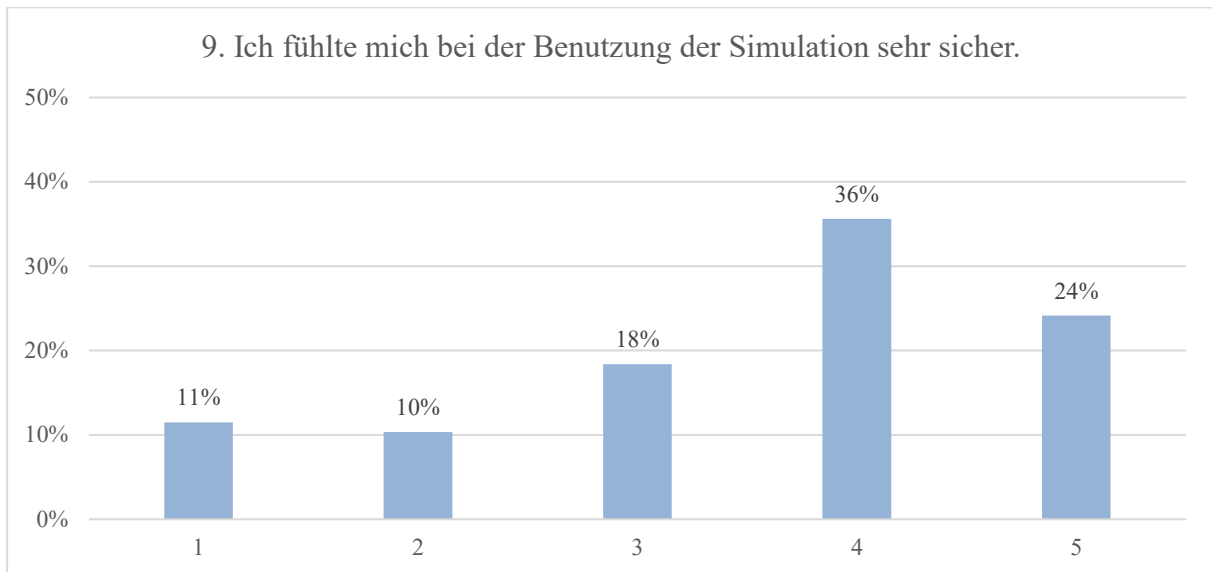


Abbildung 96: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 9 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Der Mittelwert für Frage 9 beträgt $\bar{x} = 3,51$ (siehe Tabelle 91), was darauf hinweist, dass die Schüler*innen tendenziell zustimmen, dass sie sich bei der Nutzung der Simulation sicher fühlten. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,65$ und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,28$, was auf eine erhebliche Streuung in den Antworten hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 4,00$, was bedeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 4 oder höher beantwortet hat. Zusammenfassend fühlten sich die Befragten überwiegend sicher bei der Benutzung der Simulation, obwohl es eine erhebliche Variation in den Antworten gibt.

Frage 10

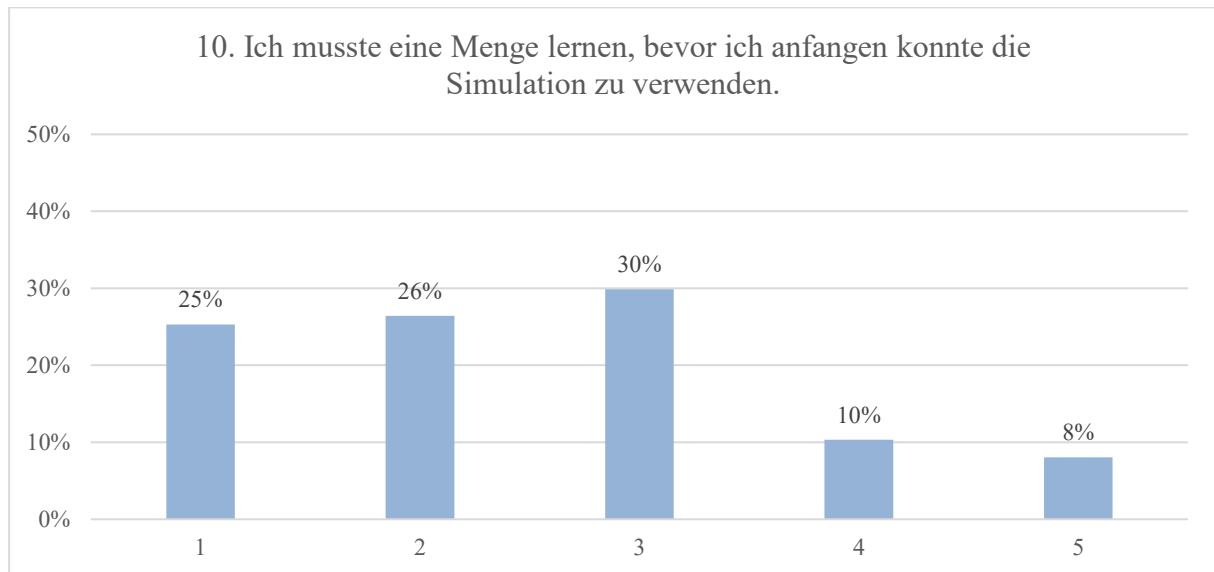


Abbildung 97: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 10 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Der Mittelwert für Frage 10 liegt bei $\bar{x} = 2,49$ (siehe Tabelle 91), was darauf hinweist, dass die Befragten eher nicht zustimmen, dass ein großer Lernaufwand erforderlich war, bevor die Simulation verwendet werden konnte. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,46$ und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,21$, was auf eine moderate Streuung der Bewertungen hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 2,00$, was bedeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 2 oder niedriger beantwortet hat. Zusammenfassend wurde der Lernaufwand, um die Simulation zu verwenden, nicht als besonders hoch empfunden, und es gibt eine moderate Variation in den Antworten.

Frage 11

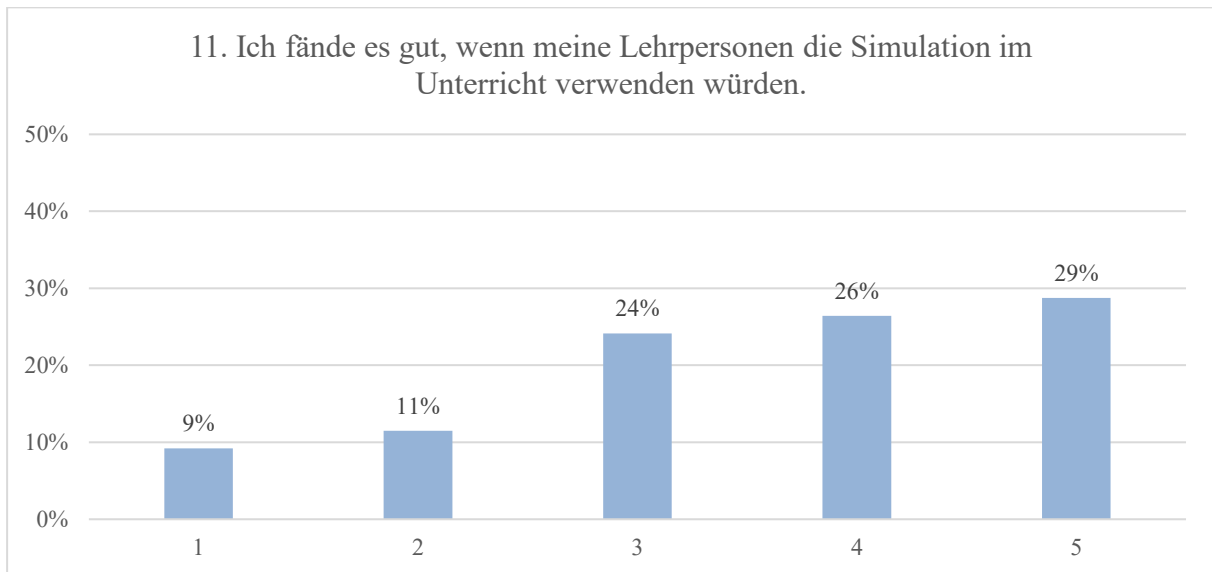


Abbildung 98: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 11 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 3,54$ (siehe Tabelle 91) zeigen die befragten Schüler*innen bei Frage 11 eine positive Einstellung zur Nutzung der Simulation im Unterricht. Ein Wert nahe 4 deutet darauf hin, dass viele Befragte die Integration der Simulation durch ihre Lehrperson in den Unterricht begrüßen würden. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,62$ und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,27$, was auf eine erhebliche Streuung der Antworten hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 4,00$, was darauf hindeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 4 oder höher beantwortet hat. Zusammenfassend würden die meisten Befragten es begrüßen, wenn die Simulation im Unterricht verwendet wird, obwohl die Bewertungen stark variieren.

Frage 12

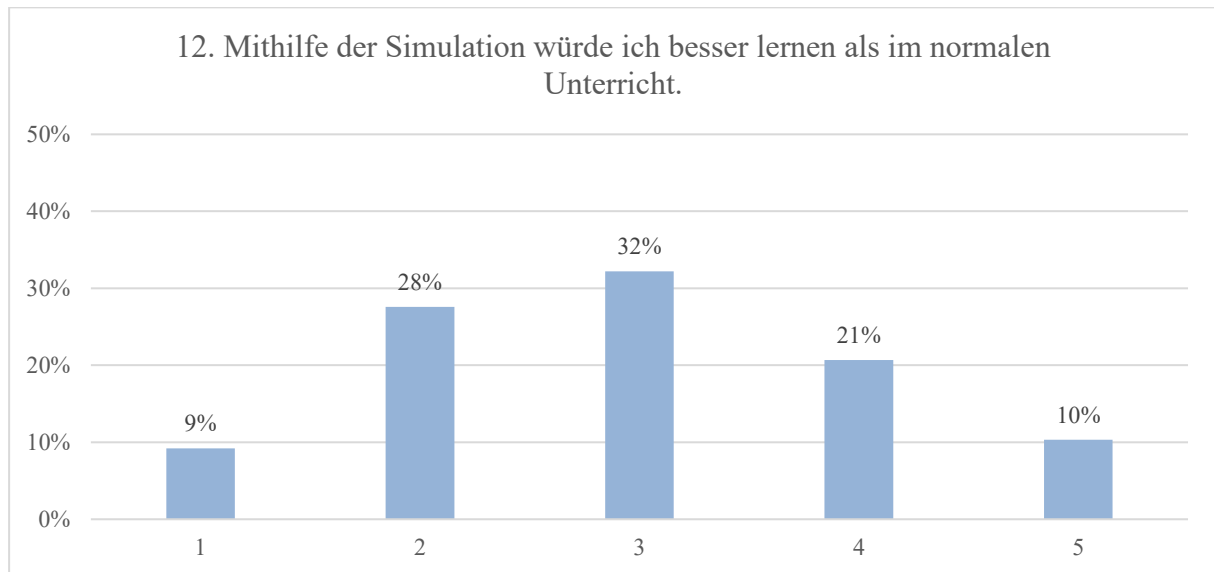


Abbildung 99: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 12 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Bei der Frage, ob die Schüler*innen mithilfe der Simulation besser lernen würden als im normalen Unterricht, ergab sich ein Mittelwert von $\bar{x} = 2,95$ (siehe Tabelle 91), was auf eine neutrale bis leicht positive Einschätzung hinweist. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,28$ und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,13$, was auf eine moderate Streuung der Antworten hindeutet. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 3,00$, was bedeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 3 beantworteten. Zusammenfassend sind die Antworten der Schüler*innen also gemischt, mit einer moderaten Variation in den Bewertungen.

Frage 13

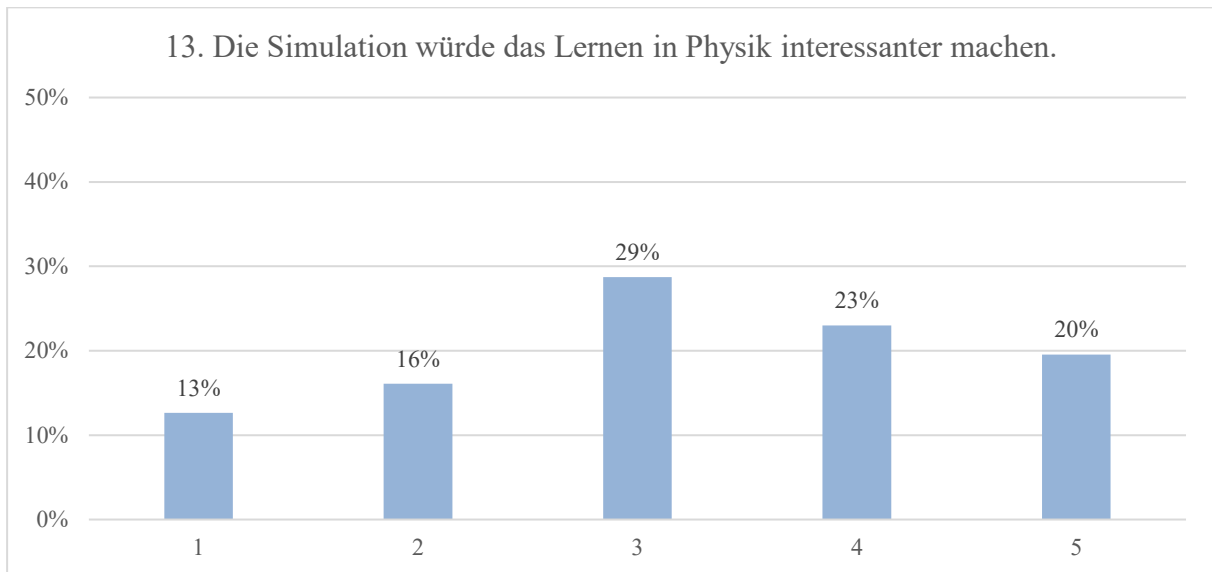


Abbildung 100: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 13 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 3,21$ (siehe Tabelle 91), zeigt sich eine eher positive Einschätzung der Interessantheit der Simulation für das Physiklernen. Die Varianz beträgt $\sigma^2 = 1,65$ und die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 1,29$, was auf eine erhebliche Streuung der Antworten hinweist. Der Median liegt bei $\tilde{x} = 3,00$, was bedeutet, dass mindestens die Hälfte der Befragten diese Frage mit einem Wert von 3 beantwortet hat. Zusammenfassend wird die Simulation als etwas interessanter für das Physiklernen angesehen, mit einer deutlichen Streuung in den Antworten.

Frage 14 (offene Frage)

Die Schüler*innen hatten in Frage 14 die Möglichkeit, zusätzliche Anmerkungen zur Nutzbarkeit der Simulation abzugeben. Diese Gelegenheit nutzen zumindest 12 der teilnehmenden Schüler*innen. Die wichtigsten Rückmeldungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) **Technische Probleme auf mobilen Geräten:** Sieben Rückmeldungen betonten, dass die Simulation auf mobilen Geräten, insbesondere auf Smartphones, nicht gut funktionierte. Es wurde berichtet, dass die Steuerung umständlich sei, sich die Darstellung verschiebe und die Simulation insgesamt nicht benutzerfreundlich sei.
- 2) **Benutzerfreundlichkeit und Steuerung:** Drei Anmerkungen bezogen sich auf die Steuerung und die Kameraperspektive der Simulation. Es wurde kritisiert, dass die Kameraperspektive und die 3D-Ausrichtung verwirrend seien und die Steuerung, insbesondere das Verschieben oder Wischen, nicht intuitiv sei.
- 3) **Visualisierung der Magnetfeldlinien:** Ein spezifischer Vorschlag zur Verbesserung der Simulation war die bessere Visualisierung der Magnetfeldlinien. Es wurde angeregt, eine unterschiedliche Schattierung zu verwenden, um die Position der Magnetfeldlinien besser unterscheiden zu können.
- 4) **Positive Rückmeldungen:** Trotz der Kritik gab es auch positive Rückmeldungen. Ein*e Schüler*in bedankte sich dafür, Teil der neuen Lernmethode sein zu dürfen. Eine*r andere*r Schüler*in erwähnte zudem, dass die Simulation am Computer gut zum Verständnis beitrug.
- 5) **Allgemeine Kritik:** Zwei Kommentare drückten allgemeine Unzufriedenheit mit der Simulation oder den gestellten Fragen aus.

Insgesamt deuteten die Rückmeldungen darauf hin, dass die Simulation insbesondere auf mobilen Geräten verbessert werden muss, um benutzerfreundlicher und intuitiver zu sein. Die positiven Aspekte der Simulation, insbesondere bei der Nutzung am Computer, wurden jedoch ebenfalls hervorgehoben.

Die Rückmeldungen wurden an den Entwickler der Simulation weitergeleitet, um eine verbesserte Version zeitnah bereitstellen zu können und die Nutzerfreundlichkeit zu erhöhen.

6.4.3 Interviews mit den Lehrpersonen

Neben den Fragebögen 1-3 dienten Lehrer*inneninterviews als Evaluationsinstrument zur Beurteilung des neuen Unterrichtsdesigns. In diesem Kapitel werden die Gespräche mit den vier an der Studie teilnehmenden Lehrpersonen detailliert dargestellt. Ziel ist es, umfassende Einblicke zu gewinnen, um zu verstehen, welche Aspekte des Unterrichtsdesigns erfolgreich umgesetzt wurden und wo noch Verbesserungspotenzial besteht. Aus Platzgründen wurden die vollständigen Transkripte nicht in diese Arbeit aufgenommen; sie sind auf Anfrage bei der Autorin erhältlich.

6.4.3.1 Interview 1

Rahmeninformationen

Im ersten Interview, das im Rahmen dieser Studie geführt wurde, wurde die Lehrperson mit dem Code SIM befragt. Diese Lehrperson ist an Schule 1 tätig, einem bilingualen Gymnasium (Unterrichtssprachen: Englisch und Deutsch). Die Klasse, die Gegenstand des Interviews war, ist eine 7. Klasse (11. Schulstufe) im Realgymnasium-Zweig, bestehend aus 14 Schüler*innen. Der Zeitraum für die Durchführung des LLAs erstreckte sich vom 9. Oktober bis zum 1. Dezember und umfasste insgesamt sechs Unterrichtseinheiten zu je 50 Minuten.

Allgemeiner Eindruck

Die Lehrperson, die im Interview ihre Eindrücke zur Unterrichtssequenz schilderte, zeigte sich grundsätzlich positiv gegenüber dem neuen Unterrichtskonzept. SIM erklärte, dass es „vernünftig wäre im Unterricht das so einzubauen, wie es in diesem Konzept vorgesehen ist“ da dieses Konzept „einfach präziser ist, auf die fachlichen Aspekte bezogen.“ Dies führte dazu, dass einige komplexe Themen, insbesondere der Stromkreis, „ein bisschen erleichtert“ wurden, was er als Vorteil ansah (Interview mit SIM, Pos. 6-14, 00:00:42-00:01:41).

Jedoch wies SIM auch auf die Herausforderung hin, dass die Verwendung der ‚Energiehandregel‘ eine zusätzliche Komplexität mit sich bringt. Trotz dieser Komplexität betonte er, dass, das Unterrichtsdesign in der Oberstufe gut umsetzbar sei, wenn man sich genug Zeit dafür nimmt. Für die Unterstufe sei diese Regel jedoch laut SIM möglicherweise schwieriger umzusetzen (Interview mit SIM, Pos. 6-14, 00:00:42-00:01:41).

Zusammenfassend überlegte SIM, ob es sinnvoll wäre, die Einführung der elektromagnetischen Felder „von Grund auf so zu machen,“ um „einigen Problemen aus dem Weg zu gehen.“ Diese Überlegung basiert auf der Erkenntnis, dass das Konzept laut SIM dazu beitragen könnte, bestehende Schwierigkeiten zu minimieren und den Unterricht effektiver zu gestalten (Interview mit SIM, Pos. 6-14, 00:00:42-00:01:41).

Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr

In Bezug auf die Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr erklärte die Lehrperson, dass das Konzept zu Beginn des Schuljahres integriert wurde. Auf die Frage, ob SIM diese Position beibehalten würde oder das Konzept später im Jahr einbauen würde, erläuterte er: „Bei mir war es jetzt so, dass es die Mischung war aus davor klassisch (...) die Lorentzkraft zu machen, klassisch die Induktion zu machen, wie man es ursprünglich gemacht hat.“ Zudem erwähnte SIM, dass er zuvor bereits den „Ørsted [Versuch]“ in seiner Klasse behandelt hatte und erst anschließend mit dem neuen Unterrichtsdesign einstieg (Interview mit SIM, Pos. 15-26, 00:01:41-00:02:43).

Die Lehrperson bevorzugte jedoch eine andere Herangehensweise für die Zukunft. SIM schlug vor, das Unterrichtskonzept direkt zu Beginn des Schuljahres zu integrieren, indem er zunächst die Elektrizitätslehre und anschließend Allgemeines zu Feldern behandelt, um den Begriff Felder klar zu definieren. Nach diesem theoretischen Teil würde er das Konzept einführen und danach die elektromagnetischen Anwendungen noch genauer besprechen. Dies würde es ermöglichen, auf den Elektromotor und verwandte Konzepte einzugehen und so eine umfassendere und logischere Abfolge der Themen zu gewährleisten (Interview mit SIM, Pos. 15-26, 00:01:41-00:02:43).

Durchführung von Block 1

Im ersten Block der Unterrichtseinheit, der sich mit der Einführung von Begriffen wie ‚kabelgebundene und kabellose Systeme‘, ‚Energiequelle‘, ‚Energieumwandler‘ und ‚Überträgermedium‘ beschäftigte, zeigte sich die Lehrperson erfreut über die positive Aufnahme durch die Schüler*innen. Er berichtete, dass es „so niederschwellig“ war, dass die Schüler*innen den Eindruck hatten, sie begännen mit einem sehr einfachen Thema. Dies führte dazu, dass die Schüler*innen, die in der Vergangenheit bereits viel über die Elektrizitätslehre gelernt hatten, „sehr schnell merkten, dass die Begriffe voll auf den Alltag bezogen“ waren, insbesondere durch das Beispiel der „kabellosen Ladesysteme“. Der Unterricht startete „sehr locker“ und die Schüler*innen beteiligten sich rege an der Diskussion, was laut SIM sonst selten der Fall sei (Interview mit SIM, Pos. 32-42, 00:03:08-00:04:04).

Die Lehrperson merkte jedoch kritisch an, dass im Konzept zwar ‚kabellose Systeme‘ eingeführt wurden, der Hauptfokus jedoch auf ‚kabelgebundenen Systemen‘ lag, während ‚kabellose Systeme‘ nur als optionale Erweiterung behandelt wurden. Dies führte laut SIM dazu, dass die Schüler*innen sich fragten, „was jetzt mit dem kabellosen System“ sei, da es in der Anwendung oder in der Erklärung nicht weiter behandelt wurde. Um diesem Punkt zu begegnen, plante die

Lehrperson, am Ende der Einheit noch einmal auf die kabellosen Systeme einzugehen. Er beabsichtigte, „die elektromagnetischen Wellen“ zu behandeln und diese Konzepte durch das Zeigen einer Simulation zu verdeutlichen, bei der er den Schüler*innen veranschaulichen würde, dass „auch ohne Kabel ein Feld existiert“ (Interview mit SIM, Pos. 46-57, 00:04:16-00:04:46).

Durchführung von Block 2

Im zweiten Block der Unterrichtseinheit, der mit dem magnetischen Feld begann, wies SIM darauf hin, dass die Schüler*innen den Ørsted-Versuch bereits in einer vorigen Stunde als Demonstrationsversuch gesehen und erklärt bekommen hatten. Dennoch merkte SIM im Interview an, dass einige Schwierigkeiten auftraten, als die Schüler*innen den Versuch selbst durchführen sollten. Die Lehrperson beobachtete, dass die Schüler*innen „Probleme hatten, das [den Versuch] überhaupt richtig aufzustellen“, obwohl sie den Versuch bereits einmal gesehen hatten. Insbesondere hatten die Schüler*innen Schwierigkeiten mit der Positionierung des Kabels relativ zum Kompass (Interview mit SIM, Pos. 58-80, 00:04:54-00:06:39).

Ein weiteres Problem, das die Lehrperson bemerkte, war der Einfluss des Erdmagnetfelds auf den Versuch, wie in dieser Interviewpassage deutlich wird:

„Was aber zu Problemen geführt hat, (...) ist, dass meiner Meinung oder meiner Gefühle nach das Erdmagnetfeld doch so stark ist, dass es nicht zum rechten Winkel kommt, wenn du es nicht, ja, wenn du es so aufstellst, dass meistens so ein 30-40 Grad Winkel oder sowas entsteht, wo nicht ganz klar ist, das ist der rechte Winkel, das geht halt beim Versuch frontal dann perfekt auf den rechten Winkel erreicht.“
(Interview mit SIM, Pos. 67-80, 00:05:33-00:06:39)

Nach einer kurzen Rückfrage durch die Interviewerin wurde deutlich, dass SIM die Fußnote in der Lehrer*innenhandreichung übersehen hatte, in der auf diesen Umstand hingewiesen wurde. In Zukunft wäre also ein deutlicherer Hinweis seitens SIM gewünscht.

Hinsichtlich der Magnetfeld-Konstruktion am zugehörigen Arbeitsblatt beschrieb die Lehrperson, dass die Schüler*innen aufgrund ihrer Vorkenntnisse und der grafischen Darstellung auf der PowerPoint schnell ein Verständnis für das Magnetfeld aufbauten. Die Verwendung von zwei Kompassen in den grafischen Darstellungen erleichterten laut SIM das Gespür für die dreidimensionalen Aspekte des Magnetfeldes erheblich (Interview mit SIM, Pos. 95-105, 00:07:20-00:08:09).

Laut Angaben von SIM wurde der Versuch mit der Strommesszange mit dieser Klasse nicht explizit behandelt, und das gezeigte Video darüber wurde als „wenig kommentiert“ beschrieben (Interview mit SIM, Pos. 13-20, 00:08:20-00:08:20). Der Lehrperson sah ein, dass eine „hands-on“ Erfahrung, wie das Experimentieren mit der Zange, möglicherweise effektiver gewesen

wäre, da den Schüler*innen im Vergleich dazu der Ventilator-Versuch am Ende des Unterrichtsdesign sehr gefallen hätte (Interview mit SIM, Pos. 111-118, 00:08:20-00:09:04).

Die Einführung der Oberflächenladungen und des elektrischen Feldes wurde dagegen als „komplex“ beschrieben. Der Lehrperson versuchte, die Schüler*innen durch ständiges Wiederholen des Konzepts klarzumachen, dass es wichtig ist, das elektrische Feld auch ohne geschlossenen Stromkreis zu verstehen (Interview mit SIM, Pos. 123-137, 00:09:25-00:10:33).

Trotz der wiederholten Erklärungen zeigten einige Schüler*innen auch bis zuletzt noch Unsicherheiten in Bezug darauf, welche Rolle die Oberflächenladungen im Stromkreis spielen. SIM führte diesen Umstand aber auf die Zusammensetzung der Klasse zurück (Interview mit SIM, Pos. 123-137, 00:09:25-00:10:33).

In Bezug auf die Energie-Hand-Regel beschrieb die Lehrperson die Einführung als herausfordernd. Die Schüler*innen empfanden es als „nervig“, eine neue Handregel zu lernen, und es war laut SIM erforderlich, „Motivationsarbeit“ zu leisten, um sie zur Akzeptanz der Regel zu bewegen (Interview mit SIM, Pos. 175-190, 00:13:00-00:14:12). Die Lehrperson schlug vor, in Zukunft die Reihenfolge der Unterrichtsinhalte zu ändern, indem man zunächst dieses Unterrichtsdesign und erst später die Lorentzkraft behandelt (Interview mit SIM, Pos. 175-190, 00:13:00-00:14:12).

Laut SIM behandelte er die Simulation zur Veranschaulichung der Felder im elektrischen Stromkreis mit den Schüler*innen und er überließ es ihnen, selbst damit zu arbeiten. Die Lehrperson merkte diesbezüglich im Interview an, dass es in Zukunft hilfreich sein könnte, 2-3 gezielte Aufgaben zu integrieren, um die Schüler*innen mit der Simulation arbeiten zu lassen. Dies könnte dazu beitragen, dass die Schüler*innen sich intensiver mit den Konzepten auseinandersetzen und ein besseres Verständnis entwickeln (Interview mit SIM, Pos. 206-216, 00:15:12-00:16:08).

Die Mindmap, die am Ende des zweiten Blocks von den Schüler*innen zur Festigung erstellt werden sollte, wurde laut SIM aufgrund von Zeitmangel und Unterrichtsausfällen nicht behandelt. Die Unterrichtseinheit zog sich laut SIM durch Krankenstand und Ausfälle über einen Zeitraum von acht Wochen (Interview mit SIM, Pos. 238-252, 00:17:35-00:18:140).

Durchführung von Block 3

Anschließend fragt die Interviewerin die Lehrperson SIM nach einem Erfahrungsbericht zur Durchführung des dritten Blocks des Unterrichtsdesigns.

Zu Beginn spricht SIM über den Wechselstromkreis und erklärt, dass dieses Thema zwar nicht neu für die Klasse war, aber bisher im Unterricht nicht vertieft behandelt wurde. Die Schüler*innen hatten aber laut SIM genug Vorwissen aus der Unterstufe und ihrem Alltag, was es

erleichterte, das Thema zu vermitteln. Der Lehrer betonte, dass die Schüler*innen schnell verstanden, dass es die eine Form gibt „wo sie [die Elektronen] im Leiterinneren quasi sich immer in die gleiche Richtung bewegen“ und die andere Form gibt „wo sich die Ladungen im Leiterinneren einmal einfach hin und her bewegen“ (Interview mit SIM, Pos. 258-272, 00:18:43-00:19:55).

SIM beschrieb weiter, wie er das Konzept der elektromagnetischen Felder im Gleich- und Wechselstromkreis durch das Schritt-für-Schritt Vorgehen, wie es in der Lehrer*innenhandreichung beschrieben ist, an die Schüler*innen vermittelte. Überraschenderweise stellten die Schüler*innen laut SIM fest, dass sich der Energiefluss-Pfeil nicht ändert, selbst wenn die Batterie umgedreht wird (Interview mit SIM, Pos. 258-272, 00:18:43-00:19:55).

Das strukturierte, schrittweise Vorgehen empfand der Lehrer sehr effektiv. Es half den Schüler*innen, die Konzepte zu verinnerlichen und auf die ‚Energie-Hand-Regel‘ anzuwenden. Die Verwendung des Videos, das die räumliche Ausbreitung des Feldes zeigt, unterstützte das Verständnis der Schüler*innen weiter. Obwohl das Video auf Englisch³⁵ war, half es zudem dabei, anschließend die Geschwindigkeit der Energieübertragung mit den Schüler*innen zu diskutieren, was insgesamt laut SIM gut gelang (Interview mit SIM, Pos. 284-300, 00:20:28-00:21:41). Anschließend thematisierte SIM die Energieerhaltung und Wärmeenergie, indem er alltägliche Beispiele wie Ventilatoren und Glühlampen heranzog, um die Prinzipien anschaulicher zu machen. Diese Themen wurden laut seiner Aussage von den Schüler*innen gut angenommen. Er setzte zudem die kognitive Stoppschilder aus der Lehrer*innenhandreichung ein, um wichtige Aspekte hervorzuheben, was laut SIM jedoch nur teilweise erfolgreich war, da die Schüler*innen nicht immer verstanden, was die Symbole bedeuten sollten. Dies beschreibt SIM in folgender Interviewpassage:

„Na, aber grundsätzlich. Kognitive Stoppschilder bringen viel. ((2)) Ich denke halt man müsste als Lehrer quasi, das von Anfang an so unterrichten, weil dann würden sie ja verstehen, was es wirklich ist. Ich hab versucht, [die Symbole] am Anfang zu erklären, aber sie [die Schüler*innen] würden jetzt sicher nicht erklären können, was ist jetzt dieses kognitive Stoppschild, im Nachhinein. Am Anfang beim ersten [Symbol] habe ich es ihnen erklärt, warum / was das Konzept dahinter ist. Sie haben es akzeptiert. Aber wenn ich das so unterrichte, wäre es vernünftig, wenn man vielleicht immer wieder das verwendet, dass man in verschiedenen Themen das auch verwendet. Würde ich auch, weil es ist wirklich – besonders für physikalische Themen ist es eine interessante Idee. [Die] Frage ist, ob man es so nennt. Weil das

³⁵ Das Video war auch in deutscher Sprache erhältlich, dies hatte SIM-1 aber übersehen.

klingt so sperrig und komplex.“ (Interview mit SIM, Pos. 319-327, 00:23:02-00:23:49).

Aus dieser Interviewpassage wird klar, dass SIM die kognitiven Stoppschilder als grundsätzlich nützlich ansieht, um wichtige Lerninhalte hervorzuheben. Er merkt jedoch an, dass diese Symbole von den Schüler*innen nicht vollständig verstanden wurden. SIM betont, dass es hilfreich wäre, diese Stoppschilder auch abseits des Unterrichtsdesigns im Unterricht zu integrieren. So könnten die Schüler*innen ein besseres Verständnis für deren Bedeutung entwickeln. Er erläutert zudem, dass er zu Beginn des Unterrichts versucht hat, das Konzept der kognitiven Stoppschilder zu erklären und dass die Schüler*innen es zwar akzeptierten, aber im Nachhinein wahrscheinlich nicht genau erklären könnten, was es bedeutet³⁶. Ferner äußert SIM Bedenken an der Terminologie, da der Begriff ‚kognitive Stoppschilder‘ sperrig und komplex klinge.

Ein weiterer Bestandteil der Stunde war die Arbeit mit einem Concept-Cartoon, der den Schüler*innen laut SIM Schwierigkeiten bereitete. Viele Schüler*innen betrachteten die Aussagen darin als entweder vollkommen richtig oder falsch, ohne die Grauzonen zu erkennen. Der Lehrer führte daraufhin eine offene Diskussion mit der Klasse, um die Schüler*innen dazu zu bringen, differenzierter über die Aussagen nachzudenken und sowohl falsche als auch richtige Aspekte zu identifizieren. Dies war teilweise erfolgreich, da zumindest einige Schüler*innen begannen, die Probleme an bestimmten Aussagen zu erkennen (Interview mit SIM, Pos. 336-356, 00:24:18-00:25:46).

Wie schätzt du das Material ein?

In der Passage des Interviews zur Einschätzung des verwendeten Materials äußert sich der Lehrer SIM überwiegend positiv. Er hebt hervor, dass die PowerPoint-Präsentation sehr selbsterklärend und gut strukturiert war. Besonders gefällt ihm, dass die Folien knapp gehalten sind und nur die wichtigsten Aspekte enthalten, was ihm als Lehrer hilft, den Überblick zu behalten und sich durch die Stunde zu navigieren. Er hob auch die enthaltenen Merksätze positiv hervor, die ihm Orientierung boten und den Schüler*innen dabei halfen, einem roten Faden zu folgen (Interview mit SIM, Pos. 360-367, 00:26:02-00:26:50).

Jedoch erwähnt SIM auch einige kleinere Probleme. Bei der Simulation bemängelte er die Darstellung des Magnetfeldes, die für die Schüler*innen nicht ganz klar war. Hier hatte SIM bereits im Vorfeld zum Interview in einer Sprachnachricht an die Interviewerin angemerkt, dass beim

³⁶ Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass es kein explizites Unterrichtsziel des Unterrichtsdesigns darstellt, dass die Schüler*innen wissen, was kognitive Stoppschilder sind. Vielmehr sollen sie ihnen helfen, auf gängige Stolpersteine im Zusammenhang mit den Inhalten aufmerksam zu werden.

Magnetfeld teilweise nicht gut ersichtlich war, dass die Feldlinien kreisförmig um den Leiter eingezeichnet waren (Interview mit SIM, Pos. 360-367, 00:26:02-00:26:50).

Ein weiterer Punkt, den SIM kritisch anmerkte, war ein Missverständnis bezüglich der Materialien auf einem Arbeitsblatt: Es wurde von Alufolien gesprochen, obwohl laut SIM tatsächlich Strohhalme gemeint waren³⁷. Er sprach dies in der Klasse direkt an, wodurch es keine weiteren Probleme gab (Interview mit SIM, Pos. 360-367, 00:26:02-00:26:50).

Außerdem fiel SIM auf, dass auf den Arbeitsblättern die Anweisungen nicht immer eindeutig waren. In einem Fall sollten die Schüler*innen selbst eine Erklärung schreiben, während in einem anderen Fall die Erklärung von der Lehrkraft gegeben werden sollte. Diese Unterscheidung war jedoch nicht deutlich genug, weshalb einige Schüler*innen darauf warteten, dass die Lehrperson die Erklärung gibt. SIM schlägt vor, diese Anweisungen klarer zu formulieren, beispielsweise durch deutlichere Hinweise wie „jetzt bist du dran“ oder „Erklärung der Lehrkraft“ (Interview mit SIM, Pos. 373-383, 00:27:16-00:28:03).

Abschließend äußert er sich lobend über die allgemeine grafische Gestaltung der Materialien, die wie gewohnt ansprechend gestaltet war.

6.4.3.2 Interview 2

Rahmeninformationen

Im zweiten Interview wurde die Lehrperson mit dem Code RIS befragt. Diese Lehrperson ist an einem Gymnasium und Realgymnasium in Wien tätig. Die Klassen, die im Interview behandelt wurden, sind die 7 anw-bnw, ein naturwissenschaftlicher Zweig mit 12 Schüler*innen, die 7 adg, ein Darstellende Geometrie-Zweig mit 18 Schüler*innen, sowie die 7 bdg, ebenfalls im Darstellende Geometrie-Zweig, mit 12 Schüler*innen. Der Zeitraum für die Durchführung des LLAs erstreckte sich vom 9. Oktober bis zum 1. Dezember und umfasste insgesamt sieben Unterrichtsstunden.

Allgemeiner Eindruck

Zu Beginn des Interviews gab RIS an, keine genauen Aufzeichnungen darüber gemacht zu haben, wann genau er das Unterrichtsdesign in seinen Klassen durchführte, da er seine Stunden grundsätzlich nicht sehr präzise im elektronischen Klassenbuch ‚Webuntis‘ festhält. Er hatte sich jedoch einige Notizen in einem persönlichen Notizbuch gemacht, wodurch der ungefähre Zeitrahmen rekonstruiert werden konnte (Interview mit RIS, Pos. 1-13, 00:00:00-00:00:44).

³⁷ Die Lehrpersonen erhielten für den Versuch 2.2 zum elektrischen Feld drei Videos zum Einsatz im Unterricht, wobei bei einem ein Alufolienstück und bei zweien ein Strohalm verwendet wurde. Dies verursachte wohl die Verwirrung bei SIM-1, der dies nicht berücksichtigt hatte.

Die Lehrperson wies darauf hin, dass die Herbstferien die Durchführung des LLAs unterbrechen, was sich auf die Planung auswirkte. Er erklärte, dass einige Themen länger dauerten als ursprünglich vorgesehen, insbesondere das Thema ‚elektrisches Feld und Energiefluss‘. Dies führte er auf die Beteiligung der Schüler*innen zurück: Wenn die Schüler*innen interessiert waren und Fragen stellten, nahm die Einheit mehr Zeit in Anspruch; bei weniger Rückmeldungen verlief sie schneller (Interview mit RIS, Pos. 28-38, 00:01:33-00:02:09).

Ein weiterer Punkt, den RIS ansprach, war, dass ihn das Layout der ersten Unterrichtseinheit anfangs verwirrte. Er fand es unübersichtlich, dass die Inhalte 1.1 und 1.2 in einer Stunde behandelt wurden und wünschte sich in Zukunft ein klareres Layout, um die Struktur der Einheiten besser erfassen zu können (Interview mit RIS, Pos. 39-46, 00:02:11-00:02:35).

RIS gab an, dass ihm das LLA grundsätzlich gefiel, jedoch merkte er an, dass der Alltagsbezug der behandelten Themen etwas zu kurz kam. Während er den Ørsted-Versuch als nützlich betrachtet, fragte er sich, ob es sinnvoll war, so viel Zeit darauf zu verwenden, anstatt sich stärker mit Themen wie Blackout oder Energiesicherheit zu befassen, insbesondere wenn diese einen höheren praktischen Nutzen für die Schüler*innen haben könnten (Interview mit RIS, Pos. 53-60, 00:02:56-00:03:47).

RIS hob zudem hervor, dass es Unterschiede in der Konzentration und dem Interesse der Schüler*innen gab. Besonders die Schüler der 7. Klasse im darstellenden Geometrie-Zweig seien sehr unkonzentriert gewesen und hätten wenig Interesse am Unterrichtsdesign gezeigt. Im Gegensatz dazu zeigten die Schüler*innen im naturwissenschaftlichen Zweig mehr Engagement und Interesse, indem sie detaillierte Fragen stellten (Interview mit RIS, Pos. 73-86, 00:04:27-00:05:35).

Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr

In Bezug auf die Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr äußerte RIS, dass die Platzierung im Physikunterricht des aktuellen Schuljahres nicht ideal war. Er meinte, dass die Themen besser am Ende des Schuljahres untergebracht werden könnten, insbesondere wenn es sich um eine Gymnasialklasse gehandelt hätte. Im Realgymnasium werden jedoch Themen wie der Ørsted-Versuch und Felder bereits gegen Ende der 6. Klasse behandelt. Daher hätte es seiner Meinung nach besser gepasst, die Einheit am Ende der 6. Klasse im Realgymnasium durchzuführen. Da er jedoch keine Gymnasialklassen hatte, konnte er diesen Vorschlag nicht umsetzen (Interview mit RIS, Pos. 87-93, 00:05:35-00:06:07).

Durchführung von Block 1

Die Lehrperson RIS beschrieb den ersten Block des LLAs als „gut und verständlich (...) quasi gast schon unterfordert“ war. Die Schüler*innen beteiligten sich aktiv am Unterricht, was für RIS ein Hinweis darauf war, dass der Inhalt der ersten Unterrichtseinheit für die Schüler*innen keine großen Schwierigkeiten bereitete (Interview mit RIS, Pos. 109-110, 00:07:06-00:07:11). In Bezug auf die Bildkarten, die in dieser Unterrichtseinheit eingesetzt werden sollten, und die damit verbundenen Übungen am Schluss, nutzte RIS eine eher frontale Vorgehensweise. RIS erklärte, dass er hauptsächlich die PowerPoint-Präsentation verwendet und die Bilder lediglich gezeigt, aber nicht ausführlich diskutiert hatte, da die Schüler*innen nicht besonders diskussionsfreudig waren. Besonders in der 7. Klasse des darstellenden Geometrie-Zweigs zeigte sich ein gewisses Interesse an den Themen, jedoch konnte RIS keine Magneten finden, um die Bildkarten, wie in der Lehrer*innenhandreichung beschrieben, auf der Tafel zu montieren, was möglicherweise die Diskussion beeinflusste (Interview mit RIS, Pos. 114-130, 00:07:21-00:08:23).

Abschließend meinte RIS, dass die PowerPoint-Präsentation und die bereitgestellten Materialien insgesamt gut gepasst hätten. Er äußerte keinen zusätzlichen Bedarf an weiteren Materialien oder Änderungen für diesen Block (Interview mit RIS, Pos. 131-133, 00:08:23-00:08:41).

Durchführung von Block 2

Im zweiten Block, der mit der Einführung des magnetischen Feldes beginnt, beschrieb RIS zunächst, dass es gut lief und die Schüler*innen die Versuche durchgeführt hatten. RIS berichtete aber über ein paar Schwierigkeiten, die bei den Schüler*innen auftraten:

„Grundsätzlich gut, obwohl ich sehr fasziniert war, dass, obwohl wir das schon gemacht haben, dass sie dann / manche immer noch Probleme nach dem Versuch vom Verständnis hatten und mit den Bildern und allem. (...) Ja, weiß nicht, manche sind da glaube ich nicht sehr / die schaffen das immer noch dabei, geistig abzuschalten und trotzdem was zu tun, ohne irgendwas mitzunehmen.“ (Interview mit RIS, Pos. 143-147, 00:09:06-00:09:30)

Aus diesem Zitat geht hervor, dass RIS trotz eines grundsätzlich positiven Verlaufs der Versuche gewisse Herausforderungen bei den Schüler*innen feststellte. Obwohl die Schüler*innen laut RIS den Ørsted Versuch bereits als Demonstrationsversuch in einer vorangegangenen Stunde gesehen hatten, traten beim Hands-on-Versuch Verständnisprobleme auf. RIS bemerkte, dass einige Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, die Inhalte vollständig zu erfassen und sich mit dem Stoff auseinanderzusetzen.

Dies wurde besonders bei der Frage nach der Ausrichtung der Kompassnadel im offenen Stromkreis deutlich, wo einige Schüler*innen laut RIS keine zufriedenstellenden Antworten geben konnten. RIS stellte fest, dass einige Schüler das Gesehene nicht vollständig in ihr Verständnis integrieren konnten und oft Schwierigkeiten hatten, die Prinzipien korrekt anzuwenden (Interview mit RIS, Pos. 170-175, 00:10:26-00:10:47).

Weiterhin berichtet RIS, dass die Visualisierungen auf der PowerPoint-Präsentation, die die magnetischen Felder darstellen sollten, grundsätzlich gut angekommen sind. Er kritisierte jedoch, dass eine rein bildliche Darstellung schwierig sei und ein Video, das die Konzepte dynamisch veranschaulicht, an dieser Stelle eventuell hilfreicher gewesen wäre (Interview mit RIS, Pos. 180-190, 00:10:56-00:11:57).

Nachdem die Klasse das Thema magnetische Felder behandelt hatte, ging es weiter zum elektrischen Feld. RIS musste hierbei feststellen, dass das Verständnis für die Atomstruktur und die Ladungsverteilung in Leitern nicht ausreichend war, besonders da die Klasse aufgrund der Unterbrechungen im Unterricht während des Homeschoolings während der Corona-Pandemie nicht ausreichend Vorwissen mitbrachten. RIS betonte, „genau nein also da war gar nichts da“ (Interview mit RIS, Pos. 239-245, 00:15:13-00:15:55).

Im Anschluss wurde das Konzept der Oberflächenladungen und die Erklärung der elektrischen Felder eingeführt. RIS bemerkte, dass einige Schüler*innen, insbesondere in der 7. Klasse im Zweig darstellender Geometrie, Schwierigkeiten hatten, die Konzepte der Oberflächen- und Leiterelektronen zu verstehen. Um dies zu verbessern, versuchte RIS ihnen, durch wiederholtes Erklären und zusätzliche Erläuterungen, wie zum Beispiel zur Atomenergie³⁸, zu helfen (Interview mit RIS, Pos. 249-262, 00:16:05-00:16:58). Diese Schwierigkeiten traten hauptsächlich bei einzelnen Schüler*innen auf (Interview mit RIS, Pos. 263-281, 00:16:58-00:18:11).

Bezüglich dem Einsatz von Übungen und Abbildungen beschrieb RIS an dieser Stelle folgendes:

Bezüglich der Übungen und Abbildungen berichtete RIS, dass er die Themen regelmäßig wiederholte und bei Bedarf auf frühere Erklärungen zurückging. Er erklärte, dass er oft zurückkehrte, um die Konzepte der Oberflächenladungen und der elektrischen Felder nochmals zu verdeutlichen. Besonders wichtig war es ihm, die Unterschiede und Zusammenhänge zwischen Oberflächenladungen, elektrischen Feldern und den Leiterelektronen, die ein magnetisches Feld erzeugen, klarzustellen (Interview mit RIS, Pos. 268-275, 00:17:16-00:17:50). Er fasste zusammen:

³⁸ Der Inhalt ‚Atomenergie‘ ist kein Bestandteil des Unterrichtsdesigns.

„(...)Wir haben zwei Sachverhalte: wir haben Oberflächenladungen und ein elektrisches Feld und Leiterelektronen, die sich bewegen machen ein magnetisches Feld. Zusammen ist das das elektromagnetische Feld.“ (Interview mit RIS, Pos. 268-275, 00:17:16-00:17:50).

Aus diesem Zitat geht hervor, dass RIS die Konzepte der Oberflächenladungen und elektrischen Felder wiederholt und detailliert erläutert hat. Er ging dabei zurück zu den grundlegenden Erklärungen und zeigte den Schüler*innen die relevanten Inhalte erneut. Trotz dieser Bemühungen scheinen die Schwierigkeiten bei der Vermittlung des Verständnisses für die Konzepte nicht vollständig gelöst worden zu sein. Der Ansatz von RIS beinhaltete Wiederholungen und zusätzliche Erklärungen, jedoch bleibt offen, ob die speziellen Bedürfnisse und Verständnisprobleme der Schüler*innen möglicherweise ausreichend berücksichtigt wurden.

Bezüglich des Versuchs zum elektrischen Feld berichtete RIS, dass dieser für die Schüler*innen "ein bisschen schwieriger nachzuvollziehen" war, weil es im Video "schlecht zu sehen" war. Die visuelle Darstellung des Versuchs war laut RIS nicht immer verständlich, was es den Schüler*innen erschwerte, die Verhaltensweise der Ladungen nachzuvollziehen. Auch nachdem RIS das Konzepts der elektrischen Influenz mit den Schüler*innen wiederholte, schienen diese nicht vollständig überzeugt zu sein. An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass RIS während dieser Interviewpassage den Eindruck erweckte, von der Lehrer*innenhandreichung mehrfach abgewichen zu sein und sich selbst mit den Inhalten unsicher zu sein (Interview mit RIS, Pos. 296-313, 00:18:59-00:20:39).

RIS erläuterte weiter:

„(...) Es ist auch ein bisschen verwirrend, weil da ist ja so ein schöner runder Stromkreis dargestellt und dort ist das nicht. Ja, weiß nicht, das müsste man dann auch irgendwie. Oder von dann das Bild von oben machen und da auch die Ladungen so kurz mal einzeichnen vielleicht, dass man vom / von der schematischen Darstellung, das besser übertragen kann, was da überhaupt das gleiche ist für die Kinder und dann warum man das dort und dort hinhält. Ein bisschen was habe ich Ihnen dann schon aufgezeichnet, so vom letzten Jahr. Dieses mit dem Druck und den Farben. Warum in der Mitte eben nichts ist. Dazu habe ich Bezug genommen bei einer Klasse, damit das wieder ein bisschen kommt.“ (Interview mit RIS, Pos. 320-328, 00:20:54-00:21:47)

Dieses Zitat verdeutlicht, dass RIS eine bessere visuellen Unterstützung für den Versuch erwünschte. Die Lehrperson schlug vor, alternative Darstellungen und Erklärungen zu nutzen, um den Schüler*innen ein klareres Verständnis der Inhalte zu ermöglichen. Möglicherweise wäre es hier förderlich, den Versuch nur mit einem offenen Stromkreis zu zeigen, um die Komplexität zu reduzieren.

Das Feedback zur Einführung der Oberflächenladungen als Ursache des elektrischen Feldes war insgesamt positiver. Die Schüler*innen akzeptierten laut RIS diese Erklärung, jedoch gab es später beim Video einige Verwirrung durch die Darstellung der Feldlinien. Konkret beschrieb RIS, dass im Video die Feldlinien auch außerhalb des Stromkreises eingezeichnet waren und nicht nur im inneren des Stromkreises. Dass es sich hierbei um eine didaktische Rekonstruktion handelt, um die Komplexität zu reduzieren, wurde nicht erwähnt (Interview mit RIS, Pos. 345-252, 00:22:48-00:23:24).

Bezüglich der Sequenz 2.3 zum elektromagnetischen Feld merkte RIS an, dass sie bisher die Linke-Hand-Regel nur für das Magnetfeld eingeführt hatten aber noch nicht für andere Inhalte, wie beispielsweise die Lorentzkraft. Dennoch schien die Einführung der energie-hand-regel unterschiedlich von den Schüler*innen aufgenommen zu werden. RIS beschreibt dies folgendermaßen: „Also wir hatten die linke Hand für das Magnetfeld. Ja manche waren da irgendwie interessiert und haben das so probiert und andere, die haben das gleich nicht so ernsthaft betrachtet.“ (Interview mit RIS, Pos. 374-376, 00:24:47-00:24:58).

Im Interview wurde deutlich, dass RIS die Erklärung zur Konstruktion des Energieflusses durch das elektromagnetische Feld mit dem grauen Kasten in der PowerPoint-Präsentation nicht explizit mit den Schüler*innen durchgegangen war. An dieser Stelle wäre es jedoch besonders wichtig gewesen, die Inhalte gemeinsam mit den Schüler*innen zu erarbeiten³⁹. RIS stellte auch nicht sicher, ob alle Schüler*innen die Inhalte verstanden hatten. Dies zeigte sich in folgender Passage:

I: „Also dieses Schritt für Schritt anleiten hast du nicht gemacht?“

IP: „Na, schon da nimmst du den Finger runter, das er / Ding und dann nach hinten. Sie haben es halt auch probiert da irgendwie, aber wer weiß ob die dann genau da hin geschaut haben.“

(Interview mit RIS, Pos. 388-391, 00:25:46-00:26:02).

Hier wird deutlich, dass RIS sich nicht vergewisserte, ob die Inhalte bei allen Schüler*innen angekommen waren, da er nicht einschätzen konnte, ob alle während der Erklärung aufmerksam waren.

Auf die Frage, ob RIS die Aufgabe am Arbeitsblatt 2.3 mit den Schüler*innen bearbeitet hätte, antwortete er: „die haben wir eigentlich gemacht“ (Interview mit RIS, Pos. 392-393, 00:26:02-00:26:13). Gleichzeitig räumte er ein: „Manche haben echt Probleme gehabt, das irgendwie räumlich einzuordnen.“ (Interview mit RIS, Pos. 394-395, 00:26:13-00:26:15)

³⁹ Dies ist auch deutlich in der Lehrer*innenhandreichung nachzulesen.

Auch zum Einsatz der Simulation gab es gemischte Rückmeldungen. Während die Simulation in einer Klasse gut aufgenommen wurde und den Schüler*innen half, das Konzept besser zu verstehen, war sie in einer anderen Klasse weniger hilfreich, da die Schüler*innen laut RIS Schwierigkeiten hatten, die Feldlinien richtig zu interpretieren (Interview mit RIS, Pos. 396-409, 00:26:15-00:26:58).

Abschließend wurde noch die Mindmap als Methode zur Strukturierung und Wiederholung im Interview diskutiert. Hier gab RIS an, diese nicht mit den Schüler*innen durchgeführt zu haben. Die Lehrperson entschied sich, diese nicht von den Schüler*innen erstellen zu lassen, da sie befürchtete, dass die Schüler*innen zu viel Zeit dafür benötigen würden und sie den Mehrwert für die Schüler*innen bezweifelte (Interview mit RIS, Pos. 457-497, 00:30:19-00:32:51).

Durchführung von Block 3

Bei der Besprechung des dritten Blocks des LLAs schilderte RIS zunächst, dass der Wechselstrom ein neues Thema für die Schüler*innen darstellte, da sie diesen bisher noch nicht im Unterricht behandelt hatten (Interview mit RIS, Pos. 498-501, 00:32:51-00:33:05). Die Lehrperson beschrieb, wie er den Schüler*innen das Konzept des Wechselstroms näherbrachte:

"Ja, das haben sie [die Schüler*innen] halt akzeptiert, dass die Elektronen sich dann nur zitternd hin und her bewegen. Haben wir halt ein bisschen besprochen dass sich das eben umpolt. ((2)) Und die Oberflächenladungen ändern / das habe ich eh gefragt: es polt sich um was ändert sich und so weiter." (Interview mit RIS, Pos. 503-506, 00:33:17-00:33:36).

Aus diesem Zitat geht hervor, dass RIS den Wechselstrom den Schüler*innen lediglich als „zitternde Bewegung“ der Elektronen erklärte und annahm, dass sie dies akzeptierten. Offen bleibt jedoch, wie genau das Verständnis überprüft wurde und ob die Besprechung tiefergehender war. Für die Vermittlung des Stoffes nutzte RIS die PowerPoint-Präsentation, die er durch gezielte Fragen aus der Lehrer*innenhandreichung unterstützte. Dies beschrieb RIS folgendermaßen: „Da habe ich eben immer die Fragen [gestellt], die waren gut, die haben geholfen“ (Interview mit RIS, Pos. 509-510, 00:33:44-00:33:57).

Zudem berichtete RIS, dass er das zugehörige Video an dieser Stelle einsetzte und mehrmals in seinen Klassen abgespielt hatte: „Genau, das haben wir ein paar Mal angeschaut“ (Interview mit RIS, Pos. 514-518, 00:34:03-00:34:15), wobei RIS laut eigenen Angaben das Video beim zweiten Mal stoppte, um auf Fragen der Schüler*innen einzugehen und das Verständnis zu sichern (Interview mit RIS, Pos. 15-26, 00:34:07). Er entschied sich, die deutsche Version des

Videos zu nutzen, was gelegentlich zu Verwirrung führte, insbesondere wegen der unterschiedlichen Darstellung der Feldlinien im Vergleich zu den bisherigen Darstellungen (Interview mit RIS, Pos. 519-523, 00:34:15-00:34:30).

RIS erläuterte, dass die unterschiedliche Darstellung des elektrischen Feldes dazu führte, dass einige Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, die neue Information zu akzeptieren: „Es waren dann halt für manche dann sehr viele Linien und dann sehr abgespaced“ (Interview mit RIS, Pos. 535-536, 00:35:18-00:35:24). Dies führte zu einem gewissen Widerstand bei einzelnen Schüler*innen, vor allem bei denen, die Schwierigkeiten hatten, die neue Darstellungsweise zu akzeptieren (Interview mit RIS, Pos. 542-546, 00:35:49-00:26:15).

Dies beobachtete RIS aber nur bei der 7 adg. Die 7bdg und die 7 anw-bnw schienen aber keine Probleme mit dem Video gehabt zu haben. RIS betonte hier: „die NAWI Klasse, die war eigentlich überall interessiert, die wollte das dann wieder verstehen“ (Interview mit RIS, Pos. 554-560, 00:36:47-00:37:25).

Im Hinblick auf den Energieerhaltungssatz in Sequenz 3.2, beschrieb RIS, dass dieser Aspekt teilweise bereits früher im Unterricht besprochen wurde. RIS merkte aber auch an „Da muss ich kurz nachdenken. In der fünften habe ich sie nicht gehabt nämlich“ (Interview mit RIS, Pos. 573-578, 00:38:58-00:39:49).

Hinsichtlich dem Arbeitsblatt mit dem Concept Cartoon merkte RIS an, dass einige Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, die Konzepte korrekt anzuwenden: „Einer hat gleich gesagt, naja, eh das die Elektronen, die bringen die Energie hin“ (Interview mit RIS, Pos. 580-584, 00:39:56-00:40:22). Nach der Besprechung der Aufgaben konnte ein Großteil der Schüler*innen laut RIS jedoch angemessene Erklärungen geben (Interview mit RIS, Pos. 586-589, 00:40:27-00:40:49). Auf die Frage der Interviewerin, ob dann alle Schüler*innen die Aufgabe am Arbeitsblatt erledigt hätten, meinte RIS jedoch: „Ja, manche, manche schreiben da aus Prinzip nichts hin auch wenn es die Aufgabe ist. Die meisten haben aber da eine Formulierung probiert zu finden.“ (Interview mit RIS, Pos. 592-593, 00:40:56-00:41:04).

Auch hier kann also nicht klar beurteilt werden, ob die Inhalte wirklich ausreichend mit den Schüler*innen gemäß den Anweisungen der Lehrer*innenhandreichung von der Lehrperson RIS behandelt worden sind.

Abschließend wurde noch die Lichtgeschwindigkeit als letzter Inhalt dieser Unterrichtssequenz angesprochen. Ris meinte hierzu, dass sie den Schülern*innen bereits aus der Mechanik bekannt war. (Interview mit RIS, Pos. 15-26, 00:41:35). RIS schloss das Gespräch mit der Überlegung, wie er die kommenden Themen in der siebten Klasse weiterführen werde, da dies für ihn eine neue Herausforderung darstellt (Interview mit RIS, Pos. 15-26, 00:41:35).

Zum Thema Lichtgeschwindigkeit erläuterte RIS, dass die Schüler*innen diesen Begriff bereits aus der Mechanik aus der sechsten Klasse kannten. Im aktuellen Kontext behandelte er die Lichtgeschwindigkeit im Zusammenhang mit Photonen⁴⁰ und deren Bewegung als Teil der elektromagnetischen Wellen (Interview mit RIS, Pos. 15-26, 00:41:35). RIS meinte, dass er dieses Thema weiterführen wolle, insbesondere in Hinblick auf die elektromagnetischen Wellen, was für ihn eine neue Herausforderung darstelle, da er bislang noch keine siebte Klasse unterrichtet habe (Interview mit RIS, Pos. 603-609, 00:41:35-00:42:18).

Wie schätzt du das Material ein?

RIS beschrieb, dass er sich bei der Durchführung der Unterrichtseinheit strikt an das vorgegebene Konzept gehalten habe, mit Ausnahme der Mindmap, obwohl er normalerweise gerne Elemente an seine spezifischen Klassen anpasst. Diese Vorgehensweise schränkte ihn laut eigener Angabe etwas ein, da er nicht sicher war, wie flexibel er mit dem Material umgehen durfte. Trotzdem fand er es hilfreich, ein festgelegtes Konzept zu haben, wie aus dieser Passage hervorgeht: „grundsätzlich, war es angenehm einfach ein Konzept zu haben und das einfach so durchzuführen“ (Interview mit RIS, Pos. 617-628, 00:42:59-00:44:10). Er hätte sich jedoch zusätzliche Informationen gewünscht, insbesondere zu komplexeren Themen wie der Verteilung von Ladungen im Stromkreis, um besser auf Fragen und Missverständnisse der Schüler*innen eingehen zu können (Interview mit RIS, Pos. 631-632, 00:44:13-00:44:16).

RIS wies nochmal darauf hin, dass er nur hinsichtlich der Mindmap Aktivität vom Unterrichtsdesign abgewichen sei. Er schätzt jedoch, dass die Mindmap möglicherweise interessant gewesen wäre, wären die Schüler*innen nicht so oft verwirrt gewesen (Interview mit RIS, Pos. 642-645, 00:45:00-00:45:22).

6.4.3.3 Interview 3

Rahmeninformationen

Im dritten Interview wurde die Lehrperson mit dem Code SEY befragt. SEY unterrichtet an einem Gymnasium und Realgymnasium in Wien und nahm mit zwei Klassen an der Studie teil: der 7RG, einer Klasse des Realgymnasiums mit 26 Schüler*innen, sowie der 7G, einer Gymnasialklasse mit 15 Schüler*innen. Der Zeitraum für die Durchführung des LLAs erstreckte sich vom 9. Oktober bis zum 3. November und umfasste insgesamt sieben Unterrichtsstunden.

⁴⁰ Der Inhalt ‚Photonen‘ ist kein Bestandteil des Unterrichtsdesigns.

Allgemeiner Eindruck

Zu Beginn des Interviews wurde SEY nach ihrem allgemeinen Eindruck zur Umsetzung des LLAs befragt. SEY berichtete, dass sie insgesamt sehr zufrieden gewesen sei und es ihr "sehr, sehr gut gefallen" habe. Sie schätzte es besonders, wenn ihr ein durchdachtes Unterrichtskonzept zur Verfügung gestellt wurde, da dies eine erhebliche Erleichterung für sie darstellte (Interview mit SEY, Pos. 20-31, 00:01:24-00:02:14).

Ein spezifischer Punkt, den sie als herausfordernd empfunden habe, war das Thema der Oberflächenladungen. Hierbei bemerkte sie, dass sie selbst Schwierigkeiten hatte, das Konzept vollständig zu verstehen, was sich auch auf ihren Unterricht auswirkte: "Wo ich persönlich Schwierigkeiten hatte, (...) ist die Sache mit den Oberflächenladungen. Das war für mich schwierig" (Interview mit SEY, Pos. 20-31, 00:01:24-00:02:14). Diese Unsicherheit führte laut SEY dazu, dass sie die Inhalte, die ursprünglich für eine Unterrichtsstunde geplant waren, auf drei Stunden ausdehnen musste, um sicherzustellen, dass die Schüler*innen das Thema vollständig verstanden.

Trotz dieser Herausforderungen gelang es ihr schließlich, das Thema erfolgreich zu vermitteln. Sie überprüfte das Verständnis der Schüler*innen durch eine Physikschararbeit, in der sie die Schüler*innen das Gelernte zu den Oberflächenladungen anwenden und zeichnen ließ. Dies bewertete sie als erfolgreich: "Das hat wirklich gut funktioniert also ich glaube bei fast allen" (Interview mit SEY, Pos. 20-31, 00:01:24-00:02:14).

Zusätzlich erwähnte SEY, dass der Übergang zu nachfolgenden Themen für sie eine gewisse Herausforderung dargestellt und einen Stressfaktor ausgelöst habe. Sie war sich bewusst, dass sie an das LLA gemäß dem Lehrplan anknüpfen musste und empfand diesen Übergang als stressig, aber es gelang ihr dennoch, diese Hürde zu überwinden und den Unterricht erfolgreich abzuschließen (Interview mit SEY, Pos. 33-38, 00:02:15-00:02:50).

Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr

Anschließend wurde SEY gefragt, ob die Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr für sie passend gewesen sei. SEY erzählte im Interview, dass der gewählte Zeitpunkt für sie genau richtig gewesen sei. Sie bestätigte, dass sie den Unterricht im November / Dezember begonnen hatte und erklärte, dass das Konzept thematisch perfekt in den Jahresplan gepasst habe (Interview mit SEY, Pos. 46-48, 00:03:15-00:03:27). Auf die Frage, ob sie den Unterricht vielleicht lieber in einer anderen Schulstufe oder am Ende des Schuljahres durchgeführt hätte, antwortete sie verneinend und betonte, dass der gewählte Zeitpunkt ideal gewesen sei.

Durchführung von Block 1

Als nächstes wurde SEY nach ihrer Erfahrung mit der Durchführung des ersten Blocks des Unterrichtskonzepts gefragt, der sich mit grundlegenden Begriffen, wie dem kabelgebundenen und kabellosen elektrischen System, befasste. SEY berichtete, dass diese Stunde für sie in beiden Klassen relativ kurz ausfiel. Während sie in der Gymnasiumsklasse bereits vorher wusste, dass die Zeit knapp bemessen war, überraschte es sie in der Realgymnasiumsklasse, dass die Stunde etwa "10 Minuten früher fertig" war (Interview mit SEY, Pos. 48-65, 00:04:06-00:04:35). Sie hätte, wenn sie dies vorher geahnt hätte, ein Kahoot-Quiz vorbereitet, da sie wusste, dass die Schüler*innen diese Art von Aktivität gerne mögen (Interview mit SEY, Pos. 48-65, 00:04:06-00:04:35).

Auf die Frage, ob der Prätest in derselben Stunde stattgefunden habe, bestätigte SEY dies und äußerte, dass der Test den Unterricht gut hätte ausfüllen können, um die Zeit sinnvoll zu nutzen. Sie bemerkte, dass sie "auf die Uhr geschaut und gedacht" habe, dass sie, wenn sie in dem Tempo weitermachen würden, "circa 20 Minuten zu früh fertig" wären, was sie verunsicherte (Interview mit SEY, Pos. 66-73, 00:04:35-00:05:04).

Bei der Vermittlung der Begriffe ‚kabelgebunden‘, ‚kabellos‘, ‚Energiequelle‘, ‚Energieumwandler‘ und ‚Übertragungsmedium‘, gab es gemischte Rückmeldungen. SEY erzählte, dass die Begriffe grundsätzlich "ok angenommen" wurden. Ein besonderes Problem stellte jedoch die Unterscheidung zwischen ‚Energiequelle‘ und ‚Spannungsquelle‘ dar, was "bis zum Schluss Probleme gemacht" habe (Interview mit SEY, Pos. 76-78, 00:05:14-00:05:28). Sie versuchte, den Schüler*innen klarzumachen, dass im Kontext dieses Blocks der Begriff ‚Energiequelle‘ verwendet werde und bemühte sich, dies stets zu betonen (Interview mit SEY, Pos. 83-85, 00:05:36-00:05:48).

Anders als erwartet, hatten die Schüler*innen kein Problem mit dem Begriff ‚Energieumwandler‘ und verwendeten den Begriff ‚Verbraucher‘ nicht, da SEY von Anfang an (auch im regulären Unterricht) darauf geachtet hatte, diesen nicht zu etablieren. Sie erwähnte, dass dies nur vereinzelt vorkam, bei Schüler*innen, die in den Schularbeiten generell schlechter abschnitten. Sie meinte aber "Ob wir dann jetzt Lämpchen sagen oder allgemein Energieumwandler, war kein Problem" (Interview mit SEY, Pos. 92-97, 00:06:12-00:06:37).

Besonders positiv hob SEY die Übung mit den Bilderkarten hervor, die den Schüler*innen "extrem gut gefallen" habe. Sie ließ die Schüler*innen die Bilder beschreiben und Unterschiede finden, was "extrem gut funktioniert" habe. Eine zusätzliche Aktivität wie ein Kahoot-Quiz hätte die Stunde laut SEY aber noch bereichert. SEY erzählte von einer interessanten Diskus-

sion, die sich um die Klassifizierung von Objekten wie einer Powerbank entstand, wobei sowohl die Schüler*innen als auch sie selbst unsicher waren, wie diese zu kategorisieren ist. Ein weiteres Diskussionsbeispiel war, ob eine Steckdose als Energiequelle angesehen werden könne, was zu einer anregenden Debatte führte (Interview mit SEY, Pos. 100-114, 00:06:42-00:07:34).

Durchführung von Block 2

Das Interview setzte anschließend mit dem zweiten Block und der Besprechung des Magnetfeldes fort. SEY erklärte, dass die Schüler*innen den Hands-on-Versuch, den sie durchführten, bereits aus früheren Stunden kannten, allerdings war es für sie offenbar hilfreich, ihn noch einmal durchzuführen. Die Schüler*innen fanden besonders spannend, dass sie bei einigen Smartphones "wirklich gesehen haben, dass es zu einem Ausschlag [beim Kompass] kommt", wenn sie sich dem Magnetfeld näherten. Auch das Verhalten der Laptops im Bezug auf das Magnetfeld fanden die Schüler*innen interessant, was SEY als besonders positiv hervorhob. Sie betonte jedoch, dass der Unterricht an einem "sehr stressigen Tag", dem Tag der Wiener Schulen⁴¹ stattfand, was sowohl sie selbst als auch die Schüler*innen beeinträchtigte (Interview mit SEY, Pos. 124-133, 00:08:11-00:08:58).

Insgesamt erzählte SEY, dass die Schüler*innen Gefallen am Experimentieren hatten (Interview mit SEY, Pos. 135-138, 00:08:59-00:09:12).

SEY berichtete weiter, dass die Schüler*innen im Realgymnasium gut mit der Einführung der Feldlinien und der Strommesszange zurechtkamen. Diese Unterrichtsbestandteile wurden von den Schüler*innen "sofort angenommen" und sie erkannten selbstständig, wie sich das Magnetfeld veränderte, je weiter sie sich vom Magneten entfernten (Interview mit SEY, Pos. 141-146, 00:09:20-00:09:49). Im Vergleich dazu war die Einführung im Gymnasium schwieriger, da die Schüler*innen dort mehr Unterstützung benötigten. Besonders erwähnte SEY, dass die Strommesszange in dieser Stunde einen großen Unterschied machte, weil sie den Schüler*innen half, die Konzepte besser zu verstehen (Interview mit SEY, Pos. 141-146, 00:09:20-00:09:49). Beim Thema der Oberflächenladungen, das SEY als besonders komplex beschrieb, gab es einige Schwierigkeiten. Sie erklärte, dass ihre erste Methode, bei der sie den Schüler*innen zunächst die Oberflächenladungen erklärte und dann die Videos zeigte, nicht gut funktionierte.

⁴¹ Beim Tag der Wiener Schulen ist das Schulgebäude für außerschulische Personen geöffnet, die sich ein Bild vom Unterricht und den Abläufen machen wollen.

Beim zweiten Versuch änderte sie die Strategie: Sie zeigte die Videos zuerst und ließ die Schüler*innen beobachten und anschließend erklären, was sie gesehen hatten⁴². Diese Methode erwies sich als effektiver (Interview mit SEY, Pos. 179-199, 00:12:07-00:13:38).

SEY stellte fest, dass die Videos über Oberflächenladungen und die Darstellung der Feldlinien größtenteils gut angekommen seien, vor allem durch die detaillierte Besprechung der Videos. Bei der Wahl der Videos fand sie das Video mit der Alufolie weniger hilfreich, da es schwierig war, die Reaktionen der Alufolie klar zu erkennen (Interview mit SEY, Pos. 238-240, 00:16:10-00:16:21). Sie bevorzugte das Video mit dem Strohalm, da es eine klarere Visualisierung bot (Interview mit SEY, Pos. 242, 00:16:21-00:16:25).

Die Interviewerin sprach anschließend noch an, dass sie in den letzten Interviews darüber nachgedacht hätte, ob es sinnvoll wäre, nur den offenen Stromkreis im Unterrichtskonzept beizubehalten, da die Einführung von verschiedenen Reihenwiderständen zusätzliche Komplexität schaffen könnte. Die Interviewerin fragte sich daher, ob es ausreiche, nur den offenen Stromkreis zu behandeln (Interview mit SEY, Pos. 243-248, 00:16:30-00:16:57).

SEY meinte, dass es wichtig sei, beide Typen von Stromkreisen zu behandeln (den offenen und geschlossenen Stromkreis), da ansonsten bei den Schüler*innen der Eindruck entstehen könnte, dass das elektrische Feld nur aufgrund eines offenen Stromkreises existiert. SEY erwähnte, dass sie in ihrem Unterricht beide Varianten verwendet hat, um ein solides Verständnis aufzubauen (Interview mit SEY, Pos. 249-256, 00:16:57-00:17:17).

Auf die Frage der Interviewerin, wie die Schüler*innen die Darstellung von Feldlinien und die Vorstellung von Oberflächenladungen aufgenommen hätten, erklärte SEY, dass die Schüler*innen bereits mit dem Zeichnen von Feldlinien aus der Unterstufe vertraut waren. Eine Herausforderung bestand darin, von der technischen Stromrichtung zur physikalischen Elektronenflussrichtung überzugehen. Dies war schwierig, aber SEY konnte die Schüler*innen durch Erklärungen und die Darstellung der Feldlinien gut unterstützen. Sie berichtete, dass die Schüler*innen das Einzeichnen der Feldlinien als sehr hilfreich empfanden, und es funktionierte sowohl in der Gymnasialklasse als auch in der Realgymnasialklasse gut (Interview mit SEY, Pos. 261-274, 00:17:40-00:18:40).

Durchführung von Block 3

Zu Beginn des dritten Blocks, der die Verknüpfung von elektrischem und magnetischem Feld sowie die Einführung der Energie-Hand-Regel umfasst, berichtete SEY, dass sie den Schüler*innen erklärt hatte, dass sie nun mit der physikalischen Stromrichtung arbeiten und dafür

⁴² In dieser Reihenfolge war es auch in der Lehrer*innenhandreichung beschrieben.

die linke Hand verwenden würden. Sie ließ bewusst die Lorentzkraft außen vor und betonte die Umstellung von der technischen zur physikalischen Stromrichtung. Dies wurde von den Schüler*innen laut SEY akzeptiert. SEY erwähnte auch, dass sie Schwierigkeiten hatte, die Erklärung zur einer spezifischen Notation in der Lehrer*innenhandreichung zu finden, die im Video gezeigt wurde. Nachdem sie die Notation „mit dem Kreis und dem X drinnen“ nicht in der Lehrer*innenhandreichung gefunden hatte, recherchierte sie deren Bedeutung im Internet und empfand sie als nützlich, da sie eindeutiger war. Allerdings akzeptierten nicht alle Schüler*innen diese Notation (Interview mit SEY, Pos. 282-298, 00:19:16-00:20:32).

SEY meinte zudem, dass sie Schwierigkeiten mit der Simulation zum elektromagnetischen Feld hatte, da diese über das Schul-WLAN nicht funktionierte. Sie konnte die Simulation nur über die mobilen Daten der Schüler*innen nutzen, was für diese teilweise frustrierend war. Da die Simulation nicht auf dem Schul-PC funktionierte, entschied sich SEY außerdem, sie nicht gemeinsam mit den Schüler*innen am Lehrer*innentisch durchzuführen, da sie der Meinung war, dass die Schüler*innen durch das Einzeichnen der Feldlinien in der vorausgegangenen Sequenz ohnehin genug Erfahrungen sammeln konnten (Interview mit SEY, Pos. 315-337, 00:21:37-00:22:48).

Der Hands-on-Versuch mit dem Ventilator zur Veranschaulichung der Energieübertragung wurde von SEY als erfolgreich beschrieben, obwohl die Schüler*innen ähnliche Experimente bereits aus dem Physiklabor kannten (Interview mit SEY, Pos. 344-345, 00:23:23-00:23:30). Sie wies darauf hin, dass die Mindmap-Aktivität, die ergänzend vorgesehen war, nicht durchgeführt wurde, da die Zeit für die Einheit zur Oberflächenladungen verwendet wurde (Interview mit SEY, Pos. 352-355, 00:23:46-00:24:04).

Im dritten Block, der sich mit Gleich- und Wechselstromkreisen beschäftigte, beschrieb SEY, dass die Schüler*innen bereits Kenntnisse über diese Unterscheidung hatten und die Visualisierungen keine Schwierigkeiten bereiteten. Die Schüler*innen erkannten laut SEY selbst, dass der Poynting-Vektor (selbst beim Wechselstromkreis) immer zum Lämpchen zeigen musste (Interview mit SEY, Pos. 370-384, 00:25:00-00:25:49).

Das Veritasium-Video, das die Schüler*innen auf Englisch ansahen, wurde von SEY als besonders gut aufgenommen beschrieben. Im Gymnasium gab es "aha-Momente" und Diskussionen über die Unterschiede zwischen dem, was sie in der Unterstufe gelernt hatten, und den neuen Informationen (Interview mit SEY, Pos. 389-393, 00:26:03-00:26:27). Dies wird aus folgender Interviewpassage besonders deutlich:

„Genau, ich habe es mit beiden Klassen auf Englisch geschaut, das hat ihnen extrem gut gefallen. Ich habe dann im Gymnasium noch die lange Version davon geschaut und das coole war, dass dann vor allem im Gymnasium, lustigerweise kamen dann so ein paar so aha Momente und es war so, das heißt, eigentlich funktioniert das ganz anders, als wir es in der Unterstufe gelernt haben, und dann kamen viele Fragen in die Richtung, warum lernen wir das in der Unterstufe dann falsch?“
(Interview mit SEY, Pos. 389-393, 00:26:03-00:26:27)

SEY erklärte den Schüler*innen daraufhin, dass in der Physik oft komplexe Konzepte vereinfacht werden, um sie altersgerecht zu vermitteln. Die Schüler*innen des Gymnasiums fanden diese Erklärung spannend und akzeptierten sie. Während SEY feststellte, dass die Gymnasialklasse an dieser Stelle besonders engagiert und aktiv war, schien die Realgymnasialklasse dagegen schon etwas übersättigt zu sein. Sie äußerten den Wunsch, langsam das Thema zu wechseln (Interview mit SEY, Pos. 397-402, 00:26:33-00:27:02).

Als nächstes beschrieb SEY die Reaktionen der Schüler*innen auf das Thema Lichtgeschwindigkeit. SEY berichtete, dass es eine ausführliche Diskussion darüber gab, warum die Informationsübertragung nicht instantan erfolgt und dass Lichtgeschwindigkeit das Maximum darstellt. Diese Diskussion wurde von den Schüler*innen des Gymnasiums besonders intensiv geführt, während das Realgymnasium die Information eher hinnahm, ohne weitere Fragen zu stellen (Interview mit SEY, Pos. 416-424, 00:28:04-00:28:47).

Bezüglich der Sequenz zum Rucksackmodell hob SEY eine Diskussion besonders hervor: Im Gymnasium kam ein Schüler mit der Idee auf, dass Energie in Paketen (quantisiert) kommt und daher nicht beliebig groß sein kann. Diese Perspektive führte zu einer langen und intensiven Diskussion über die Interpretation des Modells, was von SEY als besonders interessant und amüsant empfunden wurde. Das Realgymnasium zeigte dagegen auch bei diesem Thema insgesamt weniger Interesse und ließ die Diskussion bald ruhen (Interview mit SEY, Pos. 431-446 00:29:12-00:30:29).

SEY erwähnte abschließend, dass sie das Arbeitsblatt 3.2 aus Zeitgründen nur mit der Realgymnasiums-klasse ausgefüllt habe, nicht jedoch mit der Gymnasialklasse. In der Realgymnasiums-klasse schätzte SEY diese Aktivität jedoch als nützlich für die Entwicklung der Bewertungskompetenz ein (Interview mit SEY, Pos. 449-453, 00:30:33-00:30:52).

Wie schätzt du das Material ein?

Zu den bereitgestellten Materialien äußerte sich SEY grundsätzlich positiv. Sie schätzte die erhaltenen Worddateien der Arbeitsblätter sehr, da sie es den Schüler*innen und Schülern ermöglichte, digitale Notizen anzufertigen. Dies passte gut zu ihrem Unterrichtsstil, da die Klasse

gewohnt ist, Mitschriften in einem digitalen Physikheft zu führen. Zudem ergänzen sie diese mit "Unbedingt-Merken-Kästen" für wichtige Informationen, was der Struktur des LLAs sehr nahe kam (Interview mit SEY, Pos. 467-478, 00:31:51-00:32:27). Hingegen empfand SEY es als unpraktisch, dass die Präsentation in einer einzigen langen PowerPoint-Datei zusammengefasst war. Sie hätte es bevorzugt, separate Präsentationen für jede Unterrichtsstunde zu haben, da sie anfänglich nicht erkannt hatte, dass es sich um eine durchgehende Datei für alle Stunden handelte (Interview mit SEY, Pos. 459-464, 00:31:19-00:31:45).

Im Hinblick auf die Experimente betonte SEY, dass die Schüler*innen an das Experimentieren aus dem normalen Unterricht gewohnt sind. Besonders positiv wurde der Ventilator-Versuch bewertet, der für Begeisterung unter den Schüler*innen sorgte. Auch die Nutzung der Strommesszange stellte sich als sehr nützlich heraus, sodass die Schule sogar eine eigene anschaffte (Interview mit SEY, Pos. 481-483, 00:32:34-00:32:47).

Bezüglich der Umsetzung des Unterrichtskonzepts erklärte SEY, dass sie sich bemüht habe, so konzepttreu wie möglich zu arbeiten. Allerdings gab sie zu, bei einem Punkt, den sie als problematisch empfand, abgewichen zu sein, nämlich bei den Oberflächenladungen. Dort entschied sie sich, die Erklärungen anzupassen, da sie der Meinung war, dass das ursprüngliche Konzept in diesem Punkt nicht mit ihren Schüler*innen funktionierte (Interview mit SEY, Pos. 489-494, 00:33:08-00:33:33).

6.4.3.4 Interview 4

Rahmeninformationen

Im vierten Interview wurde die Lehrperson mit dem Code KOV befragt. KOV unterrichtet an einem Wiener Bundesoberstufenrealgymnasium und nahm mit der Klasse 7G, einem Gymnasialzweig mit bildnerischem Schwerpunkt, an der Studie teil. Diese Klasse besteht aus 31 Schüler*innen. Der Zeitraum für die Durchführung des LLAs erstreckte sich vom 6. November bis zum 23. Januar und umfasste insgesamt sechs Unterrichtsstunden.

Allgemeiner Eindruck

Zu Beginn des Interviews mit der Lehrperson KOV wurde sie zu ihrem allgemeinen Eindruck zur Durchführung des LLAs befragt. Sie erläuterte, dass sie während der Herbstferien mit der Vorbereitung begonnen hatte, um direkt nach den Ferien mit dem Konzept starten zu können (Interview mit KOV, Pos. 1-13, 00:00:00-00:01:07). Trotz dieser frühen Vorbereitung ergaben sich Probleme, insbesondere weil geplante Stunden ausfielen und sie dadurch den geplanten Ablauf nicht einhalten konnte, wie aus folgender Interviewpassage hervorgeht:

„(...) Ich habe es in den Herbstferien vorbereitet, (...) weil ich mir gedacht habe, ich fange gleich nachher an, dann sind wieder Stunden ausgefallen und es ist sich wieder nicht ausgegangen (...).“ (Interview mit KOV, Pos. 1-13, 00:00:00-00:01:07)

KOV beschrieb, dass sie zunächst dachte, sie hätte einen guten Überblick über das LLA, nachdem sie alle Materialien mehrfach durchgesehen und die PowerPoint-Präsentation vorbereitet hatte. Dennoch stellte sie in der tatsächlichen Unterrichtssituation fest, dass sie sich oft unsicher war, welches Arbeitsblatt wann ausgeteilt werden sollte, wie sie folgendermaßen formulierte: „Dann muss ich sagen, beim ersten Mal durchlesen, hab ich noch nicht damit gerechnet, welche Schwierigkeiten ich dann habe (...)“ (Interview mit KOV, Pos. 1-13, 00:00:00-00:01:07). Diese Unsicherheiten führten dazu, dass sie während des Unterrichts erneut auf die Lehrer*innenhandreichung zurückgreifen musste, obwohl sie meinte, den Ablauf im Kopf zu haben: „Dann habe ich mir die Handreichung eh wieder genommen, weil ohne dem einfach nur vom Scriptum alleine hätte ich es dann, auch wenn ich genau gewusst habe, was ich mache, war ich mir zu unsicher“ (Interview mit KOV, Pos. 22-31, 00:01:32-00:02:18).

Hier wird also deutlich, dass KOV der Meinung war, sich im Vorfeld zu früh mit den Materialien auseinandergesetzt zu haben und durch Stundenausfälle zu viel Zeit zwischen der Vorbereitung und der tatsächlichen Abhaltung der Stunden lag, wodurch sie sich nicht mehr richtig an ihre Vorbereitung erinnern konnte. Die Rückmeldung der Lehrperson zeigt, dass trotz intensiver Vorbereitung selbst bei den Lehrpersonen Unsicherheiten bestehen können.

Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr

In dem Interview wurde KOV auch zur Einbettung des Unterrichtskonzepts im Schuljahr befragt. Sie erläuterte in diesem Zusammenhang, dass sie das Konzept nach den Herbstferien umgesetzt habe und dies thematisch passend fand, da sie gerade die Themen Schwingungen und Wellen abgeschlossen hatte (Interview mit KOV, Pos. 49-50, 00:03:30-00:03:38).

Die Lehrperson fügte hinzu, dass sie normalerweise die Elektrostatik zuvor unterrichtet hätte, diese jedoch ausgelassen habe, um direkt mit dem neuen Konzept zu beginnen (Interview mit KOV, Pos. 53-55, 00:03:40-00:03:56). Dieser Punkt ist besonders interessant, da Grundkenntnisse in der Elektrostatik eigentlich als Voraussetzung für die Durchführung dieses LLAs gelistet sind.

Durchführung von Block 1

Als nächstes wurde die Lehrperson KOV zur Durchführung des ersten Unterrichtsblocks befragt. KOV berichtete, dass sie nicht die gesamte Unterrichtsstunde für die Sequenz 1.1 und 1.2 benötigte, da sie einen Teil der Stunde für administrative Aufgaben wie die Bekanntgabe des Notenstands verwendete (Interview mit KOV, Pos. 62-66, 00:04:20-00:04:31). Den Rest der Stunde nutzte sie, um die Inhalte des ersten Blocks zu behandeln, wie sie folgendermaßen formulierte:

„Ja, da habe ich gar nicht die ganze Stunde dafür gebraucht, weil den ersten Teil der Stunde habe ich den Notenstand gesagt, dann, bis man da durch ist bei 30 Schülern und Schüler*innen ist einmal und die Einverständniserklärung habe ich ja schon vorher ausgeteilt, also das war jetzt nicht in dem drin, klar, das war ja einfach vorher und also ich habe nicht für die erste Einheit [eine Stunde gebraucht] / die ist sich in einer halben Einheit ausgegangen.“ (Interview mit KOV, Pos. 62-66, 00:04:20-00:04:31).

Laut KOV gab es einige Herausforderungen bei der Begriffsdefinition, insbesondere beim Thema Akkubohrer, der kein Kabel benötigt. Dies führte zu Diskussionen darüber, dass Batterien ebenfalls keine Kabel benötigen, aber dennoch als Energiequelle fungieren. Einem Schüler war nicht ganz klar, ob der Akkubohrer nun zu den kabellosen oder kabelgebundenen elektrischen Systemen zählt. Es wäre besser gewesen, den Akkubohrer als Beispiel eines Energieumwandlers (im Gegensatz zu einer Energiequelle) zu diskutieren. Um dieses Missverständnis zu klären, erweiterten sie die Definition und diskutierten auch Batterien als kabellose Energiequellen (Interview mit KOV, Pos. 73-81, 00:04:52-00:05:50).

Die Lehrperson stellte fest, dass die Schüler*innen die Begriffe Energieumwandler und Energiequelle gut verstanden, wie sie in dieser Interviewpassage beschrieb:

„(...) Sie haben das viel schneller als ich [angenommen] / ich musste das immer bewusst verwenden und die Schüler haben es eigentlich automatisch [gemacht] (...)“ (Interview mit KOV, Pos. 94-98, 00:06:22-00:06:47).

Zur Veranschaulichung der Begriffe nutzte KOV eine selbst erdachte Übung⁴³, bei der die Schüler*innen sich im Klassenzimmer entsprechend ihren zufällig ausgeteilten Bilderkarten, die jeweils ein Beispiel für einen Energieumwandler oder eine Energiequelle zeigten, aufstellen mussten. Die Schüler*innen mit einer Bildkarte eines Energieumwandlers sollten sich auf eine Seite des Raumes stellen, während diejenigen mit einer Bildkarte einer Energiequelle sich auf die andere Seite des Raumes stellen sollten. Diese Übung verlief laut KOV erfolgreich und

⁴³ Die Übung war nicht in der Lehrer*innenhandreichung beschrieben.

ohne größere Diskussionen (Interview mit KOV, Pos. 101-103, 00:06:59-00:07:08). KOV beschrieb das ganze folgendermaßen:

„Ja, wir haben es ein bisschen anders gemacht mit den Bildern. Ich habe sie aufstellen lassen, dass sie sich ein bisschen bewegen. Also nicht anheften, sondern eine Seite, andere Seite in Klasse haben wir das gemacht.“ (Interview mit KOV, Pos. 101-103, 00:06:59-00:07:08)

KOV merkte jedoch an, dass einige Begriffe, wie Photovoltaik, den Schüler*innen zunächst unbekannt waren, was teilweise zu Verwirrungen führte: „Sie haben PV, sie haben diese Abkürzung gar nicht gekannt“ (Interview mit KOV, Pos. 118-136, 00:07:47-00:09:00). KOV musste daraufhin die Funktionsweise von Photovoltaikanlagen im Unterricht erklären, um diese Verwirrungen aufzulösen. In Zukunft sollte die Bilderkarte mit der Solarzelle eindeutiger gestaltet werden, indem beispielsweise eine kleine Sonne eingezeichnet wird (Interview mit KOV, Pos. 118-136, 00:07:47-00:09:00).

Durchführung von Block 2

Als nächstes wurde mit der Lehrperson KOV der zweite Block des LLAs besprochen. Der Block begann mit einem Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld, bei dem die Schüler*innen. KOV berichtete hier, dass die Schüler*innen bei der Durchführung dieses Versuchs teilweise Schwierigkeiten mit der Handhabung der Kabel hatten. Die Lehrperson beobachtete, dass die Kabel von den Schüler*innen oft in ihren Windungen belassen und nicht entwirrt wurden, was zu Problemen bei der Durchführung des Versuchs führte. Trotz der Anleitung, die Kabel nicht zusammenzustecken, ignorierten einige Schüler*innen diese Anweisung (Interview mit KOV, Pos. 141-148, 00:09:18-00:09:54).

KOV berichtete zudem, dass die Schüler*innen ihrer Klasse den klassischen Ørsted Versuch noch nie im Unterricht gesehen hatten, der Hands-on-Versuch somit ohne jegliche Vorerfahrung seitens der Schüler*innen durchgeführt wurde (Interview mit KOV, Pos. 159, 00:10:23-00:10:28).

In der Nachbesprechung stellte die Lehrperson fest, dass die Schüler*innen die Beobachtungen des Versuchs initial gut erfasst hatten, wie sie folgendermaßen formulierte:

„Also sie haben es recht gut beobachtet, muss ich wirklich sagen. Sie haben das erkannt, um was es geht.“ (Interview mit KOV, Pos. 163-166, 00:10:35-00:10:55)

Allerdings zeigten sich laut KOV bei der Wiederholung des Versuchs in den Folgestunden auch einige Schwierigkeiten, da sich die Schüler*innen nicht mehr an den Ablauf und die Ergebnisse erinnerten. Dies führte sie zum Teil auf eine hohe Krankheitsrate und damit verbundene häufige

Abwesenheit der Schüler*innen zurück, was die Wiederholung und das Festigen der Inhalte erschwerte (Interview mit KOV, Pos. 163-176, 00:10:35-00:11:34).

Das Arbeitsblatt 2.1, das eine Abbildung der magnetischen Feldlinien enthielt, wurde von den Schüler*innen bei der Wiederholung der Inhalte in der Folgestunde offenbar nicht genutzt (Interview mit KOV, Pos. 180-181, 00:11:38-00:11:51). KOV beschloss anschließend, noch zusätzliche Themen wie die theoretischen Aspekte der Magnetfelder und das Magnetfeld der Erde mit ihren Schüler*innen zu besprechen:

„Und (...) und da sind wir ja dann zu dem Thema gekommen, wir merken keine Magnetfelder. Also, wir haben dann noch drüber gesprochen über Nord und Südpol, dass der geographische nicht mit dem [magnetischen] übereinstimmt. Da haben wir relativ lang [darüber gesprochen], also damit ist diese Einheit eigentlich / der Rest der Stunde war über das Magnetfeld der Erde zu sprechen, dass wir es nicht merken, und dann sind wir auf die Tiere gekommen, die sich orientieren (...).“

(Interview mit KOV, Pos. 184-190, 00:11:51-00:12:23)

KOV ergänzte den Unterricht zudem spontan durch ein aktuelles Thema – einen Zeitungsartikel zu Delfinen und Glasfaserkabeln – und merkte an, dass dies das Interesse der Schüler*innen weckte und zu weiteren Diskussionen führte (Interview mit KOV, Pos. 192-198, 00:12:33-00:13:05).

Auf die Frage der Interviewerin, ob den Schüler*innen die zweidimensionale Darstellung des kreisförmigen Magnetfeldes Schwierigkeiten bereitet habe, antwortete die Lehrperson, dass das Hauptproblem für die Schüler*innen nicht die Darstellung an sich, sondern vielmehr die Unsichtbarkeit des Magnetfeldes gewesen sei (Interview mit KOV, Pos. 203-209, 00:13:13-00:13:43).

Die Lehrperson erklärte weiter, dass sie zusätzlich zu den theoretischen Erklärungen auch die Demonstration mit der Strommesszange durchgeführt hatte. Dafür hatte sie sich sogar eine eigene Strommesszange für die Physiksammlung ihrer Schule besorgt (Interview mit KOV, Pos. 212-216, 00:13:47-00:14:10). KOV erwähnte zudem, dass sie den Schüler*innen die dazugehörigen Erklärungen aus der Lehrer*innenhandreichung ausgeteilt hatte⁴⁴, da „(...) sie es zwar verstanden haben, wie ich es ihnen erzählt habe, wir haben es nicht aufgeschrieben, und in der nächsten Stunde hat wieder keiner eine Ahnung gehabt“ (Interview mit KOV, Pos. 212-216, 00:13:47-00:14:10).

⁴⁴ Das Verbreiten der Informationen aus der Lehrer*innenhandreichung war nicht vorgesehen, da die Inhalte nicht in schüler*innengerechter Sprache formuliert wurden, sondern nur für die Lehrpersonen bestimmt sind.

Im Verlauf des Versuchs zum Magnetfeld, der in fünf Gruppen⁴⁵ durchgeführt wurde, gab es laut KOV insbesondere wegen der begrenzten Anzahl an Strommesszangen Diskussionen unter den Schüler*innen, wer diese nun verwenden durfte (Interview mit KOV, Pos. 219-228, 00:14:11-00:15:04). Trotz der Organisation in Gruppen und der kontinuierlichen Begleitung der Lehrperson traten laut KOV während der Durchführung der Versuche Ablenkungen auf. Ein Beispiel, das die Lehrperson anführte, war, dass einige Schüler*innen ihre Smartphones nutzten, um Bilder zu zeigen, was zu einer zusätzlichen Herausforderung führte:

„(...) Es hat Schüler gegeben, Schüler*innen, die haben, während ich mich hingestellt habe, dazu immer noch das Smartphone ein Bild ihrer Nachbarin gezeigt, vom Smartphone, wie ich gesagt habe, das Smartphone ist natürlich weg.“ (Interview mit KOV, Pos. 219-228, 00:14:11-00:15:04)

Die Lehrperson versuchte, die besagte Schüler*in durch Fragen zum Inhalt der Versuche von ihrer Ablenkung abzubringen, jedoch schien diese wenig beeindruckt und meinte: „(...)Na dann schreiben Sie mir ein Minus hinein“ (Interview mit KOV, Pos. 230-234, 00:15:07-00:15:27). Bezüglich der Unterrichtssequenz zum elektrischen Feld zeigte sich, dass die Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, das Konzept der Oberflächenladungen und die Unterschiede zu den Ladungen im Leiterinneren zu verstehen. Die Lehrperson hatte sich entschieden, die Videos anstelle des Demonstrationsversuches zu verwenden. KOV berichtete, dass sie alle Variationen (mit Strohalm und Alufolie) in der Klasse hergezeigt hatte. KOV merkte jedoch kritisch an, dass sie den Eindruck gehabt hätte, dass die Videos nicht überzeugend für die Schüler*innen waren. Dies formulierte KOV im Interview folgendermaßen:

„Ja, ja und das war für sie irgendwie nicht überzeugend. Ich mein, ob das ich glaub auch nicht wenn ich es selbst gemacht hätte, den Versuch glaub ich auch nicht, dass es überzeugender gewesen wäre, das Magnetfeld war für sie voll akzeptiert das elektrische Feld wollten sie nicht. Naja, das habe ich eher ja, damit ich eine Ruh gebe, jetzt endlich, aber das war für sie nicht mehr [greifbar].“ (Interview mit KOV, Pos. 247-251, 00:16:15-00:16:39)

Als die Interviewerin einwarf, dass hier wohl eine Behandlung der Elektrostatik vor des LLAs sinnvoll gewesen wäre, stimmte KOV zu (Interview mit KOV, Pos. 255-257, 00:16:52-00:16:53).

Die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Arten von Ladungen (Oberflächenladungen und Ladungen im Leiterinneren) war laut KOV für die Schüler*innen anfangs verständlich,

⁴⁵ Zu beachten ist, dass Materialien für acht Versuchsgruppen zur Verfügung standen. KOV teilte die Klasse aber nur in fünf Gruppen ein. Bei einer Gesamtanzahl von 30 Schüler*innen waren dies zirka sechs Schüler*innen pro Gruppe.

wurde aber bei komplexeren Konzepten wie dem Wechselstrom schwieriger (Interview mit KOV, Pos. 294-297, 00:18:45-00:18:59).

Auch die Abbildungen zur Unterscheidung von Gleich- und Wechselstromkreisen fanden die Schüler*innen laut KOV verständlich: „Das haben sie sofort angenommen.“ (Interview mit KOV, Pos. 300-308, 00:19:20-00:19:52).

Als nächstes äußerte die Lehrperson KOV ihre Beobachtungen und Erfahrungen zur Sequenz 2.3 zum elektromagnetischen Felde und der Energieflussregel. Die Lehrperson berichtete, dass die Schüler*innen den Begriff ‚Energiefluss‘ relativ schnell verinnerlicht hatten und sie die Erklärung mit der Schritt-für-Schritt Anleitung gemäß der Lehrer*innenhandreichung gemacht hatte (Interview mit KOV, Pos. 318-324, 00:20:20-00:21:06). KOV zeigte sich jedoch besorgt, dass dieses Verständnis möglicherweise nicht von langer Dauer sein würde, wie aus dieser Interviewpassage hervorgeht:

„Es waren überhaupt so viele Sachen, die waren für sie total klar, wenn ich es gemacht habe, aber beim Wiederholen merkt man dann, dass da wesentliche Dinge fehlen (...).“ (Interview mit KOV, Pos. 318-324, 00:20:20-00:21:06)

Als wesentliche Herausforderung beschrieb KOV in diesem Zusammenhang, dass die Schüler*innen die Existenz des elektromagnetischen Feldes anzweifeln. Während das elektrische und magnetische Feld für sie klar war, so war die Vorstellung eines Feldes, das elektromagnetisch ist, für sie schwer anzunehmen (Interview mit KOV, Pos. 327-333, 00:21:13-00:21:44). Bezüglich der Simulation zum elektromagnetischen Feld berichtete die Lehrperson, dass hier technische Probleme auftraten. Die Schüler*innen konnten die Simulation zunächst nicht auf ihren Smartphones nutzen, was die Lehrperson dazu veranlasste, die Simulation auf dem Computer durchzuführen. Die Probleme wurden auf Fehler in der Bedienung und das unzuverlässige Schul-WLAN zurückgeführt, was zu zusätzlichem Aufwand für die Lehrperson führte, da sie sich einzelnen Schüler*innen zuwenden musste (Interview mit KOV, Pos. 344-353, 00:22:14-00:22:59).

Abschließend wurde noch der Hands-on-Versuch zur Energieübertragung aus der Sequenz 2.3 diskutiert. Dieser Versuch stieß laut KOV auf große Begeisterung bei den Schüler*innen, was sie folgendermaßen beschrieb:

„Ja, das hat ihnen sehr, sehr gut gefallen. Also der Ventilator war / also, wirklich. Also ich hab ihn noch ein Stativ dazu gegeben, das ihn sie ihn eingesteckt haben und ja, aber der Ventilator war der Höhepunkt.“ (Interview mit KOV, Pos. 414-416, 00:27:19-00:27:28)

Jedoch kam es bei diesem Versuch auch zu einem kleinen Unfall, als ein Schüler den Finger in den Ventilator steckte. KOV zeigte sich darüber aber etwas belustigt, da sie dieses Verhalten bei einer 7. Klasse nicht erwartet hätte (Interview mit KOV, Pos. 409-410, 00:26:57-00:27:07). Als letzten Punkt im zweiten Block wurde noch die Durchführung des Mindmaps mit KOV besprochen. KOV hatte den Schüler*innen die Begriffe vorgegeben und sie darum gebeten, daraus selbst eine Mindmap zu erstellen⁴⁶. KOV meinte, dass dies sehr unterschiedlich von den Schüler*innen gemacht wurde. Einige hätten sehr wenig aufgeschrieben, andere mehr (Interview mit KOV, Pos. 433-438, 00:28:04-00:28:39).

Durchführung von Block 3

Als nächstes wurde der dritte Block des LLAs mit der Lehrperson KOV diskutiert. KOV berichtete, dass die Unterscheidung zwischen Gleich- und Wechselstrom für die Schüler*innen weitgehend neu war. Die Lehrperson führte aus, dass den Schüler*innen die grundlegenden Begriffe klar waren, jedoch die detailliertere Vorstellung von Elektronen und deren Verhalten in diesen Kreisen zu Beginn Schwierigkeiten bereitete (Interview mit KOV, Pos. 439-448, 00:28:41-00:29:19).

KOV gab an, sich an dieser Stelle an die Schritt-für-Schritt-Anleitung der Lehrer*innenhandreichung gehalten zu haben. Allerdings merkte sie an, dass die Schüler*innen zusätzlich einige Fragen äußerten:

„Ja, das war, nein, das war noch leicht, wenn man die Batterie umdreht, aber dann sind wir schon auf die Frequenz vom Wechselstrom gekommen, und wenn sich das so schnell, woher kommt das so schnell, woher kommt das, woher kommt das plötzlich, haben sie gesagt.“ (Interview mit KOV, Pos. 454-457, 00:29:40-00:29:45).

Wie aus diesem Zitat hervorgeht, lag die Herausforderung insbesondere in der Vorstellung der Frequenz und der sich schnell ändernden Felder. Es wurde deutlich, dass die Schüler*innen Probleme damit hatten, die schnelle Änderung der Oberflächenladungen und deren Auswirkungen zu begreifen.

Zusätzlich schienen sich einige Schüler*innen die Frage zu stellen, wie diese Richtungsänderung des Feldes zu interpretieren sei, insbesondere, da eine Magnetnadel, die die Richtung des Magnetfeldes anzeigt, nicht mit der Geschwindigkeit des Wechselstroms mithalten kann (Interview mit KOV, Pos. 476-482, 00:31:02-00:31:34).

⁴⁶ Diese Vorgehensweise weicht von den Instruktionen der Lehrer*innenhandreichung ab, bei der die Schüler*innen selbst die Begriffe aus den Unterlagen zusammensuchen sollten, um die Mindmap zu erstellen.

Die anschließende Diskussion über den Poynting-Vektor, der den Energiefluss beschreibt, war den Schüler*innen laut KOV jedoch relativ klar (Interview mit KOV, Pos. 409-492, 00:31:43-00:32:00).

Die Lehrperson berichtete weiter, dass das Video zum Wechselstromkreis, das sie zur Wiederholung zeigte, gemischte Reaktionen hervorrief. Laut KOV schauten sie das Video mehrfach in englischer Sprache⁴⁷ an (Interview mit KOV, Pos. 509-517, 00:33:15-00:33:35). Obwohl die Schüler*innen zunächst Schwierigkeiten mit der Komplexität der Darstellung hatten, empfand die Lehrperson das Video grundsätzlich als nützlich, da es eine umfassendere, dreidimensionale Perspektive auf das Thema bot. Sie sagte: "(...) Es ist gut dargestellt, aber sie haben zum ersten Mal dann wirklich auch gesagt, erkannt, wie kompliziert es ist (...)" (Interview mit KOV, Pos. 541-544, 00:35:16-00:35:58).

Bezüglich des Themas ‚Energieerhaltung‘ meinte KOV, dass die Schüler*innen bereits grundlegendes Vorwissen zu diesem Thema mitgebracht hätten: „Ja, ja, ja. Sie wissen, dass ich immer auf das [viel Wert lege]“ (Interview mit KOV, Pos. 563, 00:36:43-00:36:47).

Ein weiteres Thema, das besprochen wurde, war die Lichtgeschwindigkeit und der schnelle Energieübertragungsprozess. Die Lehrperson erklärte, dass die Schüler*innen die Idee, dass die Energie in Lichtgeschwindigkeit übertragen wird, nachvollzogen hatten, da sie im Alltag die Erfahrung gemacht hatten, dass dieser Prozess schnell stattfindet (Interview mit KOV, Pos. 564-567, 00:36:47-00:37:08).

Bezüglich des Rucksackmodells und der Concept Cartoons, welches die Schüler*innen am Arbeitsblatt 3.2 ausfüllen sollten, konnte KOV nicht viel berichten, da sie die Arbeitsblätter noch nicht ausgewertet hatte: "Das hab‘ ich vergessen zum Einsammeln, das mache ich morgen" (Interview mit KOV, Pos. 588, 00:38:38-00:38:41).

Wie schätzt du das Material ein?

Anschließend gab die Lehrperson KOV eine Rückmeldung zum eingesetzten Unterrichtsmaterial. Sie äußerte sich durchweg positiv zur Verfügbarkeit und Eignung des Materials, das für die Unterrichtssequenz bereitgestellt wurde. Auf die Frage, ob sie zusätzliches Material benötigt hätte oder ob etwas fehlte, antwortete sie klar mit „Nein“ und bestätigte damit, dass sie mit dem vorhandenen Material zufrieden war (Interview mit KOV, Pos. 611-616, 00:39:43-00:40:13).

Die Lehrperson reflektierte über die Versuche und merkte an, dass die Schüler*innen bei der Arbeit mit Kabeln, Batterien und Lämpchen, die sie selbstständig miteinander kombinieren

⁴⁷ Die Lehrperson KOV gab an, übersehen zu haben, dass das Video auch auf Deutsch verfügbar war.

sollten, sehr selbstständig vorgehen und es schafften, geschlossene Stromkreise zu bauen, was im Regelunterricht eher eine Schwierigkeit darstellte. Dies wurde von KOV als positive Erfahrung beschrieben (Interview mit KOV, Pos. 630-626, 00:40:20-00:40:54).

Zu den Themen, die im Unterricht behandelt wurden, merkte KOV an, dass sie während des Unterrichts teilweise in ihren Erklärungen über die vorgesehenen Inhalte hinausgegangen war. In diesem Zusammenhang erwähnte sie erneut die zusätzlichen Diskussionen über den Akku-bohrer und die Magnetfelder (Interview mit KOV, Pos. 642-649, 00:41:57-00:42:44).

Die Lehrperson plante, im Anschluss an dieses LLA mehr auf das Thema Wechselstrom einzugehen und das Thema Gleichstrom, insbesondere die Arbeit mit Batterien und Kabeln, nur noch am Rande zu behandeln. Dies war darauf zurückzuführen, dass die Schüler*innen nun bereits umfangreiche praktische Erfahrungen gesammelt hatten und die zukünftige Unterrichtsgestaltung auf andere Aspekte fokussiert werden sollte (Interview mit KOV, Pos. 651-657, 00:42:47-00:43:19).

6.5 Diskussion

In Folgenden werden die im Rahmen der Evaluation des LLAs zur Energieübertragung in elektrischen Systemen gewonnenen Ergebnisse kritisch reflektiert und diskutiert. Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem Ergebniskapitel (siehe Abschnitt 6.4 Ergebnisse) werden zunächst die wichtigsten Erkenntnisse aus den Fragebögen und Interviews zusammengefasst (Abschnitt 6.5.1). Darauf folgt eine Interpretation dieser Ergebnisse im Kontext der Forschungsfragen (Abschnitt 6.5.2). Abschließend werden die Stärken und Schwächen der Untersuchung analysiert, um eine fundierte Bewertung des LLAs vorzunehmen (Abschnitt 6.5.3).

6.5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

6.5.1.1 Fragebogen 1 und 3

Quantitative Analyse

In diesem Abschnitt wird die quantitative Analyse der Ergebnisse aus den Fragebögen 1 (Prätest) und Fragebogen 3 (Posttest) diskutiert (siehe auch Abschnitt 6.4.1 Ergebnisse des Fragebogens 1 und 3). Ziel ist es, die (statistisch signifikanten) Veränderungen in den Schüler*innenleistungen zwischen dem Prätest und dem Posttest darzulegen und zu interpretieren.

Gesamtpunkte Prä- vs. Posttest

Der Vergleich der Gesamtpunktezahle aller Schüler*innen zeigt eine signifikante Verbesserung der Leistungen im Posttest gegenüber dem Prätest. Die durchschnittliche Punktzahl stieg von $\bar{x} = 19,85$ im Prätest auf $\bar{x} = 24,99$ im Posttest, was durch einen statistisch signifikanten p-

Wert von $p < 0,0001$ und einen Cohens d-Wert von $d = 0,92$, der einen starken Effekt beschreibt, untermauert wird (siehe auch Abbildung 69 und Tabelle 68). Dies deutet darauf hin, dass das LLA einen wesentlichen Einfluss auf das Verständnis der Schüler*innen bezüglich der Inhalte des Unterrichtsdesigns hatte.

Dieses Ergebnis kann als Beleg dafür gesehen werden, dass die entwickelten Lehrmaterialien und Methoden effektiv dazu beigetragen haben, das Verständnis der Schüler*innen zu diesem Thema zu verbessern. Die geringe Varianz und der geringe Standardfehler in beiden Tests unterstützen die Aussage, dass die Ergebnisse konsistent über die gesamte Stichprobe hinweg waren. Das zeigt, dass die Verbesserungen nicht nur auf einzelne Ausreißer zurückzuführen sind, sondern auf eine allgemeine Tendenz in der gesamten Schüler*innengruppe.

Vergleich Prä- vs. Posttest: Item-Analyse

Die differenzierte Betrachtung der einzelnen Items liefert wichtige Einblicke in die Lernfortschritte der Schüler*innen innerhalb des LLAs zur Energieübertragung in elektrischen Systemen. Während fast alle Items signifikante Verbesserungen zeigen⁴⁸, variiert die Stärke des Effekts deutlich zwischen den verschiedenen Themenbereichen. Im Folgenden werden die einzelnen Items genauer beschrieben.

Item 1 – Kabelgebundene Systeme

Die Analyse der Ergebnisse für das Item 1, das die Schüler*innen aufforderte, ein Beispiel für ein kabelgebundenes elektrisches System zu nennen, zeigt deutliche Lernfortschritte zwischen dem Prä- und Posttest (siehe Abbildung 70 und Tabelle 73). Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, stieg der Mittelwert für dieses Item von $\bar{x} = 2,11$ im Prätest auf $\bar{x} = 2,71$ im Posttest, was einen signifikanten Anstieg darstellt ($p < 0,0001$). Dies weist darauf hin, dass die Schüler*innen nach der Intervention ein besseres Verständnis oder eine verbesserte Fähigkeit zur Identifikation kabelgebundener Systeme entwickelt haben.

Der hohe Cohens d-Wert von $d = 0,89$ signalisiert zudem einen starken Effekt der Intervention auf das Wissen der Schüler*innen zu diesem Thema. Dies bedeutet, dass die Verbesserung nicht nur statistisch signifikant ist, sondern auch praktisch relevant, was die Wirksamkeit der durchgeführten Unterrichtsmaßnahme unterstreicht.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Reduktion der Varianz von $\sigma^2 = 0,90$ auf $\sigma^2 = 0,44$ und der Standardabweichung von $\sigma = 0,95$ auf $\sigma = 0,66$. Diese Abnahme deutet darauf hin, dass die Antworten im Posttest homogener waren, was auf eine gleichmäßigere Verteilung des Wis-

⁴⁸ Eine Ausnahme bildet das Item 8 zum elektrischen Feld.

sens unter den Schüler*innen hinweist. Während im Prätest einige Schüler*innen möglicherweise noch unsicher oder uneinheitlich in ihren Antworten waren, scheinen nach der Intervention die meisten Schüler*innen ein konsistenteres Verständnis entwickelt zu haben.

Die Verringerung des Standardfehlers von $SE = 0,09$ im Prätest auf $SE = 0,06$ im Posttest unterstützt ebenfalls die Annahme, dass die gemessenen Verbesserungen nicht zufällig sind, sondern auf einer tatsächlichen Steigerung des Wissens basieren. Der kleinere Standardfehler im Posttest deutet darauf hin, dass die Mittelwertsschätzung für die gesamte Schüler*innengruppe genauer ist, was die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht.

Item 2 – Kabellose Systeme

Auch für das zweite Item, das nach Beispielen für kabellose elektrische Systeme fragte, wurde eine signifikante Verbesserung zwischen dem Prä- und Posttest (siehe Abbildung 71 und Tabelle 74) beobachtet. Der Mittelwert der erreichten Punkte stieg für die gesamte Stichprobe von $\bar{x} = 1,59$ im Prätest auf $\bar{x} = 2,57$ im Posttest, was durch den statistisch signifikanten p-Wert von $p < 0,0001$ untermauert wird. Diese signifikante Zunahme deutet darauf hin, dass die Schüler*innen nach der Intervention ein besseres Verständnis für kabellose Systeme entwickelt haben. Der Cohens d-Wert von $d = 1,46$ weist auch bei diesem Item wieder auf einen sehr starken Effekt hin.

Die Reduktion der Varianz von $\sigma^2 = 0,81$ auf $\sigma^2 = 0,51$ und der Standardabweichung von $\sigma = 0,90$ auf $\sigma = 0,72$ im Posttest deutet darauf hin, dass die Antworten im Posttest konsistenter waren als im Prätest. Diese Reduktion in der Streuung der Ergebnisse legt nahe, dass die Schüler*innen nach der Intervention ein einheitlicheres Verständnis für kabellose Systeme entwickelt haben, was auf eine erfolgreiche Vermittlung des Inhalts hinweist.

Die Verringerung des Standardfehlers von $SE = 0,09$ im Prätest auf $SE = 0,07$ im Posttest unterstützt weiter die Annahme, dass die Verbesserungen in den erzielten Punkten zuverlässig und nicht zufällig sind.

Item 3 – Energieumwandler

Die Analyse der Ergebnisse für Item 3, bei dem die Schüler*innen ein Beispiel für einen Energieumwandler nennen sollten, zeigt eine deutliche Verbesserung ihrer Leistung nach der Intervention (siehe Abbildung 72 und Tabelle 75). Der Mittelwert der erreichten Punkte stieg signifikant von $\bar{x} = 1,44$ im Prätest auf $\bar{x} = 2,61$ im Posttest, was durch den sehr niedrigen p-Wert von $< 0,0001$ belegt wird. Dies weist auf einen erfolgreichen Lernprozess hin, bei dem die Schüler*innen nach der Intervention ein deutlich besseres Verständnis für den Begriff ‚Energieumwandler‘ entwickelt haben.

Der Cohens Wert von $d = 1,84$ ergab auch bei diesem Item einen starken Effekt.

Die Varianz in den erreichten Punkten blieb im Vergleich zum Prätest ($\sigma^2 = 0,65$) im Posttest nahezu unverändert ($\sigma^2 = 0,62$). Auch die Standardabweichung änderte sich somit nur geringfügig von $\sigma = 0,81$ im Prätest auf $\sigma = 0,79$ im Posttest. Dies deutet drauf hin, dass die Streuung der Leistungen der Schüler*innen ähnlich blieb. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Intervention zwar insgesamt zu einer Verbesserung geführt hat, aber die Unterschiede zwischen den einzelnen Schüler*innen in Bezug auf ihr Verständnis von Energieumwandlern weitgehend bestehen blieben.

Der Standardfehler blieb unverändert bei $SE = 0,08$, was darauf hindeutet, dass die Präzision der Schätzung des Mittelwerts vor und nach der Intervention konsistent war.

Item 4 – Energiequellen

Die Analyse der Ergebnisse für Item 4, in dem die Schüler*innen dazu aufgefordert waren, ein Beispiel für eine Energiequelle zu nennen, zeigt eine signifikante Verbesserung der Leistungen nach der durchgeführten Intervention (siehe Abbildung 73 und Tabelle 76). Der Mittelwert der erreichten Punkte stieg von $\bar{x} = 2,41$ im Prätest auf $\bar{x} = 2,89$ im Posttest, was durch den p-Wert von $p < 0,0001$ statistisch belegt wird. Diese Zunahme deutet somit darauf hin, dass die Schüler*innen nach der Intervention ein besseres Verständnis von Energiequellen hatten.

Der Cohens d-Wert von $d = 0,95$ zeigt zudem einen starken Effekt.

Ein auffälliger Aspekt bei den Ergebnissen zu Item 4 ist die deutliche Reduktion der Varianz von $\sigma^2 = 0,80$ im Prätest auf $\sigma^2 = 0,22$ im Posttest und der Standardabweichung von $\sigma = 0,89$ im Prätest auf $\sigma = 0,46$ im Posttest. Diese Verringerung der Streuung deutet darauf hin, dass die Antworten der Schüler*innen im Posttest wesentlich homogener waren.

Der geringere Standardfehler von $SE = 0,05$ im Posttest im Vergleich zu $SE = 0,09$ im Prätest spiegelt die höhere Genauigkeit der Mittelwertsschätzung nach der Intervention wider.

Item 5 – Magnetisches Feld Definition

Die Ergebnisse für Item 5, in dem die Schüler*innen eine Definition des magnetischen Feldes geben und es darstellen sollten, zeigen eine signifikante, jedoch relativ geringe Verbesserung zwischen Prä- und Posttest (siehe Abbildung 74 und Tabelle 77). Der Mittelwert der erreichten Punkte stieg nur leicht von $\bar{x} = 1,64$ im Prätest auf $\bar{x} = 1,80$ im Posttest, was durch den p-Wert von $p = 0,039$ als statistisch signifikant bewertet wird. Obwohl der Anstieg signifikant ist, ist der Cohens d-Wert von $d = 0,27$ eher gering, was auf eine begrenzte praktische Relevanz des Effekts hinweist.

Die nahezu unveränderte Varianz ($\sigma^2 = 0,59$ im Prätest und $\sigma^2 = 0,60$ im Posttest) und konstant gebliebene Standardabweichung (von $\sigma = 0,77$) zeigen, dass die Leistungsunterschiede innerhalb der Gruppe durch die Intervention kaum beeinflusst wurden. Der Anstieg des Standardfehlers von $SE = 0,07$ im Prätest auf $SE = 0,08$ im Posttest deutet zudem darauf hin, dass die Präzision der Mittelwertschätzung nach der Intervention leicht abgenommen hat, was darauf hindeuten könnte, dass die Verbesserung in den Antworten der Schüler*innen uneinheitlich war und nicht auf eine gleichmäßige Wissenssteigerung in der gesamten Gruppe hinweist.

Mehrere Interpretationen könnten dieses Ergebnis erklären: Erstens könnte es sein, dass einige Klassen bereits über Vorwissen zum Thema verfügten, was den Effekt der Intervention abschwächte. Zweitens ist es möglich, dass die Schüler*innen die Definition des magnetischen Feldes, die sie als Merksatz aufgeschrieben haben, nicht vollständig verinnerlicht haben und daher im Posttest Schwierigkeiten hatten, sie korrekt wiederzugeben. Drittens könnten die Schüler*innen bei der Darstellung des Magnetfeldes auf ihr Vorwissen zurückgegriffen haben, wobei es möglicherweise zu Verwechslungen mit dem elektrischen Feld kam.

Angesichts dieser Überlegungen könnte es für zukünftige Interventionen sinnvoll sein, dieses Ergebnis genauer zu untersuchen und Strategien zu entwickeln, um den Effekt in Zukunft zu verstärken. Dies könnte beispielsweise durch eine gezieltere Vermittlung des Unterschieds zwischen magnetischen und elektrischen Feldern oder durch Methoden zur besseren Verankerung von Merksätzen im Langzeitgedächtnis der Schüler*innen erreicht werden.

Item 6 – Magnetisches Feld (Multiple Choice)

Die Ergebnisse für das sechste Item, das eine Multiple-Choice Aufgabe zum magnetischen Feld umfasste, zeigt eine signifikante, wenn auch moderatere Verbesserung zwischen dem Prä- und Posttest im Vergleich zu den zuvor diskutierten Items (siehe Abbildung 75 und Tabelle 78). Der Mittelwert der erreichten Punkte stieg von $\bar{x} = 2,06$ im Prätest auf $\bar{x} = 2,31$ im Posttest, was durch den p-Wert von $p = 0,002$ statistisch bestätigt wird. Obwohl der Anstieg weniger ausgeprägt ist als bei anderen Items, ist er dennoch signifikant und zeigt, dass die Schüler*innen nach der Intervention ein besseres Verständnis des Themas erlangt haben.

Der Cohens Wert von $d = 0,61$ deutet auf einen mittleren Effekt hin, was darauf schließen lässt, dass die Intervention zwar wirksam war, der Effekt jedoch nicht so stark ausgeprägt ist. Dies könnte darauf hinweisen, dass das Thema des magnetischen Feldes möglicherweise komplexer ist oder dass die didaktischen Maßnahmen in diesem Bereich weniger stark gewirkt haben.

Die Varianz im Posttest ($\sigma^2 = 0,37$) ist leicht gegenüber dem Prätest ($\sigma^2 = 0,47$) gesunken, was auf eine geringfügig homogenere Leistung der Schüler*innen nach der Intervention hindeutet. Diese Reduktion, zusammen mit der leicht verringerten Standardabweichung von $\sigma = 0,69$ auf $\sigma = 0,61$, deutet darauf hin, dass es nach der Intervention weniger extreme Abweichungen in den Schüler*innenergebnissen gab, was für eine gewisse Konsistenz im erworbenen Wissen spricht.

Der Standardfehler verringerte sich von $SE = 0,07$ im Prätest auf $SE = 0,06$ im Posttest, was darauf hinweist, dass die Ergebnisse nach der Intervention stabiler und konsistenter sind

Item 7 – Felder um den Stromkreis (Multiple Choice)

Die Ergebnisse für Item 7, das sich mit den Feldern um den Stromkreis befasst und im Multiple-Choice-Format abgefragt wurde, zeigen eine signifikante Verbesserung der Schüler*innenleistungen zwischen Prä- und Posttest (siehe Abbildung 76 und Tabelle 79). Der Mittelwert stieg von $\bar{x} = 2,60$ im Prätest auf $\bar{x} = 2,75$ im Posttest, was durch den p-Wert von $p = 0,016$ statistisch belegt wird. Dies zeigt, dass die Schüler*innen nach der Intervention ein verbessertes Verständnis für die Thematik entwickelt haben.

Der Cohens Wert von $d = 0,63$ weist auf einen mittleren Effekt hin. Dies bedeutet, dass die Veränderung im Wissen der Schüler*innen aufgrund der Intervention signifikant ist, aber nicht so stark wie in einigen anderen Items.

Die Reduktion der Varianz von $\sigma^2 = 0,26$ im Prätest auf $\sigma^2 = 0,19$ im Posttest und die Abnahme der Standardabweichung von $\sigma = 0,51$ auf $\sigma = 0,44$ zeigen, dass die Leistung der Schüler*innen nach der Intervention homogener geworden ist. Dies deutet darauf hin, dass die Schüler*innen ein konsistenteres Verständnis für die Felder um den Stromkreis entwickelt haben, was darauf hinweist, dass die Intervention die Leistungsunterschiede innerhalb der Gruppe verringert hat.

Zusätzlich verringerte sich der Standardfehler von $SE = 0,05$ im Prätest auf $SE = 0,04$ im Posttest.

Item 8 – Elektrisches Feld (Multiple Choice)

Die Analyse der Ergebnisse für Item 8, das sich auf das Verständnis des elektrischen Feldes in einem Multiple-Choice-Format konzentriert, zeigt als einziges Item keine signifikante Verbesserung zwischen Prä- und Posttest (siehe Abbildung 77 und Tabelle 80). Der Mittelwert der erreichten Punkte über die gesamte Stichprobe stieg von $\bar{x} = 1,83$ im Prätest auf $\bar{x} = 1,95$ im Posttest. Der p-Wert von $p = 0,083$ liegt knapp über dem allgemein akzeptierten Signifikanzniveau von $p \leq 0,05$, was darauf hinweist, dass der Unterschied statistisch nicht signifikant ist.

Der Cohens Wert von $d = 0,48$ weist auf einen kleinen bis mittleren Effekt hin. Dies könnte bedeuten, dass die behandelten Inhalte möglicherweise weniger effektiv waren oder dass das Thema für die Schüler*innen komplexer war und mehr Zeit oder andere Lernstrategien benötigt hätte. Dies sollte in zukünftigen Forschungszyklen genauer betrachtet werden.

Die Varianz der Testergebnisse erhöhte sich von $\sigma^2 = 0,20$ im Prätest auf $\sigma^2 = 0,31$ im Posttest, was auf eine größere Streuung der Ergebnisse nach der Intervention hindeutet. Auch die Standardabweichung stieg entsprechend von $\sigma = 0,45$ auf $\sigma = 0,56$. Diese größere Streuung könnte darauf hindeuten, dass einige Schüler*innen deutliche Fortschritte gemacht haben, während andere möglicherweise kaum oder gar nicht profitiert haben.

Der Standardfehler erhöhte sich ebenfalls leicht von $SE = 0,04$ auf $SE = 0,05$, was die größere Unsicherheit in der Schätzung des Mittelwerts im Posttest widerspiegelt.

Um diese Ergebnisse besser einschätzen zu können, ist ein Blick auf die Kodierung⁴⁹ dieses Items notwendig (siehe Textbox 30).

Textbox 30: Kodieranleitung für das Item 8 zum elektrischen Feld (Multiple Choice).

Fragebogen 1: Frage 8. | Fragebogen 3: Frage 10.

In welchen Situationen tritt ein elektrisches Feld auf? Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

a) Im Raum um eine Batterie, die mit nichts verbunden ist.	<i>richtig</i>
b) Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter.	<i>richtig</i>
c) Im Raum um einen Stabmagneten.	<i>falsch</i>
d) In keinem der oben genannten Beispiele.	<i>falsch</i>

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn a) <i>und</i> b) angekreuzt sind.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn a) oder b) angekreuzt sind.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird bei allen anderen Fällen angewandt.
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Die Kodierung der Antworten gemäß der Kodieranleitung zeigt, dass nur 22,92 % der Schüler*innen alle korrekten Antwortoptionen auswählten und den Code 3 erhielten. Etwa 56,25 % der Antworten wurden mit dem Code 2 bewertet, was darauf hinweist, dass die Schüler*innen

⁴⁹ Die genaue Kodieranleitung für alle Items ist im Anhang dieser Arbeit zu finden.

entweder nur die Option a) oder b) auswählten, aber nicht beide. Dies zeigt, dass viele Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, beide korrekten Antwortoptionen zu erkennen. Die verbleibenden 18,75 % erhielten den Code 1, da sie keine korrekten Antwortoptionen auswählten, und 2,08 % wurden mit Code 0 bewertet, da die Antwort leer gelassen wurde.

Ein möglicher Grund für dieses Ergebnis könnte ein unzureichendes Verständnis des elektrischen Feldes gewesen sein. Schüler*innen, die nur den Code 2 erhielten, erkannten möglicherweise nicht, dass sowohl eine Batterie als auch ein stromdurchflossener Leiter ein elektrisches Feld erzeugen. Ein weiterer möglicher Grund könnte die Formulierung der Frage sein: Möglicherweise kreuzten einige Schüler*innen nur eine Antwortoption schnell an, ohne zu realisieren, dass mehrere Optionen richtig sein könnten.

Die Ergebnisse zu Item 8 verdeutlichten jedenfalls die Notwendigkeit, das LLA in diesem Bereich zu überarbeiten und gezieltere Unterstützung zum Thema ‚elektrische Felder‘ anzubieten.

Item 9 – Elektrisches Feld Definition

Die Analyse der Ergebnisse für Item 9, das die Definition des elektrischen Feldes und seine Darstellungsformen in einem offenen Fragenformat abfragt, zeigt eine signifikante Verbesserung zwischen dem Prä- und Posttest (siehe Abbildung 78 und Tabelle 81). Der Mittelwert der erreichten Punkte stieg von $\bar{x} = 1,24$ im Prätest auf $\bar{x} = 1,57$ im Posttest. Der p-Wert von $p < 0,0001$ zeigt die statistische Signifikanz an.

Der Cohens Wert von $d = 0,92$ deutet auf einen starken Effekt der Intervention hin. Dies zeigt, dass die Schüler*innen nach der Intervention signifikante Fortschritte beim Verständnis der Definition des elektrischen Feldes gemacht haben.

Die Varianz erhöhte sich von $\sigma^2 = 0,24$ im Prätest auf $\sigma^2 = 0,48$ im Posttest und die Standardabweichung stieg von $\sigma = 0,49$ auf $\sigma = 0,69$. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Schüler*innen unterschiedlich gut von der Intervention profitiert haben oder dass es größere Unterschiede im Verständnis der Definition des elektrischen Feldes gibt. Eine solche Zunahme der Varianz und Standardabweichung kann auch auf eine stärkere Differenzierung in der Leistungsfähigkeit der Schüler*innen hinweisen.

Auch der Standardfehler erhöhte sich leicht von $SE = 0,05$ im Prätest auf $SE = 0,07$ im Posttest. Diese leichte Erhöhung des SE könnte die größere Unsicherheit in der Schätzung des Mittelwerts nach der Intervention widerspiegeln, die durch die höhere Varianz verursacht wird.

Item 10 – Weg der Energie (Zeichnung)

Die Analyse der Ergebnisse für Item 10, in dem die Schüler*innen den ‚Weg der Energie‘ in einer Zeichnung darstellen sollten, zeigt eine besonders große Verbesserung zwischen dem Prä- und Posttest (siehe Abbildung 79 und Tabelle 82). Der Mittelwert der erreichten Punkte stieg

von $\bar{x} = 1,02$ im Prätest auf $\bar{x} = 1,53$ im Posttest. Der p-Wert von $p < 0,0001$ zeigt, dass diese Verbesserung statistisch signifikant ist.

Der Cohens Wert von $d = 1,24$ weist auf einen sehr starken Effekt hin. Dieser hohe Effekt zeigt, dass die Schüler*innen nach der Intervention signifikante Fortschritte bei der Darstellung des Weges der Energie gemacht haben. Die Intervention war daher besonders effektiv bei der Vermittlung dieses Konzeptes.

Die Varianz erhöhte sich von $\sigma^2 = 0,04$ im Prätest auf $\sigma^2 = 0,78$ im Posttest und die Standardabweichung stieg von $\sigma = 0,19$ auf $\sigma = 0,89$. Diese erhebliche Zunahme deutet darauf hin, dass nach der Intervention eine größere Streuung in den Ergebnissen zu beobachten ist.

Der Standardfehler erhöhte sich von $SE = 0,02$ im Prätest auf $SE = 0,09$ im Posttest. Das liegt vermutlich daran, dass die größere Streuung in den Ergebnissen zu einer etwas größeren Unsicherheit bei der Einschätzung des durchschnittlichen Lernerfolgs führt. Trotzdem bleibt der Standardfehler insgesamt klein, was darauf hinweist, dass der berechnete Mittelwert weiterhin als zuverlässig angesehen werden kann.

Item 11 – Gleich- und Wechselstromkreise

Die Ergebnisse für Item 11, das sich mit Gleich- und Wechselstromkreisen befasst, zeigen ebenfalls eine signifikante Verbesserung zwischen dem Prä- und Posttest (siehe Abbildung 80 und Tabelle 83). Der Mittelwert der erzielten Punkte stieg von $\bar{x} = 1,91$ im Prätest auf $\bar{x} = 2,31$ im Posttest. Der p-Wert von $p = 0,0002$ bestätigt, dass dieser Unterschied statistisch signifikant ist.

Der Cohens Wert von $d = 0,48$ weist auf einen geringen bis mittleren Effekt hin. Dies deutet darauf hin, dass die Intervention zwar zu einer Verbesserung des Verständnisses der Gleich- und Wechselstromkreise geführt hat, der Effekt jedoch nicht besonders stark ausgeprägt ist. Diese geringe Effektgröße könnte darauf hinweisen, dass die Intervention in diesem Bereich nur eine moderate Wirkung hatte oder dass die Schüler*innen möglicherweise bereits ein gewisses Grundverständnis für das Thema hatten.

Die Varianz verringerte sich leicht von $\sigma^2 = 0,89$ im Prätest auf $\sigma^2 = 0,79$ im Posttest und auch die Standardabweichung sank von $\sigma = 0,94$ auf $\sigma = 0,89$. Diese Reduktion der Streuung deutet darauf hin, dass die Antworten im Posttest etwas homogener wurden. Dies könnte bedeuten, dass die Schüler*innen nach der Intervention insgesamt ein konsistenteres Verständnis für Gleich- und Wechselstromkreise entwickelten.

Der Standardfehler blieb konstant bei $SE = 0,09$ in beiden Tests. Dies deutet darauf hin, dass die Zuverlässigkeit der Schätzung des Mittelwerts der Schüler*innenleistungen nicht wesentlich beeinflusst wurde, auch wenn sich die Leistung insgesamt verbessert hat.

Interpretation der Ergebnisse im Gesamtkontext

Die signifikanten Verbesserungen in den meisten Items und der starke Effekt bei den Gesamtpunkten deuten darauf hin, dass das LLA insgesamt erfolgreich war. Die Effektstärken variieren zwischen den verschiedenen Themenbereichen, was auf verschiedene Gründe, wie oben beschrieben, zurückgeführt werden kann.

Ein besonders ausgeprägter Effekt zeigt sich beispielsweise bei Item 2, das sich mit kabellosen Systemen beschäftigt. Das Effektstärkemaß ergibt hier einen Wert von $d = 1,46$, was darauf hindeutet, dass die Schüler*innen durch das LLA in diesem Bereich besonders große Fortschritte gemacht haben. Diese Verbesserung könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Begriff ‚kabellose Systeme‘ für die Schüler*innen besonders einleuchtend und intuitiv nachvollziehbar war, was zu einer schnellen Akzeptanz führte. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen aus der Interviewstudie (siehe Kapitel 5).

Noch deutlicher zeigt sich dies bei Item 3, in dem die Energieumwandler thematisiert wird. Mit einer Effektstärke von $d = 1,84$ ist dies das Item mit dem stärksten beobachteten Effekt. Dieser hohe Wert legt nahe, dass auch der Begriff ‚Energieumwandler‘ besonders gut von den Schüler*innen aufgenommen wurde und sie beim Posttest einige korrekte Beispiele dafür nennen konnten.

Im Gegensatz dazu weist Item 5, das die Definition des magnetischen Feldes behandelt, lediglich einen geringen Effekt auf (Cohens $d = 0,27$), obwohl die Ergebnisse statistisch signifikant sind. Dies könnte darauf hindeuten, dass das Konzept des magnetischen Feldes für die Schüler*innen schwerer zu erfassen war, oder dass die entsprechenden Lehrmaterialien weniger effektiv waren. Möglich ist auch, dass dieses Thema für die Schüler*innen weniger relevant erschien, was sich in einem geringeren Engagement und somit in weniger deutlichen Lernfortschritten äußerte.

Besondere Aufmerksamkeit verdient auch Item 8, da es als einziges Item keine signifikanten Unterschiede zwischen Prä- und Posttest aufwies. Dies könnte auf spezifische Schwierigkeiten bei der Vermittlung des Konzepts des elektrischen Feldes hindeuten oder darauf, dass das Multiple-Choice-Format für dieses Thema weniger geeignet war. Weitere Untersuchungen könnten erforderlich sein, um die Ursachen für diese mangelnde Verbesserung zu klären und gezielte Anpassungen in des LLAs vorzunehmen.

Insgesamt lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass das LLA wirksam war, um das Verständnis der Schüler*innen zum Thema ‚Energieübertragung in elektrischen Systemen‘ zu verbes-

sern. Gleichzeitig bieten die Unterschiede in den Effektstärken Hinweise darauf, welche Aspekte des LLAs weiter optimiert werden könnten, um in allen Bereichen gleichermaßen starke Lernergebnisse zu erzielen.

Qualitative Analyse

In der qualitativen Analyse der Schüler*innenantworten wurden verschiedene offene Items betrachtet und interpretiert. Die qualitative Auswertung der Daten ermöglichte es, tiefergehende Einsichten in die Denkprozesse der Schüler*innen zu gewinnen und spezifische Muster in ihrem Antwortverhalten zu identifizieren.

Item F1_10b bzw. F3_12b – Weg der Energie (Begründung)

Das Item zur Begründung des Wegs der Energie in einem Stromkreis enthielt zwei Teilfragen: eine Skizze und eine schriftliche Begründung. Die qualitative Analyse der Begründungen (F1_10b und F3_12b) ergab, dass die am häufigsten genannten Kategorien ‚Stromrichtung‘ und ‚0‘, was für eine fehlende Antwort steht, waren. Im Prätest erklärten 42 Schüler*innen ihre Zeichnung primär durch die Richtung des Stromflusses, während 22 Antworten keine Begründung enthielten. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass viele Schüler*innen die Richtung des Stroms mit dem Energiefluss verwechselten.

Im Posttest wurde eine ähnliche Verteilung beobachtet, wobei die Kategorie ‚Stromrichtung‘ erneut vorherrschte, gefolgt von ‚Minusplus‘ und ‚Energieübertragung‘. Die Zunahme der Nennungen der Kategorie ‚Energieübertragung‘ im Vergleich zum Prätest deutet auf eine mögliche Verbesserung des Verständnisses hin, da Schüler*innen nun häufiger in der Lage waren, die Vorstellung von Energieübertragung in ihre Begründungen einzubeziehen. Andererseits scheint auch die Verwechslung des Energieflusses mit dem Stromfluss, der häufig vom Minuspol zum Pluspol der Batterie beschrieben wird, beständig zu sein.

Besonders auffällig ist, dass viele Schüler*innen im Prätest spärliche Begründungen gaben, häufig nur kurze Antworten ohne vollständige Sätze formulierten. Dies könnte auf eine begrenzte Fähigkeit zur Verbalisierung ihrer Gedanken oder auf ein mangelndes Verständnis des behandelten Themas hindeuten.

Item F1_12 bzw. F3_14 – Elektrischer Föhn

Das Item zur Energieübertragung bei einem elektrischen Föhn zeigte im Prätest die höchsten Nennungen in den Kategorien ‚Wärme‘, ‚Luft‘ und ‚Funktion‘. Dies kann auf die Alltagserfahrung der Schüler*innen zurückgeführt werden.

Im Posttest stieg die Anzahl der Nennungen für ‚Wärme‘ und ‚Luft‘ weiter an.

Die Kategorien ‚Energieübertragung‘ und ‚Energieumwandlung‘ erschienen im Posttest häufiger, was auf eine stärkere Reflexion über den Energieübertragungsprozess hinweisen könnte. Die Kategorien ‚Ventilator‘, ‚Geräusch‘ und ‚Energieerzeugung‘ wurden dagegen nur selten im Posttest genannt.

Item F3_7 – Kompassversuch

Das Item zum Kompassversuch, das ausschließlich im Posttest verwendet wurde, zeigte eine relativ gleichmäßige Verteilung der Antworten. Der Mittelwert von $\bar{x} = 2,09$ und die Varianz von $\sigma^2 = 0,79$ deuten darauf hin, dass die Schüler*innen insgesamt ein gutes Verständnis für den Effekt eines Kompasses im Stromkreis hatten, aber es immer noch Unterschiede in der Genauigkeit der Antworten gibt.

Die durchschnittlichen Bewertungen und die Standardabweichungen zeigen, dass es Klassen gibt, in denen das Verständnis der Schüler*innen für den Kompassversuch stärker ausgeprägt war (z. B. SEY-2), während andere Klassen (z. B. KOV-1) größere Unsicherheiten aufwiesen. Dies könnte auf Unterschiede in der Unterrichtsqualität oder den Vorwissenstand der Schüler*innen hinweisen.

Item F3_8 – Oberflächenladungen

Für das Item zu Oberflächenladungen zeigten die Schüler*innen eine breite Verteilung der Antworten. Der Mittelwert von $\bar{x} = 1,46$ und die hohe Varianz deuten darauf hin, dass es große Unterschiede im Verständnis des Konzepts der Oberflächenladungen gibt. Während einige Schüler*innen ein besseres Verständnis für die Rolle von Oberflächenladungen in einem Stromkreis hatten (z. B. SEY-2), zeigten andere Schüler*innen größere Unsicherheiten (z. B. SIM-1).

Die Differenzen zwischen den Klassen könnten auf unterschiedliche Ausprägungen des Vorwissens oder die Effektivität der Lehrmethoden hinweisen. Besonders erwähnenswert ist, dass viele Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, das Konzept der Oberflächenladungen präzise zu erklären, was auf eine mögliche Notwendigkeit hinweist, dieses Thema in zukünftigen Unterrichtseinheiten gezielter zu behandeln.

Item F3_15 – Rucksackmodell

Das Item zum ‚Rucksackmodell‘ zeigte eine breite Verteilung der Antworten, wobei der Mittelwert von $\bar{x} = 1,38$ und die hohe Varianz darauf hinweisen, dass es eine große Variation im Verständnis der Schüler*innen gab. Die Unterschiede in den Mittelwerten zwischen den Klas-

sen (z. B. RIS-1 und SEY-2) zeigen, dass einige Schüler*innen das Erklärungsmodell zur Energieübertragung in elektrischen Systemen aus dem Unterrichtsdesign besser verinnerlicht haben als andere.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass viele Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, das Modell korrekt zu bewerten. Die hohe Varianz und die unterschiedlichen Mittelwerte zwischen den Klassen unterstreichen die Notwendigkeit, differenzierte Lehrstrategien anzuwenden, um ein tieferes Verständnis der Energieübertragung zu fördern.

Interpretation der Ergebnisse im Gesamtkontext

Die oben dargestellte qualitative Analyse der Schüler*innenantworten bietet Einblicke in das Verständnis der Schüler*innen zu verschiedenen Inhalten des LLAs.

Die Ergebnisse ergänzen und präzisieren die quantitativen Befunde, die insgesamt signifikante Verbesserungen in vielen Testbereichen zeigen.

Im Prätest und Posttest wurden deutliche Fortschritte in der Erklärung komplexer Konzepte wie Energieübertragung und Energieumwandlung beobachtet. Besonders hervorzuheben ist der Anstieg der Nennungen in den Kategorien ‚Energieübertragung‘ und ‚Energieumwandlung‘ im Item F1_12 bzw. F3_14. Dieser Anstieg deutet darauf hin, dass das LLA dazu beigetragen hat, das Verständnis der Schüler*innen für diese Konzepte zu vertiefen.

Jedoch zeigen die Daten auch, dass es weiterhin Herausforderungen gibt. Bei Item F1_10b bzw. F3_12b gaben viele Schüler*innen Antworten an, die auf eine Verwechslung des Energieflusses mit dem Stromfluss hindeuten.

Besonders problematisch ist zudem, dass viele Schüler*innen bei den offenen Fragen im Prätest nur spärliche Begründungen gaben, oft in Form von kurzen, unvollständigen Antworten. Dies könnte auf ein unzureichendes Verständnis des Themas oder fehlende Motivation beim Ausfüllen des Fragebogens hinweisen. Diese Problematik wurde auch im Posttest teilweise beibehalten, wenn auch mit einer leichten Verbesserung.

Die detaillierte Analyse einzelner Items zeigt zudem spezifische Unterschiede zwischen den Klassen:

Beispielsweise ergaben sich bei Item 7, das die Wirkung eines Kompasses in der Nähe eines elektrischen Stromkreises behandelt, unterschiedliche Mittelwerte bei den einzelnen Klassen. Die Klasse SEY-2, die einen Mittelwert von $\bar{x} = 2,58$ und eine geringe Streuung (Varianz $\sigma^2 = 0,81$, Standardabweichung $\sigma = 0,90$) aufweist, schnitt beispielsweise deutlich besser ab als die Klasse RIS-2, die einen niedrigeren Mittelwert von $\bar{x} = 1,80$ erzielte und eine größere Streuung in den Antworten hatte (Varianz $\sigma^2 = 1,03$, Standardabweichung $\sigma = 1,01$). Diese Unterschiede könnten darauf hindeuten, dass es unterschiedliches Vorwissen bei den Klassen

gegeben hat oder dass die Instruktionen durch die Lehrpersonen unterschiedlich ausfielen. Letzteres würde sich auch mit den Interviewergebnissen decken (siehe Abschnitt 6.4.3 Interviews mit den Lehrpersonen), bei denen klar wurde, dass die Lehrperson RIS die Klasse mit dem Code RIS-2 (7 adg, Gymnasialklasse im digitalen Zweig) bezüglich ihrer Performanz schlechter einschätzte als die anderen Klassen.

Auch bei Item 14, das sich mit Oberflächenladungen im Stromkreis beschäftigt, ergaben sich ähnliche Ergebnisse: Die Klasse SEY-2 schneidet mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,00$ und einer geringen Varianz ($\sigma^2 = 0,73$) am besten ab. Im Gegensatz dazu weist die Klasse RIS-3 den niedrigsten Mittelwert von $\bar{x} = 0,90$ auf, bei gleichzeitig hoher Varianz ($\sigma^2 = 1,43$) und Standardabweichung ($\sigma = 1,20$), was auf erhebliche Unterschiede im Verständnis innerhalb dieser Klasse schließen lässt. Diese Diskrepanz unterstreicht, dass die Schüler*innen unterschiedlich stark von den Unterrichtseinheiten profitierten, was auch hier möglicherweise auf die Qualität der Unterrichtsgestaltung oder die Unterschiede im Vorwissen zurückzuführen ist.

Ein weiteres Beispiel, bei dem Unterschiede zwischen Klassen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen, ist das Item 15, das sich mit dem Rucksackmodell beschäftigt. Die Klasse RIS-1 weist mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 1,70$ und einer relativ hohen Streuung (Varianz $\sigma^2 = 1,57$, Standardabweichung $\sigma = 1,25$) eine bessere Gesamtleistung auf als die Klasse KOV-1, die einen niedrigeren Mittelwert von $\bar{x} = 0,93$ aufweist. Auch hier sind größere Unterschiede in der Streuung der Antworten zu beobachten (Varianz $\sigma^2 = 1,03$, Standardabweichung $\sigma = 1,02$). Diese Unterschiede deuten darauf hin, dass das Verständnis dieser Thematik von Klasse zu Klasse stark variiert. Dies kann auch mithilfe der Interviewergebnisse interpretiert werden: Die Lehrperson KOV berichtete im Interview (siehe Abschnitt 6.4.3.4 Interview 4) darüber, dass sie die Sequenz 3.2 nur kurz am Schluss mit den Schüler*innen behandelt hatte und dass sie den Eindruck hatte, es wären nicht alle Schüler*innen gleichermaßen interessiert und involviert gewesen.

Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass das LLA insgesamt erfolgreich war, es aber auch Bereiche gibt, in denen weitere Optimierungen erforderlich sind. Es wäre wünschenswert, das LLA anhand dieser Ergebnisse weiter auszubauen und gezielte Verbesserungen in spezifischen Themenbereichen vorzunehmen. Eine detaillierte Analyse der Unterschiede zwischen den Klassen im Rahmen einer weiterführenden Arbeit kann zudem wertvolle Hinweise für die weitere Optimierung der Unterrichtsmethoden und die gezielte Unterstützung der Schüler*innen geben.

6.5.1.2 Fragebogen 2

Der Fragebogen 2 untersuchte verschiedene Aspekte der Nutzung und Wahrnehmung der Simulation zur Energieübertragung mittels elektromagnetischer Felder durch die Schüler*innen. Die Ergebnisse (siehe Abschnitt 6.4.2 Ergebnisse des Fragebogens 2) geben Aufschluss darüber, wie die Simulation in der Praxis angenommen wurde und welche Herausforderungen und Stärken aus Sicht der Nutzer*innen bestehen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse diskutiert und interpretiert.

Frage 1: „Ich denke, dass ich die Simulation gerne häufig benutzen würde.“

Die Ergebnisse zeigen einen Mittelwert von $\bar{x} = 2,47$ und einen Median von $\tilde{x} = 2,00$, was darauf hinweist, dass die Befragten insgesamt eher nicht geneigt sind, die Simulation häufig zu nutzen. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,16$ weist auf eine gewisse Streuung in den Antworten hin, was bedeutet, dass es unterschiedliche Meinungen zur Nutzungshäufigkeit gibt. Dies ist wenig überraschend, da die Simulation sehr kontextspezifisch ist und daher nur selten im Unterricht Anwendung finden wird.

Frage 2: „Ich fand die Simulation unnötig kompliziert.“

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,23$ und einem Median von $\tilde{x} = 2,00$ bewerteten die Schüler*innen die Simulation als nicht unnötig kompliziert. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,10$ zeigt eine gewisse Streuung in den Antworten, aber insgesamt scheinen die Nutzer die Komplexität als angemessen zu bewerten. Die offene Frage 14 bietet weitere Einblicke darin, welche spezifischen Funktionen der Anwendung weiter optimiert werden können, um etwaige komplexe Aspekte gezielt zu vereinfachen.

Frage 3: „Ich fand die Simulation einfach zu benutzen.“

Hier zeigt der Mittelwert von $\bar{x} = 3,72$ und der Median von $\tilde{x} = 4,00$ eine überwiegend positive Einschätzung der Benutzerfreundlichkeit. Die niedrige Standardabweichung von $\sigma = 1,14$ deutet darauf hin, dass die Antworten relativ einheitlich sind. Dies weist darauf hin, dass die Mehrheit der befragten Schüler*innen die Simulation als einfach zu bedienen empfindet.

Frage 4: „Ich glaube, ich würde die Hilfe einer Person, die sich damit gut auskennt, benötigen, um die Simulation benutzen zu können.“

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,02$ und einem Median von $\tilde{x} = 2,00$ wird deutlich, dass die Mehrheit der Befragten der Aussage eher nicht zustimmt. Dies deutet darauf hin, dass die meisten Befragten der Ansicht sind, dass sie die Simulation ohne externe Hilfe (beispielsweise durch eine Lehrperson) nutzen können. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,16$ zeigt eine gewisse

Variabilität in den Antworten, aber insgesamt scheint die Simulation ausreichend intuitiv zu sein.

Frage 5: „Ich fand, die verschiedenen Funktionen in dieser Simulation haben alle gut zusammengepasst.“

Die Bewertung für diese Frage zeigt einen Mittelwert von $\bar{x} = 3,90$ und einen Median von $\tilde{x} = 4,00$, was auf eine sehr positive Bewertung hinweist. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,00$ bestätigt, dass die Mehrheit der Befragten die Funktionen als gut integriert empfindet. Diese positive Einschätzung legt nahe, dass die Nutzer*innen die Funktionen der Simulation insgesamt gut einschätzen.

Frage 6: „Ich denke, die Simulation enthielt zu viele Unstimmigkeiten.“

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,02$ und einem Median von $\tilde{x} = 2,00$ sind die Antworten überwiegend negativ. Dies deutet darauf hin, dass die Mehrheit der Befragten kaum Unstimmigkeiten in der Simulation wahrgenommen hat. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,06$ zeigt eine geringe Streuung, was darauf hindeutet, dass die Mehrheit der Nutzer diese Frage ähnlich bewertet.

Frage 7: „Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit dieser Simulation sehr schnell lernen.“

Hier zeigt der Mittelwert von $\bar{x} = 3,68$ und der Median von $\tilde{x} = 4,00$ eine positive Einschätzung der Lernkurve der Simulation. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,16$ deutet auf eine moderate Variabilität hin, aber insgesamt scheint die Mehrheit der Befragten der Meinung zu sein, dass die Simulation relativ schnell erlernbar ist. Dies ist ein positives Zeichen für die Benutzerfreundlichkeit der Simulation und hebt ihre hohe Benutzerfreundlichkeit hervor.

Frage 8: „Ich fand die Simulation sehr umständlich zu nutzen.“

Die Antwortverteilung zeigt einen Mittelwert von $\bar{x} = 2,45$ und einen Median von $\tilde{x} = 2,00$, was darauf hinweist, dass die Mehrheit der befragten Schüler*innen die Nutzung der Simulation positiv einschätzte. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,19$ weist auf eine gewisse Streuung hin, aber insgesamt scheint die Mehrheit die Nutzung als akzeptabel zu bewerten.

Frage 9: „Ich fühlte mich bei der Benutzung der Simulation sehr sicher.“

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 3,51$ und einem Median von $\tilde{x} = 4,00$ bewerten die Befragten das Sicherheitsgefühl während der Nutzung insgesamt positiv. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,28$ zeigt eine größere Streuung, was bedeutet, dass es unterschiedliche Wahrnehmungen hinsichtlich der Sicherheit gab.

Frage 10: „Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte, die Simulation zu verwenden.“

Die Antworten auf diese Frage zeigen einen Mittelwert von $\bar{x} = 2,49$ und einen Median von $\tilde{x} = 2,00$, was darauf hindeutet, dass die Mehrheit der Befragten die Lernanforderungen als eher gering empfindet. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,21$ weist auf eine moderate Streuung hin. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Schüler*innen die Simulation intuitiv schnell einsetzen konnten, ohne viele Instruktionen zu benötigen.

Frage 11: „Ich fände es gut, wenn meine Lehrpersonen die Simulation im Unterricht verwenden würden.“

Hier zeigt der Mittelwert von $\bar{x} = 3,54$ und der Median von $\tilde{x} = 4,00$ eine überwiegend positive Einschätzung der Nutzung der Simulation im Unterricht. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,27$ zeigt eine gewisse Streuung in den Antworten, aber insgesamt gibt es eine starke Neigung seitens der Schüler*innen, die Simulation als nützlich im Unterricht zu betrachten.

Frage 12: „Mithilfe der Simulation würde ich besser lernen als im normalen Unterricht.“

Mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 2,95$ und einem Median von $\tilde{x} = 3,00$ ist die Bewertung dieser Frage eher neutral bis positiv. Die Verwendung der Simulation könnte also als optionale Ergänzung im Unterricht sinnvoll sein. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,13$ zeigt jedoch eine moderate Streuung der Antworten. Dies deutet darauf hin, dass es gemischte Ansichten darüber gibt, ob die Simulation das Lernen im Unterricht verbessert.

Frage 13: „Die Simulation würde das Lernen in Physik interessanter machen.“

Der Mittelwert von $\bar{x} = 3,21$ und der Median von $\tilde{x} = 3,00$ zeigen eine eher positive Bewertung der Simulation in Bezug auf die Interessensteigerung beim Lernen von Physik. Die Standardabweichung von $\sigma = 1,29$ zeigt eine höhere Streuung der Antworten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Simulation grundsätzlich als interessant empfunden wird, jedoch gibt es unterschiedliche Meinungen zur Intensität dieser Steigerung des Interesses.

Frage 14: Allgemeine Rückmeldungen

Die offenen Anmerkungen zur Simulation zeigen sowohl positive als auch negative Rückmeldungen. Die Kritikpunkte, insbesondere bezüglich der Nutzung auf mobilen Geräten und der Benutzerfreundlichkeit, bieten wertvolle Hinweise für Verbesserungen. Die technische Unzulänglichkeit auf mobilen Geräten und die Schwierigkeiten bei der Steuerung könnten wesentliche Barrieren darstellen, die angegangen werden sollten, um die Benutzererfahrung zu optimieren. Die positiven Rückmeldungen, insbesondere zur Nutzung am Computer, zeigen jedoch auch das Potenzial der Simulation als effektives Lernwerkzeug.

Interpretation der Ergebnisse im Gesamtkontext

Zusammenfassend zeigt die Diskussion der Ergebnisse des Fragebogens 2, dass die Simulation in vielerlei Hinsicht positiv bewertet wird, jedoch auch Bereiche für Verbesserungen identifiziert wurden. Die unterschiedlichen Bewertungen und Rückmeldungen bieten wertvolle Einblicke, die genutzt werden können, um die Simulation weiter zu optimieren und besser an die Bedürfnisse der Lernenden anzupassen. Die Rückmeldungen wurden bereits an den Entwickler der Simulation weitergeleitet, um entsprechende Anpassungen vorzunehmen und die Nutzerfreundlichkeit zu erhöhen.

6.5.1.3 Interviews mit den Lehrpersonen

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse aus den Lehrer*inneninterviews (siehe Abschnitt 6.4.3 Interviews mit den Lehrpersonen) beleuchtet und diskutiert. Dies soll Aufschlüsse darüber geben, welche Aspekte des LLAs bereits gut verliefen und welche Aspekte in weiteren Forschungszyklen überarbeitet werden sollten.

Interview 1

Das Interview mit der Lehrperson SIM bietet wertvolle Einblicke in die Umsetzung und Bewertung des neuen Unterrichtsdesigns. Insgesamt bewertet SIM das Konzept positiv und erkennt es als eine sinnvolle Ergänzung des Unterrichts an, die präziser auf fachliche Aspekte eingeht und somit komplexe Themen wie den Stromkreis verständlicher macht. Besonders hervorgehoben wird die klare Strukturierung der Materialien, insbesondere der PowerPoint-Präsentationen, die als selbsterklärend und übersichtlich wahrgenommen wurden. Die enthaltenen Merksätze unterstützten die Lehrperson dabei, den Unterricht gut zu strukturieren und den Schüler*innen einen roten Faden zu bieten.

Als eine der Stärken des neuen Unterrichtsdesigns hebt SIM die niederschwellige Einführung durch die Verwendung alltäglicher Beispiele, wie etwa kabellose Ladesysteme, hervor. Diese Strategie erleichterte den Einstieg in die Thematik und förderte die aktive Beteiligung der Schüler*innen. Zudem wird das schrittweise Vorgehen beim Thema elektromagnetische Felder als besonders effektiv beschrieben, da es den Schüler*innen half, die komplexen Konzepte besser zu verstehen und anzuwenden.

Dennoch wurden im Interview auch mehrere Bereiche identifiziert, in denen Verbesserungspotenzial besteht. So bemängelt SIM dass einige Arbeitsanweisungen nicht klar formuliert waren, was zu Unsicherheiten bei den Schüler*innen führte. Insbesondere war unklar, wann die Schüler*innen selbst tätig werden sollten und wann sie auf eine Erklärung der Lehrkraft warten

mussten. Eine klarere Formulierung der Anweisungen, beispielsweise durch deutlichere Hinweise wie „jetzt bist du dran“ oder „Erklärung der Lehrkraft“, wäre hier laut SIM hilfreich.

Des Weiteren stellte sich die Darstellung in der Simulation zur Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern als problematisch heraus. So war etwa die visuelle Darstellung des Magnetfeldes für einige Schüler*innen nicht ausreichend verständlich, was zu Missverständnissen führte. Auch bei der Nutzung eines Arbeitsblattes zeigte sich ein kleineres Problem, da es zu einer Diskrepanz kam, weil SIM nur den Versuch 2.2 mit einem Strohhalm zeigte, nicht jedoch mit dem Alufolienstück, wie es am Arbeitsblatt beschrieben war.

Eine besondere Herausforderung, die SIM anmerkte, ergab sich bei der Einführung der ‚Energie-Hand-Regel‘. SIM beschreibt diese als komplex und merkt an, dass sie auf Widerstand bei den Schüler*innen stieß, da diese die Regel als unnötig kompliziert empfanden. Hier war es laut SIM notwendig, zusätzliche Motivationsarbeit zu leisten, um die Akzeptanz der neuen Regel zu fördern. Ebenso wurden die kognitiven Stoppschilder, obwohl sie grundsätzlich als nützlich angesehen wurden, nicht vollständig von den Schüler*innen verstanden. Eine konsequentere und wiederholte Anwendung dieser Symbole außerhalb des Unterrichtsdesigns könnte das Verständnis verbessern.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass das neue Unterrichtsdesign von SIM als innovativ und hilfreich bewertet wird. Es zeigte sich jedoch, dass es in einigen Bereichen noch Optimierungspotenzial gibt. Hervorzuheben ist zudem, dass sich SIM sichtlich bemühte, sich engmaschig an die Inhalte der Lehrer*innenhandreichung zu halten, auch wenn er teilweise Fußnoten übersah und die Mindmap aus Zeitgründen auslassen musste. Im Interview wurde deutlich, dass er die Inhalte regelmäßig mit den Schüler*innen wiederholte, um diese zu festigen.

Interview 2

Das Interview mit RIS verdeutlicht sowohl positive als auch negative Aspekte des LLAs.

Positiv hervorzuheben ist, dass RIS das LLA insgesamt als verständlich und gut strukturiert beschreibt. Der erste Block, der sich mit den grundlegenden Konzepten des elektrischen Feldes beschäftigte, wurde als erfolgreich bewertet, obwohl RIS erwähnte, dass die Schüler*innen zeitweise unkonzentriert waren. Die Visualisierungen und Materialien, insbesondere die PowerPoint-Präsentation, stießen auf überwiegend positive Resonanz. RIS merkte jedoch an, dass tiefere Diskussionen und dynamischere Darstellungen an einigen Stellen hilfreich gewesen wären.

Kritisch betrachtet wurde jedoch das Layout der ersten Unterrichtseinheit, das für Verwirrung sorgte. Weiterhin hatten die Schüler*innen Schwierigkeiten mit komplexeren Konzepten wie

dem elektrischen Feld und den Oberflächenladungen. Diese Probleme konnten durch die wiederholten Erklärungen von RIS nicht vollständig behoben werden. Auch die visuelle Unterstützung und das Verständnis der Konzepte, insbesondere beim Wechselstrom und den elektrischen Feldern, stellten sich als problematisch heraus. RIS betonte die Notwendigkeit zusätzlicher Unterstützung und verbesserter Darstellungen.

Es ist zu beachten, dass RIS an einigen Stellen von den Instruktionen der Lehrer*innenhandreichung abwich und somit nicht konzepttreu vorging. Besonders auffällig war, dass RIS die vorgesehenen Methoden wie den Einsatz von Bildkarten und der Mindmap nicht nutzte. Zudem wurde die Einführung des Energieflusses durch das elektromagnetische Feld und das Concept Cartoon zum Rucksackmodell offenbar nicht sehr ausführlich mit allen Schüler*innen behandelt. Obwohl RIS angab, sich grundsätzlich an das Konzept gehalten zu haben, zeigte das Interview eine andere Perspektive. Diese Abweichungen könnten die Effektivität der Lernsequenz und das Verständnis der Schüler*innen beeinträchtigt haben.

Insgesamt zeigte sich, dass RIS in mehreren Aspekten von der vorgesehenen Struktur des Unterrichtskonzepts abwich und dabei auf Herausforderungen stieß. Diese Abweichungen, insbesondere das Fehlen der Mindmap und die eingeschränkte Nutzung der Bildkarten sowie Schwierigkeiten bei der Vermittlung komplexer Konzepte, könnten signifikante Auswirkungen auf die Lernergebnisse in den Prä- und Posttests gehabt haben. Die unzureichende Umsetzung und die Anpassungen, die nicht immer im Sinne des Konzepts lagen, werfen Fragen zur Effektivität der Durchführung auf und zeigen, dass eine engere Orientierung am vorgegebenen Konzept möglicherweise zu besseren Lernergebnissen hätte führen können.

Interview 3

SEY zeigte sich erfreut über das bereitgestellte Unterrichtskonzept, welches sie als eine erhebliche Erleichterung im Gegensatz zum regulären Unterricht beschrieb. Sie lobte die Struktur und die durchdachte Planung des Materials, das gut in den Jahresplan passte. Besonders hervorzuheben ist SEYs konzepttreue Herangehensweise, da sie sich bemühte, das Unterrichtskonzept so exakt wie möglich umzusetzen. Dies ermöglichte eine klare und strukturierte Vermittlung der Inhalte, die in beiden Klassen erfolgreich aufgenommen wurde. Die Schularbeitsergebnisse der Schüler*innen bestätigten den Lernerfolg, insbesondere im Bereich der Oberflächenladungen, die als besonders herausfordernd galten. Auch die praktischen Elemente, wie der Einsatz von Strommesszangen und der Ventilatorversuch, wurden von den Schüler*innen positiv aufgenommen und führten zu einem besseren Verständnis der theoretischen Inhalte.

Nichtsdestotrotz stieß SEY auf einige Herausforderungen. Das Thema der Oberflächenladungen bereitete sowohl ihr als auch den Schüler*innen Schwierigkeiten, was zu einer verlängerten Unterrichtszeit führte. SEY berichtete von der Notwendigkeit, den Unterrichtsplan in diesem Bereich anzupassen, um sicherzustellen, dass die Schüler*innen die komplexen Konzepte vollständig verstehen. Ein weiterer kritischer Punkt war der Übergang zu nachfolgenden Themen, den SEY als stressig empfand. Sie musste den Balanceakt zwischen der treuen Umsetzung des Lehrplans und der Anpassung an die Bedürfnisse der Schüler*innen meistern.

Ein interessanter Aspekt des Interviews war der Vergleich zwischen der Realgymnasial- und der Gymnasialklasse. SEY stellte fest, dass die Gymnasialklasse tiefergehendes Interesse und Engagement zeigte, insbesondere bei der Auseinandersetzung mit komplexen Themen wie der Lichtgeschwindigkeit und quantisierten Energiepaketen. In der Realgymnasialklasse hingegen zeigte sich eine Tendenz zur schnelleren Übersättigung und einem geringeren Diskussionsbedarf, was SEY als Indiz für unterschiedliche Lerndynamiken in den beiden Schulformen deutete.

SEY äußerte sich auch zur Qualität der bereitgestellten Materialien. Sie schätzte die digitalen Worddateien der Arbeitsblätter, da sie den Schüler*innen die Möglichkeit gaben, digitale Notizen zu machen, was ihrem Unterrichtsstil entsprach. Allerdings empfand sie die Präsentation in einer einzigen, langen PowerPoint-Datei als unpraktisch und hätte separate Dateien für jede Unterrichtsstunde bevorzugt. Ein technisches Problem trat bei der Verwendung einer Simulation auf, die aufgrund von WLAN-Problemen nicht funktionierte und somit nicht optimal genutzt werden konnte.

Insgesamt zeigte sich SEY zufrieden mit der Umsetzung des LLAs, hob aber auch hervor, dass Anpassungen und Flexibilität notwendig waren, um den unterschiedlichen Bedürfnissen der Schüler*innen gerecht zu werden.

Interview 4

Das Interview mit KOV brachte sowohl positive Aspekte als auch Verbesserungspotentiale des LLAs zutage.

KOV begann die Vorbereitung des LLAs bereits in den Herbstferien. Trotz dieser umfassenden Vorbereitung traten jedoch Probleme auf, insbesondere durch den Ausfall von Stunden, der die zeitliche Planung beeinträchtigte. Dies führte dazu, dass KOV während des Unterrichts Unsicherheiten erlebte und öfter auf die Lehrer*innenhandreichung zurückgreifen musste. Diese Schwierigkeiten verdeutlichen, dass selbst bei intensiver Vorbereitung Unklarheiten auftreten können, die die Umsetzung der Unterrichtssequenzen beeinflussen.

Ein zentrales Thema war zudem die Einbettung des Unterrichtskonzepts in den Jahresverlauf. KOV begann das Konzept nach den Herbstferien, was thematisch passend schien, da sie gerade die Themen Schwingungen und Wellen abgeschlossen hatte. Interessanterweise ließ sie jedoch die Elektrostatik, die als Voraussetzung für das LLA gilt, aus, was im Kontext der Auswertung der Fragebögen berücksichtigt werden sollte.

In der Durchführung des ersten Blocks des LLAs hatte KOV mit der Begriffsdefinition und der Veranschaulichung von Konzepten wie ‚Energieumwandler‘ und ‚Energiequelle‘ zu kämpfen. Die von ihr selbst entwickelte Übung zur Kategorisierung dieser Begriffe erwies sich als erfolgreich. Jedoch stellten sich einige Begriffe, wie Photovoltaik, als problematisch heraus, da die Schüler*innen anfänglich Schwierigkeiten hatten, diese zu verstehen.

Der zweite Block, der einen Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld beinhaltete, zeigte sowohl positive als auch negative Aspekte. Die Schüler*innen zeigten anfänglich gute Beobachtungsfähigkeiten, doch die Wiederholung der Versuche war durch hohe Fehlzeiten und unzureichendes Erinnern an den Versuchserlauf erschwert. KOV integrierte zusätzlich aktuelle Themen, um das Interesse der Schüler*innen zu fördern, was sich als hilfreich erwies. Dennoch kam es zu organisatorischen Problemen, wie der begrenzten Anzahl an Strommesszangen und vereinzelnden Ablenkungen durch unerlaubte Smartphonennutzung.

Im dritten Block, berichtete KOV von anfänglichen Schwierigkeiten bei der Vorstellung der Frequenz des Wechselstroms. Während die Grundbegriffe ‚Gleich- und Wechselstrom‘ klar waren, stellten sich komplexe Konzepte als herausfordernd dar. Der Einsatz der Videos rief an dieser Stelle gemischte Reaktionen hervor.

Insgesamt äußerte sich KOV positiv zum bereitgestellten Unterrichtsmaterial und den Versuchen, wobei sie hervorhob, dass die Schüler*innen durch die praktische Erfahrungen mit Kabeln und Batterien erheblich profitieren konnten. Jedoch ging KOV in einigen Unterrichtserklärungen über die vorgesehenen Inhalte hinaus.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass KOV, trotz ihrer langjährigen Unterrichtserfahrung, mit spezifischen Herausforderungen konfrontiert war, die sowohl die Vorbereitung als auch die Durchführung des LLAs betrafen. Auch die große Klassengröße von 31 Schüler*innen führte wohlmöglich zu einer anderen Dynamik als in kleineren Klassen (wie beispielsweise bei SIM mit nur 14 Schüler*innen). Die Abweichungen von der Lehrer*innenhandreichung und die Schwierigkeiten bei der Umsetzung des LLAs sollten bei der Auswertung der Fragebögen und der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Fazit zu den Interviews

Die Interviews mit den Lehrpersonen zeichnen ein insgesamt positives Bild des LLAs. Die Lehrpersonen loben die durchdachte Struktur, die klare Vermittlung der Inhalte und die positiven Reaktionen der Schüler*innen auf das Unterrichtsmaterial. Die Verwendung von alltäglichen Beispielen und praktischen Elementen hat sich als besonders hilfreich erwiesen und trägt zur besseren Verständlichkeit komplexer Konzepte bei.

Gleichzeitig wurden wichtige Verbesserungspotenziale aufgezeigt. Die häufigsten Herausforderungen betreffen die klare Formulierung von Arbeitsanweisungen, die visuelle Darstellung komplexer Themen und die konsequente Anwendung der vorgesehenen Methoden. Diese Punkte sind entscheidend für die weitere Optimierung des Konzepts und die Sicherstellung einer effektiven Lernumgebung.

Die konstruktive Kritik und die positiven Rückmeldungen aus den Interviews bieten eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung des LLAs. Die Anpassungsfähigkeit und die Bereitschaft der Lehrpersonen, das Konzept flexibel an die Bedürfnisse der Schüler*innen anzupassen, zeigen, dass das Konzept grundlegend gut funktioniert, jedoch in bestimmten Bereichen verfeinert werden muss. Die kontinuierliche Reflexion und das Engagement der Lehrpersonen sind zentrale Elemente, um das LLA weiter zu verbessern und die Lernziele noch effektiver zu erreichen.

6.5.2 Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Leitfragen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie detailliert im Hinblick auf die formulierten Leitfragen für die Implementationsstudie (siehe Abschnitt 6.1.4) interpretiert. Der Schwerpunkt lag darauf, zu untersuchen, in welchem Maße die erzielten Ergebnisse die Hypothesen bestätigen und welche Rückschlüsse daraus für das entwickelte Unterrichtsdesign sowie das Verständnis der Schüler*innen gezogen werden können.

- *Wie sieht ein Unterrichtsdesign zur Energieübertragung in elektrischen Systemen aus, welches für Schüler*innen der Sekundarstufe II verständlich und anwendbar ist?*

Die erste Leitfrage zielte darauf ab, ein Unterrichtsdesign zu entwickeln und zu testen, das speziell darauf ausgerichtet ist, das Verständnis der Schüler*innen für die Energieübertragung in elektrischen Systemen zu verbessern. Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wurde eine Interventionsstudie durchgeführt, in der die Leistungen der Schüler*innen vor und nach der Unterrichtsintervention in einem Wissenstest gemessen wurde.

Die Ergebnisse der Prä- und Posttests zeigten, dass Schüler*innen, die nach dem neuen Unterrichtsdesign unterrichtet wurden, nach der Intervention insgesamt signifikant höhere Leistungen in Verständnisaufgaben zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen erzielten. Dies bestätigt die Hypothese, dass das entwickelte Unterrichtsdesign effektiv ist, um das Verständnis der Schüler*innen zu fördern. Die signifikante Leistungssteigerung im Posttest im Vergleich zum Prätest deutet darauf hin, dass das Unterrichtsdesign erfolgreich dazu beigetragen hat, ihr Wissen zu dem Thema aufzubauen und zu vertiefen.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass das Unterrichtsdesign methodisch und didaktisch gut auf die Bedürfnisse der Schüler*innen abgestimmt ist. Das Design scheint den Schüler*innen zu ermöglichen, die Energieübertragung in elektrischen Systemen nicht nur oberflächlich zu verstehen, sondern auch in der Lage zu sein, dieses Verständnis auf verschiedene Aufgaben anzuwenden. Dies könnte durch die gezielte Einbindung von praktischen Beispielen, visualisierten Konzepten und interaktiven Elementen im Unterricht erreicht worden sein.

– *Welche Veränderungen im Verständnis der Schüler*innen zur Energieübertragung zeigen sich vor und nach der Durchführung des Lehr-Lern-Arrangements (LLAs)?*

Diese zweite Leitfrage dieses Projektabschnitts zielte darauf ab, die qualitativen Veränderungen in den Vorstellungen der Schüler*innen zu untersuchen, die durch den Unterricht hervorgerufen werden.

Die Analyse der Vorstellungen der Schüler*innen vor und nach dem Unterricht durch das Prä- und Posttestverfahren zeigt, dass vor der Intervention häufige Fehlvorstellungen zur Energieübertragung in elektrischen Systemen (beispielsweise zum Weg, den die Energie in einem einfachen elektrischen Stromkreis nimmt) vorhanden waren, wie in Hypothese 1 postuliert. Diese Fehlvorstellungen wurden durch den Unterricht signifikant reduziert, was darauf hindeutet, dass das Unterrichtsdesign effektiv darin war, konzeptionelle Missverständnisse zu adressieren und zu korrigieren.

Weiterhin zeigt der Posttest, dass Schüler*innen nach dem Unterricht ein differenzierteres und wissenschaftlich korrektes Verständnis der Energieübertragung in elektrischen Systemen entwickelt haben. Dies bestätigt die zweite Hypothese, die davon ausgegangen ist, dass der Unterricht nicht nur Fehlvorstellungen reduziert, sondern auch das gesamte Verständnis vertieft und differenziert. Die Schüler*innen waren nach der Intervention in der Lage, komplexere und präzisere Erklärungen zu geben, was auf einen erfolgreichen Lernprozess hinweist.

6.5.3 Stärken und Schwächen der Implementationsstudie

In diesem Abschnitt werden die Stärken und Schwächen dieser wissenschaftlichen Untersuchung näher erläutert, um die gewonnenen Ergebnisse in ihrem Kontext angemessen einzuordnen und wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Forschungsarbeiten zu gewinnen.

Stärken der Untersuchung

Die methodische Durchführung der Studie zeichnet sich durch mehrere Stärken aus. Ein zentraler Aspekt ist die Wahrung der Gütekriterien Validität, Reliabilität und Objektivität im Testverfahren. Die Prä- und Posttests wurden mit besonderem Augenmerk auf Interrater-Reliabilität, Validität und Objektivität entwickelt und durchgeführt, was die Verlässlichkeit der erhobenen Daten sicherstellt. Darüber hinaus wurde die Studie unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt, was durch die Einbeziehung von sieben Klassen unter der Anleitung von vier Lehrpersonen mit insgesamt 128 Studienteilnehmer*innen gewährleistet wurde.

Auf praktischer Ebene zeigt die Studie ebenfalls mehrere Stärken. Das entwickelte Unterrichtsdesign ist nicht nur innovativ, sondern auch direkt im Lehrplan der AHS-Oberstufe verankert, was seine Praxistauglichkeit im schulischen Kontext unterstreicht. Es schließt eine bestehende Forschungslücke, da bisher kein empirisch evaluiertes Unterrichtsdesign zu diesem spezifischen Thema, für diese Altersstufe im deutschsprachigen Raum vorlag. Die positive Resonanz und das hohe Engagement der Schüler*innen, die insbesondere in den Lehrer*inneninterviews mit den Lehrpersonen SEY und SIM deutlich wurden, bestätigen den praktischen Nutzen des Designs.

Darüber hinaus leistet diese Studie einen Beitrag zur fachdidaktischen Forschung, indem sie zeigt, wie Design-Based Research effektiv genutzt werden kann, um komplexe Lehr-Lern-Prozesse zu gestalten und zu verbessern. Die gewonnenen Erkenntnisse sind nicht nur auf den spezifischen Kontext dieser Studie beschränkt, sondern bieten auch wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung von Unterrichtsdesigns in anderen pädagogischen Kontexten. Durch die systematische Anwendung des Design-Based-Research-Ansatzes trägt diese Studie zur Erweiterung der wissenschaftlichen Diskussion bei und eröffnet Möglichkeiten für eine breitere Anwendung der entwickelten Konzepte und Methoden.

Schwächen der Untersuchung

Trotz der zahlreichen Stärken weist die Untersuchung auch einige Schwächen auf, die im Folgenden kritisch betrachtet werden. Auf konzeptioneller Ebene zeigen sich Grenzen des entwickelten Unterrichtsdesigns, insbesondere in Bezug auf dessen Anwendbarkeit auf andere Themen oder Schüler*innengruppen. Die durchgeführten Lehrer*inneninterviews deuten darauf

hin, dass eine strikte Einhaltung der Lehrer*innenhandreichung erforderlich ist, um die gewünschte Leistungssteigerung bei den Schüler*innen zu erzielen. Abweichungen von diesem Leitfaden können die Effektivität des Unterrichtsdesigns erheblich beeinträchtigen, was in der Praxis problematisch sein könnte. Zudem bleibt das Thema der Oberflächenladungen und elektrischen Felder nach wie vor für viele Schüler*innen herausfordernd, obwohl die Gesamtergebnisse der Studie im Prä- und Posttestvergleich eine positive Entwicklung aufzeigen. Dies deutet darauf hin, dass einige Konzepte im Rahmen des Unterrichtsdesigns möglicherweise einer weiteren didaktischen Verfeinerung bedürfen.

Auf methodischer Ebene sind ebenfalls einige Schwächen zu verzeichnen. Beispielsweise gab es in einigen Klassen vermehrte Ausfälle aufgrund von Krankenständen oder Schulausflügen, was zu einer Verlängerung des Zeitfensters für die Durchführung des Unterrichtsdesigns führte. Diese verlängerten Pausen zwischen den Unterrichtseinheiten könnten dazu geführt haben, dass Schüler*innen teilweise den Anschluss verloren und sich nicht mehr vollständig an den Inhalt der vorherigen Stunden erinnerten. Weiterhin könnten sprachliche Barrieren, insbesondere in der bilingualen Klasse (Englisch-Deutsch), die Ergebnisse beeinflusst haben. Eine weitere methodische Limitation liegt darin, dass die Effektivität des Unterrichtsdesigns lediglich zu zwei Zeitpunkten überprüft wurde: vor und nach der Intervention. Langzeiteffekte wurden nicht untersucht, was eine wertvolle Ergänzung für zukünftige Studien darstellen könnte. Darüber hinaus offenbarten die Interviews Unterschiede in der Durchführung des Unterrichtsdesigns zwischen den Klassen, was auf eine inkonsistente Umsetzung der Lehrer*innenhandreichung zurückzuführen ist. Solche Unterschiede könnten die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen und sollten in zukünftigen Studien besser kontrolliert werden.

In praktischer Hinsicht könnte die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Schulfächer oder Altersgruppen eingeschränkt sein. Die Studie konzentrierte sich ausschließlich auf die 7. Klassen (11. Schulstufe), und obwohl einige Schüler*innen der 6. Klasse (10. Schulstufe) erfolgreich interviewt wurden und das Unterrichtsdesign theoretisch auch in der 6. Klasse angewendet werden könnte, legen die Ergebnisse des Prä- und Posttests nahe, dass bestimmte Vorkenntnisse, insbesondere in den Bereichen Elektrostatik und elektrische Felder, notwendig sind, um den vollen Nutzen aus dem Unterrichtsdesign zu ziehen. Daher wäre Vorsicht geboten bei der Anwendung des Designs in Klassenstufen, in denen diese Vorkenntnisse nicht ausreichend vorhanden sind.

Fazit

Insgesamt lässt sich die vorliegende Untersuchung als wissenschaftlich relevant bewerten. Die identifizierten Stärken unterstreichen die Bedeutung des entwickelten Unterrichtsdesigns, während die analysierten Schwächen wichtige Anhaltspunkte für zukünftige Forschung und didaktische Anpassungen bieten. Die Ergebnisse dieser Reflexion tragen somit dazu bei, die Qualität und Wirkung zukünftiger Studien und Unterrichtsinterventionen weiter zu verbessern.

Diskussion

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der durchgeführten Studien kritisch reflektiert, systematisch eingeordnet und im Lichte der theoretischen und methodischen Grundlagen dieser Arbeit diskutiert. Ziel ist es, die im Rahmen der Evaluation gewonnenen Erkenntnisse mit Blick auf die Forschungsfragen, die entwickelten Designprinzipien sowie die zugrunde liegenden theoretischen Annahmen zu analysieren und zu bewerten.

Zunächst erfolgt eine ausführliche Reflexion des entwickelten Unterrichtsdesigns im Hinblick auf die in Kapitel 4.4 formulierten allgemeinen und domänenspezifischen Designprinzipien. Daran anschließend wird auf die in Kapitel 4.2 formulierten Forschungsfragen eingegangen, wobei sowohl konkrete Erkenntnisse als auch weiterführende Implikationen für die Unterrichtspraxis herausgearbeitet werden. Abschließend werden die Limitationen der Arbeit benannt sowie Perspektiven für zukünftige Forschung und mögliche Weiterentwicklungen skizziert.

7.1 Reflexion der Designprinzipien

Dieser Abschnitt untersucht, inwiefern die in Kapitel 4.4 formulierten Designprinzipien in die Entwicklung und Umsetzung des Lehr-Lern-Arrangements eingeflossen sind. Im Rahmen der iterativen Design-Based-Research-Zyklen wurden die Designprinzipien fortlaufend auf ihre Praxistauglichkeit geprüft und bei Bedarf angepasst. Die folgenden Abschnitte zeigen, wie sich

die Designprinzipien in der konkreten Unterrichtsgestaltung widerspiegeln und welche Modifikationen sich aus den Interviewergebnissen und der Erprobung im realen Klassensetting ergeben haben.

7.1.1 Allgemeine Designprinzipien

Die allgemeinen Designprinzipien (A1–A8) bilden das theoretische Rückgrat des Unterrichtsdigns (siehe Abschnitt 4.4.1). Im Folgenden werden sie nacheinander diskutiert.

A1: Das Unterrichtsdign berücksichtigt bestehende Forschung zu Lernendenvorstellungen.

Das allgemeine Designprinzip A1 wurde bei der Konzeption des Unterrichtsdigns systematisch berücksichtigt: Ein zentrales Beispiel hierfür ist der gezielte Einsatz eines Concept Cartoons, mit dem überprüft werden sollte, inwiefern die Schüler*innen bereits ein fachlich angemessenes Verständnis der Energieübertragung in elektrischen Systemen entwickelt hatten. Der Einsatz erfolgte dabei bewusst im Sinne des ‚conceptual change‘-Paradigmas (siehe Abschnitt 2.5.3), um vorhandene Vorstellungen sichtbar zu machen und einen möglichen kognitiven Konflikt zu initiieren.

Bei der Entwicklung der Testinstrumente wurden ebenfalls Forschungsergebnisse zu typischen Lernendenvorstellungen berücksichtigt. So basiert Item 10 im Prätest beziehungsweise Item 12 im Posttest auf einer Studie von Winter und Pilser (2024). Im ersten Aufgabenteil sollten die Schüler*innen den Weg der Energie in einem einfachen Stromkreis zeichnen, im zweiten Teil ihre Antwort begründen. Die Studie von Winter und Pilser ordnete anschließend die Schüler*innenantworten verschiedenen konzeptuellen Verständnistypen (energy frameworks) zu.

Die Auswertung dieses Items in der vorliegenden Untersuchung zeigte einen großen Zuwachs an richtigen Antworten, aber auch eine große Spannweite an anderen Antworten, was auf das Fortbestehen unterschiedlicher Lernendenvorstellungen hindeutet. Wie in Kapitel 6.4 beschrieben, stieg der Mittelwert von $\bar{x} = 1,02$ im Prätest auf $\bar{x} = 1,53$ im Posttest an. Dieser Unterschied ist statistisch signifikant ($p < 0,0001$) und weist mit einer Effektstärke von $d = 1,24$ auf einen starken Effekt hin.

A2: Lernprozesse werden in Kontexte eingebettet, die für Schüler*innen interessant sind.

Das allgemeine Designprinzip A2 wurde ebenfalls gezielt berücksichtigt. Bereits im Rahmen der Akzeptanzbefragungen kamen verschiedene alltagsnahe Kontexte zum Einsatz, darunter der elektrische Föhn, die Zahnbürste, das Smartphone und der Computer. In den Interviews wurden die Schüler*innen zusätzlich aufgefordert, eigene Anwendungsideen zu benennen, um

eine Liste interessanter Kontexte zu erstellen (siehe Konzeptideen 1 und 2 in Interviewrunde 2, Kapitel 5).

In den Rückmeldungen zeigte sich, dass insbesondere Geräte wie Computer, Steckdose, elektrische Zahnbürste, Lampe, Glätteisen, Föhn und Wasserkocher von den Schüler*innen häufig als anschauliche Beispiele für kabelgebundene und kabellose elektrische Systeme genannt wurden. Diese Rückmeldungen flossen in die Auswahl der Kontexte für das Lehr-Lern-Arrangement ein.

A3: Lernende werden als aktive Teilnehmer*innen im Lehr-Lern-Prozess gesehen.

Die aktive Beteiligung der Schüler*innen bildete eine zentrale Grundlage des hier entwickelten Unterrichtsdesigns.

Bereits zu Beginn der ersten Unterrichtseinheit wurden die Schüler*innen dazu angeregt, eigenständig elektrische Systeme aus ihrem Alltag zu identifizieren und zu benennen. Diese offen gestaltete Einstiegsaufgabe zielte darauf ab, die persönliche Relevanz des Themas zu erhöhen und einen motivierenden Zugang zur Thematik zu schaffen. Eine anschließende Sortieraufgabe, bei der Bildkarten kabelgebundenen und kabellosen elektrischen Systemen zugeordnet werden sollten, forderte die Lernenden dazu auf, ihr Vorwissen zu aktivieren, Hypothesen zu formulieren und diese im Plenum kritisch zu diskutieren. Die Möglichkeit, alternative Darstellungsformen – wie eine räumliche Anordnung – zu wählen, erweiterte den Spielraum für aktive Beteiligung.

Im zweiten Unterrichtsblock übernahmen die Schüler*innen eine noch aktivere Rolle: In Kleingruppen führten sie eigenständig Versuche zum magnetischen Feld durch, dokumentierten ihre Beobachtungen und tauschten sich anschließend über ihre Ergebnisse aus.

Auch in den folgenden Sequenzen zum elektrischen und elektromagnetischen Feld blieb die aktive Mitgestaltung ein wichtiges Element: Die Schüler*innen beobachteten Demonstrationsversuche, analysierten diese mithilfe von Arbeitsblättern und diskutierten ihre Erkenntnisse im gemeinsamen Austausch mit der Lehrperson. Die Integration einer Simulation ermöglichte es den Lernenden, physikalische Phänomene eigenständig zu erkunden und ihr Verständnis zu festigen. Die Erstellung von Mind-Maps unterstützte eine individuelle und differenzierte Auseinandersetzung mit den Lerninhalten.

Im letzten Unterrichtsblock wurde gemeinsam mit den Schüler*innen erarbeitet, wie die Energieübertragung in Wechselstromkreisen erfolgt.

Abschließend setzten sich die Lernenden in Kleingruppen oder Paaren mithilfe eines Concept Cartoons mit der Funktion der Elektronen im Energieübertragungsprozess auseinander. Dabei reflektierten sie ihr Verständnis kritisch und vertieften es im Austausch mit anderen.

Obwohl die Unterrichtseinheit insgesamt stärker lehrer*innenzentriert gestaltet war, wurden dennoch gezielt Elemente integriert, in denen die Schüler*innen als aktive Teilnehmer*innen agierten. Die bewusste Begrenzung der Methodenvielfalt und Sozialformen ergab sich daraus, dass der Fokus dieser Einheit primär auf der inhaltlichen Auseinandersetzung mit dem Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen lag. Ziel war es, zu untersuchen, unter welchen Bedingungen Lernende physikalische Konzepte in diesem Kontext besser verstehen können, ohne durch eine übermäßige methodische Vielfalt vom fachlichen Kern abgelenkt zu werden.

Selbstverständlich können Lehrpersonen das Lehr-Lern-Arrangement im Sinne eigener Zielsetzungen und der Bedürfnisse ihrer Lerngruppe anpassen und erweitern, etwa durch die stärkere Einbindung kooperativer Lernformen oder offenerer Aufgabenstellungen.

A4: Komplexe Sachverhalte werden schrittweise eingeführt.

Das allgemeine Designprinzip A4 fand im Unterrichtsdesign Anwendung, um komplexe physikalische Inhalte für die Schüler*innen verständlich aufzubereiten.

Bereits in der ersten Interviewrunde (siehe Abschnitt 5.1) zeigte sich, dass die Konzeptidee 2.2 (zum elektrischen Feld) für einige Lernende zu anspruchsvoll war. In Reaktion darauf wurde ein zusätzlicher Zwischenschritt eingefügt, der zunächst die Rolle der Oberflächenladungen separat thematisierte. Dies diente dazu, den komplexen Sachverhalt gezielt aufzubrechen und die ‚cognitive load‘ (siehe Abschnitt 2.5.4) zu reduzieren.

Die Wirkung dieses Vorgehens wurde besonders in Block 3 deutlich, in dem die Energieübertragung im Wechselstromkreis behandelt wurde. In Interviewrunde 2 zeigten viele Schüler*innen erhebliche Schwierigkeiten mit der ursprünglichen Aufbereitung der Inhalte. Daraufhin wurde die Erklärung überarbeitet und in eine Reihe klar strukturierter Einzelschritte unterteilt. Die Lernenden wurden systematisch durch eine Folge gezielter Fragen geleitet: Zunächst sollten sie die Auswirkungen einer Umpolung auf das Magnetfeld beschreiben, anschließend auf das elektrische Feld und schließlich auf das elektromagnetische Feld und den daraus resultierenden Energiefluss. Diese schrittweise Annäherung ermöglichte es den Schüler*innen, das Konzept der Energieübertragung im Wechselstromkreis systematisch zu erarbeiten. In Interviewrunde 3 zeigte sich, dass die überarbeitete Struktur insgesamt zu einem besseren Verständnis bei den Schüler*innen führte.

A5: Lernprozesse beginnen bei subjektiv wahrnehmbaren Phänomenen.

Das allgemeine Designprinzip A5 griff die Idee auf, Lernprozesse an subjektiv wahrnehmbaren Phänomenen zu initiieren, um so einen konzeptuellen Zugang zu physikalischen Inhalten zu ermöglichen. Diese Herangehensweise orientierte sich an der Lebenswelt der Schüler*innen und schuf durch direkte Beobachtungen und Erfahrungen einen Ankerpunkt für weiterführendes Lernen.

Im Sinne der Anknüpfungsstrategie (siehe Abschnitt 2.5.3) wurden in den Unterrichtssequenzen gezielt Vorstellungen der Schüler*innen aktiviert, indem sie zunächst beobachtbare Phänomene untersuchten, bevor eine wissenschaftliche Erklärung eingeführt wurde. Dies zeigte sich beispielsweise im Hands-on-Versuch zum Magnetfeld, bei dem die Schüler*innen mit einem Kompass und einem stromdurchflossenen Leiter experimentierten. Die unmittelbare Auslenkung der Kompassnadel erzeugte ein wahrnehmbares Phänomen, das Irritation oder Neugier auslösen konnte. Die anschließende Einführung des Feldlinienkonzepts bot die Möglichkeit, diese Beobachtungen auf abstrakter Ebene zu deuten und ein physikalisches Verständnis aufzubauen.

Der Versuch mit der Stromzange knüpfte ebenfalls an Alltagserfahrungen der Schüler*innen an: Der Einsatz eines realen Messgeräts schuf einen Bezug zu technischen Anwendungen und machte die Wirkung des Stroms indirekt erfahrbar.

Auch der Demonstrationsversuch zum elektrischen Feld zeigte, wie sich abstraktere Konzepte über visuell erfahrbare Phänomene erschließen ließen, etwa durch die Bewegung eines Strohhalmes. Diese war unmittelbar beobachtbar und regte die Schüler*innen dazu an, über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge nachzudenken. Darauf aufbauend erfolgte die systematische Erarbeitung des elektrischen Feldes.

Durch diesen phänomenologischen Zugang gelang ein Brückenschlag zwischen Alltagsvorstellungen und physikalischer Fachlichkeit. Die Schüler*innen wurden aktiv in den Prozess der Erkenntnisgewinnung eingebunden.

A6: Adaption technischer Fachbegriffe für Lernende und Verzicht auf mathematische Herleitungen.

Das sechste allgemeine Designprinzip zielte auf die sprachliche Vereinfachung fachlicher Inhalte und den bewussten Verzicht auf komplexe mathematische Herleitungen ab. Im Unterrichtsdesign wurden technische Fachbegriffe gezielt durch intuitivere, alltagsnahe Begriffe ersetzt und konsistent verwendet. So wurde beispielsweise anstelle des Begriffs Widerstand die

Bezeichnung Energieumwandler eingeführt, um die Funktion elektrischer Bauteile für Lernende verständlicher zu machen.

Diese konzeptuelle Vereinfachung erwies sich als erfolgreich: Im Interview mit der Lehrperson SEY zeigte sich, dass die Schüler*innen den Begriff Energieumwandler problemlos übernahmen. Der im schulischen Sprachgebrauch verbreitete Begriff Verbraucher fand hingegen kaum Anwendung. SEY führte dies darauf zurück, dass sie – sowohl im Projekt als auch im regulären Unterricht – von Beginn an darauf geachtet habe, diesen Begriff nicht zu etablieren. Nur bei wenigen Schüler*innen mit allgemein schwächeren Leistungen sei der Begriff Verbraucher gelegentlich aufgetaucht. Insgesamt bestätigte die Lehrperson, dass die gewählte Begrifflichkeit von den Lernenden gut angenommen wurde und keine Verständnisschwierigkeiten verursachte (Interview mit SEY, Pos. 92–97, 00:06:12–00:06:37).

Auch auf eine mathematische Beschreibung elektromagnetischer Felder (siehe Abschnitt 2.2) wurde im Sinne von A6 bewusst verzichtet. Stattdessen wurde – wie bereits im Rahmen von A5 beschrieben – ein phänomenologischer Zugang gewählt. Erst zur Erweiterung und Vertiefung bietet die Konzeptidee K7 die Möglichkeit, bei Bedarf den Poynting-Vektor als mathematischen Formalismus einzuführen, sofern es von der Lehrperson als didaktisch sinnvoll erachtet wird.

A7: Verwendung lernfreundlicher Repräsentationen.

Das siebte allgemeine Designprinzip verfolgte das Ziel, physikalische Inhalte durch lernförderliche Repräsentationen zu vermitteln. Diese wurden entweder gemeinsam mit den Lernenden entwickelt oder gezielt so gestaltet, dass sie intuitiv verständlich sind und zentrale Zusammenhänge auf einen Blick erfassbar machen. Im Verlauf des Designs und Redesigns des Lehr-Lern-Arrangements wurde dieses Prinzip mehrfach umgesetzt und auf Basis der Interviewrückmeldungen weiterentwickelt:

In der ersten Interviewrunde regte IP1 beispielsweise an, ergänzende Simulationen und weitere Abbildungen zur Förderung des Verständnisses einzusetzen. Gleichzeitig bewertete IP1 die bereits vorhandenen Abbildungen überwiegend positiv. Auch IP3 empfand die bestehenden Darstellungen als gelungen, schlug jedoch vor, zusätzlich 3D-Visualisierungen zu verwenden. Diese Anregungen wurden aufgegriffen und umgesetzt, indem eine Simulation zur Veranschaulichung der Felder in einem einfachen Stromkreis entwickelt wurde.

Ebenfalls nach der ersten Interviewrunde wurde bei Konzeptidee K2.2 die Überschrift ‚Elektrisches Feld‘ in der entsprechenden Abbildung ergänzt, um klarer zwischen dem zuvor behandelten magnetischen Feld und dem neuen Konzept zu unterscheiden. Zudem wurde der Versuch

zum elektrischen Feld angepasst: Das Aluminiumstück und der Strohhalm wurden mit einem roten Faden befestigt, der sich besser vom Hintergrund abhebt und so in Standbildern und Videos deutlicher sichtbar ist.

Auch in der zweiten Interviewrunde ergaben sich Optimierungen der Repräsentationen: Die Feldlinien in den Abbildungen wurden überarbeitet: elektrische Feldlinien wurden fortan gestrichelt, magnetische durchgezogen gezeichnet. Zudem wurde ihre Linienstärke erhöht, um die Darstellungen klarer und unterscheidbarer zu machen (siehe Abbildung 101).

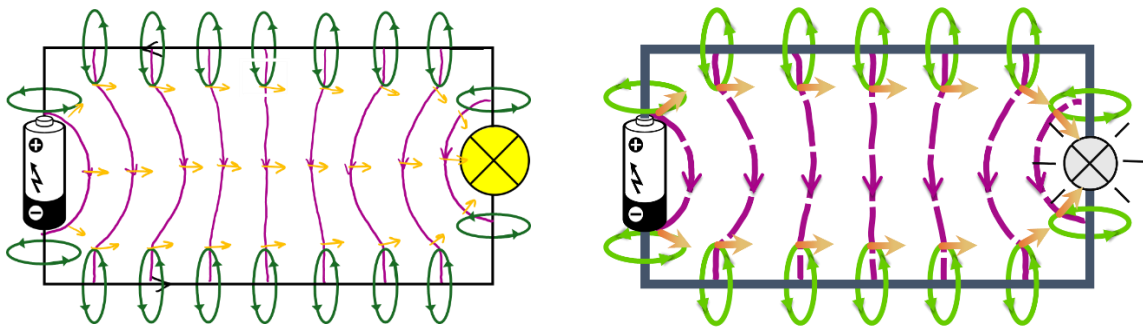


Abbildung 101: Weiterentwicklung der Repräsentation der Energieübertragung in einem einfachen elektrischen Stromkreis durch Felder. Links: Interviewrunde 1. Rechts: Finale Version.

Nach der Erprobung im Unterricht wurde eine weitere Rückmeldung der Lehrperson SIM umgesetzt: Eine Abbildung zum Versuch mit dem magnetischen Feld wurde überarbeitet, da sie bei einigen Schüler*innen den Eindruck erweckte, das Kabel verlaufe durch die Aufhängung des Kompasses. In der finalen Version kam deshalb ein anderer Kompass zum Einsatz, um Missverständnisse zu vermeiden (siehe Abbildung 102).

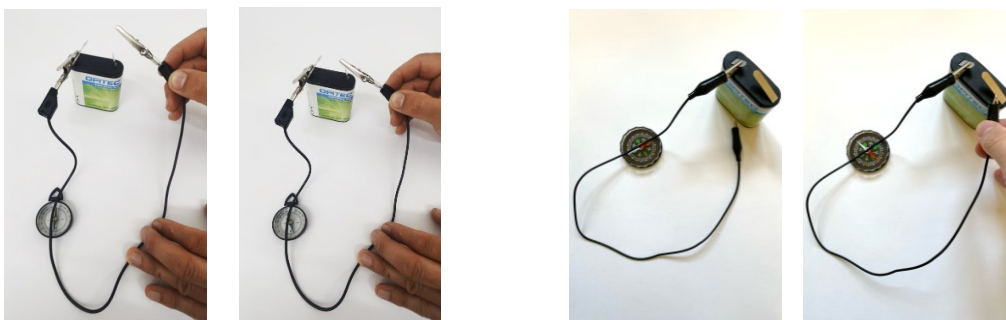


Abbildung 102: Weiterentwicklung der Repräsentation zum Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld. Links: Version während der Intervention im realen Klassensetting. Rechts: Finale Version.

A8: Lernschwierigkeiten werden explizit durch kognitive Stoppschilder thematisiert.

Ein weiteres allgemeines Designprinzip im vorliegenden Unterrichtsdesign befasste sich mit dem gezielten Umgang mit typischen Hindernissen im Lernprozess durch kognitive Stoppschilder. Dabei handelte es sich um kurze, prägnante Hinweise im Lernmaterial, die gezielt an Stellen platziert wurden, an denen bei Schüler*innen erfahrungsgemäß Missverständnisse oder Fehlvorstellungen auftraten (siehe auch Abschnitt 2.4.1).

Im Rahmen der Design-Based Research-Zyklen wurden diese Stoppschilder gezielt dort eingesetzt, wo im Verlauf der Interviewrunden spezifische Verständnisschwierigkeiten sichtbar wurden. Nach der ersten Interviewrunde zeigte sich beispielsweise, dass viele Schüler*innen Schwierigkeiten hatten, zwischen dem magnetischen Feld und dem elektrischen Feld zu unterscheiden. Um diesem Problem zu begegnen, wurde im entsprechenden Abschnitt ein kognitives Stoppschild (siehe Textbox 31) eingefügt, das den Wechsel des physikalischen Feldbegriffs explizit thematisiert. Darin werden die Lernenden darauf hingewiesen, dass bisher das magnetische Feld behandelt wurde und nun ein weiteres Feld betrachtet wird, das sich in Ursache, Form und Richtung wesentlich vom magnetischen unterscheidet.

Textbox 31: Kognitives Stoppschild zur Verwechslung des magnetischen und elektrischen Feldes (siehe LLA im Anhang).



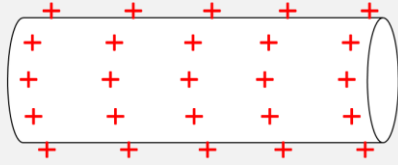
KOGNITIVES STOPPSCHILD: Bisher haben wir vom magnetischen Feld um den Leiter gesprochen. Nun schauen wir uns ein anderes Feld genauer an. Dieses unterscheidet sich in Ursache, Form und Richtung vom magnetischen Feld!

Ein weiteres kognitives Stoppschild (siehe Textbox 32) in diesem Abschnitt bezog sich auf die Unterscheidung zwischen Oberflächenladungen und den Ladungen im Inneren eines Leiters. In den Interviews wurde deutlich, dass Schüler*innen beide Ladungsarten häufig nicht trennen konnten oder sie vermischten. Im Stoppschild wurde deshalb klar darauf hingewiesen, dass Oberflächenladungen von den Ladungen im Leiterinneren durch ihre Positionierung im Stromkreis zu unterscheiden sind. Die begleitenden Abbildungen sollten dies visuell unterstützen, indem sie die beiden Arten grafisch unterschiedlich darstellen: Oberflächenladungen mit einfachen Plus- oder Minuszeichen, Ladungen im Inneren durch eingekreiste, grau gefärbte Symbole.

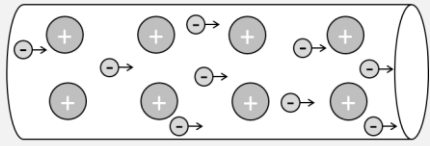
Textbox 32: Kognitives Stoppschild zur Verwechslung der Ladungen im Leiterinneren und der Oberflächenladungen (siehe LLA im Anhang).



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Beachte, dass die Oberflächenladungen von den Ladungen im Inneren des Leiters zu unterscheiden sind!



Abschnitt eines Leiters mit positiven Oberflächenladungen. Die positiven Ladungen an der Oberfläche werden mit einem Plus ‚+‘ rund um den Leiter dargestellt, negative mit einem Minus ‚-‘.



Abschnitt eines Leiters mit Ladungen im Leiterinneren. Die Ladungen im Inneren des Leiters werden eingekreist und grau gezeichnet, um sie von den Oberflächenladungen zu unterscheiden.

In der zweiten Interviewrunde zeigte sich, dass viele Lernende die Begriffe Stromfluss und Energiefluss gleichsetzten oder deren Unterschied nicht klar erkannten. Als Reaktion wurde in der dritten Interviewrunde ein weiteres kognitives Stoppschild (siehe Textbox 33) eingeführt, das diesen Unterschied explizit macht.

Textbox 33: Kognitives Stoppschild zur Erklärung des elektromagnetischen Feldes (siehe LLA im Anhang).



KOGNITIVES STOPPSCHILD:

- Bis jetzt haben wir einzeln über das elektrische und das magnetische Feld gesprochen, wobei jedes seine eigene Ursache, Form und Richtung hat.
- Wissenschaftler*innen verwenden den Begriff „elektromagnetisches Feld“ (kurz: EM-Feld), um die Kombination dieser beiden Felder zu benennen.
- Aber lass dich nicht verwirren! Das elektromagnetische Feld hat keine Richtung wie das elektrische und das magnetische Feld und wird daher auch nicht durch einen der Pfeile in der Abbildung dargestellt! Der Ausdruck "elektromagnetisches Feld" bedeutet einfach "die kombinierte Wirkung des elektrischen und des magnetischen Feldes".

Zusätzlich wurde im Abschnitt zur Einführung des elektromagnetischen Feldes ein weiteres Kognitives Stoppschild (siehe Textbox 34) formuliert, das den Begriff ‚elektromagnetisches Feld‘ erläutert und mögliche Missverständnisse im Umgang damit adressiert. Im Stoppschild

wird betont, dass elektrische und magnetische Felder jeweils eine eigene Richtung, Ursache und Form besitzen, und dass das elektromagnetische Feld als ‚kombinierte Wirkung‘ dieser Felder interpretiert werden kann.

Textbox 34: Kognitives Stoppschild zur Verwechslung von Energie- und Stromfluss (siehe LLA im Anhang).



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Der Energiefluss beschreibt den Fluss der Energie, der Stromfluss den Fluss des Stromes!

In der finalen Version des Lehr-Lern-Arrangements wurden also vier kognitive Stoppschilder eingebaut: zwei im Abschnitt ‚2.2 Das elektrische Feld und die Oberflächenladungen‘ sowie zwei im Abschnitt ‚2.3 Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss‘. Alle Stoppschilder wurden bewusst an Stellen eingesetzt, an denen im Rahmen der Interviewstudie wiederholt konzeptuelle Schwierigkeiten auftraten. Ihre Funktion bestand dabei nicht nur im Korrigieren von Lernendenvorstellungen, sondern auch darin, Denkprozesse gezielt anzustoßen, indem sie den Lernenden verdeutlichten, dass an diesen Stellen besondere Aufmerksamkeit erforderlich war.

7.1.2 Domänenspezifische Designprinzipien

Die in Kapitel 4.4.2 formulierten domänenspezifischen Designprinzipien (D1–D6) stellen das fachliche Fundament des Lehr-Lern-Arrangements dar. Im Folgenden werden sie analog zu den allgemeinen Designprinzipien diskutiert:

D1: Energie wird früh als zentrales Konzept eingeführt und durchgehend im Unterrichtsdesign berücksichtigt.

Das Unterrichtsdesign etabliert den Energiebegriff von Anfang an als zentrales physikalisches Konzept. Die Konzeptideen K1, K2, K6, K7, K8, K9 und K10 tragen auf jeweils eigene Weise zur Umsetzung dieses domänenspezifischen Designprinzips bei.

In Konzeptidee 1 steht die Energieübertragung in elektrischen Systemen im Mittelpunkt. Dabei werden sowohl kabelgebundene Geräte (z. B. elektrischer Mixer, Föhn) als auch kabellose Anwendungen (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Laden beim Smartphone) thematisiert. Dies ermöglicht einen unmittelbaren Alltagsbezug und macht früh deutlich, welche Rolle Energie in diesem Unterrichtsdesign spielt.

Konzeptidee 2 greift den Energiebegriff explizit auf, indem Energieübertragungssysteme als Kombination aus Energiequelle (z. B. Generator, Batterie), Überträgermedium (z. B. Kabel)

und Energieumwandler (z. B. Lampe, Motor) eingeführt werden. Hier wird erstmals systematisch thematisiert, dass Energie von der Quelle bereitgestellt, über ein Medium transportiert und schließlich in eine andere Energieform umgewandelt wird.

Mit Konzeptidee 6 wird dieser Gedanke weiter vertieft: Energieübertragung wird nun physikalisch durch das elektromagnetische Feld beschrieben. In Konzeptidee 7 wird dies durch die Einführung des Poynting-Vektors in eine formale Beschreibung überführt.

Konzeptidee 8 erweitert die Diskussion auf Wechselstromkreise. Die Lernenden vergleichen diese mit Gleichstromkreisen und beschäftigen sich damit, wie sich die Energieübertragung in beiden Systemen unterscheidet. Konzeptidee 9 richtet den Fokus schließlich auf die Energieumwandlung: Die über das Feld transportierte Energie erreicht nahezu vollständig den Umwandler, wo sie beispielsweise in Strahlungs- oder Wärmeenergie umgewandelt wird. In Konzeptidee 10 wird schließlich thematisiert, dass der Energieübertragungsprozess in Lichtgeschwindigkeit stattfindet.

Rückblickend lässt sich festhalten, dass das domänenspezifische Designprinzip D1 im Unterrichtsdesign nicht nur berücksichtigt, sondern konsequent umgesetzt wurde. Energie dient hier nicht lediglich als Randbegriff einzelner Phänomene, sondern als durchgehender strukturierender Rahmen. Die wiederholte Bezugnahme auf den Energieaspekt ermöglicht den Lernenden, ein kontextübergreifendes und anschlussfähiges Verständnis darüber zu entwickeln. Diese durchgehende Integration erwies sich in den Interviews als hilfreich für das Verständnis der thematischen Zusammenhänge.

Dies entspricht auch der theoretischen Rahmung: Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, gilt Energie als zentrales Konzept der Physik, das Phänomene unterschiedlichster Bereiche verbindet und erklärt (Schecker et al., 2018). Gleichzeitig stellt das Konzept Lernende häufig vor erhebliche kognitive Herausforderungen. Gerade deshalb ist eine durchgängige Integration wie im vorliegenden Unterrichtsdesign didaktisch besonders bedeutsam. Damit wird gezielt dazu beigetragen, dass die Lernenden ein solides Verständnis des Energiekonzepts entwickeln.

D2: Elektrische Systeme werden als Energieübertragungssysteme aufgefasst.

Das domänenspezifische Designprinzip D2 basiert auf der Idee, elektrische Systeme konsequent unter dem Gesichtspunkt der Energieübertragung zu betrachten.

Die Umsetzung dieses Prinzips im Unterrichtsdesign folgt damit den Überlegungen von Sefton (2002), Rückl (1991) und Muckenfuß und Walz (1997), wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben wurde.

In der konkreten Ausgestaltung des Unterrichts spiegelt sich D2 vor allem in Konzeptidee 2 wider, in der die Begriffe Energiequelle, Überträgermedium und Energieumwandler als feste

Systemelemente eingeführt werden. Diese Sichtweise bietet eine klare Struktur, die sich als Deutungsmuster durch alle weiteren Unterrichtsphasen zieht.

Besonders in K9 wird sie explizit aufgegriffen, wenn die nahezu vollständige Übertragung der Energie von der Energiequelle bis zum Energieumwandler thematisiert wird.

Das Designprinzip D2 wurde somit ebenfalls konsequent im Unterrichtsdesign umgesetzt. Die Betrachtung elektrischer Systeme als Energieübertragungssysteme dient dabei als zentrales Element, das sich durch mehrere Konzeptideen zieht, um wurde von den Lernenden in den Interview gut aufgenommen. Diese Perspektive unterstützt nicht nur ein fachlich korrektes Verständnis, sondern fördert auch die kontextübergreifende Einführung des Energiebegriffs, was ein zentrales Ziel im Rahmen der Designprinzipien dieses Lehr-Lern-Arrangements darstellt.

D3: Physikalische Felder werden mittels Feldlinien dargestellt.

Das dritte domänenspezifische Designprinzip D3 greift die zentrale Bedeutung des Feldkonzepts für das Verständnis elektromagnetischer Phänomene auf. Im vorliegenden Unterrichtsdesign werden physikalische Felder insbesondere durch Feldlinien dargestellt (siehe theoretische Fundierung in Kapitel 2.4), um Lernenden eine anschauliche Repräsentation zu vermitteln.

Diese Form der Visualisierung zielt auf zwei Aspekte ab: Einerseits soll die Struktur des Feldes sichtbar gemacht werden (z. B. die räumliche Orientierung), andererseits wird über die Dichte der Feldlinien auch die Intensitätsverteilung angedeutet. Zugleich wird im Unterricht explizit thematisiert, dass es sich bei Feldlinien um ein Modell handelt, das physikalische Eigenschaften vereinfacht darstellt.

D3 ist eng mit den Konzeptideen 3 und 5 verknüpft, die sich mit dem magnetischen beziehungsweise elektrischen Feld um stromdurchflossene Leiter befassen. Die Einführung dieser Konzepte erfolgt experimentell, zum Beispiel durch den Kompassversuch, die Verwendung von Strommesszangen oder durch Demonstrationsversuche zum elektrischen Feld. Die anschließende Modellierung der beobachteten Phänomene mithilfe von Feldlinien führt die Lernenden auf eine abstraktere Ebene und unterstützt die konzeptuelle Verankerung des Feldbegriffs.

Wie in Kapitel 2.4 erläutert, stellt die Feldliniendarstellung eine von mehreren möglichen Repräsentationen dar. Im Rahmen des gewählten Unterrichtsdesigns wird bewusst auf mathematische Herleitungen und die Vektordarstellung verzichtet (siehe allgemeines Designprinzip A6), um die Zugänglichkeit zu erleichtern. Stattdessen stehen Feldlinien und ergänzende digitale Simulationen im Fokus. Diese Kombination folgt dem Ansatz multipler externer Repräsentationen (Ainsworth, 1999) und trägt dazu bei, das physikalische Verständnis zu vertiefen (Cao & Brizuela, 2016).

Es zeigt sich somit, dass das Designprinzip D3 im Unterrichtsdesign auf vielfältige Weise aufgegriffen wurde. Die Konzeptideen 3 und 5 bieten dabei einen konkreten Rahmen, um physikalische Felder nicht nur experimentell zu erschließen, sondern auch durch Feldlinien anschaulich zu modellieren. Die Verbindung von Versuch und Visualisierung macht das Feldkonzept für die Lernenden zugänglich und unterstreicht seinen Stellenwert für das Verständnis elektromagnetischer Phänomene. So trägt D3 wesentlich dazu bei, Energieübertragung als räumlich vermittelten Prozess erfahrbar zu machen. Die Visualisierung durch Feldlinien wurde von den Lernenden in den Interviews positiv aufgenommen. In einigen Fällen kam es jedoch zur Verwechslung des elektrischen und magnetischen Feldes, was darauf hindeutet, dass die fachliche Differenzierung noch nicht durchgängig gelungen ist. In der Implementationsstudie im realen Klassensetting gab es dennoch überwiegend positive Rückmeldungen zur Feldliniendarstellung, etwa im Lehrer*inneninterview mit SEY.

D4: Der Energieübertragungsprozess wird mithilfe von elektromagnetischen Feldern beschrieben und durch den Poynting-Vektor modelliert.

Das domänenspezifische Designprinzip D4 beschäftigt sich mit der Darstellung der Energieübertragung mittels elektromagnetischer Felder. Es wurde im Unterrichtsdesign durch die Konzeptideen K6, K7, K8, K9 und K10 aufgegriffen.

Angelehnt an die physikdidaktischen Überlegungen von Sefton (2002) (siehe Abschnitt 4.4.2) und die physikalische Fundierung aus Kapitel 2.3, wurde damit bewusst ein fachlich präziser Zugang gewählt.

Dieses Designprinzip ist vor allem in Konzeptidee 6 zentral, in der die Energieübertragung mithilfe von elektromagnetischen Feldern thematisiert wird. Zur Vertiefung wird mit Konzeptidee 7 der Poynting-Vektor als mathematisches Modell eingeführt. Hierbei wurde gemäß A6 bewusst auf komplexe Herleitungen verzichtet.

Konzeptidee 8 überträgt das Prinzip auf Gleich- und Wechselstromkreise, Konzeptidee 9 verdeutlicht den nahezu vollständigen Energietransport von der Energiequelle zum Energieumwandler, und Konzeptidee 10 hebt die Lichtgeschwindigkeit als Übertragungsgeschwindigkeit hervor.

Die Umsetzung von D4 erfolgte somit konsequent und fachlich fundiert. Besonders die Kombination aus anschaulicher Darstellung und Ergänzung durch den Poynting-Vektors ermöglichte den Lernenden einen differenzierten Zugang zum abstrakten Konzept der Energieübertragung. Aufgrund der hohen Komplexität des Poynting-Formalismus wurde dieser im Rahmen der Interviews nur mit wenigen ausgewählten Interviewpartner*innen thematisiert. Dennoch

wurde die visuelle und qualitative Beschreibung des Formalismus von den Lernenden überwiegend gut aufgenommen.

D5: Die Linke-Hand-Regel wird als Hilfsmittel zur Bestimmung der Richtung des Energieflusses eingeführt.

Das domänenspezifische Designprinzip D5 wurde im Unterrichtsdesign an mehreren Stellen konkret aufgegriffen. Dabei erhielt die Linke-Hand-Regel bewusst die Bezeichnung ‚Energie-Hand-Regel‘, um ihre Funktion zur Bestimmung der Energieflussrichtung bei der Energieübertragung in elektrischen Systemen mit elektromagnetischen Feldern sprachlich deutlich zu machen.

Die Umsetzung von D6 erfolgte praxisorientiert: Die Energie-Hand-Regel wurde gezielt eingeführt und in Übungen angewendet, um den Lernenden ein handlungsorientiertes Werkzeug zur Verfügung zu stellen. Besonders im Zusammenhang mit Konzeptidee 6 diente sie als Hilfestellung. Die Mehrheit der befragten Lernenden konnte die Regel korrekt anwenden.

Die Rückmeldungen aus der Interviewstudie (siehe Kapitel 5) zeigen, dass viele Schüler*innen die Energie-Hand-Regel als hilfreich wahrnahmen und sie erfolgreich anwendeten, um die Richtung des Energieflusses zu bestimmen. Gleichzeitig wurden aber auch Schwierigkeiten deutlich: Einige Lernende verwechselten die Energie-Hand-Regel mit der FBI-Regel oder hatten Probleme, das magnetische vom elektrischen Feld zu unterscheiden. Um diese Herausforderungen gezielt aufzugreifen, wurden in der dritten Interviewrunde die Abbildungen im Unterrichtsmaterial überarbeitet und die Begriffe ‚elektrisches Feld‘ und ‚magnetisches Feld‘ in den Legenden vollständig ausgeschrieben.

Die Rückmeldungen aus den Lehrer*inneninterviews fielen unterschiedlich aus. Lehrperson SIM berichtete, dass die Regel bei einigen Schüler*innen auf Widerstand stieß und als unnötig kompliziert empfunden wurde, was eine gezielte Motivationsarbeit erforderlich machte. Lehrperson RIS beobachtete gemischte Reaktionen innerhalb der Lerngruppe: Während einige Lernende Interesse zeigten und die Regel ausprobierten, blieb sie für andere wenig relevant. Lehrperson SEY berichtete positiv, dass die Einführung der Energie-Hand-Regel dazu beitrug, die Umstellung von der technischen zur physikalischen Stromrichtung im Unterricht besser zu akzeptieren.

Insgesamt zeigt sich, dass das Designprinzip D5 im Unterrichtsdesign durchwegs umgesetzt wurde. Die Einführung der Energie-Hand-Regel erwies sich als hilfreiches Instrument, um die abstrakten Zusammenhänge zwischen elektrischem Feld, Magnetfeld und Energiefluss für die

Lernenden nachvollziehbar zu machen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass ihre erfolgreiche Anwendung gezielte Unterstützung und eine sorgfältige Einführung erfordert. Die Rückmeldungen belegen, dass die Regel dort, wo sie verständlich eingeführt und konsequent geübt wurde, einen wertvollen Beitrag zum Verständnis der Energieübertragung leisten konnte. Herausforderungen bei der Begriffsverwendung und der Akzeptanz unter den Schüler*innen unterstreichen die Bedeutung einer klaren, differenzierten Vermittlung.

D6: Die Rolle der Oberflächenladungen für die Feldbildung wird explizit thematisiert und durch bildliche Darstellungen modelliert.

Das domänenspezifische Designprinzip D6 wurde vor allem durch die Konzeptidee K4 im Unterrichtsdesign umgesetzt. In K4 wurde herausgearbeitet, dass Energiequellen Oberflächenladungen auf den Leiter ‚pumpen‘ und diese wiederum das elektrische Feld erzeugen.

Die Umsetzung im Unterrichtsdesign erfolgte auf mehreren Ebenen: Neben der direkten inhaltlichen Bearbeitung wurde insbesondere der Einsatz schematischer Visualisierungen genutzt, um den Zusammenhang zwischen Oberflächenladungen und Feldlinienverlauf anschaulich zu machen. Diese bildlichen Darstellungen orientierten sich an den von Chabay und Sherwood (2015) verwendeten Repräsentationen, wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben wurde.

Um typische Lernschwierigkeiten zu adressieren, wurde ein kognitives Stoppschild eingesetzt, das explizit auf die Unterscheidung zwischen Oberflächenladungen und Leitungselektronen hinwies. Damit sollte verhindert werden, dass Schüler*innen die beiden Konzepte vermischen. Die Ergebnisse der Interviewstudie (siehe Kapitel 5) zeigten, dass das Konzept der Oberflächenladungen insgesamt gut von den Schüler*innen aufgenommen wurde. Die explizite Einführung der Oberflächenladungen im Rahmen einer eigenen Konzeptidee (K4) führte zu einem verbesserten Verständnis elektrischer Felder und der Energieübertragung durch Felder. Viele Schüler*innen konnten die Verteilung der Oberflächenladungen korrekt beschreiben und deren Rolle für die Feldbildung erkennen. Schwierigkeiten traten vereinzelt bei der Begriffswahl (z. B. ‚Nord- und Südpol‘ statt ‚positiv und negativ geladen‘) und beim Verständnis der statischen Natur der Oberflächenladungen auf.

Die Rückmeldungen der Lehrpersonen zeigten, dass D6 in der praktischen Umsetzung eine gewisse Herausforderung darstellte. Die Lehrperson SEY berichtete, dass die Einführung der Oberflächenladungen deutlich mehr Unterrichtszeit beanspruchte als erwartet, sich aber letztlich durch sichtbare Lernerfolge bezahlt machte. RIS schilderte, dass das Verständnis der Oberflächenladungen und der Feldbildung in einer seiner drei Klassen auch nach wiederholter Erklärung nur teilweise gelang. KOV stellte fest, dass insbesondere die Unterscheidung zwischen Oberflächenladungen und Leitungselektronen in ihrer Klasse unklar blieb. Sie merkte kritisch

an, dass die eingesetzten Videos von den Schüler*innen als wenig überzeugend wahrgenommen wurden und eine vorgelagerte Behandlung der klassischen Elektrostatik aus ihrer Sicht hilfreich gewesen wäre.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das domänenspezifische Designprinzip D6 grundsätzlich in den Unterricht integriert werden kann. Die Erfahrungen aus dieser Studie zeigen, dass das Konzept von den Schüler*innen dann gut aufgenommen wird, wenn es sorgfältig eingeführt, anschaulich visualisiert und durch unterstützende Maßnahmen wie kognitive Stoppschilder begleitet wird. Gleichzeitig wird sichtbar, dass das Thema für viele Lernende anspruchsvoll bleibt. Einige typische Schwierigkeiten, insbesondere die Unterscheidung zwischen Oberflächenladungen und Ladungen im Leiterinneren, konnten auch durch gezielte Maßnahmen nicht von allen Schüler*innen vollständig überwunden werden. Die Rückmeldungen der Lehrpersonen machen deutlich, dass die Thematisierung der Oberflächenladungen sinnvoll und lernwirksam ist, jedoch einen hohen didaktischen Aufwand erfordert. Ausreichend Zeit, Wiederholung und der gezielte Einsatz geeigneter Visualisierungsmittel erwiesen sich als entscheidende Faktoren für den Lernerfolg.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass alle sechs domänenspezifischen Designprinzipien im finalen Unterrichtsdesign umgesetzt wurden. Besonders bedeutsam war dabei der systematische Abgleich mit den Konzeptideen des Lehr-Lern-Arrangements (siehe Abschnitt 6.2.1), die in Tabelle 92 zusammengefasst sind. Die Tabelle zeigt, welche Designprinzipien jeweils durch welche Konzeptideen realisiert wurden, und ergänzt diese Übersicht um eine kurze Reflexion zur Wirksamkeit der jeweiligen Umsetzung. Dabei wird deutlich, inwiefern die einzelnen domänenspezifischen Designprinzipien zur Verständnissicherung beigetragen haben und wo Herausforderungen auftraten.

Tabelle 92: Verknüpfung der domänenspezifischen Designprinzipien mit den entsprechenden Konzeptideen sowie kurze Reflexion zur Wirksamkeit.

Design- prinzip (Dx)	Zugehörige Konzeptidee(n) (Kx)	Kurzreflexion zur Wirksamkeit
D1	K1, K2, K6, K7, K8, K9, K10	Hoch: Lernende entwickelten ein solides, anschlussfähiges Verständnis; wurde in Interviews als hilfreich bestätigt
D2	K2, K9	Hoch: Konzept wurde gut aufgenommen, unterstützte fachlich korrektes Verständnis und kontextübergreifende Einführung des Energiebegriffs
D3	K3, K5	Mittel bis hoch: Visualisierung unterstützt Verständnis, wurde positiv bewertet; teilweise Verwechslungen elektrisches/magnetisches Feld bei Lernenden
D4	K6, K7, K8, K9, K10	Hoch: Differenzierter Zugang zum abstrakten Konzept, visuelle/qualitative Darstellung gut aufgenommen, mathematischer Formalismus komplex und daher nur bedingt im Unterricht einsetzbar
D5	K6	Mittel bis hoch: Viele Lernende finden die Regel hilfreich; Anwendung erfordert gezielte Einführung; gemischte Rückmeldungen
D6	K4	Mittel: Die Einführung von Oberflächenladungen als Erklärungsansatz war wirksam, erforderte jedoch einen hohen Zeitaufwand in der Umsetzung.

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen

In Kapitel 4.2 wurden – ausgehend vom Entwicklungs- und Forschungsziel – zwei zentrale Forschungsfragen formuliert (siehe Textbox 35 und Textbox 36). Die erste Forschungsfrage (F1) bezieht sich auf den Entwicklungszyklus eines Unterrichtsdesigns zur Energieübertragung in elektrischen Systemen für die Sekundarstufe II:

Textbox 35: Forschungsfrage 1 – Entwicklungszyklus.

Forschungsfrage 1 (F1): *Wie sieht ein Unterrichtsdesign zur Energieübertragung in elektrischen Systemen aus, welches für Schüler*innen der Sekundarstufe II verständlich und anwendbar ist?*

Diese Frage wurde im Rahmen eines Design-Based-Research-Ansatzes beantwortet. Durch die iterative Entwicklung eines Lehr-Lern-Arrangements im Rahmen von Akzeptanzbefragungen (siehe Kapitel 5) konnten drei Design- und Redesignzyklen durchlaufen werden. Ein zusätzlicher Zyklus erfolgte durch die Erprobung des finalen Unterrichtsdesigns im realen Klassensetting (Kapitel 6), was eine praxisnahe Evaluation ermöglichte.

Zu den Unterfragen dieser Forschungsfrage:

- *Wie werden die Erklärungen und Visualisierungen im Unterrichtsdesign von den Schüler*innen aufgenommen?*

Die Akzeptanzbefragungen lieferten wertvolle Hinweise auf die Wirksamkeit der eingesetzten Erklärungen und Visualisierungen. In der ersten Interviewrunde wurde das Unterrichtsdesign insgesamt positiv aufgenommen, wobei keine Ablehnung (sichtbar durch ‚rot-1‘-Kodierungen in der qualitativen Inhaltsanalyse) festgestellt wurde. Gleichzeitig wurden Verbesserungspotenziale identifiziert, etwa bei der grafischen Aufbereitung einzelner Konzepte. Die Diskussion rund um das Rucksackmodell stieß zudem auf großes Interesse: viele Schüler*innen konnten damit Missverständnisse identifizieren und entkräften.

In der zweiten Interviewrunde konnten ebenfalls wichtige Erkenntnisse über das Unterrichtsdesign gewonnen werden: Der Kompassversuch wurde beispielsweise von den Lernenden aufgrund seiner Vertrautheit geschätzt, während der Strommesszangenversuch durch seinen Alltagsbezug als praktisch beurteilt wurde.

In der dritten Interviewrunde zeigten alle Konzeptideen hohe Mittelwerte bei der Akzeptanz. Besonders die neu entwickelte Idee zu Oberflächenladungen erwies sich als hilfreich, da sie das Verständnis der Schüler*innen für das elektrische Feld und die Energieübertragung durch elektromagnetische Felder deutlich verbesserte: Die neue Konzeptidee führte zu einem Anstieg des

Mittelwerts bei der Konzeptidee zum elektrischen Feld von $\bar{x} = 2,57$ in der zweiten Runde auf $\bar{x} = 2,76$ in der dritten Runde (auf einer Skala von 0 bis 3).

- *Inwiefern sind Schüler*innen in der Lage, mithilfe der vermittelten Konzeptideen Verständnis- und Transferaufgaben zu bearbeiten?*

Die Analyse der drei Interviewrunden (siehe Kapitel 5) zeigt, dass die Schüler*innen zunehmend in der Lage sind, mithilfe der vermittelten Konzeptideen Aufgaben zu lösen. Die Ergebnisse variieren je nach Konzeptidee und Interviewrunde, weisen jedoch insgesamt auf eine positive Entwicklung hin.

In der dritten Interviewrunde konnten die meisten Aufgaben von den Schüler*innen erfolgreich gelöst werden. Die Mittelwerte lagen dabei überwiegend zwischen $\bar{x} = 2,57$ und $\bar{x} = 3,00$ (auf einer Skala von 0 bis 3), was auf eine insgesamt hohe Erfolgsquote hinweist.

Besonders stark zeigten sich die Schüler*innen bei Aufgaben, die alltagsnahe Beispiele erforderten. So wurden etwa A3.2 (Nennung alltagsbezogener Beispiele, bei denen eine Strommesszange ein Magnetfeld detektieren könnte, z. B. Handyladekabel oder Wasserkocher) und A5 (Nennung von Beispielen elektrischer Systeme, bei denen ein elektrisches Feld auftritt) in der dritten Interviewrunde nahezu durchgehend korrekt beantwortet. Dies verdeutlicht, dass die Schüler*innen die vermittelten Konzepte erfolgreich auf reale Kontexte übertragen können.

Auch bei Visualisierungsaufgaben wie A4.1 und A4.2 – zur Position und Verteilung von Oberflächenladungen auf einem Leiterstück – wurden in der dritten Runde durchgängig richtige Lösungen von den Interviewpartner*innen gegeben.

Gleichzeitig traten einige Herausforderungen auf. Schwierigkeiten zeigten sich vor allem bei Aufgaben, die mehrere physikalische Konzepte miteinander verknüpfen. Insbesondere die Aufgaben A8.1–A8.3, in denen die Auswirkungen einer Umpolung auf das magnetische, elektrische und elektromagnetische Feld zu analysieren waren, bereiteten den Schüler*innen teilweise Probleme. Hier waren häufig gezielte Hilfestellungen notwendig, um zur korrekten Lösung zu gelangen. Auch bei den Aufgaben A10.1 und A10.2 zeigten sich vereinzelt Verständnisschwierigkeiten: In A10.1 sollten die Schüler*innen sich mit der Vorstellung auseinandersetzen, dass innerhalb der Kabel ein Elektronenfluss stattfindet, und beurteilen, ob die Annahme zutrifft, dass die Elektronen die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler transportieren. Darauf aufbauend forderte A10.2 die Schüler*innen dazu auf, zu erklären, weshalb Elektronen in Wechselstromkreisen nicht als Träger der Energieübertragung gelten können.

Ein klarer positiver Trend zeigt sich im Vergleich der drei Interviewrunden: Die Mittelwerte der Konzeptideen stiegen von der ersten zur dritten Runde an. Dies spricht dafür, dass sowohl

die Überarbeitung des Interviewleitfadens als auch die Einführung neuer Konzeptideen zu einem verbesserten Verständnis beigetragen haben.

Einzelfälle, wie etwa bei IP21 in der dritten Runde, zeigen, dass auch Konzentrationsprobleme oder äußere Einflüsse die Bearbeitung der Aufgaben beeinträchtigen können. Solche Fälle stellen jedoch Ausnahmen dar und sind nicht repräsentativ für die Gesamtstichprobe.

- *Welche Veränderungen im Verständnis der Schüler*innen zur Energieübertragung zeigen sich vor und nach der Durchführung des Lehr-Lern-Arrangements (LLAs)?*

Im Rahmen der Prä- und Posttest-Erhebung wurde untersucht, ob und inwiefern sich das Verständnis der Schüler*innen zur Energieübertragung in elektrischen Systemen durch das im realen Klassensetting erprobte Lehr-Lern-Arrangement (LLA) verbessert hat. Die Ergebnisse der Erhebung sind in Kapitel 6.4 dargestellt, eine vertiefte Diskussion findet sich in Kapitel 6.5.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass das LLA zu deutlichen Verbesserungen bei den Schüler*innen geführt hat. Der durchschnittliche Punktwert stieg von $\bar{x} = 19,85$ im Prätest auf $\bar{x} = 24,99$ im Posttest (von 33 möglichen Punkten). Dieser Anstieg ist statistisch signifikant ($p < 0,0001$) und deutet auf einen relevanten Lernzuwachs hin. Der berechnete Effektstärkewert von Cohen liegt bei $d = 0,92$ und weist auf einen starken Effekt des Lehr-Lern-Arrangements hin.

Besonders deutlich war der Lernerfolg bei den Konzepten ‚kabellose Systeme‘ (Cohens $d = 1,46$) und ‚Energieumwandler‘ (Cohens $d = 1,84$). Hier gelang es offensichtlich, zentrale Inhalte besonders wirksam zu vermitteln. Schwierigere Themen wie das elektrische Feld wurden jedoch weniger erfolgreich vermittelt. Das entsprechende Multiple-Choice-Item zeigte keine signifikante Veränderung ($p = 0,083$), was auf ein bestehendes Optimierungspotenzial hinweist.

Auch die qualitative Auswertung der offenen Begründungsaufgabe ergab ein insgesamt positives Bild. In den Items F1_10b (Prätest) und F3_12b (Posttest) sollten die Schüler*innen den Verlauf der Energie in einem Stromkreis grafisch darstellen und anschließend begründen. Eine verbreitete Lernendenvorstellung, nämlich die Gleichsetzung von Energiefluss mit Stromfluss, konnte durch den Unterricht verringert werden: Im Prätest bezogen sich 42 Schüler*innen in ihrer Begründung allgemein auf die Stromrichtung. Weitere 19 nannten explizit die Richtung von Plus nach Minus, und 18 gaben Minus nach Plus an. Im Posttest reduzierte sich die Anzahl der allgemeinen Stromrichtungsbezüge auf 23. 20 Schüler*innen nannten die Richtung Minus nach Plus, nur 7 entschieden sich für Plus nach Minus. Gleichzeitig nahm die Zahl der Schüler*innen zu, die in ihren Begründungen Begriffe wie ‚Energierichtung‘ oder ‚Energieübertra-

gung‘ verwendeten. Während im Prätest nur sieben Bezüge zur Energierichtung und eine Nennung zur Energieübertragung vorkamen, stiegen diese im Posttest auf 11 beziehungsweise 16 an. Dies spricht dafür, dass zentrale Konzepte der Energieübertragung von einem Teil der Schüler*innen zunehmend sprachlich korrekt und konzeptuell treffender beschrieben wurden. Trotz dieser positiven Entwicklung blieben in den Begründungen zum Energiefluss vereinzelt Missverständnisse bestehen. Das zeigt, dass die begriffliche und konzeptuelle Unterscheidung zwischen Strom und Energie weiterhin erklärungsbedürftig ist und im Unterricht stärker thematisiert werden sollte.

Die im Unterricht eingesetzte Simulation zur Energieübertragung wurde von den Schüler*innen mehrheitlich positiv beurteilt. Sie lobten insbesondere die einfache Bedienbarkeit und die anschauliche Darstellung. Auf mobilen Endgeräten traten jedoch vereinzelt technische Probleme auf, die den Einsatz einschränkten.

Auch die Lehrpersonen bewerteten das Konzept grundsätzlich positiv. Sie hoben vor allem die klare Struktur und die praxisnahe Umsetzung hervor. Gleichzeitig wurde angemerkt, dass sich manche Inhalte – insbesondere die komplexeren Konzepte – nicht immer problemlos umsetzen ließen. Auch die konsequente Anwendung der Lehrer*innenhandreichung stellte für einige eine Herausforderung dar. Unterschiede in der Umsetzung führten teilweise zu Unterschieden in den Ergebnissen zwischen den Klassen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Lehr-Lern-Arrangement das Verständnis der Schüler*innen zur Energieübertragung in elektrischen Systemen deutlich verbessert hat. Bestehende Fehlvorstellungen konnten reduziert werden, zentrale Konzepte wurden besser verstanden und häufiger korrekt benannt. Die Forschungsfrage wurde damit bestätigt. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere bei komplexen Inhalten wie dem elektrischen Feld sowie bei der Formulierung klarer Arbeitsanweisungen weiterhin Optimierungspotenzial besteht.

Textbox 36: Forschungsfrage 2 – Forschungszyklus.

Forschungsfrage 2 (F2): *Welche Lernhindernisse und lernförderlichen Bedingungen lassen sich im Umgang mit der Energieübertragung in elektrischen Systemen für den Unterricht identifizieren?*

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurden qualitative und quantitative Daten aus den Akzeptanzbefragungen (siehe Kapitel 5) sowie aus dem Posttest des Lehr-Lern-Arrangements (siehe Kapitel 6) herangezogen. Ziel war es, typische Verständnisschwierigkeiten der Schü-

ler*innen sowie lernförderliche Bedingungen im Kontext der Energieübertragung in elektrischen Systemen zu identifizieren und daraus Implikationen für eine wirksame Unterrichtsgestaltung abzuleiten.

Dabei standen die folgenden Unterfragen im Fokus:

- *Welche Vorstellungen, Missverständnisse oder Hürden zeigen sich beim Lernen mit dem entwickelten Unterrichtsdesign?*

Die Auswertung der drei Interviewrunden zeigt, dass das entwickelte Unterrichtsdesign viele positive Aspekte bietet, zugleich aber auch einige Lernhürden sichtbar macht, die gezielt adressiert werden sollten.

Eine häufig beobachtete Schwierigkeit lag im Umgang mit fachsprachlichen Begriffen. In mehreren Interviews griffen Schüler*innen auf Alltagssprachliche oder unscharfe Ausdrücke zurück. Statt von einem ‚kabelgebundenen System‘ war beispielsweise von einem ‚Kabelsystem‘ die Rede, und statt des Begriffs ‚Energieumwandler‘ wurde von einzelnen Schüler*innen wiederholt ‚Energieverbraucher‘ verwendet. Diese Wortwahl deutet auf stabile Präkonzepte hin, die vermutlich durch frühere schulische Erfahrungen oder Alltagserfahrungen geprägt wurden. Um die fachliche Sprache langfristig zu festigen, sollte der gezielte Einsatz sprachsensibler Aufgabenformate weiter gestärkt werden.

Ein zentrales Hindernis beim Lernen mit dem Unterrichtsdesign war die Verwechslung des elektrischen und des magnetischen Feldes. In der zweiten Interviewrunde zeigte sich dies etwa bei der Anwendung der Energie-Hand-Regel. Auch in der dritten Interviewrunde wurden Begriffe wie ‚Nord- und Südpol‘ im Kontext elektrischer Felder verwendet, was auf eine konzeptuelle Unklarheit hinweist.

Darüber hinaus stellte das Konzept der Oberflächenladungen für einige Interviewpartner*innen eine Herausforderung dar. Mehrere Schüler*innen hielten sie irrtümlich für bewegliche Ladungen im Leiterinneren oder betrachteten sie als dynamisch, obwohl sie im Modell statisch gedacht sind. Solche Missverständnisse zeigen, wie zentral die verständnisorientierte Modellarbeit für den Lernprozess ist und dass insbesondere visuelle und experimentelle Unterstützungsangebote hier eine tragende Rolle spielen.

Bei der Diskussion der Energieübertragung in Wechselstromkreisen zeigten sich in der zweiten Interviewrunde weitere Verständnisprobleme. In der dritten Interviewrunde wurde daher entschieden, gemäß Designprinzip A4 (siehe Abschnitt 4.4) das Thema schrittweise herunterzubrechen. Diese methodische Anpassung führte zu einer höheren Akzeptanz bei den Schüler*innen.

Neben konzeptuellen Hürden wurden auch äußere Faktoren identifiziert, die den Lernprozess der Schüler*innen beeinflussten. In der dritten Interviewrunde wurde im Fall von IP21 deutlich, dass äußere Einflüsse wie Ablenkungen oder Zeitdruck zu spärlichen oder unvollständigen Antworten führten. Auch die Motivation der Schüler*innen und die individuelle Betreuung durch die Lehrperson hatten spürbaren Einfluss auf das Antwortverhalten.

Zusätzliche Erkenntnisse ergaben sich aus den schriftlichen Posttests, die am Ende der Unterrichtsintervention durchgeführt wurden. Ein zentrales Missverständnis, nämlich die Gleichsetzung von Energiefluss mit Stromfluss, wurde bereits weiter oben beschrieben. Die Testdaten deuten darauf hin, dass dieses Missverständnis durch das Lehr-Lern-Arrangement bei einem Teil der Schüler*innen reduziert werden konnte.

Demgegenüber blieb das Verständnis des elektrischen Feldes im Vergleich zwischen Prä- und Posttest weitgehend unverändert. Die Ergebnisse des entsprechenden Testitems zeigen keine signifikante Verbesserung. Mögliche Ursachen könnten darin liegen, dass das elektrische Feld zwar eine zentrale Voraussetzung des Unterrichtsdesigns darstellt, aber nicht in allen Klassen zuvor im Unterricht behandelt wurde. Zudem wurde das betreffende Item im Multiple-Choice-Format abgefragt – ein Format, das im Posttest insgesamt schwächer bearbeitet wurde als offene Aufgaben. Die Ergebnisse legen nahe, dass elektrische Felder im Rahmen des Unterrichtsdesigns noch intensiver und gezielter aufgegriffen werden sollten, um ein vertieftes Verständnis bei den Schüler*innen zu fördern.

Auch aus den Interviews mit den unterrichtenden Lehrpersonen ergaben sich wertvolle Hinweise. So wurde im Gespräch mit SIM betont, dass die Unterscheidung von Oberflächenladungen und Ladungen im Leiterinneren für einige Schüler*innen schwierig war. RIS berichtete von Unsicherheiten beim Ørsted-Versuch, insbesondere bei der Frage, ob sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis auslenkt. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass das erworbene Wissen teils noch nicht sicher auf konkrete physikalische Kontexte übertragen werden konnte. KOV wiederum betonte die Herausforderung, die Energieübertragung im Wechselstromkreis verständlich zu vermitteln. Die Rückmeldung unterstreicht, wie bedeutsam eine sorgfältig abgestufte Einführung in dieses Thema ist.

Technische Hürden betrafen vor allem die Nutzung digitaler Medien. Die Interpretation von Feldlinien, wie sie in Simulationen oder Videoanimationen dargestellt wurden, erwies sich nicht immer als intuitiv. Dies zeigt, dass der Einsatz solcher Werkzeuge stärker durch Anleitung und gezielte didaktische Impulse begleitet werden sollte. Gleichzeitig zeigen einzelne Rückmeldungen, dass die Visualisierungen auch motivierend wirkten und einen guten Zugang zu abstrakten Konzepten ermöglichen können.

Auffällig war zudem, dass viele Schüler*innen in den schriftlichen Tests nur knappe oder unvollständige Antworten gaben. Dies kann auf ein noch nicht vollständig gesichertes Begriffsverständnis hinweisen, möglicherweise aber auch mit sprachlichen Ausdrucksbarrieren zusammenhängen. Ein weiterer Grund könnte auch die fehlende Motivation beim Beantworten der Fragen gewesen sein.

Insgesamt lassen sich auf Grundlage der Interviews, der Testdaten und der Rückmeldungen aus dem Klassensetting typische Lernschwierigkeiten im Zusammenhang mit dem neu entwickelten Unterrichtsdesign identifizieren. Diese sollten bei der Anwendung des Unterrichtsdesigns in der Praxis berücksichtigt werden.

- *Welche Gestaltungselemente und didaktischen Prinzipien erweisen sich als besonders hilfreich für das Verständnis der physikalischen Zusammenhänge?*

Im Rahmen dieses Projekts konnten verschiedene Gestaltungselemente und didaktische Prinzipien identifiziert werden, die das Verständnis physikalischer Inhalte nachweislich fördern. Die ausführliche Reflexion der allgemeinen und domänenspezifischen Designprinzipien findet sich in den Abschnitten 7.1.1 und 7.1.2. Im Folgenden werden einige zentrale Erkenntnisse zur Beantwortung dieser Forschungsfrage zusammengefasst.

Ein zentraler Befund des vorliegenden Unterrichtsdesigns betrifft den konsequenten Alltagsbezug sowie den niederschweligen Einstieg in physikalische Inhalte. Die Einführung zentraler Begriffe wie ‚kabelgebundene‘ und ‚kabellose Systeme‘ anhand lebensnaher Beispiele, etwa kabelloses Laden von Smartphones oder elektrische Zahnbürsten, erleichterte den Zugang zum Thema und förderte die aktive Beteiligung der Schüler*innen bereits zu Beginn. Diese Kontextualisierung wurde von den Lehrpersonen SIM und SEY in den Lehrer*inneninterviews als motivierend und lernförderlich beschrieben (Designprinzip A2, D2).

Ebenfalls bedeutsam war die durchgängige und präzise Verwendung fachsprachlicher Begriffe und Merksätze. Die gezielte Einführung und konsequente Anwendung von Termini wie Energiequelle, Energieumwandler und Energieübertragung unterstützte die begriffliche Klarheit und trug wesentlich zur kognitiven Strukturierung bei. Dies spiegelte sich sowohl in den Interviewaussagen als auch in den Ergebnissen der Prä- und Posttests wider (Designprinzip A6, D1).

Ein weiteres wichtiges Element des Unterrichtsdesigns stellte der gezielte Einsatz visueller Gestaltungsmittel dar, die insbesondere in den drei Interviewrunden stetig weiterentwickelt wurden. Farbcodierungen, unterschiedliche Linientypen sowie schematische Darstellungen erleich-

terten die Vermittlung abstrakter Konzepte wie Feldverteilungen, Energieflüsse oder Oberflächenladungen (Designprinzip A7, D3). Insbesondere die Darstellung der Oberflächenladungen stellte sich in den Interviewergebnissen als wichtig dar (Designprinzip D6).

Zudem wurde die Entwicklung eigener Repräsentationsformen für die Darstellung der Oberflächenladungen insbesondere in den Interviewergebnissen notwendig (Designprinzip D6).

Zur Unterstützung des Lernprozesses wurden an gezielten Stellen kognitive Stoppschilder eingesetzt. Diese wurden im Rahmen der Interviewstudie entwickelt und mit den Schüler*innen erprobt. Die Lehrperson SIM bewertete dieses Element in der Umsetzung im realen Klassensetting als besonders hilfreich (Designprinzip A8).

Einen wichtigen Beitrag zum konzeptuellen Verständnis leisteten Demonstrationsversuche und einfache Hands-On-Versuche. Klassische Versuche wie der Ørsted-Versuch aber auch der Ventilator-Versuch zur Visualisierung von Energieübertragung, stießen bei den Schüler*innen auf großes Interesse und förderten ein intuitives Verständnis. Besonders der Ventilator-Versuch wurde von KOV und SEY als didaktischer Höhepunkt des Lehr-Lern-Arrangements hervorgehoben. Zudem wurde der Einsatz der Strommesszange von allen befragten Lehrpersonen als sehr gewinnbringend beschrieben (Designprinzip A5, A7).

Ab der zweiten Interviewrunde wurden Mindmaps eingesetzt, um den Schüler*innen beim Strukturieren ihrer Gedanken zu helfen. Dies erwies sich als sehr förderlich in der praktischen Umsetzung, da es die Lernenden bei der selbstständigen Reflexion unterstützte und es manchmal bestehende Verständnisschwierigkeiten offenbarte (Designprinzip A7).

Die eigens für das Unterrichtsdesign entwickelten PowerPoint-Folien wurden sehr positiv aufgenommen. Insbesondere SEY, SIM und RIS lobten ihre Gestaltung (Designprinzip A7).

Darüber hinaus erwiesen sich Schritt-für-Schritt-Anleitungen als hilfreich, etwa bei der Einführung der Energie-Hand-Regel oder der Diskussion des Wechselstromkreises. In den Lehrer*inneninterviews beschrieben SIM und SEY dieses Vorgehen als zentral (Designprinzip A4, D5). Einen besonderen Mehrwert brachte der Einsatz einer digitalen Simulation zur Energieübertragung durch elektromagnetische Felder. Die Lehrpersonen SEY und RIS beschrieben sie als besonders hilfreich, um die physikalischen Konzepte zu visualisieren und zu vertiefen. Allerdings gab es in Zusammenhang mit der Simulation auch technische Probleme, vor allem bei der Lehrperson KOV (Designprinzip A7, D4).

Zudem sind die offenen Diskussionsphasen positiv hervorzuheben: Die gemeinsame Auseinandersetzung mit Modellvorstellungen, etwa dem Rucksackmodell, sowie konzeptuellen Herausforderungen wie der Lichtgeschwindigkeit, ermöglichte vertiefte Lernprozesse und führte in

mehreren Fällen zu nachvollziehbaren ‘Aha-Momenten’. Besonders in der Klasse von SEY zeigten diese Phasen nachhaltige Wirkung (Designprinzip A1, A3).

7.3 Implikationen und Limitationen des Unterrichtsdesigns

Die Reflexion des Unterrichtsdesigns erfolgte fortlaufend im Entwicklungsprozess und wurde in Kapitel 5 im Rahmen der Interviewstudie nach jeder Runde systematisch dokumentiert. In Kapitel 6, insbesondere in Abschnitt 6.5.3 zur Evaluation des Lehr-Lern-Arrangements im schulischen Kontext, wurden die Stärken und Schwächen der Untersuchung differenziert analysiert. Aufbauend auf diesen punktuellen Betrachtungen lassen sich im Folgenden übergeordnete Implikationen und Limitationen für die Unterrichtspraxis systematisch zusammenfassen. Eine zentrale Implikation ergibt sich aus der Wahl des Design-Based-Research-Ansatzes. Der iterative Charakter dieses methodischen Rahmens ermöglichte eine praxisnahe Entwicklung des Unterrichtsdesigns und dessen kontinuierliche Optimierung. Die enge Verzahnung von theoretischen Grundlagen und praktischer Umsetzung führte zu einem didaktisch fundierten Lehr-Lernarrangement, das sich in den aktuellen Lehrplan für Physik der AHS-Oberstufe einfügt und dabei adaptierbar ist.

Die Kombination unterschiedlicher Erhebungsmethoden erwies sich als besonders gewinnbringend: Der Einsatz eines Prä- und Posttests ermöglichte die Erfassung von Veränderungen im Konzeptverständnis der Schüler*innen, während vertiefende Interviews mit Lehrpersonen zusätzliche Perspektiven auf die Umsetzbarkeit des Unterrichtsdesigns lieferten.

Der gezielte Einsatz digitaler Medien, insbesondere von Simulationen und Visualisierungen, unterstützte zudem das Verständnis physikalischer Inhalte und stärkte gleichzeitig die digitalen Kompetenzen der Lernenden. Das Unterrichtsdesign entspricht damit den Anforderungen an zeitgemäßen Unterricht und leistet einen Beitrag zur digitalen Bildung.

Die Rückmeldungen der Lehrpersonen zur Lernmotivation und zum Engagement der Schüler*innen bestätigen die Akzeptanz und Umsetzbarkeit des Konzepts. Darüber hinaus ermöglichten die empirischen Ergebnisse die Ableitung konkreter Gelingensbedingungen sowie potenzieller Hindernisse im Themenfeld der Energieübertragung in elektrischen Systemen, die in Form einer umfassenden Lehrer*innenhandreichung zusammengefasst wurden.

Trotz der genannten Stärken unterliegt die Untersuchung bestimmten Limitationen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Die Generalisierbarkeit der Befunde ist eingeschränkt, da die Stichprobe mit 128 Schüler*innen ausschließlich AHS-Klassen im städtischen Raum Wiens umfasste. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Schulformen, Regionen oder Bildungssysteme ist nur bedingt möglich und bedarf weiterer Untersuchungen.

Darüber hinaus können keine Aussagen über die langfristige Wirksamkeit oder die Nachhaltigkeit des erworbenen Wissens gemacht werden.

Ein weiterer begrenzender Faktor betrifft die Rolle der Lehrpersonen. Die Qualität der Umsetzung des Unterrichtsdesigns variierte abhängig von individuellen didaktischen Kompetenzen und der Bereitschaft zur Einhaltung der bereitgestellten Materialien. Eine systematische Kontrolle dieser Umsetzungsunterschiede war im Untersuchungsdesign nicht vorgesehen, sodass mögliche Verzerrungen nicht ausgeschlossen werden können.

Die Abhängigkeit von technischer Infrastruktur, insbesondere beim Einsatz der digitalen Simulation zur Energieübertragung in elektrischen Systemen, stellt eine zusätzliche Einschränkung dar. Die Umsetzung des Designs setzte stabile Internetverbindungen sowie funktionstüchtige digitale Endgeräte voraus. Diese Bedingungen waren nicht in allen Klassen vollständig gegeben, was insbesondere die Arbeit mit der digitalen Simulation erschwerte.

Im Rahmen der Interviews ist zudem mit einer möglichen Verzerrung durch soziale Erwünschtheit zu rechnen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Schüler*innen und Lehrpersonen Hemmnisse oder Kritikpunkte nicht offen ansprechen wollten. Zudem könnte die freiwillige Teilnahme der Schüler*innen an den Interviews zu einer selektiven Auswahl durch besonders engagierte Lernende geführt haben.

Ein letzter Aspekt betrifft den Verzicht auf eine Kontrollgruppe. Diese Entscheidung wurde bewusst getroffen, um allen teilnehmenden Klassen den Zugang zum innovativen Unterrichtskonzept zu ermöglichen und einen ethischen Konflikt zu vermeiden. Dennoch schränkt das Fehlen einer Kontrollgruppe die Möglichkeit ein, Lernzuwächse eindeutig auf das Unterrichtsdesign zurückzuführen, da kein Vergleich mit dem regulären Unterricht möglich war.

7.4 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Projekt widmete sich der Entwicklung und Evaluation eines innovativen Unterrichtsdesigns zur Vermittlung der Energieübertragung in elektrischen Systemen für die Sekundarstufe II. Auf der Grundlage eines Design-Based-Research-Ansatzes entstand ein didaktisch fundiertes und empirisch überprüftes Konzept, das elektromagnetische Felder als zentrale Erklärungsebene in den Mittelpunkt stellt.

Die Vorgehensweise im Designprojekt gliederte sich in vier aufeinander aufbauende Phasen: Zunächst wurden in Phase 1 relevante fachwissenschaftliche und fachdidaktische Literatur analysiert und zentrale physikalische Konzepte wie Oberflächenladungen und elektromagnetische Felder aufgearbeitet. Auf dieser Basis wurden mithilfe der Didaktischen Rekonstruktion erste Konzeptideen entwickelt. In Phase 2 erfolgte eine qualitative Interviewstudie mit 21 Schüler*innen in drei Designzyklen, um diese Ideen hinsichtlich ihrer Anschlussfähigkeit und Verständlichkeit zu überprüfen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mittels Qualitativer Inhaltsanalyse. Phase 3 umfasste die Entwicklung und Erprobung des Lehr-Lern-Arrangements zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in sieben Oberstufenklassen an vier Wiener AHS, begleitet von Prä- und Posttests sowie Lehrer*inneninterviews. Abschließend wurden in Phase 4 die Ergebnisse zusammengeführt, diskutiert und hinsichtlich didaktischer sowie methodologischer Implikationen reflektiert. Jede Phase baute dabei systematisch auf den Ergebnissen der vorhergehenden auf und verband Theoriearbeit mit empirischer Erprobung.

Ein zentrales Produkt dieser Arbeit sind die entwickelten Unterrichtsmaterialien, insbesondere die Lehrer*innenhandreichung zur Energieübertragung in elektrischen Systemen. Diese Materialien beruhen auf den empirischen Befunden der Studie und wurden im Laufe der Entwicklungsphasen mehrfach überarbeitet. Die identifizierten Lernhürden flossen systematisch in die abschließende Version ein, sodass das Material praxisnah und differenziert eingesetzt werden kann.

Die Ergebnisse der Evaluation des Lehr-Lern-Arrangements im realen Klassensetting belegen eine insgesamt gute fachliche Verständlichkeit sowie eine hohe Anschlussfähigkeit im schulischen Alltag. Die signifikanten Lernzuwächse und die positiven Rückmeldungen der Lehrpersonen bestätigen die Wirksamkeit des Konzepts. Gleichzeitig zeigten sich typische Lernschwierigkeiten, die wertvolle Hinweise für eine weitere Optimierung liefern.

Die zweite Runde der Akzeptanzbefragungen wurde unter den pandemiebedingten Einschränkungen Anfang 2022 durchgeführt, was insbesondere die Rekrutierung geeigneter Interviewpartner*innen erschwerte. Dennoch konnte die Erhebung planmäßig abgeschlossen werden, was als Erfolg anzusehen ist.

Offene Fragen bestehen insbesondere im Hinblick auf das fachliche Vorwissen der Schüler*innen. Die Ergebnisse legen nahe, dass ein vorheriger Unterricht zur Elektrostatik und zur Feldvorstellung das Verständnis zentraler Konzepte im vorliegenden Design (z. B. Oberflächenladungen) wesentlich erleichtert.

Ein weiteres Forschungsdesiderat ergibt sich aus der genaueren Analyse einzelner Testitems aus der Prä- und Posttestuntersuchung. Besonders lohnend erscheint ein vertiefender Blick auf die Antworten zu Item 10 im Prätest sowie Item 12 im Posttest, die sich mit dem ‚Weg der Energie‘ im Stromkreis befassen. Die verbreitete Vorstellung, Energie fließe durch die Leiterkabel, tritt hier besonders deutlich zutage. Eine systematische Auswertung dieser Daten könnte Aufschluss darüber geben, welche Lernendenvorstellungen vor und nach dem Unterricht besonders häufig auftreten. Daraus ließen sich gezielte Impulse für die Weiterentwicklung des Unterrichtsdesigns ableiten. Vorstellungen von Schüler*innen zum ‚Weg der Energie‘ in elektrischen Stromkreisen wurden bereits in einer früheren Studie (Pilsner, 2023; Winter & Pilsner, 2024). Diese Studie griff jedoch auf eine andere Schüler*innengruppe zurück und arbeitete mit leitfadengestützten Interviews anstelle von Fragebogendaten. Eine vertiefende Analyse der hier vorliegenden Daten konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt werden.

Zukünftige Forschungsarbeiten könnten zudem den Fokus auf die Nachhaltigkeit der Lernfortschritte richten. Eine Langzeitstudie würde ermöglichen, Veränderungen im Konzeptverständnis über einen längeren Zeitraum hinweg zu verfolgen. Darüber hinaus wäre die Erprobung des Unterrichtsdesigns in verschiedenen Schulformen und mit heterogenen Lerngruppen ein spannender nächster Schritt. So ließe sich die Übertragbarkeit und Anpassungsfähigkeit des Konzepts überprüfen und gegebenenfalls gezielt weiterentwickeln.

Das in dieser Arbeit entwickelte Unterrichtsdesign stellt einen wichtigen Schritt auf dem Weg zu einem besseren Verständnis von Lernprozessen zum Thema Energieübertragung in elektrischen Systemen dar. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur fachdidaktischen Bearbeitung einer Thematik, die lange als schwer zugänglich galt und eröffnet Anknüpfungspunkte für die weitere Erforschung und Gestaltung lernförderlicher Bedingungen eines zeitgemäßen Physikunterrichts.

Literaturverzeichnis

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33(2-3), 131–152. [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00029-9)
- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Ainsworth, S. (2008). The Educational Value of Multiple-representations when Learning Complex Scientific Concepts. In J. K. Gilbert, M. Reiner & M. Nakhleh (Hrsg.), *Models and modeling in science education: v. 3. Visualization: Theory and Practice in Science Education* (1. Aufl., S. 191–208). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5267-5_9
- Anderson, T. & Shattuck, J. (2012). Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research? *Educational Researcher*, 41, 25. <https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- Apolin, M. (2017). *Big Bang: [Physik]* (1. Auflage). Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG. <https://permalink.obvsg.at/AC14462144>
- Aschauer, W. (2017). *Elektrische und magnetische Felder* [Dissertation, Logos Verlag Berlin GmbH]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- Backhaus, U. (1987). Der Energietransport durch elektrische Ströme und elektromagnetische Felder. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 36(3), 30. <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/Energietransport.pdf>
- Backhaus, U. & Schäfer, K. (1986). On the uniqueness of the vector for energy flow density in electromagnetic fields. *American Journal of Physics*, 54(3), 279–280. <https://doi.org/10.1119/1.14646>
- Backhaus, U. & Schlichting, H. J. (1979). Energie als grundlegendes Konzept. *PhuD*, 7(2).
- Bakker, A. (2018). *Design research in education: A practical guide for early career researchers*. Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351329422>
- Barab, S. & Squire, K. (2004). Design-Based Research: Putting a Stake in the Ground. *Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 1–14. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1301_1
- Becker, M. (2023). *Der Energie-Feld-Ansatz : Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II* [Dissertation]. Universität Wien. <http://urn:nbn:at:at-ubw:1-21519.10017.573915-4>
- Behle, J. & Wilhelm, T. (2017). Aktuelle Schülerrahmenkonzepte zur Energie. In Nordmeier, V. Grötzebach, H. (Vorsitz), *Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Dresden 2017*. Symposium im Rahmen der Tagung von Fachverband Didaktik der Physik, Dresden.

- Budimaier, F. (2024). *Students' understanding of emergent processes in physics within the context of the particulate nature of matter* [Dissertation]. Universität Wien, Wien. <https://doi.org/10.25365/thesis.76695>
- Verordnung des Bundesministers für Unterricht und Kunst vom 14. November 1984 über die Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen. <https://www.ris.bka.gv.at/Gelten-deFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568&Fassung-Vom=2018-09-01>
- Burde, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells* [Dissertation, Logos Verlag Berlin GmbH]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- Campos, E., Zavala, G., Zuza, K. & Guisasola, J. (2020). Students' understanding of the concept of the electric field through conversions of multiple representations. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010135>
- Cao, Y. & Brizuela, B. M. (2016). High school students' representations and understandings of electric fields. *Physical Review Physics Education Research*, 12(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020102>
- Chabay, R. W [Ruth W.] & Sherwood, B. A [Bruce A.]. (2015). *Matter & interactions* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50(1), 66–71. <https://doi.org/10.1119/1.12989>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed.). Erlbaum. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Davis, B. & Kaplan, L. (2011). Poynting vector flow in a circular circuit. *American Journal of Physics*, 79(11), 1155–1162. <https://doi.org/10.1119/1.3630927>
- Design-Based Research Collective (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry, 32(1), 5–8. <https://doi.org/10.3102/0013189X032001005>
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105–225. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008>
- Driver, R. & Easley, J. (1978). Pupils and Paradigms: a Review of Literature Related to Concept Development in Adolescent Science Students. *Studies in Science Education*, 5(1), 61–84. <https://doi.org/10.1080/03057267808559857>
- Driver, R. & Scanlon, E. (1989). Conceptual change in science: A research programme *Journal of Computer Assisted Learning*, 5(1), 25–36. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1989.tb00195.x>
- Duit, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41. <https://doi.org/10.25656/01:10536> (Zeitschrift für Pädagogik 41 (1995) 6, S. 905-923).
- Duit, R. (2004). *Schülervorstellungen und Lernen von Physik, PIKO-BRIEF NR. 1*. Mai.

- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M. & Parchmann, I. (2012). *The Model of Educational Reconstruction – a framework for improving teaching and learning science*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2848.6720>
- Duit, R., Jung, W., Pfundt, H. & Kiel Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften. (1981). *Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht*. Aulis-Verlag Deubner.
- Duit, R. & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671–688. <https://doi.org/10.1080/09500690305016>
- Duit, R. H. & Treagust, D. F. (2012). Conceptual Change: Still a Powerful Framework for Improving the Practice of Science Instruction. In K. C. D. Tan & M. Kim (Hrsg.), *Issues and challenges in science education research: Moving forward* (S. 43–54). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3980-2_4
- Engelhardt, P. V. & Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 72(1), 98–115. <https://doi.org/10.1119/1.1614813>
- Feynman, R. P., Leighton, R. B. & Sands, M. L. (1970). *The Feynman lectures on physics. Volume II*. Addison-Wesley Longman, Amsterdam.
- Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K. & Nordine, J. (2022). Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften: ZfDN*, 28(1), 203–221. <https://doi.org/10.1007/s40573-022-00143-8>
- Galili, I. & Goihbarg, E. (2005). Energy transfer in electrical circuits: A qualitative account. *American Journal of Physics*, 73(2), 141–144. <https://doi.org/10.1119/1.1819932>
- Haagen-Schützenhöfer, C. (2016). *Lehr- und Lernprozesse im Anfangsoptikunterricht der Sekundarstufe I* [Kumulative Habilitationsschrift], Bruck/Mur. https://static.uni-graz.at/fileadmin/nawi-institute/Physik/Physikdidaktik/Mitarbeiter/Habil_Haagen.pdf
- Haagen-Schützenhöfer, C. & Hopf, M. (2020). Design-based research as a model for systematic curriculum development: The example of a curriculum for introductory optics. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 16(2), 20152. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020152>
- Haagen-Schützenhöfer, C., Obczovsky, M. & Kislinger, P. (2024). Design-based research—Tension between practical relevance and knowledge generation—What can we learn from projects? *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 20(1), em2378. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13928>
- Hammer, D. (2000). Student resources for learning introductory physics. *American Journal of Physics*, 68(S1), S52–S59. <https://doi.org/10.1119/1.19520>
- Harbola, M. K. (2010). Energy flow from a battery to other circuit elements: Role of surface charges. *American Journal of Physics*, 78(11), 1203–1206. <https://doi.org/10.1119/1.3456567>

- Härtel, H. (1985). The electric voltage. In R. Duit, C. v. Rhöneck & W. Jung (Hrsg.), *IPN-Arbeitsberichte: Bd. 59, Aspects of understanding electricity: Proceedings of an international workshop* (S. 353–362). Schmidt und Klaunig.
- Härtel, H. (1987). A qualitative approach to electricity. *Technical Report, Jun. 1985 - Sep. 1986 Xerox Corp., Palo Alto, CA. Inst. for Research on Learning.*
- Härtel, H. (2012). Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*(61), 17–24.
- Härtel, H. (2021). Voltage and Surface Charges What Wilhelm Weber already knew 150 years ago. *European Journal of Physics Education*, 12(3), 19–31.
- Hattie, J. (2015). *Lernen sichtbar machen aus psychologischer Perspektive*. Schneider Hohengehren. <https://ubdata.univie.ac.at/AC12166138>
- Häußler, P. & Hoffmann, L. (1995). Physikunterricht - an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert. *Unterrichtswissenschaft*, 23. <https://doi.org/10.25656/01:8124> (Unterrichtswissenschaft 23 (1995) 2, S. 107-126).
- Heald, M. A. (1984). Electric fields and charges in elementary circuits. *American Journal of Physics*, 52, 522–526.
- Heeg, J., Bittorf, R. M. & Schanze, S. (2021). Förderung der Diagnosefähigkeiten angehender Lehrkräfte hinsichtlich Lernendenvorstellungen: Anwendung der Didaktischen Rekonstruktion zur Gestaltung eines hochschuldidaktischen Seminars. *Herausforderung Lehrer* innenbildung-Zeitschrift zur Konzeption, Gestaltung und Diskussion (HLZ)*, 4.2, 146–164. <https://doi.org/10.11576/HLZ-2703>
- Hestenes, D., Wells, M. & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141–158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Hines, C. O. (1952). Electromagnetic energy density and flux. *Canadian Journal of Physics*, 30(2), 123–129. <https://doi.org/10.1139/p52-013>
- Hobbs, B. (2014). *Are we teaching electricity the wrong way around?* <https://www.abc.net.au/science/articles/2014/02/05/3937083.htm>
- Hoffmann, L., Häußler, P. & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. IPN.
- Hopf, M., Schecker, H., Höttecke, D. & Wiesner, H. (Hrsg.). (2022). *Physikdidaktik kompakt* (1. vollständig neu bearbeitete Auflage). Aulis. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.5555/9783761430149>
- Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V. & Wilhelm, T. (2021). Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 17(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020123>
- Jackson, J. D. (1996). Surface charges on circuit wires and resistors play three roles. *American Journal of Physics*, 64(7), 855–870. <https://doi.org/10.1119/1.18112>
- Jaeger, D., Franz, T. & Müller, R. (2018). Cognitive Load und authentische Probleme. In *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht- normative und empirische Dimensionen*

- (Jahrestagung in Regensburg, S. 687–690). Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik (GDCP). https://gdcp-ev.de/wp-content/tb2018/tb2018_687_jaeger.pdf
- Jaeger, D. & Müller, R. (2018). Repräsentation als kognitiv entlastende Strategie beim Problemlösen? *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/879>
- Jan-Philipp Burde & Thomas Wilhelm (2015). Akzeptanzbefragung zum Elektronengasmodell. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/602>
- Jefimenko, O. (1962). Demonstration of the Electric Fields of Current-Carrying Conductors. *American Journal of Physics*, 30(1), 19–21. <https://doi.org/10.1119/1.1941887>
- Johsua, S. & Dupin, J. J. (1985). Schematic diagrams, representations and type of reasoning in basic electricity. In R. Duit, C. v. Rhöneck & W. Jung (Hrsg.), *IPN-Arbeitsberichte: Bd. 59, Aspects of understanding electricity: Proceedings of an international workshop* (S. 129–138). Schmidt und Klaunig.
- Jung, W. (1992). Probing acceptance: A technique for investigating learning difficulties. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Hrsg.), *IPN: Bd. 131. Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies: Proceedings of an international workshop held at the University of Bremen, March 4 - 8, 1991* (S. 278–295).
- Jung, W. (2011). Alltagsvorstellungen und das Lernen von Physik und Chemie. In R. Müller (Hrsg.), *Schülervorstellungen in der Physik: Festschrift für Hartmut Wiesner* (3. unveränd. Aufl., S. 15–19). Aulis-Verl. Deubner.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengiesser, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung, 3, 3–18.
- Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (2007). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*. Springer-Link Bücher. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34091-1>
- Korner, M. (2024). Akzeptanzbefragungen als Methode in der Ausbildung Lehramtsstudierender. *Frühe naturwissenschaftliche Bildung: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Hamburg 2023*, 614–617. <https://ucrisportal.univie.ac.at/en/publications/akzeptanzbefragungen-als-methode-in-der-ausbildung-lehramtsstudie>
- Krebs, R. E. (2024). *Development and evaluation of a teaching-learning sequence about acid-base chemistry for upper secondary chemistry learners* [Dissertation]. Universität Wien. <http://urn:nbn:at:at-ubw:1-25133.03596.310497-0>
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (4. Auflage). *Grundlagentexte Methoden*. Beltz Juventa. <http://www.beltz.de/de/nc/verlagsgruppe-beltz/gesamtprogramm.html?isbn=978-3-7799-3682-4>
- Lai, C. S. (1981). Alternative choice for the energy flow vector of the electromagnetic field. *American Journal of Physics*, 49(9), 841–843. <https://doi.org/10.1119/1.12719>

- Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Majcen, S., Haaland, R. K. & Dudley, S. C. (2000). The Poynting vector and power in a simple circuit. *American Journal of Physics*, 68(9), 857–859. <https://doi.org/10.1119/1.1302733>
- Matter & Interactions. (2016). *Surface charge demo*. <https://matterandinteractions.org/surface-charge-demo/>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12. Aufl.). Beltz.
- McDermott, L. C. & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60(11), 994–1003. <https://doi.org/10.1119/1.17003>
- Muckenfuß, H. & Walz, A. (Hrsg.). (1997). *Unterrichtshilfen Naturwissenschaften. Neue Wege im Elektrikunterricht: Vom Tun über die Vorstellung zum Begriff* (2., überarb. Aufl.). Aulis-Verl. Deubner.
- Müller, R. (2012). A semiquantitative treatment of surface charges in DC circuits. *American Journal of Physics*, 80(9), 782–788. <https://doi.org/10.1119/1.4731722>
- Niedderer, H. & Schecker, H. (1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Hrsg.), *IPN: Bd. 131. Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies: Proceedings of an international workshop held at the University of Bremen, March 4 - 8, 1991* (S. 74–98).
- Nussbaumer, A. & Nussbaumer, P. (2017). *Physik compact: Basiswissen 6 : Bearbeitung der Ausgabe 2010 der Autoren: Mag. Albert Jaros, Mag. Alfred Nussbaumer, Mag. Peter Nussbaumer* (1. Auflage). Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG. <https://permalink.obvsg.at/AC13745142>
- Paas, F., van Gog, T. & Sweller, J. (2010). Cognitive Load Theory: New Conceptualizations, Specifications, and Integrated Research Perspectives. *Educational Psychology Review*, 22(2), 115–121. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9133-8>
- Pilser, A. (2023). *Empirische Erhebung von Vorstellungen zur Energie in der Elektrizitätslehre* [Masterarbeit]. Universität Wien. <https://doi.org/10.25365/thesis.73249>
- Plomp, T. & Nieveen, N. (2013). Educational design research: An introduction. In T. Plomp & N. Nieveen (Hrsg.), *Educational Design Research* (S. 11–50). Netherlands Institute for Curriculum Development (SLO).
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211–227. <https://doi.org/10.1002/sce.3730660207>
- Preyer, N. W. (2000). Surface charges and fields of simple circuits. *American Journal of Physics*, 68(11), 1002–1006. <https://doi.org/10.1119/1.1286115>

- Rasch, B. (2021). *Quantitative Methoden* (5. Auflage). *Lehrbuch*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63282-6>
- Reinfried, S., Mathis, C. & Kattmann, U. (2009a). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *BzL - Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 27(3), 404–414. <https://doi.org/10.36950/bzl.27.3.2009.9826>
- Reinfried, S., Mathis, C. & Kattmann, U. (2009b). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 27, 404–414.
- Rückl, E. (1991). *Feldenergie: Ein neues didaktisches Konzept*. Teilw. zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr., 1989 u.d.T.: Rückl, Eckhard: Zur Feldenergie im Physikunterricht. BI-Wiss.-Verl.
- Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.). (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>
- Scherr, R. E. (2007). Modeling student thinking: An example from special relativity. *American Journal of Physics*, 75(3), 272–280. <https://doi.org/10.1119/1.2410013>
- Sefton, I. M. (2002). *Understanding Electricity and Circuits: What the Text Books Don't Tell You*. Proceedings of the 9th Science Teachers Workshop. Science Foundation for Physics, Sydney.
- Sexl, R., Kühnelt, H., Stadler, H., Jakesch, P. & Sattlberger, E. (2017). *Physik: Für die 5. und 6. Klasse der allgemein bildenden höheren Schulen ; neue Oberstufe* [Neue Ausgabe], 1. Auflage). Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG. <https://permalink.obvsg.at/AC13745015>
- Sherwood, B. A [B. A.] & Chabay, R. W [R. W.]. (1999). *A unified treatment of electrostatics and circuits*. Center for Innovation in Learning and Dept. of Physics. <https://matterandinteractions.org/wp-content/uploads/2016/07/circuit.pdf>
- Solbes, J., Guisasola, J. & Tarín, F. (2009). Teaching Energy Conservation as a Unifying Principle in Physics. *Journal of Science Education and Technology*, 18(3), 265–274. <https://doi.org/10.1007/s10956-009-9149-3>
- Sommerfeld, A. (Hrsg.). (1953). *Electrodynamics: Lectures on Theoretical Physics* (Vol III). Academic Press.
- Suárez, Á., Marti, A. C., Zuza, K. & Guisasola, J. (2023). *Presentation of the electromagnetic field in introductory physics textbooks and consequences for its teaching*. <http://arxiv.org/pdf/2305.05431>
- Suleder, M. (2013). *Physikdidaktik, Lernsoftware, Videoanalyse - FeldLab*. <https://www.videoanalyse.lima-city.de/feldlab.html>
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4(4), 295–312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)

- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251–296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2015). *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure* (7. dt. Aufl.). *Lehrbuch*. Springer Spektrum.
- Trumper, R. & Gorsky, P. (1993). Learning about energy: The influence of alternative frameworks, cognitive levels, and closed-mindedness. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(7), 637–648. <https://doi.org/10.1002/tea.3660300704>
- von Rhöneck, C. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie*(34), 10–14.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45–69. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90018-3)
- Watts, D. M. (1983). *A study of alternative frameworks in school science* [Dissertation]. University of Surrey, United Kingdom.
- Widodo, A. & Duit, R. (2004). Konstruktivistische Sichtweisen vom Lehren und Lernen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN*, 10. <https://doi.org/10.25656/01:31602> (Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 10 (2004), S. 233-255).
- Wiener, G. J., Schmeling, S. M. & Hopf, M. (2015). Can grade-6 students understand quarks? Probing acceptance of the subatomic structure of matter with 12-year-olds. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 3(4), 313–322. <https://doi.org/10.30935/scimath/9440>
- Wiesner, H. (2018). Wie man den Lernschwierigkeiten im Physikunterricht wirksam begegnen kann. Ergebnisse aus 50 Jahren fachdidaktischer Forschung. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/894?utm_source=chatgpt.com
- Wiesner, H. & Wodzinski, R. (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In R. Duit (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften* (S. 250–274). IPN.
- Willison, J. W. & Taylor, P. C. (2006). Complementary Epistemologies of Science Teaching. In P. J. Aubusson, A. G. Harrison & S. M. Ritchie (Hrsg.), *Science & Technology Education Library. Metaphor and Analogy in Science Education* (Bd. 30, S. 25–36). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/1-4020-3830-5_3
- Winter, L. & Pilser, A. (2024). Investigating high school students' ideas about energy transfer in simple electric circuits. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, 15(2).
- Wirtz, M. & Kutschmann, M. (2007). Analyse der Beurteilerübereinstimmung für kategoriale Daten mittels Cohens Kappa und alternativer Masse [Analyzing interrater agreement

- for categorical data using Cohen's kappa and alternative coefficients]. *Die Rehabilitation*, 46(6), 370–377. <https://doi.org/10.1055/s-2007-976535>
- Wolfram Demonstrations Project. (2025, 23. März). *Fields and Poynting Vector around a Transformer*. <https://demonstrations.wolfram.com/FieldsAndPoyntingVectorAroundATransformer/>
- Zloklikovits, S. (2025). *Elektromagnetische Strahlung in der Sekundarstufe I unterrichten* [Dissertation], Wien. <https://doi.org/10.25365/thesis.78103>
- Zloklikovits, S. & Hopf, M. (2020). Akzeptanzbefragungen zu elektromagnetischer Strahlung. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen.: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung* (S. 479–482). Universität Duisburg-Essen.
- Zöchling, S. M. (2023). *Students' types of interest in physics revisited* [Dissertation], Wien. <https://doi.org/10.25365/thesis.74729>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eine Batterie als Spannungsquelle mit Oberflächenladungen an ihren metallischen Ausgängen (angelehnt an Härtel, 2012b, S. 4).	10
Abbildung 2: Spannungsquelle mit angeschlossenen Leitern und Oberflächenladungen (angelehnt an Härtel, 2012b, S. 5).....	11
Abbildung 3: Qualitative Darstellung der Oberflächenladungsverteilung auf einem gekrümmten Leiterstück (angelehnt an Chabay & Sherwood, 2015, S. 735).....	11
Abbildung 4: Darstellung der Oberflächenladungen in einem einfachen elektrischen Stromkreis ohne Widerstand (angelehnt an Chabay & Sherwood, 2015, S. 733).	12
Abbildung 5: Ein geschlossener Stromkreis mit Oberflächenladungen (angelehnt an Härtel, 2012b, S. 5).	13
Abbildung 6: Darstellung der Oberflächenladungen in einem einfachen elektrischen Stromkreis mit Widerstand (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 736).	13
Abbildung 7: Wechselwirkung zwischen einem stromführenden Leiter und einer geladenen Metallfolie, um die Existenz von Oberflächenladungen zu demonstrieren.	15
Abbildung 8: Wechselwirkung zwischen einer stromdurchflossenen Serie von Widerständen und einem geladenen Strohhalm, um die Existenz von Oberflächenladungen zu demonstrieren.	16
Abbildung 9: Elektrische Feldlinien bei einer positiven (links) und einer negativen (rechts) Punktladung.....	18
Abbildung 10: Das elektrische Feld in einem stromdurchflossenen Leiter muss dem Leiter folgen (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 722).	19
Abbildung 11: Elektrisches Feld an der Oberfläche eines Leiters. a) Elektrisches Feld in der Nähe eines neutralen Leiters, b) axiale und radiale Komponenten des Feldes bei stromdurchflossenem Leiter, c) resultierendes Gesamtfeld bei stromdurchflossenem Leiter (angelehnt an Sefton, 2002, S. 8).	20
Abbildung 12: Ein Kompassnadel unter einem a) neutralen und b) stromdurchflossenen Leiter (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 674). Die Stromflussrichtung I entspricht in der Abbildung der Elektronenflussrichtung.	21
Abbildung 13: Eine Kompassnadel zeigt in die Richtung des Gesamtmagnetfeldes. Dies ist die Überlagerung des Magnetfeldes der Erde und des Magnetfeldes des stromdurchflossenen Leiters, der durch den Kompass verläuft und in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet ist (adaptiert von Chabay & Sherwood, 2015, S. 675).....	22
Abbildung 14: Linke-Hand-Regel für die Bestimmung der Magnetfeldrichtung bei einem stromdurchflossenen Leiter.	23
Abbildung 15: Feldliniendarstellung des Energieflusses von einer Batterie zu einer Glühlampe durch ein elektromagnetisches Feld (adaptiert von Hobbs, 2014).	26

Abbildung 16: Feldliniendarstellung des Energieflusses von einer Batterie zu einer Glühlampe durch ein elektromagnetisches Feld mit alternativen Konventionen (angelehnt an Sefton, 2002, S. 9).	27
Abbildung 17: Vektordarstellung des Energieflusses von einer Batterie zu einer Glühlampe durch ein elektromagnetisches Feld (angelehnt an Galili & Goihbarg, 2005, S. 143).	28
Abbildung 18: Das Rucksackmodell als Schüler*innenvorstellung zur Energie im elektrischen Stromkreis.	40
Abbildung 19: Der Design-Based-Research Zyklus (Bild adaptiert von Zloklikovits).	51
Abbildung 20: Didaktische Rekonstruktion nach Kattmann et al. (1997).	55
Abbildung 21: Ablauf der Akzeptanzbefragungen nach Jung (1992).	58
Abbildung 23: Übersicht bestehender Unterrichtskonzeptionen zur Elektrizitätslehre mit Fokus auf Energie, Felder und Oberflächenladungen.	70
Abbildung 24: Vorgehensweise im Designprojekt in vier Phasen.	74
Abbildung 25: Elektrischer Föhn und Smartphone als Beispiel für Alltagskontexte, die für Lernende von interessant sind.	78
Abbildung 26: Hands-on-Versuch mit Strommesszange in einem Stromkreis, bestehend aus einer Batterie, einer Glühlampe, einem Ventilator und Leiterkabeln.	80
Abbildung 27: Energie-Hand-Regel für die linke Hand (siehe LLA im Anhang)	85
Abbildung 28: Bilder, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 1 gezeigt wurden. Zu sehen sind a) eine Lampe, b) eine Handyladestation, c) ein Föhn und d) eine Zahnbürste.	91
Abbildung 29: Darstellung, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 1 zur Konzeptidee K2.1 gezeigt wird.	93
Abbildung 30: a) schematische Darstellung des Demonstrationsversuchs und b) Darstellung der elektrischen Feldlinien in einem geschlossenen Stromkreis, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 1 zur Konzeptidee K2.2 gezeigt werden.	93
Abbildung 31: Darstellung des elektromagnetischen Feldes um einen einfachen Stromkreis, bestehend aus einer Energiequelle, Kabeln und einem Energieumwandler. Zu sehen sind das elektrische Feld, magnetische Feld und der Energiefluss, sowie eine Referenz zur Linken-Hand Regel, die im Rahmen des dritten Blocks der Interviewrunde 1 zur Konzeptidee K3 gezeigt werden.	95
Abbildung 32: Darstellung, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 2 zur Konzeptidee K2.1 bei der Variation a gezeigt wird.	136
Abbildung 33: Darstellung, die im Rahmen des ersten Blocks der Interviewrunde 2 zur Konzeptidee K2.1 bei der Variation b gezeigt wird.	137
Abbildung 34: Kognitives Stoppschild zur Unterscheidung des magnetischen und elektrischen Feldes in Interviewrunde 2.	137

Abbildung 35: Kognitives Stoppschild zur Einführung des Begriffs ‚elektromagnetisches Feld‘ in Interviewrunde 2.	139
Abbildung 36: Darstellung des elektromagnetischen Feldes um einen einfachen Stromkreis, bestehend aus einer Energiequelle, Kabeln und einem Energieumwandler. Zu sehen sind das elektrische Feld, magnetische Feld und der Energiefluss, sowie eine Referenz zur Linken-Hand Regel, die im Rahmen der Konzeptidee K5 in Interviewrunde 2 gezeigt wird.	140
Abbildung 37: Beispielhafte Mind-Map zur Organisation der Begriffe für Interviewrunde 2. Das Diagramm wurde exemplarisch erstellt und stellt kein direktes Ergebnis der Interviews dar.	141
Abbildung 38: Unterscheidung von Gleich- und Wechselstromkreisen in Interviewrunde 2.	142
Abbildung 39: Rekonstruierte Mindmap von IP8.....	178
Abbildung 40: Rekonstruierte Mindmap von IP9.....	179
Abbildung 41: Rekonstruierte Mindmap von IP10.....	180
Abbildung 42: Kognitives Stoppschild zur Unterscheidung der Oberflächenladungen und der Ladungen im Leiterinneren.	195
Abbildung 43: Versuch 2.2 zum elektrischen Feld. Zu sehen ist der Versuchsaufbau mit einer Hochspannungsquelle, vier in Reihe geschalteten Widerständen und einem Alufolienstück; das an einem Faden befestigt ist und in die Nähe des ersten Widerstands gehalten wird.....	196
Abbildung 44: Rekonstruierte Mindmap von IP21.....	239
Abbildung 45: Rekonstruierte Mindmap von IP20.....	240
Abbildung 46: Rekonstruierte Mindmap von IP16.....	242
Abbildung 47: Kabelgebundene und kabellose Systeme. Links ist eine Tischlampe zu sehen, die über ein Kabel mit der Steckdose verbunden ist. Rechts ist ein Smartphone zu sehen, bei dem der Akku kabellos am Ladepad geladen werden kann.	254
Abbildung 48: Zuordnung der Begriffe Energiequelle und -umwandler an einem Beispiel. Der elektrische Föhn stellt dabei den Energieumwandler und die Steckdose die Energiequelle dar.	257
Abbildung 49: Kompass-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes. a) Der Kompass wird in einem offenen Stromkreis unter ein Leiterkabel gelegt und zeigt nach Norden. b) Der Kompass lenkt sich unter dem stromdurchflossenen Leiter senkrecht zum Kabel aus.	260
Abbildung 50: Magnetische Feldlinien beim Kompass-Versuch. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines elektrischen Leiters, durch den ein Strom I fließt. Um den Leiter entsteht ein Magnetfeld, das mit kreisförmigen Magnetfeldlinien dargestellt werden kann. a) Ein Kompass wird an verschiedene Positionen gehalten und man kann erkennen, dass sich die Nadel entlang des Magnetfelds ausrichtet. b) Die Richtung des Magnetfeldes kann mit der linken Hand bestimmt werden: Der Daumen zeigt am Kabel entlang in die Elektronenflussrichtung, die übrigen Finger krümmen sich um das Leiterkabel in Richtung des Magnetfeldes.....	261

Abbildung 51: Stromzangen-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes. a) Das Display der Stromzange zeigt 00.00 A an, wenn sie nicht um ein Kabel gehalten wird. b) Das Display der Stromzange zeigt 00.15 A an, wenn die Stromzange um ein Kabel gehalten wird.	262
Abbildung 52: Magnetische Feldlinien beim Stromzangen-Versuch. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines elektrischen Leiters, durch den ein Strom I fließt. Um den Leiter entsteht ein Magnetfeld, das mit kreisförmigen Magnetfeldlinien dargestellt werden kann. Die Strommesszange wird um den Leiter gehalten und bestimmt die Stromstärke über das Magnetfeld.	263
Abbildung 53: Unterschiedliche Darstellungen für Oberflächenladungen. Links ist eine Batterie zu sehen, an deren Polen sich negative und positive Oberflächenladungen sammeln. In der Mitte ist die Darstellung der Batterie als Schaltsymbol zu sehen. Rechts ist ein Querschnitt des Leiters zu sehen, der mit dem positiven und negativen Pol der Batterie verbunden ist. Man kann erkennen, dass sich die Oberflächenladungen rund um den Leiter verteilen.	265
Abbildung 54: Abschnitt eines Leiters mit positiven Oberflächenladungen. Die positiven Ladungen an der Oberfläche werden mit einem Plus ,+' rund um den Leiter dargestellt, negative mit einem Minus ,-'	266
Abbildung 55: Abschnitt eines Leiters mit Ladungen im Leiterinneren. Die Ladungen im Inneren des Leiters werden eingekreist und grau gezeichnet, um sie von den Oberflächenladungen zu unterscheiden.	266
Abbildung 56: Einfacher Stromkreis mit Batterie und Kabeln.....	266
Abbildung 57: Oberflächenladungen in einem offenen Stromkreis. Die Ladungen verteilen sich im ersten Moment gleichmäßig entlang der Kabel und und bleiben dann statisch auf der Leiteroberfläche. Zu beachten ist, dass die Ladungen hier exemplarisch an einer Seite des Leiters gezeichnet werden, sich aber tatsächlich rund um den Leiter anordnen (siehe Abbildung 54).....	267
Abbildung 58: Versuch zum elektrischen Feld. Zu sehen ist eine Hochspannungsquelle, die mit fünf in Serie geschalteten Ohm'schen Widerständen über ein Stativ verbunden ist. An die Widerstände wird ein Strohhalm gehalten, der über einen Faden aufgehängt wird. a) das schwarz angemalte Ende des Strohhalms wendet sich dem Widerstand rechts außen zu. b) das andere Ende des Strohhalms wendet sich dem Widerstand links außen zu.	269
Abbildung 59: Darstellung des elektrischen Feldes im offenen Stromkreis.....	270
Abbildung 60: Darstellung des elektrischen Feldes im geschlossenen Stromkreis.....	270
Abbildung 61: Energie-Hand-Regel für die linke Hand.	272
Abbildung 62: Konstruktion des Energieflusses im einfachen Stromkreis mithilfe des elektromagnetischen Feldes.	273
Abbildung 63: Gegenüberstellung eines Gleichstrom- und Wechselstromkreises. Oben ist jeweils ein Ausschnitt des Leiterkabels zu sehen, unten der geschlossene Gleich- bzw. Wechselstromkreis. Die Stromrichtung I ist mit grauen Pfeilen markiert.	277
Abbildung 64: Rucksackmodell nach Härtel (Härtel, 1985). Zu sehen sind die Elektronen als kleine Wesen, die an der Batterie mit Energie beladen werden. Diese Energiepakete laden sie	

am Energieumwandler ab. Anschließend gehen die kleinen Wesen wieder zurück zur Batterie, um neu beladen zu werden.	282
Abbildung 65: Kisten mit Versuchsmaterialien für die Durchführung des LLAs.....	285
Abbildung 66: Zeitplan für die Durchführung des Lehr-Lern-Arrangement (LLA).	286
Abbildung 67: Kodierschema zur Erstellung eines sechsstelligen Codes zur Wahrung der Identität der teilnehmenden Schüler*innen.	310
Abbildung 68: Übersicht der Zugriffsberechtigungen auf das Datenmaterial der Studie. ...	311
Abbildung 69: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für alle Items. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.....	312
Abbildung 70: Vergleich der erreichten Gesamtpunktzahl aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	313
Abbildung 71: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 1 zu kabelgebundenen Systemen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	314
Abbildung 72: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 2 zu kabellosen Systemen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.....	315
Abbildung 73: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 3 zu Energieumwandlern. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	316
Abbildung 74: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 4 zu Energiequellen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	317
Abbildung 75: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 5 zur Definition des magnetischen Feldes. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	318
Abbildung 76: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 6 zum magnetischen Feld (Multiple Choice). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	319
Abbildung 77: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 7 zu Feldern um den Stromkreis (Multiple Choice). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	320
Abbildung 78: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 8 zum elektrischen Feld (Multiple Choice). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	321
Abbildung 79: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 9 zur Definition des elektrischen Feldes. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	322

Abbildung 80: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 10 zum Weg der Energie (Zeichnung). Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	323
Abbildung 81: Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 11 zu Gleich- und Wechselstromkreisen. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.	324
Abbildung 82: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Prätest.	326
Abbildung 83: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Posttest.	327
Abbildung 84: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Prätest.	330
Abbildung 85: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Posttest.	331
Abbildung 86: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 7 aus dem Posttest....	334
Abbildung 87: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 8 aus dem Posttest....	335
Abbildung 88: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 8 aus dem Posttest....	337
Abbildung 89: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 1 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	339
Abbildung 90: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 2 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	340
Abbildung 91: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 3 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	341
Abbildung 92: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 4 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	342
Abbildung 93: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 5 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	343
Abbildung 94: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 6 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	344
Abbildung 95: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 7 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	345
Abbildung 96: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 8 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	346
Abbildung 97: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 9 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	347
Abbildung 98: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 10 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	348

Abbildung 99: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 11 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	349
Abbildung 100: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 12 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	350
Abbildung 101: Relative Häufigkeiten der Antworten auf Frage 13 des zweiten Fragebogens, dargestellt auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala.	351
Abbildung 102: Weiterentwicklung der Repräsentation der Energieübertragung in einem einfachen elektrischen Stromkreis durch Felder. Links: Interviewrunde 1. Rechts: Finale Version.	417
Abbildung 103: Weiterentwicklung der Repräsentation zum Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld. Links: Version während der Intervention im realen Klassensetting. Rechts: Finale Version.	417

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ebenen und Arbeitsbereiche bzw. Prozessschritte des Entwicklungs- und Forschungszyklus im Design Bades Research (adaptiert von Haagen-Schützenhöfer, 2016, S. 11).	50
Tabelle 2: Stichprobe für Interviewrunde 1.	89
Tabelle 3: Konzeptideen für den ersten Block zu elektrischen Energieübertragungssystemen aus der ersten Interviewrunde.	91
Tabelle 4: Konzeptideen für den zweiten Block zu elektromagnetischen Feldern aus der ersten Interviewrunde.	92
Tabelle 5: Konzeptideen für den dritten Block zur Energieübertragung durch elektromagnetische Felder aus der ersten Interviewrunde.	95
Tabelle 6: Übersicht der Kodierungen für die erste Runde an Akzeptanzbefragungen.	98
Tabelle 7: Bewertungsschema für die Analyse der Transkripte.	98
Tabelle 8: Kodierungen zur 1. Konzeptidee zur Einführung von elektrischen Systemen als Energieübertragungssystem in der ersten Interviewrunde.	100
Tabelle 9: Übersicht der genannten Beispiele zur Konzeptidee 1 in der ersten Interviewrunde.	102
Tabelle 10: Kodierungen zur 2.1. Konzeptidee zum magnetischen Feld in der ersten Interviewrunde.	103
Tabelle 11: Kodierungen zur 2.2. Konzeptidee zum elektrischen Feld in der ersten Interviewrunde.	106
Tabelle 12: Übersicht der genannten Beispiele aus Aufgabe A2 zur Konzeptidee 2.2.	110
Tabelle 13: Kodierungen zur 3.1. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in der ersten Interviewrunde.	110
Tabelle 14: Kodierungen zur 3.3. Konzeptidee zum Rucksackmodell in der ersten Interviewrunde.	114
Tabelle 15: Stichprobe für Interviewrunde 2.	131
Tabelle 16: Konzeptideen für den ersten Block zu elektrischen Energieübertragungssystemen aus der zweiten Interviewrunde.	133
Tabelle 17: Konzeptideen für den zweiten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen) aus der zweiten Interviewrunde.	135
Tabelle 18: Konzeptideen für den dritten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung) aus der zweiten Interviewrunde.	142
Tabelle 19: Übersicht der Kodierungen für die zweite Runde an Akzeptanzbefragungen. ..	144
Tabelle 20: Kodierungen zur 1. und 2. Konzeptidee zur Einführung von elektrischen Systemen als Energieübertragungssystemen in der zweiten Interviewrunde.	145

Tabelle 21: Kodierungen zur 3. Konzeptidee zum magnetischen Feld in der zweiten Interviewrunde.	150
Tabelle 22: Kodierungen zur 4. Konzeptidee zum elektrischen Feld in der zweiten Interviewrunde.	153
Tabelle 23: Übersicht der genannten Beispiele aus der zweiten Aufgabe zur Konzeptidee 4 in Interviewrunde 2.	157
Tabelle 24: Kodierungen zur 5. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in der zweiten Interviewrunde.	157
Tabelle 25: Kodierungen zur 7. Konzeptidee zu Gleichstrom- und Wechselstromkreisen in der zweiten Interviewrunde.	165
Tabelle 26: Kodierungen zur 8. Konzeptidee zur Energieerhaltung in der zweiten Interviewrunde.	168
Tabelle 28: Kodierungen zur 9. Konzeptidee zur Energieerhaltung in der zweiten Interviewrunde.	170
Tabelle 29: Stichprobe für Interviewrunde 3.	190
Tabelle 30: Konzeptideen für den ersten Block zu elektrischen Energieübertragungssystemen aus der dritten Interviewrunde.	192
Tabelle 31: Konzeptideen für den zweiten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen) aus der dritten Interviewrunde.	193
Tabelle 32: Konzeptideen für den dritten Block zu Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung) aus der dritten Interviewrunde.	198
Tabelle 33: Übersicht der Kodierungen für die dritte Runde an Akzeptanzbefragungen.	200
Tabelle 34: Kodierungen zur 1. Konzeptidee zur Unterscheidung von kabellosen und kabelgebundenen Systemen in der dritten Interviewrunde.	201
Tabelle 35: Aufgabe 1.1, Beispiele für kabelgebundene Systeme	203
Tabelle 36: Aufgabe 1.2, Beispiele für kabellose Systeme.	203
Tabelle 37: Kodierungen zur 2. Konzeptidee zur Unterscheidung von Energiequellen und -umwandlern in der dritten Interviewrunde.	204
Tabelle 38: Übersicht der Synonyme für Konzeptidee 2.	206
Tabelle 39: Kodierungen zur 3. Konzeptidee zum magnetischen Feld in der dritten Interviewrunde.	207
Tabelle 40: Übersicht der genannten Beispiele aus Aufgabe A3.2.	209
Tabelle 41: Kodierungen zur 4. Konzeptidee zu den Oberflächenladungen in der dritten Interviewrunde.	209
Tabelle 42: Kodierungen zur 5. Konzeptidee zum elektrischen Feld in der dritten Interviewrunde.	213
Tabelle 43: Übersicht der genannten Beispiele aus der Aufgabe zur Konzeptidee 5.	215

Tabelle 44: Kodierungen zur 6. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen in der dritten Interviewrunde.....	215
Tabelle 45: Kodierung zur 7. Konzeptidee zur Energieübertragung in elektrischen Systemen II in der dritten Interviewrunde.....	217
Tabelle 46: Kodierungen zur 8. Konzeptidee zu Gleichstrom- und Wechselstromkreisen in der dritten Interviewrunde.....	217
Tabelle 47: Kodierungen zur 9. Konzeptidee zur Energieerhaltung in der dritten Interviewrunde.....	221
Tabelle 48: Kodierungen zur 10. Konzeptidee zum Rucksackmodell in der dritten Interviewrunde.....	224
Tabelle 49: Erklärung der Icons, die in der Lehrer*innenhandreichung verwendet werden.	252
Tabelle 50: Inhalte zu Block 1, Sequenz 1.1 und 1.2.....	253
Tabelle 51: Überblick über die Schritte zu Block 1, Sequenz 1.1.....	253
Tabelle 52: Überblick über die Schritte zu Block 1, Sequenz 1.2.....	255
Tabelle 53: Inhalte zu Block 2, Sequenz 2.1-2.3.....	258
Tabelle 54: Überblick über die Schritte zu Block 2, Sequenz 2.1.....	259
Tabelle 55: Überblick über die Schritte zu Block 2, Sequenz 2.2.....	264
Tabelle 56: Überblick über die Schritte zu Block 2, Sequenz 2.3.....	271
Tabelle 57: Inhalte zu Block 3, Sequenz 3.1-3.2.....	276
Tabelle 58: Überblick über die Schritte zu Block 3, Sequenz 3.1.....	276
Tabelle 59: Überblick über die Schritte zu Block 3, Sequenz 3.2.....	280
Tabelle 60: Übersicht der benötigten und optionalen Materialien für die Durchführung des LLAs.....	285
Tabelle 61: Übersicht der Inhalte des LLAs, unterteilt in drei Blöcken.....	289
Tabelle 62: Übersicht der sieben teilnehmenden Klassen an der Studie.....	291
Tabelle 63: Übersicht der Schüler*innen, die den Fragebogen 1, Fragebogen 3 und den Fragebogen 1 und 3 ausgefüllt haben.....	294
Tabelle 64: Initiale Übersicht der Fragen, die für die quantitative Analyse des Prä- und Posttests herangezogen wurden. Die Abkürzung ‚MC‘ steht für ‚Multiple Choice‘.....	296
Tabelle 65: Finale Übersicht der Fragen, die für die quantitative Analyse des Prä- und Posttests herangezogen wurden. Die Abkürzung ‚MC‘ steht für ‚Multiple Choice‘.....	297
Tabelle 66: Übersicht der neuen Codebezeichnungen für die quantitative Analyse des Prä- und Posttests.....	297
Tabelle 67: Übersicht der Anzahl der Schüler*innen, die den Fragebogen 1-3 ausgefüllt haben.....	300
Tabelle 68: Rahmenbedingungen zu den Nachbesprechungen mit den Lehrpersonen.....	301

Tabelle 69: Übersicht der Fragen, die für die qualitative Analyse des Prä- und Posttests herangezogen wurden.....	302
Tabelle 70: Bewertungsschema für die Analyse der Schüler*innenantworten.	303
Tabelle 71: Übersicht der Fragen, die für das Interrater verwendet wurden.	304
Tabelle 72: Übersicht der Fragebögen, die von den drei Interratern kodiert wurden.	305
Tabelle 73: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Gesamtpunktezahl aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest.....	313
Tabelle 74: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 1 zu kabelgebundenen Systemen.	314
Tabelle 75: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 2 zu kabellosen Systemen.	315
Tabelle 76: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 3 zu Energieumwandlern.	316
Tabelle 77: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 4 zu Energiequellen.	317
Tabelle 78: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 5 zur Definition des magnetischen Feldes.	318
Tabelle 79: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 6 zum magnetischen Feld (Multiple Choice).	319
Tabelle 80: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 7 zu Feldern um den Stromkreis (Multiple Choice).	320
Tabelle 81: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für das Item 8 zum elektrischen Feld (Multiple Choice).	321
Tabelle 82: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für Item 9 zur Definition des elektrischen Feldes.	322
Tabelle 83: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für Item 10 zum Weg der Energie (Zeichnung).	323
Tabelle 84: Statistische Kennwerte beim Vergleich der erreichten Punkte aller Schüler*innen im Prätest gegenüber dem Posttest für Item 11 zu Gleich- und Wechselstromkreisen.....	324
Tabelle 85: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Prätest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.	328
Tabelle 86: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 10b bzw. 12b aus dem Posttest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.	328

Tabelle 87: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Prätest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.	332
Tabelle 88: Ergebnisse der Schüler*innenantworten für das Item 12 bzw. 14 aus dem Posttest. Zu sehen ist jeweils die Schüler*innenanzahl, der ein entsprechender Code zugeordnet wurde.	332
Tabelle 89: Statistische Kennwerte (Mittelwert $\bar{x}$, Varianz σ^2 und Standardabweichung σ) für die Ergebnisse des Items 7 aus dem Posttest.....	334
Tabelle 90: Statistische Kennwerte (Mittelwert $\bar{x}$, Varianz σ^2 und Standardabweichung σ) für die Ergebnisse des Items 8 aus dem Posttest.....	336
Tabelle 91: Statistische Kennwerte (Mittelwert $\bar{x}$, Varianz σ^2 und Standardabweichung σ) für die Ergebnisse des Items 15 aus dem Posttest.....	337
Tabelle 92: Übersicht der statistischen Kennwerte für den Fragebogen 2, der eine fünfstufige Likert-Skala nutzte. Zu sehen sind die ermittelten Mittelwerte ($\bar{x}$), Varianzen (σ^2), Standardabweichungen (σ) und Mediane ($\tilde{x}$) für die Gesamtstichprobe $N = 87$	338
Tabelle 93: Verknüpfung der domänenspezifischen Designprinzipien mit den entsprechenden Konzeptideen sowie kurze Reflexion zur Wirksamkeit.	427

Anhang

1. Interviewleitfäden (Runde 1-3) aus der Interviewstudie
2. Fragebögen 1-3 aus der Implementationsstudie
3. Kodierleitfaden Fragebogen 1 und 3 (Prä- und Posttest)
4. Material des LLAs: Lehrer*innenhandreichung, Arbeitsblätter, Bilderkarten, PPT

Die Transkripte der Schüler*inneninterviews und Lehrer*inneninterviews können von der Autorin auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

Anhang 1:

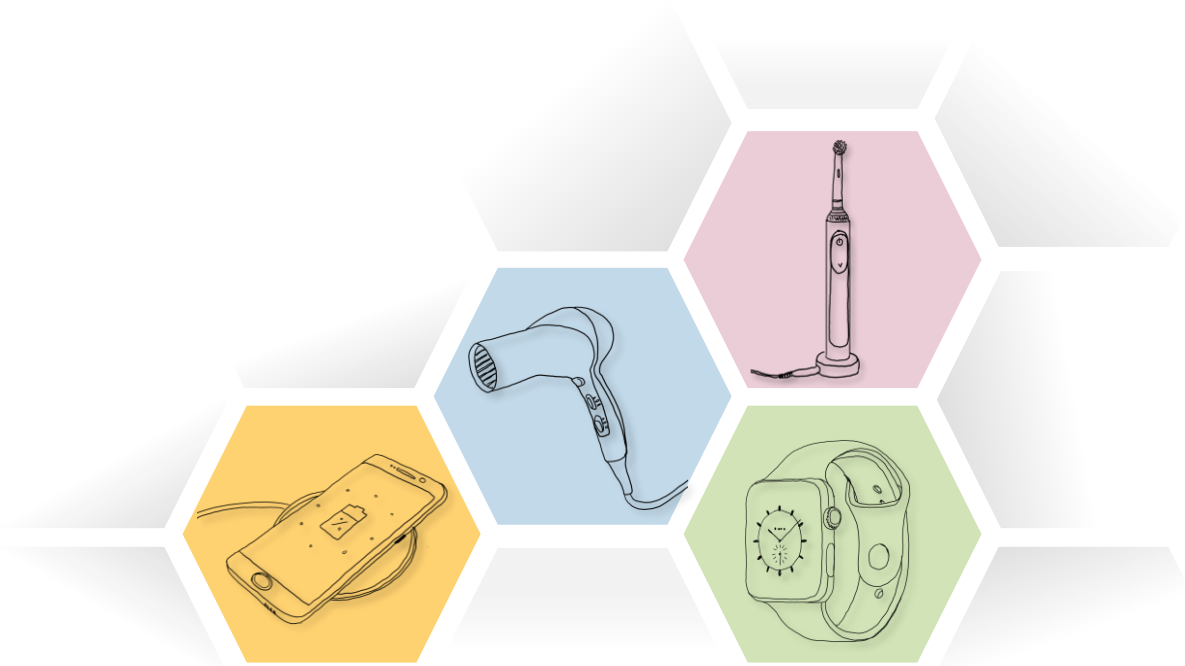
Interviewleitfäden (Runde 1-3) aus der Interviewstudie



universität
wien



PH
Wien



Akzeptanzbefragung

ZUR ENERGIEÜBERTRAGUNG IN ELEKTRISCHEN
SYSTEMEN

INTERVIEWRUNDE 1

Akzeptanzbefragung

zur Energieübertragung in elektrischen Systemen

A. Konzeptideen (Übersicht)

K1	Elektrische Systeme (elektrische Gleich- und Wechselstromkreise) können Energie übertragen.
K1.1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z.B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) <i>oder</i> kabellosen Systemen (z.B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
K1.2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z.B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z.B. Leiterkabel).
K2	Um (geschlossene) elektrische Systeme gibt es magnetische und elektrische Felder, die sich experimentell nachweisen lassen (Versuche).
K2.1	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein magnetisches Feld. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Stromzange) bestimmt werden.
K2.2	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein elektrisches Feld. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Alufolienstück) bestimmt werden.
K3	In einem elektrischen System wird Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen.
K3.1	Die Energieübertragung findet durch das Ausbreiten des elektromagnetischen Feldes statt. Dies passiert in Lichtgeschwindigkeit. (Ausschluss der Elektronen als Energieübertragungsmedium)
K3.2	Der Poynting-Vektor beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld (Rückl, 1991, S. 104).
K3.3	Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z.B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
K3.4	Der Energietransport im elektromagnetischen Feld ist sowohl beim elektrischen als auch beim magnetischen Kreis <i>systemgebunden</i> ; d.h. das elektromagnetische Feld löst sich nicht vom betreffenden System (Rückl, 1991, S. 104).

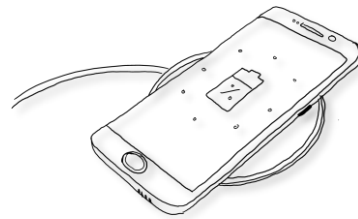
B. Interviewleitfaden**K1 Elektrische Systeme (elektrische Gleich- und Wechselstromkreise) können Energie übertragen.**

K1.1 Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z.B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) *oder* kabellosen Systemen (z.B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.

a)



b)



c)



d)

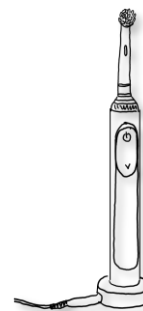


Abbildung 1: a) Lampe, b) Handyladestation, c) Föhn und d) Zahnbürste

E1.1

- ☐ Wenn du den Schalter bei einer Lampe betätigst, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. (Backup: Ähnlich funktioniert es beim Föhn.) Kennst du noch andere Beispiele dafür?
- ☐ Bestimmt hast du schon die neuen Handy-Ladestationen gesehen, bei denen dein Handy ohne Kabel aufgeladen werden kann. Du musst es dafür nur auf die Station legen. (Backup: Ähnlich funktioniert es bei elektrischen Zahnbürsten). Kennst du noch andere Beispiele dafür?
- ☐ Wir beschäftigen uns heute mit elektrischen Stromkreisen. Insbesondere werden wir darüber sprechen, wie die Energie in elektrischen Anlagen übertragen werden kann.

K1.2 Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer **Energiequelle** (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem **Energieumwandler** (z.B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z.B. Leiterkabel).

E1.2 ☐ Die Lampe, der Föhn, das Handy und die elektrische Zahnbürste werden in der Physik als Energieumwandler oder Elektrogeräte bezeichnet. Dabei wird **elektrische Energie** in eine **andere Energieform** umgewandelt. Ein Energieübertragungssystem enthält üblicherweise neben einem **Energieumwandler** auch eine **Energiequelle** (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage, Steckdose). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z.B. Leiterkabel).

☐ In *Abbildung 1a* siehst du eine Tischlampe. Sie ist über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden. Die Steckdose wird in diesem Beispiel als Energiequelle bezeichnet, da sie das elektrische System mit elektrischer Energie versorgt (Hinweis: Die Energie der Steckdose kommt von einem Kraftwerk, eine weitere Energiequelle). Die Tischlampe bezeichnen wir als Energieumwandler, da sie elektrische Energie in Strahlungs- und Wärmeenergie umwandelt.

B1.2 ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Findest du die gewählten Begriffe passend?

P1.2 ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.

A1.2.1 ☐ Betrachte *Abbildung 1c*. Du siehst ein Bild eines Föhns. Ordne die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zu.

A1.2.2 ☐ Betrachte *Abbildung 1d*. Du siehst ein Bild einer elektrischen Zahnbürste. Ordne die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zu.

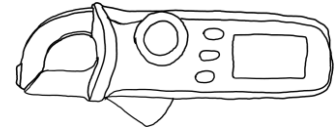
K2 Um (geschlossene) elektrische Systeme gibt es magnetische und elektrische Felder, die sich experimentell nachweisen lassen.

Um zu überprüfen, wie die Energie übertragen wird, untersuchen wir zunächst den Raum um den Leiter. Dazu benötigen wir Messgeräte.

K2.1 Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein magnetisches Feld. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Stromzange) bestimmt werden.

Versuch 1: Nachweis des magnetischen Feldes.

Material: Wechselstromkreis mit Kabeln, Stromzange



Durchführung: Die Stromzange wird um einen stromdurchflossenen Leiter (AC) gegeben.

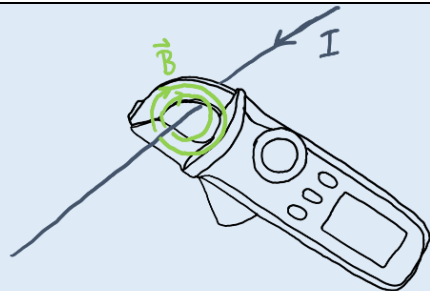
Vermutungen der Schüler*innen festhalten. Gezielte Fragen stellen:

- Was könnte die Strommesszange um den Leiter messen?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Beobachtung: Das Display zeigt eine Stromstärke an. Wie funktioniert das?

Erklärung der Strommesszange (vereinfacht / detailliert, je nach Schüler*in):

E2.1: ☐ Um einen stromdurchflossenen Leiter (AC) entsteht ein (wechselndes) Magnetfeld. Führt man die Strommesszange um diesen Leiter, kann das Magnetfeld mithilfe des weichmagnetischen Kerns bestimmt werden.



B2.1 ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Kannst du dir vorstellen, was hier passiert?

P2.1 ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.

A2.1 ☐ Würde die Strommesszange auch in einem offenen Stromkreis einen positiven Wert anzeigen (z.B. wenn der Föhn nicht angesteckt ist)?

☐ Warum nicht? → **Nachprüfen mit Stromzange**

K2.2 Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein elektrisches Feld. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Alufolienstück) bestimmt werden.

Versuch 2: Nachweis des elektrischen Feldes.

Material: Stromkreis mit Kabeln und Reihenwiderständen ($U = 25 \text{ kV}$; $R = 5 \times 50 \text{ M}\Omega$), Alufolienstück auf Faden

Durchführung: Der Alufolienstück wird auf einen Faden gehängt und in die Nähe des Leiterkabels gebracht.

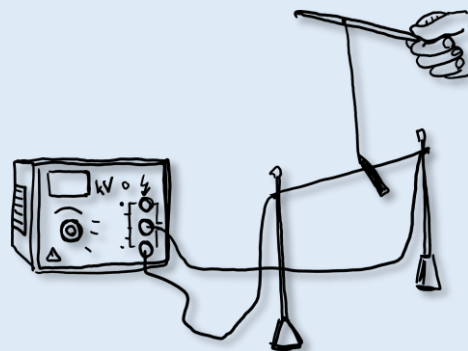
Vermutungen der Schüler*innen festhalten. Gezielte Fragen stellen:

- Was könnte dazu führen, dass das Alufolienstück angezogen / angestoßen wird?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

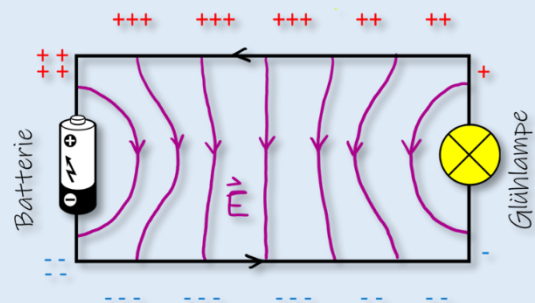
Beobachtung: Das elektrostatische Feld (der Oberflächenladungen) führt zu einer Ablenkung des Alufolienstücks, wenn dieser dem stromdurchflossenen Leiter angenähert wird. (Härtel, 2013)

Erklärung des Versuchs (vereinfacht / detailliert, je nach Schüler*in):

E2.2.1 Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC) entsteht ein elektrisches Feld. Bringt man einen elektrostatisch geladenen Alufolienstück oder ein kleines Stück Aluminiumfolie in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung beobachtet werden (Ablenkung). Dies kann mithilfe des Modells der Oberflächenladungen erklärt werden.



E2.2.2 Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen. Das elektrische Feld der Oberflächenladungen verursacht einen Stromfluss im elektrischen Stromkreis, sobald er geschlossen vorliegt.¹



¹ Die Darstellung der Oberflächenladungsverteilung wurde später vereinfacht.

-
- B2.2** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar? Hilft dir die Grafik, um dir das ganze etwas besser vorzustellen?
- P2.1** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A2.2.1** ☐ Würde das Alufolienstück auch in einem offenen System abgelenkt werden (zwei lose Kabel an Energiequelle angeschlossen, aber nicht miteinander verbunden)?
- A2.2.2** ☐ Nenne ein Beispiel aus einem Alltag, wo ein elektrisches Feld um ein elektrisches System entsteht.
-

K3 In einem elektrischen System wird Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen.

K3.1 Die Energieübertragung findet durch das Ausbreiten des elektromagnetischen Feldes statt. Dies passiert in Lichtgeschwindigkeit. (Ausschluss der Elektronen als Energieübertragungsmedium)

K3.2 Der Poynting-Vektor beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld (Rückl, 1991, S. 104).

Hypothese: In einem elektromagnetischen Feld, das aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld gebildet wird, kann Energie übertragen werden.

Wir haben bisher festgestellt, dass es ein elektrisches Feld aufgrund der Oberflächenladungen gibt, das für den Stromfluss sorgt. Der Stromfluss erzeugt wiederum ein Magnetfeld um den Leiter. Der Energiefluss kann nun näherungsweise mithilfe der Linken-Hand-Regel hergeleitet werden.

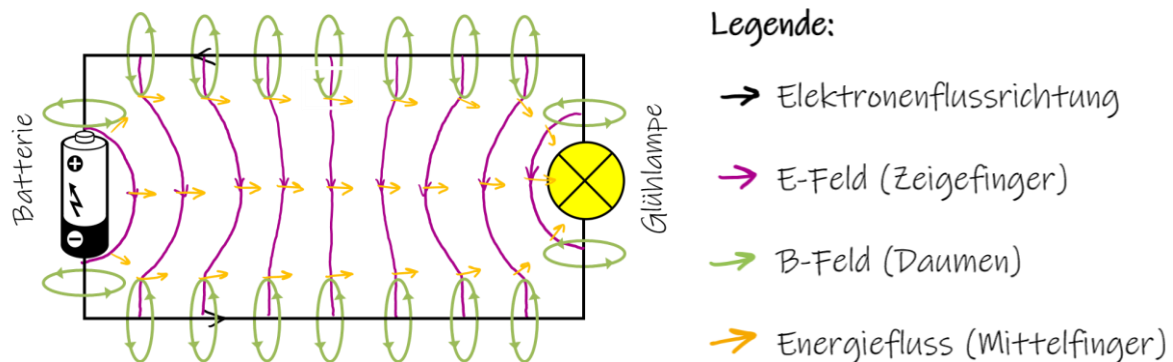


Abbildung 2: Poynting Vektor im einfachen Stromkreis. (Sefton, 2002, S. 9)

E3.1 ☐ **Linke Hand Regel für den Energiefluss:** Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, kann man die Richtung des Energieflusses herleiten. Dies wird mithilfe des sog. Poynting Vektors beschrieben: $S = (1/\mu_0)(E \times B)$.

E3.2

- ☐ Gemeinsame Erarbeitung des Poynting Vektors an ein bis zwei Stellen im Stromkreis.
- ☐ Die Energie tritt aus der Batterie und wird dort durch das elektromagnetische Feld übertragen (**Vorsicht!** Die Elektronen bewegen sich weiterhin nur in eine Richtung, nämlich vom Minus- zum Pluspol!). Auch am Energieumwandler kann beobachtet werden: Hier tritt die Energie ein. Diese Energieübertragung passiert in Lichtgeschwindigkeit.

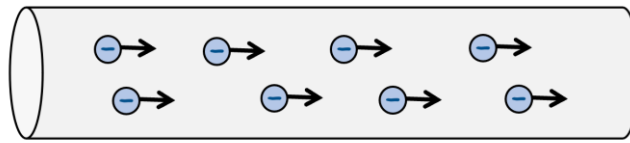
-
- B3.1** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar? Hilft dir die Grafik, um dir das ganze etwas besser vorzustellen?
- P3.1** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A3.1** ☐ Betätigst du den Schalter bei einem Ventilator, so scheint dieser sofort anzugehen. Woher kommt die Energie, um den Ventilator zu betreiben und wie wird diese übertragen? Begründe deine Antwort.
-

- K3.3** Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z.B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
- K3.4** Der Energietransport im elektromagnetischen Feld ist sowohl beim elektrischen als auch beim magnetischen Kreis *systemgebunden*; d.h. das elektromagnetische Feld löst sich nicht vom betreffenden System (Rückl, 1991, S. 104).
-

- E3.3** ☐ Die Bestandteile eines elektrischen Systems sind durch ein elektromagnetisches Feld miteinander verbunden. Das elektromagnetische Feld breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit von der Energiequelle zum Elektrogerät aus. Dabei wird Energie übertragen.
- E3.4** ☐ Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird (*Energieerhaltung*).
- ☐ Die Elektronen transportieren nicht die Energie, die zum Betrieb der Glühlampe notwendig ist (sie bewegen sich in einem Bummeltempo von etwa $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$). Ihre stetige Bewegung ist aber notwendig, damit es ein elektromagnetisches Feld geben kann.
-

- B3.3** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar?
- P3.3** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A3.3** ☐ In vielen elektrischen Systemen findet innerhalb der Kabel ein Elektronenfluss statt. Die Elektronen bewegen sich bei Gleichstrom mit einem Bummeltempo von $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ vom Minus zum Pluspol der Energiequelle (z.B. Batterie). Bei Wechselstrom bewegen sich die Elektronen hin- und her (siehe *Abbildung 3b*). Erkläre, warum sie auch in diesem Fall nicht für die Energieübertragung im Stromkreis verantwortlich sein können.
-

a) **Gleichstrom:** Elektronen bewegen sich in eine Richtung



b) **Wechselstrom:** Elektronen bewegen sich hin- und her

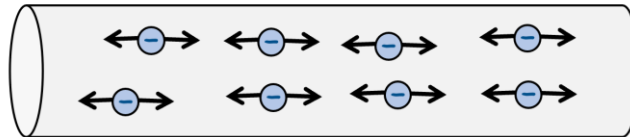


Abbildung 3: Gleich- vs. Wechselstrom.

Literaturverzeichnis

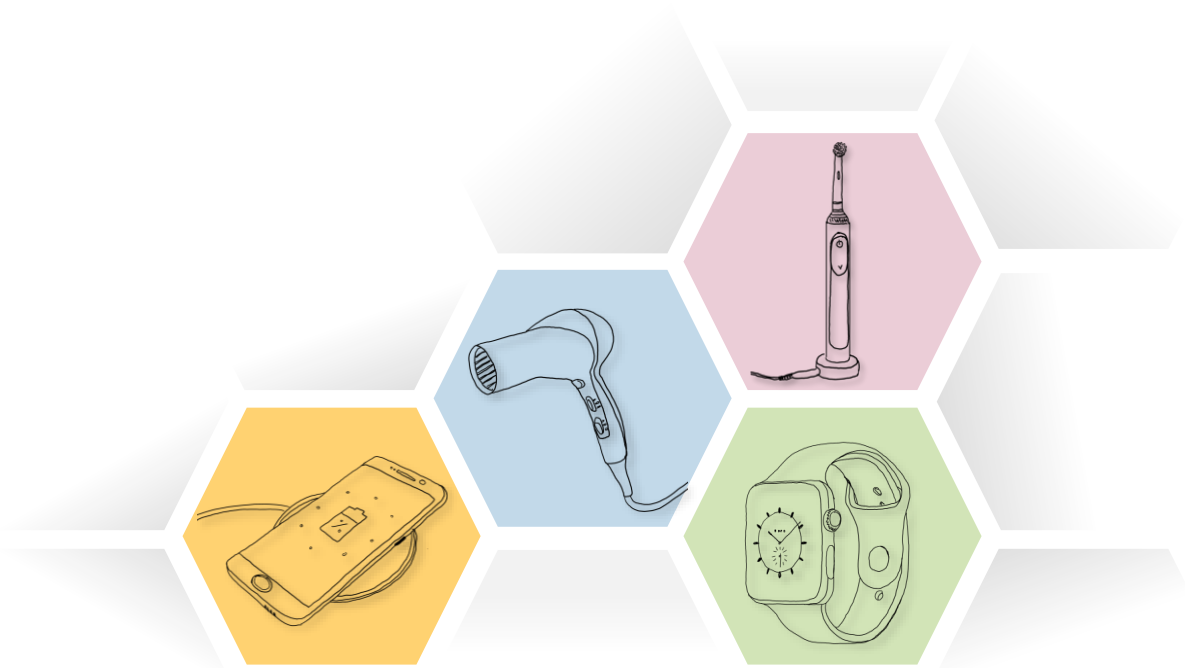
- Härtel, H. (2013). Spannung und Oberflächenladungen - Was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahren wusste. *PdN PHYSIK in der Schule*, *PhiS_2012_5_*, *PhiS_2012_5_S_31-36*.
- Rückl, E. (1991). *Feldenergie: Ein neues didaktisches Konzept*. Teilw. zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr., 1989 u.d.T.: Rückl, Eckhard: Zur Feldenergie im Physikunterricht. BI-Wiss.-Verl.
- Sefton, I. M. (2002). *Understanding Electricity and Circuits: What the Text Books Don't Tell You*. Proceedings of the 9th Science Teachers Workshop. Science Foundation for Physics, Sydney.



universität
wien



PH
Wien



Akzeptanzbefragung

ZUR ENERGIEÜBERTRAGUNG IN ELEKTRISCHEN
SYSTEMEN

INTERVIEWRUNDE 2

A. Konzeptideen (Übersicht)

Block 1: Elektrische Energieübertragungssysteme

Elektrische Systeme (elektrische Gleich- und Wechselstromkreise) können Energie übertragen.

K1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z.B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) oder kabellosen Systemen (z.B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
K2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z.B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z.B. Leiterkabel).

Block 2: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen)

Die Energieübertragung in elektrischen Systemen erfolgt durch elektromagnetische Felder. Zur besseren Übersicht schauen wir uns zunächst die magnetischen und elektrischen Felder einzeln an. Diese lassen sich experimentell nachweisen (Versuche).

K3	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein magnetisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden.
K4	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein elektrisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.
K5	Die Energieübertragung findet durch das elektromagnetische Feld statt. Dies kann mit dem Energiefluss beschrieben werden.
K6	Der Poynting-Vektor beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld mathematisch.

Block 3: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung)

In einem elektrischen System wird Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen. Dies kann in DC und AC-Stromkreisen erfolgen.

K7	Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld kann sowohl bei Gleich- als auch Wechselstromkreisen erfolgen.
K8	Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z.B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
K9	Die Energieübertragung findet in Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld statt.

B. Interviewleitfaden

Block 1: Elektrische Energieübertragungssysteme

Elektrische Systeme (elektrische Gleich- und Wechselstromkreise) können Energie übertragen.

K1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z.B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) <i>oder</i> kabellosen Systemen (z.B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
E1	☐ Wenn du den Schalter bei einer Lampe betätigst, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. (Backup: Ähnlich funktioniert es beim Föhn.) Kennst du noch andere Beispiele dafür? ☐ Bestimmt hast du schon die neuen Handy-Ladestationen gesehen, bei denen dein Handy ohne Kabel aufgeladen werden kann. Du musst es dafür nur auf die Station legen. (Backup: Ähnlich funktioniert es bei elektrischen Zahnbürsten). Kennst du noch andere Beispiele dafür? ☐ Wir beschäftigen uns heute mit elektrischen Stromkreisen. Insbesondere werden wir darüber sprechen, wie die Energie in elektrischen Anlagen übertragen werden kann.
K2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z.B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z.B. Leiterkabel).
E2	☐ Die Lampe, der Föhn, das Handy und die elektrische Zahnbürste werden in der Physik als Energieumwandler oder Elektrogeräte bezeichnet. Dabei wird elektrische Energie in eine andere Energieform umgewandelt. Ein Energieübertragungssystem enthält üblicherweise neben einem Energieumwandler auch eine Energiequelle (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage, Steckdose). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z.B. Leiterkabel). ☐ In <i>Abbildung 1a</i> siehst du eine Tischlampe. Sie ist über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden. Die Steckdose wird in diesem Beispiel als Energiequelle bezeichnet, da sie das elektrische System mit elektrischer Energie versorgt (Hinweis: Die Energie der Steckdose kommt von einem Kraftwerk, eine weitere Energiequelle). Die Tischlampe bezeichnen wir als Energieumwandler, da sie elektrische Energie in Strahlungs- und Wärmeenergie umwandelt.

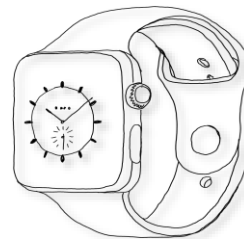
- ☐ In *Abbildung 1b* siehst du ein Smartphone. Es befindet sich auf einem Ladepad, dazwischen sind keine metallischen Kontakte. Das Smartphone kann dadurch aufgeladen werden. Das Smartphone bezeichnen wir als Energieumwandler (in weiterer Folge kann es die elektrische Energie z.B. in Strahlungsenergie umwandeln) und das Ladepad als Energiequelle.

- B1** ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Findest du die gewählten Begriffe passend?
- P1** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A1.1** ☐ Betrachte *Abbildung 1c*. Du siehst ein Bild eines Föhns. Ordne die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zu.
- A1.2** ☐ Betrachte *Abbildung 1d*. Du siehst ein Bild einer elektrischen Zahnbürste. Ordne die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zu.

a)



b)



c)



d)

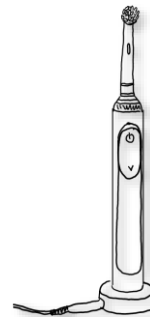


Abbildung 1: a) Tischlampe, b) Smartphone c) Föhn und d) Elektrische Zahnbürste

Block 2: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen)

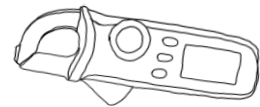
Vielleicht hast du schon einmal gehört, dass es um elektrische Systeme elektromagnetische Felder gibt. Diese sind für die Energieübertragung verantwortlich. Zur besseren Übersicht schauen wir uns zunächst das magnetische und dann das elektrische Feld einzeln an. Dazu untersuchen wir den Raum um den Leiter experimentell.

K3 Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **magnetisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden.

Mit den Interviewpartner*innen wird entweder Versuch 1a oder 1b durchgeführt!

Versuch 1a: Nachweis des magnetischen Feldes.

Material: Spannungsquelle (DC), 2 Kabel, Ventilator, Stromzange



Durchführung: Zunächst wird das Messgerät eingeschaltet und neben den geöffneten Stromkreis gehalten. Anschließend wird der Stromkreis geschlossen der Wert auf dem Display des Messgeräts beobachtet. Der Versuch kann an mehreren Stellen um den Stromkreis wiederholt werden.

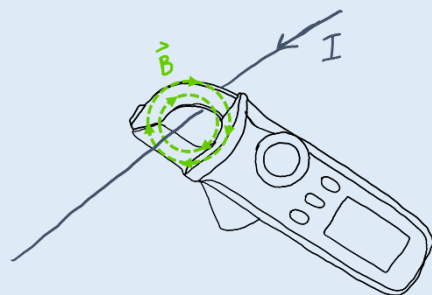
Vermutungen der Schüler*innen festhalten. Gezielte Fragen stellen:

- Was könnte das Messgerät um den Leiter messen?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Beobachtung: Das Display des Messgeräts zeigt beim geschlossenen Stromkreis einen positiven Wert für die Stromstärke an. Wie funktioniert das?

Erklärung der Strommesszange (vereinfacht / detailliert, je nach Schüler*in):

E3.1a ☐ Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC oder AC) entsteht ein (statisches oder wechselndes) Magnetfeld. Führt man das Messgerät um diesen Leiter, kann das Magnetfeld mithilfe des weichmagnetischen Kerns bestimmt werden. Daraus berechnet das Gerät die Stromstärke.



E3.2a ☐ Der Kern der Strommesszange ist ringförmig und hat eine kleine Öffnung auf der Seite des Gehäuses. Darin befindet sich eine Hall-Sonde, ein kleines Metallplättchen aus Kupfer oder ein Halbleiterbauelement. Durch die Hall-Sonde fließt ein kleiner Strom. Durch Anlegen des äußeren Magnetfeldes wirkt auf die negativen Ladungsträger eine Lorentzkraft, die senkrecht zum B-Feld und der Stromrichtung ist. Durch die Ladungstrennung (positive Ladungen auf einer Seite, negative auf der anderen), entsteht die sog. Hall-Spannung. Diese

wird von einer entsprechenden Auswertelektronik erfasst und verwendet, um die zugehörige Stromstärke zu bestimmen.

B3a ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Kannst du dir vorstellen, was hier passiert?

P3a ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.

A3a ☐ Warum zeigt das Display beim geöffneten Stromkreis keinen Wert an?

Versuch 1b: Nachweis des magnetischen Feldes.

Material: Spannungsquelle (DC), 2 Kabel, Ventilator, Kompass



Durchführung: Zunächst wird der Kompass neben den geöffneten Stromkreis gehalten. Anschließend wird der Stromkreis geschlossen und die Kompassnadel beobachtet. Der Versuch kann an mehreren Stellen um den Stromkreis wiederholt werden.

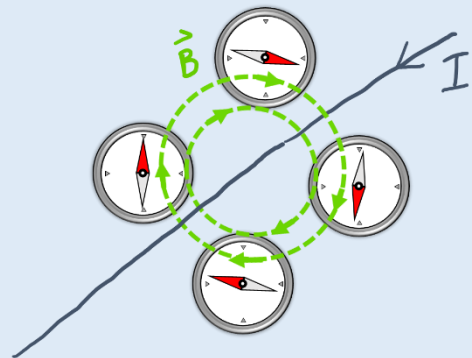
Vermutungen der Schüler*innen festhalten. Gezielte Fragen stellen:

- Wofür kann ein Kompass verwendet werden?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Beobachtung: Die Kompassnadel bewegt sich in der Nähe des stromdurchflossenen Leiters. Wie funktioniert das?

Erklärung des Kompassversuchs (Ørsted Versuch):

E3b ☐ Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC oder AC) entsteht ein (statisches oder wechselndes) Magnetfeld. Bringt man den Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, richtet sich die Kompassnadel senkrecht dazu aus. Daraus kann geschlossen werden, dass das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter verlaufen muss.



B3b ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Kannst du dir vorstellen, was hier passiert?

P3b ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.

A3b ☐ Warum richtet sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht aus?



- ❑ **KOGNITIVES STOPPSCHILD:** Bisher haben wir vom magnetischen Feld um den Leiter gesprochen. Nun schauen wir uns ein weiteres Feld genauer an.
- ❑ Dieses unterscheidet sich in Ursache, Form und Richtung vom magnetischen Feld!

K4 Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **elektrisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.

Versuch 2: Nachweis des elektrischen Feldes.

Material: Stromkreis mit Kabeln und Reihenwiderständen ($U = 10 \text{ kV}$; $R = 5 \times 50 \text{ M}\Omega$), (a) Alufolienstück auf Faden oder (b) Strohhalm auf Faden

Durchführung: Der Versuch wird, wie in den Abbildungen unten zu sehen, aufgebaut. Auf einen Faden wird (a) ein Alufolienstück oder (b) ein Strohhalm befestigt und in die Nähe des Leiterkabels gebracht.

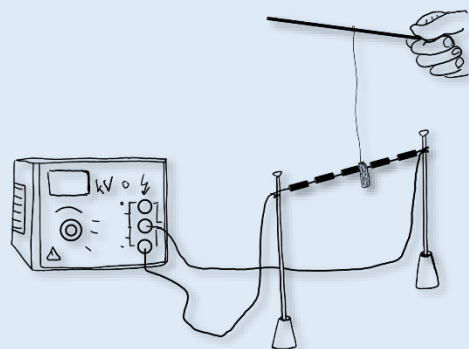
Vermutungen der Schüler*innen festhalten. Gezielte Fragen stellen:

- Was könnte dazu führen, dass das Alufolienstück / der Strohhalm angezogen / angestoßen wird?
- Was ist in der Umgebung eines Leiters?

Beobachtung: Das elektrostatische Feld (der Oberflächenladungen) führt zu einer Ablenkung des Alufolienstücks / Strohhalms, wenn dieser dem (stromdurchflossenen) Leiter angenähert wird.

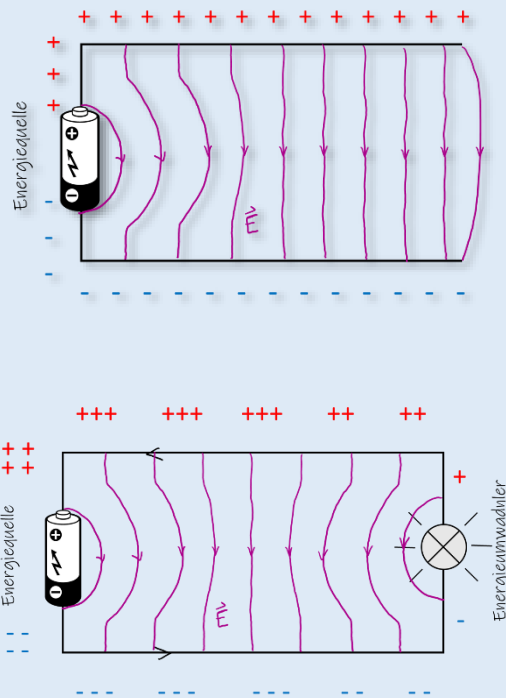
Erklärung des Versuchs (vereinfacht / detailliert, je nach Schüler*in):

E4.1 Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC) entsteht ein elektrisches Feld. Bringt man ein kleines Stück Alufolie oder einen elektrostatisch geladenen Strohhalm in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung beobachtet werden (Anziehung / Abstoßung). Dies kann mithilfe des Modells der Oberflächenladungen erklärt werden.



E4.2 Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen. Das elektrische Feld kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden, die von Plus zu Minus verlaufen. Die Richtung des elektrischen Feldes hat historische Hintergründe.

Das elektrische Feld der Oberflächenladungen verursacht einen Stromfluss im elektrischen Stromkreis, sobald er **geschlossen** vorliegt, d.h. jeder Anschluss der Energiequelle mit je einem Anschluss des Energieumwandlers verbunden ist.



- B4** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar? Hilft dir die Grafik, um dir das ganze etwas besser vorzustellen?
- P4** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A4.1** ☐ Würde (a) das Alufolienstück oder (b) der Strohhalm auch in einem offenen System abgelenkt werden (zwei lose Kabel an Energiequelle angeschlossen, aber nicht miteinander verbunden)?
- A4.2** ☐ Nenne ein Beispiel aus einem Alltag, wo ein elektrisches Feld um ein elektrisches System entsteht.

K5 Die Energieübertragung findet durch das **elektromagnetische Feld** statt. Dies kann mit dem **Energiefluss** beschrieben werden.

K6 Der **Poynting-Vektor** beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld mathematisch.

Hypothese: In einem elektromagnetischen Feld, das aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld gebildet wird, kann Energie übertragen werden.

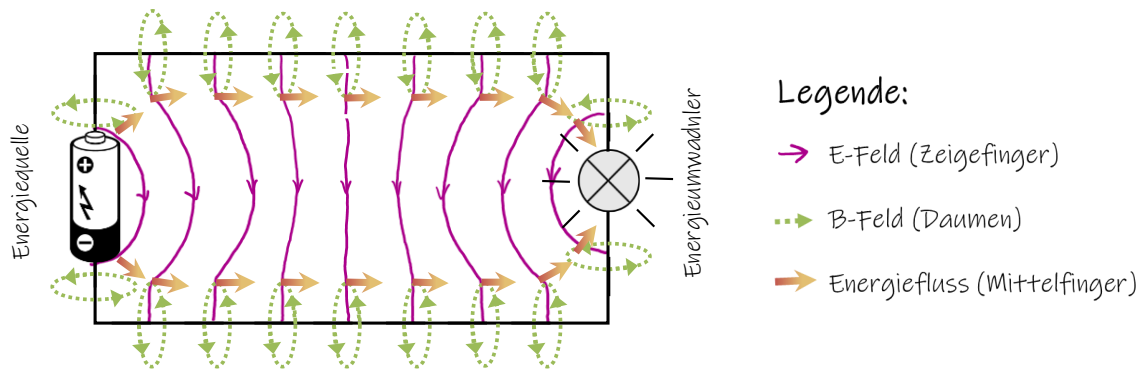


Abbildung 2: Poynting Vektor im einfachen Stromkreis.



- ❑ **KOGNITIVES STOPPSCHILD:** Bis jetzt haben wir einzeln über das elektrische und das magnetische Feld gesprochen, wobei jedes seine eigene Ursache, Form und Richtung hat.
- ❑ Wissenschaftler*innen verwenden den Begriff „elektromagnetisches Feld“ (kurz: EM-Feld), um die Kombination dieser beiden Felder zu benennen.
- ❑ Aber lass dich nicht verwirren! Das elektromagnetische Feld hat keine Richtung wie das elektrische und das magnetische Feld und wird daher auch nicht durch einen der Pfeile in der Abbildung dargestellt! Der Ausdruck "elektromagnetisches Feld" bedeutet einfach "die kombinierte Wirkung des elektrischen und des magnetischen Feldes".

E5

- ❑ Wir haben bisher festgestellt, dass es ein elektrisches Feld aufgrund der Oberflächenladungen gibt, das für den Stromfluss sorgt. Der Stromfluss erzeugt wiederum ein Magnetfeld um den Leiter. Gemeinsam ergeben sie das sogenannte **elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld)**. Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden.

- ❑ **Energie-Hand-Regel für die linke Hand zur Bestimmung des Energieflusses:** Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss ebenfalls senkrecht darauf einzeichnen.

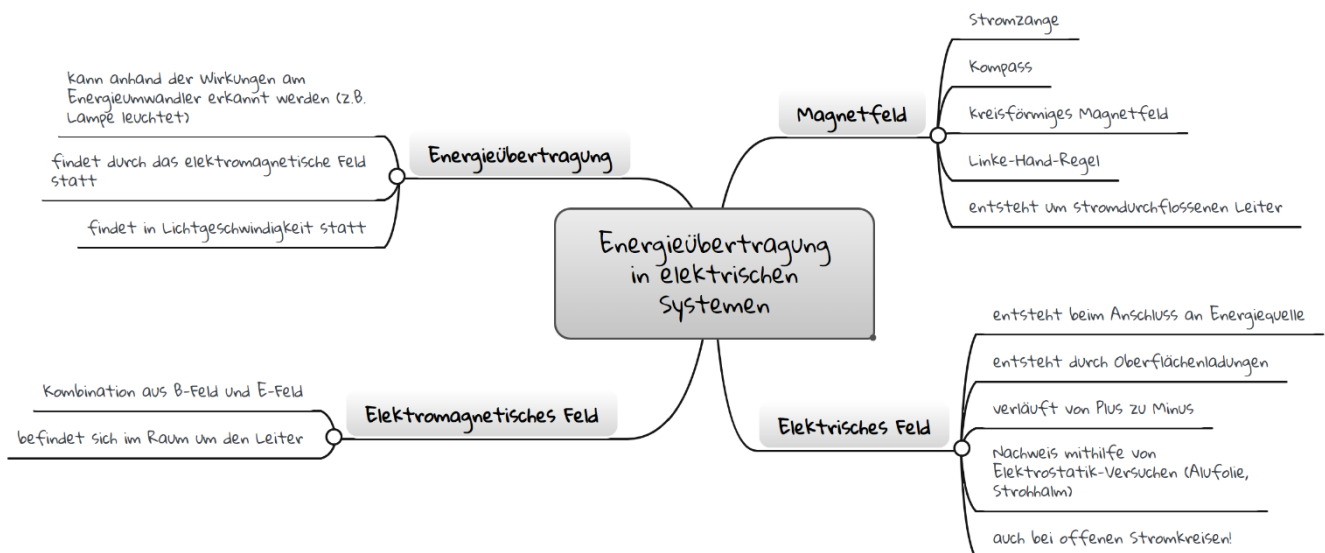
[E6]

- ❑ [Dieser kann mathematisch mithilfe des Poynting Vektors beschrieben werden: $\vec{S} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right) (\vec{E} \times \vec{B})$]
- ❑ Gemeinsame Erarbeitung des Energieflusses [Poynting Vektor] an ein bis zwei Stellen im Stromkreis.
- ❑ Die Energie wird von der Batterie durch das elektromagnetische Feld bis zum Energieumwandler übertragen. Dies kann meist direkt an der Energieumwandlung beobachtet werden (z.B. Lämpchen leuchtet).

- B5** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar? Hilft dir die Grafik, um dir das ganze etwas besser vorzustellen?
- P5** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A5** ☐ Betätigst du den Schalter bei einem Ventilator, so scheint dieser sofort anzugehen. Woher kommt die Energie, um den Ventilator zu betreiben und wie wird diese übertragen? Begründe deine Antwort.

Anmerkung: Was hier schön verdeutlicht werden kann, ist, dass der Energieübertragungsprozess erst dann ermöglicht wird, wenn es sowohl ein E-Feld als auch ein B-Feld gibt. Das E-Feld kommt durch den Anschluss an eine Energiequelle zustande. Das B-Feld wird erst durch einen Stromfluss (AC oder DC) hervorgerufen. Erst wenn diese Bedingungen bestehen, kann Energie durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen werden!

Ergänzung Erstelle ein Mind-Map zu den bisher besprochenen Begriffen, um deine Gedanken zu ordnen. Markiere die Schlüsselbegriffe mit einem Farbstift!



Block 3: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung)

In einem elektrischen System wird Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen. Dies kann in DC und AC-Stromkreisen erfolgen.

K7	Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld kann sowohl bei Gleich- als auch Wechselstromkreisen erfolgen.
E7	☐ Bisher hast du gehört, dass ein elektrisches System aus einer Energiequelle und einem Energieumwandler besteht. Außerdem wird manchmal ein Übertragemedium (z.B. Leiterkabel) benötigt. ☐ Die Energiequelle (z.B. Batterie) pumpt Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche, die ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter hervorrufen. ☐ Durch die Oberflächenladungen entsteht außerdem ein Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld um den Leiter erzeugt. ☐ Gemeinsam ergeben das elektrische und das magnetische Feld um den Leiter das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden (<i>siehe Abbildung 2</i>).
B7	☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar?
P7	☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
A7	☐ In Gleichstromkreisen bewegen sich die Elektronen gerichtet vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle. Bei Wechselstromkreisen hingegen bewegen sie sich hin- und her (<i>siehe Abbildung 3</i>). Wie wird die Energie in Wechselstromkreisen übertragen?

*Ergänzend kann an dieser Stelle eine **Animation** eines Wechselstromkreises gezeigt werden, bei der eine niederfrequente elektromagnetische Welle die Energie transportiert. (Didaktischer Hinweis: Die Erweiterung, dass diese Welle auch ohne Leiter propagieren kann, wäre dann nur mehr der nächste Schritt)*

K8	Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z.B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
E8	☐ Die Bestandteile eines elektrischen Systems sind durch ein elektromagnetisches Feld miteinander verbunden. Das elektromagnetische Feld breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit von der Energiequelle zum Elektrogerät aus. Durch das Feld wird Energie übertragen. ☐ Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht (in einem idealen Stromkreis) der Menge Energie, die am Energieumwandler

wieder aufgenommen wird (*Energieerhaltung*). In der Realität wird ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben.

- B8** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar?
- P8** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A8** ☐ Woran kannst du beim Föhn / bei der elektrischen Zahnbürste erkennen, dass Energie übertragen wurde?
- ☐ Welche Energieumwandlung findet beim Energieumwandler statt?

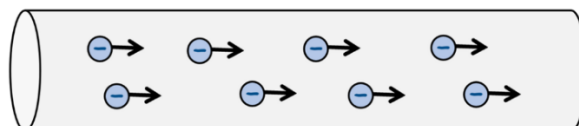
Didaktisches Kommentar: Mittels Anknüpfungsstrategie sollen die Schüler*innen erkennen, dass Elektronen für die Energieübertragung zwar wichtig, aber nicht alleinig verantwortlich sind. Vielmehr sind sie die Ursache es Magnetfeldes, das gemeinsam mit dem elektrischen Feld das **EM-Feld** formt, welches für die Energieübertragung erforderlich ist.

- K9** Die Energieübertragung findet in Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld statt.

- E9** ☐ Die Elektronen transportieren nicht die Energie, die zum Betrieb der Glühlampe notwendig ist (sie bewegen sich in einem Bummeltempo von etwa $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$). Ihre stetige Bewegung ist aber notwendig, damit es ein elektromagnetisches Feld geben kann.

- B9** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar?
- P9** ☐ Versuche in deinen eigenen Worten zu wiederholen, was ich gerade erklärt habe.
- A9** ☐ In vielen elektrischen Systemen findet innerhalb der Kabel ein Elektronenfluss statt. Die Elektronen bewegen sich bei Gleichstrom mit einem ‚Bummeltempo‘ von $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ vom Minus zum Pluspol der Energiequelle (z.B. Batterie). Bei Wechselstrom bewegen sich die Elektronen hin- und her (siehe *Abbildung 3b*). Erkläre, warum sie auch in diesem Fall nicht für die Energieübertragung im Stromkreis verantwortlich sein können.

Gleichstrom (DC): Elektronen bewegen sich in eine Richtung



Wechselstrom (AC): Elektronen bewegen sich hin- und her

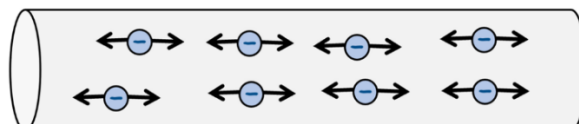


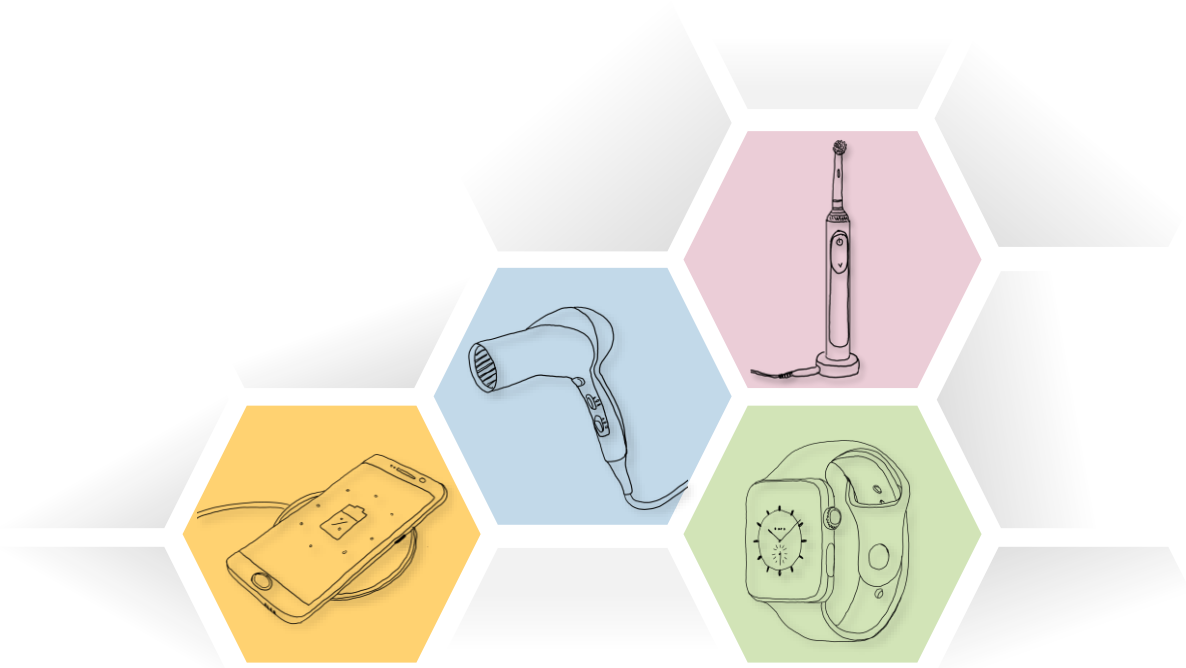
Abbildung 3: Gleich- vs. Wechselstrom.



universität
wien



PH
Wien



Akzeptanzbefragungen

ZUR ENERGIEÜBERTRAGUNG IN ELEKTRISCHEN SYSTEMEN

INTERVIEWRUNDE 3

A. Konzeptideen (Übersicht)

Block 1: Elektrische Energieübertragungssysteme

Elektrische Systeme (elektrische Gleich- und Wechselstromkreise) können Energie übertragen.

K1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z.B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) <i>oder</i> kabellosen Systemen (z.B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
K2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z.B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z.B. Leiterkabel).

Block 2: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen)

Die Energieübertragung in elektrischen Systemen erfolgt durch elektromagnetische Felder. Diese setzen sich aus elektrischen und magnetischen Feldern zusammen, die sich experimentell nachweisen lassen.

K3	Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein magnetisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Kompass, Stromzange) bestimmt werden.
K4	Energiequellen pumpen Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche. Diese generieren ein elektrisches Feld.
K5	Um einen Leiter, der mit einer Energiequelle verbunden ist, gibt es ein elektrisches Feld . Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.
K6	Die Energieübertragung findet durch das elektromagnetische Feld statt. Dies kann mit dem Energiefluss beschrieben werden.
K7	Der Poynting-Vektor beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld mathematisch.

Block 3: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung)

In einem elektrischen System wird Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen. Dies kann in DC und AC-Stromkreisen erfolgen.

K8	Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld kann sowohl bei Gleich- als auch Wechselstromkreisen erfolgen.
K9	Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie umgewandelt (z.B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).
K10	Die Energieübertragung findet in Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld statt.

B. Interviewleitfaden

Block 1: Elektrische Energieübertragungssysteme

Elektrische Systeme (Gleich- und Wechselstromkreise) können Energie übertragen.

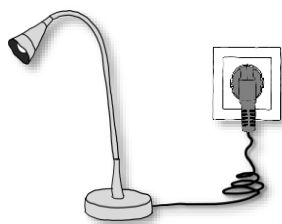
K1	Die Energieübertragung kann in kabelgebundenen Systemen (z.B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) <i>oder</i> kabellosen Systemen (z.B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Handy, ...) stattfinden.
E1	☐ Auf dem Bild siehst du eine Lampe, die über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden ist. Wenn du den Schalter bei einer Lampe betätigst, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. Solche elektrischen Systeme bezeichnen wir als kabelgebundene Systeme . (Backup: Ähnlich funktioniert es beim Föhn.) ☐ Bestimmt hast du schon die neuen Handy-Ladestationen gesehen, bei denen dein Handy ohne Kabel aufgeladen werden kann. Du musst es dafür nur auf die Station legen. Solche elektrischen Systeme bezeichnen wir als kabellose Systeme . (Backup: Ähnlich funktioniert es bei elektrischen Zahnbürsten). ☐ Wir beschäftigen uns heute mit elektrischen Stromkreisen. Insbesondere werden wir darüber sprechen, wie die Energie in elektrischen Systemen übertragen werden kann.
B1	☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Findest du die gewählten Begriffe passend?
P1	☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.
A1.1	☐ Kennst du noch ein anderes Beispiel für ein kabelgebundenes System?
A1.2	☐ Kennst du noch ein anderes Beispiel für ein kabelloses System?
K2	Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer Energiequelle (z.B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem Energieumwandler (z.B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein Überträgermedium (z.B. Leiterkabel).
E2	☐ Die Lampe, der Föhn, das Handy und die elektrische Zahnbürste werden in der Physik als Energieumwandler oder Elektrogeräte bezeichnet. Dabei wird elektrische Energie in eine andere Energieform umgewandelt. Ein Energieübertragungssystem enthält üblicherweise neben einem Energieumwandler

auch eine **Energiequelle** (z.B. Generator, Batterie, Solarzelle, Steckdose). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z.B. Leiterkabel).

- ☐ In *Abbildung 1a* siehst du eine Tischlampe. Sie ist über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden. Die Steckdose wird in diesem Beispiel als Energiequelle bezeichnet, da sie das elektrische System mit elektrischer Energie versorgt (Hinweis: Die Energie der Steckdose kommt von einem Kraftwerk, eine weitere Energiequelle). Die Tischlampe bezeichnen wir als Energieumwandler, da sie elektrische Energie in Strahlungs- und Wärmeenergie umwandelt.
- ☐ In *Abbildung 1b* siehst du ein Handy. Es befindet sich auf einem Ladepad, dazwischen sind keine metallischen Kontakte vorhanden. Hier kann Energie übertragen werden. Das Handy bezeichnen wir als Energieumwandler (in weiterer Folge kann es die elektrische Energie z.B. in Strahlungsenergie umwandeln) und das Ladepad als Energiequelle.

- B2** ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Findest du die gewählten Begriffe passend?
- P2** ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.
- A2.1** ☐ Betrachte *Abbildung 1c*. Du siehst ein Bild eines Föhns. Ordne die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zu.
- A2.2** ☐ Betrachte *Abbildung 1d*. Du siehst ein Bild einer elektrischen Zahnbürste. Ordne die Begriffe Energiequelle und Energieumwandler korrekt zu.

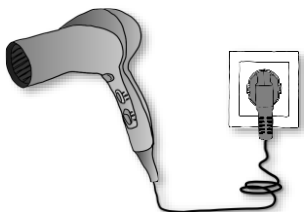
a)



b)



c)



d)



Abbildung 1: a) Tischlampe, b) Smartphone c) Föhn und d) Elektrische Zahnbürste

Block 2: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen)

Vielleicht hast du schon einmal gehört, dass es um elektrische Systeme elektromagnetische Felder gibt. Diese sind für die Energieübertragung verantwortlich. Zur besseren Übersicht schauen wir uns zunächst das magnetische und dann das elektrische Feld einzeln an. Dazu untersuchen wir den Raum um den Leiter experimentell.

K3 Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **magnetisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden.

Versuch 1: Nachweis des magnetischen Feldes.

Material: Spannungsquelle (DC), 2 Kabel, Kompass, Ventilator (optional)



Durchführung: Zunächst wird der Kompass neben den geöffneten Stromkreis gehalten. Anschließend wird der Stromkreis geschlossen und die Kompassnadel beobachtet. Der Versuch kann an mehreren Stellen um den Stromkreis wiederholt werden.

Vermutungen der Schüler*innen festhalten. Gezielte Fragen stellen:

- Wofür kann ein Kompass verwendet werden?
- Was ist in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters?

Beobachtung: Die Kompassnadel bewegt sich in der Nähe des stromdurchflossenen Leiters. Wie funktioniert das?

Erklärung des Kompassversuchs (Ørsted Versuch):

- E3**
- ☐ Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC oder AC) entsteht ein (statisches oder wechselndes) Magnetfeld. Bringt man den Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, richtet sich die Kompassnadel senkrecht dazu aus. Daraus kann geschlossen werden, dass das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter verlaufen muss (siehe *Abbildung 2*).
 - ☐ Das magnetische Feld kann mit Magnetfeldlinien beschrieben werden. Beachte aber, dass sie nur eine Anschauungshilfe darstellen, mit denen man einige Eigenschaften von magnetischen Feldern gut beschreiben kann.

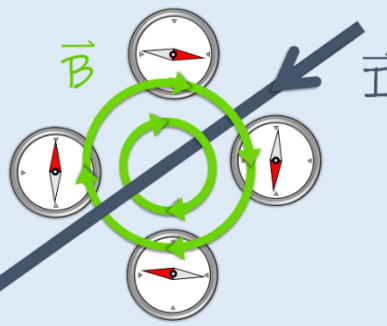


Abbildung 2: Kompass-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes.

- B3** ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Kannst du dir vorstellen, was hier passiert?
- P3** ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.
- A3.1** ☐ Warum richtet sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht aus?
- A3.2** ☐ Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC oder AC) entsteht ein (statisches oder wechselndes) Magnetfeld. Führt man das Messgerät um diesen Leiter, kann das Magnetfeld mithilfe des weichmagnetischen Kerns bestimmt werden (siehe *Abbildung 3*). Daraus berechnet das Gerät die Stromstärke, die auf dem Display ablesbar ist.
- ☐ Nenne ein weiteres Beispiel aus dem Alltag, bei dem das Messgerät ein Magnetfeld detektieren könnte.

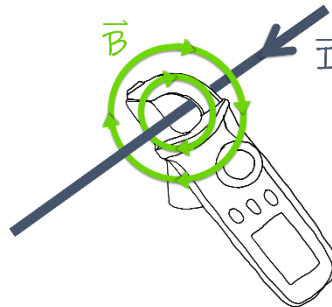


Abbildung 3: Stromzangen-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes.



- ☐ **KOGNITIVES STOPPSCHILD:** Bisher haben wir vom magnetischen Feld um den Leiter gesprochen. Nun schauen wir uns ein weiteres Feld genauer an.
- ☐ Dieses unterscheidet sich in Ursache, Form und Richtung vom magnetischen Feld!

K4 Energiequellen pumpen **Oberflächenladungen** auf die Leiteroberfläche. Diese generieren ein elektrisches Feld.

- E4** ☐ Es gibt verschiedene Arten von Energiequellen (z.B. Generator, Batterie, Solarzelle, ...). Auch wenn sie sich äußerlich voneinander unterscheiden, so ist ihre Wirkung immer dieselbe: Es kommt zu einer Verschiebung von Ladung im Inneren der Energiequelle. Bei einem äußeren Kontakt entsteht somit ein Überschuss an Elektronen. Am anderen Kontakt fehlen diese Elektronen, was insgesamt zu einer positiven Ladung führt.
- ☐ Die Ladungen werden als Oberflächenladungen bezeichnet, da sie sich auf der Oberfläche des Leiters befinden (siehe *Abbildung 4*). Die Stärke der Energiequelle bestimmt wie viele Ladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt werden.

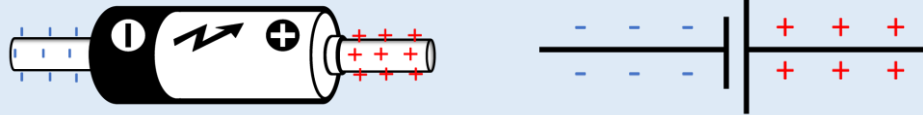


Abbildung 4: Oberflächenladungen an einer Batterie.

- B4** ☐ Erscheint dir diese Erklärung sinnvoll? Kannst du dir vorstellen, was hier passiert?
- P4** ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.
- A4.1** ☐ Wie müssten sich die Oberflächenladungen in diesem Stromkreis (siehe *Abbildung 5*) anordnen? Zeichne die positiven bzw. negativen Ladungen ein.



Abbildung 5: Einfacher Stromkreis mit Batterie und Kabeln.

- A4.2** ☐ Wo genau befinden sich die Oberflächenladungen?



- ☐ **KOGNITIVES STOPPSCHILD:** Beachte, dass die Oberflächenladungen von den Ladungen im Inneren des Leiters zu unterscheiden sind!

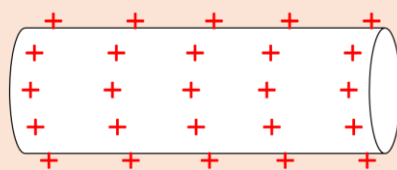


Abbildung 6: Abschnitt eines Leiters mit positiven Oberflächenladungen.

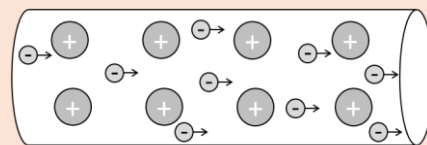


Abbildung 7: Abschnitt eines Leiters mit Ladungen im Leiterinneren.

K5 Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **elektrisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z.B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.

Versuch 2: Nachweis des elektrischen Feldes.

Material: Stromkreis mit Kabeln und Reihenwiderständen ($U = 10 \text{ kV}$; $R = 5 \times 50 \text{ M}\Omega$), (a) Alufolienstück auf Faden oder (b) Strohhalm auf Faden

Durchführung: Der Versuch wird, wie in den Abbildungen unten zu sehen, aufgebaut. Auf einem Faden wird (a) ein Alufolienstück oder (b) ein Strohhalm befestigt und in die Nähe des Leiterkabels gebracht.

Vermutungen der Schüler*innen festhalten. Gezielte Fragen stellen:

- Was könnte dazu führen, dass das Alufolienstück / der Strohhalm angezogen / angestoßen wird?
- Was ist in der Umgebung eines Leiters?

Beobachtung: Das elektrische Feld (der Oberflächenladungen) führt zu einer Ablenkung des Alufolienstücks / Strohhalmes, wenn dieser dem Leiter angenähert wird.

Erklärung des Versuchs (vereinfacht / detailliert, je nach Schüler*in):

E5.1 Um einen stromdurchflossenen Leiter (DC) entsteht ein elektrisches Feld. Bringt man ein kleines Stück Alufolie oder einen elektrostatisch geladenen Strohhalm in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung beobachtet werden (Anziehung / Abstoßung). Dies kann mithilfe des Modells der Oberflächenladungen erklärt werden.

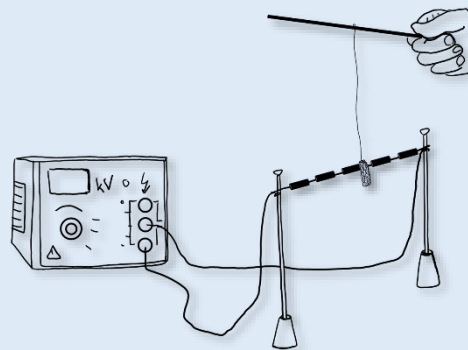


Abbildung 8: Versuch zum elektrischen Feld.

E5.2 Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen. Das elektrische Feld kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden, die von Plus zu Minus verlaufen. Die Richtung des elektrischen Feldes hat historische Hintergründe.

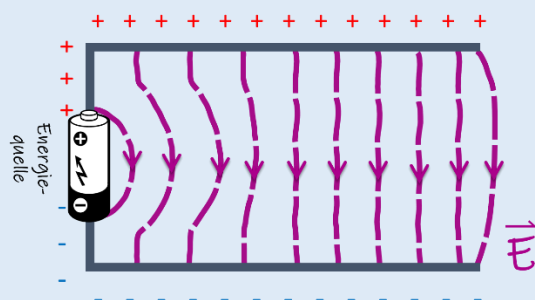


Abbildung 9: Darstellung des elektrischen Feldes im offenen Stromkreis.

Das elektrische Feld der Oberflächenladungen verursacht einen Stromfluss im elektrischen Stromkreis, sobald er **geschlossen** vorliegt, d.h. jeder Anschluss der Energiequelle mit je einem Anschluss des Energieumwandlers verbunden ist.

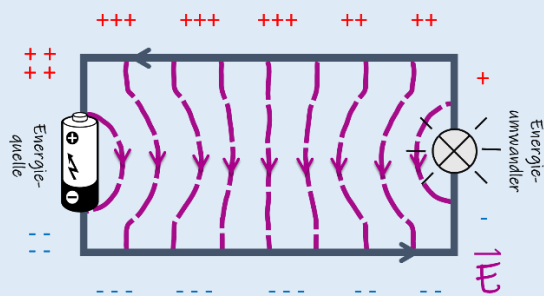


Abbildung 10: Darstellung des elektrischen Feldes im geschlossenen Stromkreis.

- B5** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar? Hilft dir die Grafik, um dir das ganze etwas besser vorzustellen?
- P5** ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.
- A5** ☐ Nenne ein Beispiel aus deinem Alltag, wo ein elektrisches Feld um ein elektrisches System entsteht.

- K6** Die Energieübertragung findet durch das **elektromagnetische Feld** statt. Dies kann mit dem **Energiefluss** beschrieben werden.
- K7** Der **Poynting-Vektor** beschreibt die Energieübertragung im elektromagnetischen Feld mathematisch.

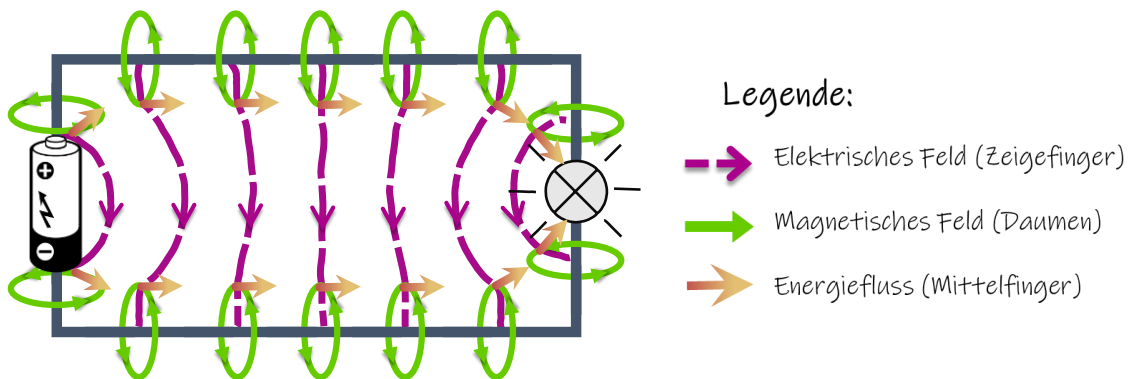


Abbildung 11: Poynting Vektor im einfachen Stromkreis.



- ☐ **KOGNITIVES STOPPSCHILD:** Bis jetzt haben wir einzeln über das elektrische und das magnetische Feld gesprochen, wobei jedes seine eigene Ursache, Form und Richtung hat.
- ☐ Wissenschaftler*innen verwenden den Begriff „elektromagnetisches Feld“ (kurz: EM-Feld), um die Kombination dieser beiden Felder zu benennen.
- ☐ Aber lass dich nicht verwirren! Das elektromagnetische Feld hat keine Richtung wie das elektrische und das magnetische Feld und wird daher auch nicht

durch einen der Pfeile in der Abbildung dargestellt! Der Ausdruck "elektromagnetisches Feld" bedeutet einfach "die kombinierte Wirkung des elektrischen und des magnetischen Feldes".

- E6** ☐ Wir haben bisher festgestellt, dass es ein elektrisches Feld aufgrund der Oberflächenladungen gibt, das für den Stromfluss sorgt. Der Stromfluss erzeugt wiederum ein Magnetfeld um den Leiter. Gemeinsam ergeben sie das sogenannte **elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld)**. Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden.
- ☐ **Energie-Hand-Regel für die linke Hand zur Bestimmung des Energieflusses:** Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss ebenfalls senkrecht darauf einzeichnen.
- [E7]** ☐ [Dieser kann mathematisch mithilfe des Poynting Vektors beschrieben werden: $\vec{S} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right) (\vec{E} \times \vec{B})$]
- ☐ Gemeinsame Erarbeitung des Energieflusses [Poynting Vektor] an ein bis zwei Stellen im Stromkreis.
- ☐ Die Energie wird von der Batterie durch das elektromagnetische Feld bis zum Energieumwandler übertragen. Dies kann meist direkt an der Energieumwandlung beobachtet werden (z.B. Lämpchen leuchtet).



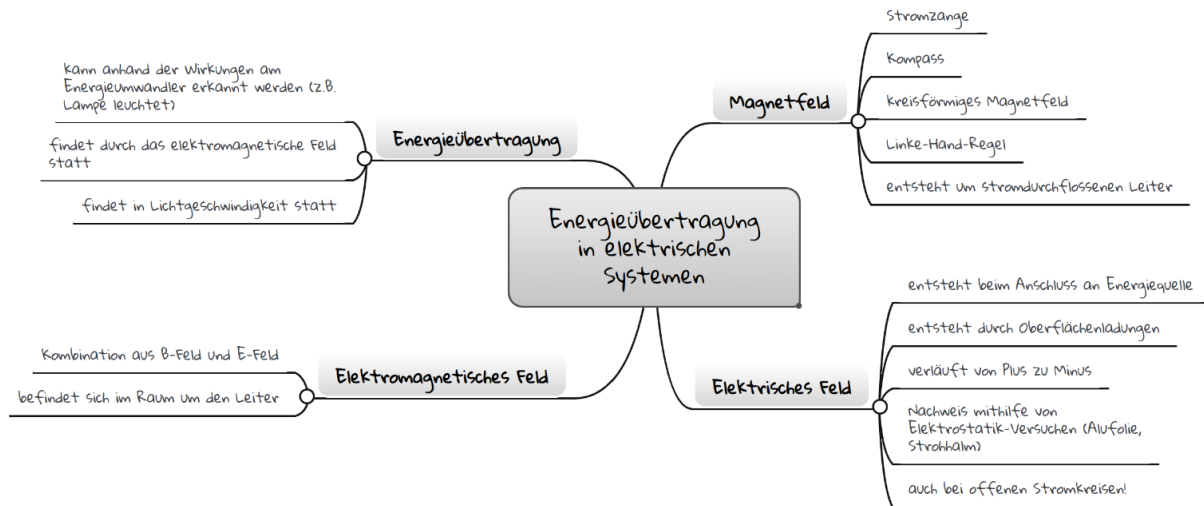
- ☐ **KOGNITIVES STOPPSCHILD:** Der Energiefluss sollte nicht mit dem Stromfluss verwechselt werden!

- B6** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar? Hilft dir die Grafik, um dir das ganze etwas besser vorzustellen?
- P6** ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.
- A6** ☐ Betätigst du den Schalter bei einem Ventilator, so scheint dieser sofort anzugehen. Woher kommt die Energie, um den Ventilator zu betreiben und wie wird diese übertragen? Verwende für deine Erklärung das vorgestellte Konzept.
- [B7]** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar? Hilft dir die Formel, um dir das ganze etwas besser vorzustellen?
- [P7]** ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.

Anmerkung: Was hier schön verdeutlicht werden kann, ist, dass der Energieübertragungsprozess erst dann ermöglicht wird, wenn es sowohl ein E-Feld als auch ein B-Feld gibt. Das E-Feld kommt durch den Anschluss an eine Energiequelle zustande. Das B-Feld wird erst durch

einen Stromfluss (AC oder DC) hervorgerufen. Erst wenn diese Bedingungen bestehen, kann Energie durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen werden!

Ergänzung Erstelle ein Mind-Map zu den bisher besprochenen Begriffen, um deine Gedanken zu ordnen. Markiere die Schlüsselbegriffe mit einem Farbstift!



Block 3: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung)

In einem elektrischen System wird Energie durch ein elektromagnetisches Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen. Dies kann in DC und AC-Stromkreisen erfolgen.

K8 Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld kann sowohl bei **Gleich-** als auch **Wechselstromkreisen** erfolgen.

- E8**
- ☐ Bisher hast du gehört, dass ein elektrisches System aus einer Energiequelle und einem Energieumwandler besteht. Außerdem wird manchmal ein Übertragemedium (z.B. Leiterkabel) benötigt.
 - ☐ Die Energiequelle (z.B. Batterie) pumpt Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche, die ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter hervorrufen.
 - ☐ Bei einem geschlossenen Stromkreis entsteht außerdem ein Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld um den Leiter erzeugt.
 - ☐ Gemeinsam ergeben das elektrische und das magnetische Feld um den Leiter das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden (siehe Abbildung 11).
 - ☐ In Gleichstromkreisen bewegen sich die Elektronen gerichtet vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle. Bei Wechselstromkreisen hingegen bewegen sie sich hin- und her (siehe Abbildung 12).

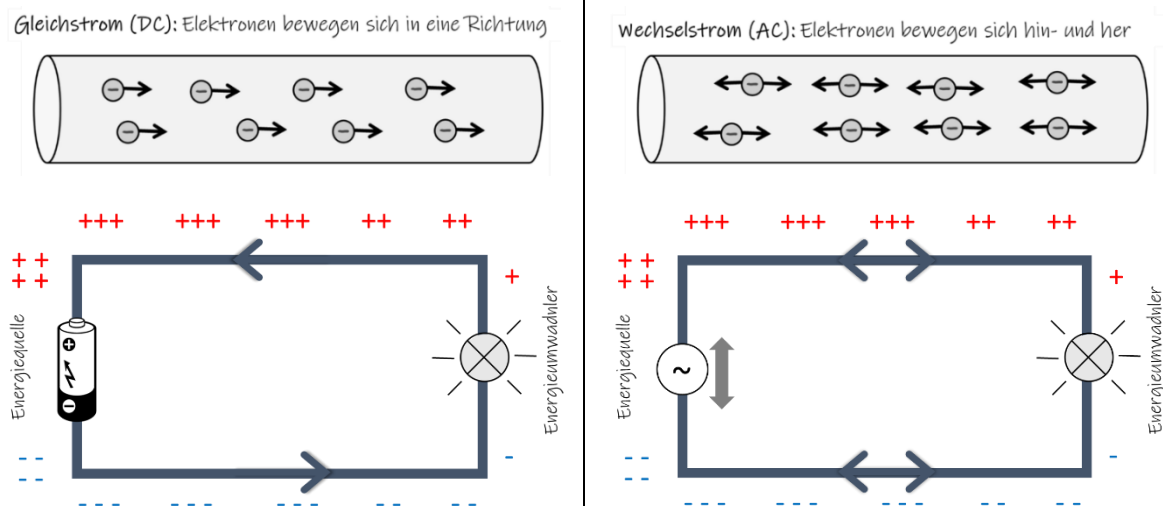


Abbildung 12: Gleich- vs. Wechselstrom.

- B8** ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar?
- P8** ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.
- A8.1** ☐ Was verändert sich beim magnetischen Feld, falls ein Wechselstromkreis vorliegt?

A8.2 ☐ Was verändert sich beim elektrischen Feld, falls ein Wechselstromkreis vorliegt?

A8.3 ☐ Wie findet der Energiefluss in Wechselstromkreisen statt?

*Ergänzend kann an dieser Stelle eine **Animation** eines Wechselstromkreises gezeigt werden, bei der eine niederfrequente elektromagnetische Welle die Energie transportiert. (Didaktischer Hinweis: Die Erweiterung, dass diese Welle auch ohne Leiter propagieren kann, wäre dann nur mehr der nächste Schritt)*

K9 Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie **umgewandelt** (z.B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).

E9 ☐ Die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler findet durch das elektromagnetische Feld statt.

☐ Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht (in einem idealen Stromkreis) der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird (*Energieerhaltung*). In der Realität wird ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben.

B9 ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar?

P9 ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.

A9.1 ☐ Woran kannst du beim Föhn / bei der elektrischen Zahnbürste erkennen, dass Energie übertragen wurde? (Herzeigen einer elektrischen Zahnbürste)

A9.2 ☐ Welche Energieumwandlung findet beim Energieumwandler statt?

*Didaktischer Kommentar: Mittels Anknüpfungsstrategie sollen die Schüler*innen erkennen, dass Elektronen für die Energieübertragung zwar wichtig, aber nicht ausschließlich dafür verantwortlich sind. Vielmehr sind sie die Ursache es Magnetfeldes, das gemeinsam mit dem elektrischen Feld das **EM-Feld** formt, welches für die Energieübertragung erforderlich ist.*

K10 Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld findet in Lichtgeschwindigkeit statt.

E10 ☐ Die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler findet durch das elektromagnetische Feld statt. Dies geschieht in Lichtgeschwindigkeit, also sehr schnell.

☐ *Hinweis:* Die Lichtgeschwindigkeit ist jene Geschwindigkeit, mit der sich Licht (im Vakuum) ausbreitet. Sie hat den ungefähren Wert von $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

B10 ☐ Ist diese Erklärung für dich nachvollziehbar?

P10 ☐ Bitte wiederhole nochmal, was ich dir soeben erklärt habe.

-
- A10.1** ☐ In vielen elektrischen Systemen findet innerhalb der Kabel ein Elektronenfluss statt. In Gleichstromkreisen bewegen sich die Elektronen mit einem ‚Bummeltempo‘ von $5 \times 10^{-5} m/s$ vom Minus zum Pluspol der Energiequelle.
- ☐ Manche Leute behaupten, dass die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich sind, indem sie die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler transportieren. Haben diese Leute Recht?
- A10.2** ☐ In Wechselstromkreisen bewegen sich die Elektronen hin- und her. Erkläre, warum die Elektronen auch in diesem Fall nicht für die Energieübertragung verantwortlich sein können.
-

Anhang 2:

Fragebögen 1-3 aus der Implementationsstudie

Fragebogen 1

Hast du deiner Lehrperson eine unterschriebene **Einverständniserklärung** abgegeben?

- ☐ Ja
☐ Nein, aber ich bringe sie nach
☐ Nein

Vielen Dank für deine Teilnahme an diesem Forschungsprojekt zur Evaluation eines neuen Unterrichtsdesigns für den Physikunterricht.

Die folgenden Fragen dienen dazu einen anonymen Code zu erstellen:

Code:			
Dein Geburtsmonat:	- -		
Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	- -		
Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	- -		

Muster:			
Dein Geburtsmonat:	z.B. Februar: <u>02</u>		
Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	z.B. WI <u>EN</u>		
Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	z.B. (0676) <u>518</u> 5188		

Es ist äußerst wichtig, dass du dir bei der Bearbeitung des Fragebogens Mühe gibst und die Fragen vollständig und gewissenhaft beantwortest.

Elektrische Energieübertragungssysteme

1. **Nenne** ein Beispiel für ein kabelgebundenes System. ☐
2. **Nenne** ein Beispiel für ein kabelloses System. ☐
3. **Nenne** ein Beispiel für einen elektrischen Energieumwandler. ☐

4. **Nenne** ein Beispiel für eine elektrische Energiequelle. ☐

Energieübertragung I

5. **Beschreibe**, was ein magnetische Feld ist und wie es dargestellt werden kann. ☐

6. In welchen Situationen tritt ein magnetisches Feld auf? ☐

Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

- ☐ Im Raum um eine Batterie, die mit nichts verbunden ist.
- ☐ Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter.
- ☐ Im Raum um einen Stabmagneten.
- ☐ In keinem der oben genannten Beispiele.

7. Zu sehen ist ein einfacher Stromkreis mit einer Batterie, zwei Kabeln und einem Lämpchen. Der Stromkreis ist geschlossen. ☐

Welche Felder bilden sich um den Leiter?

Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

- ☐ Magnetisches Feld
- ☐ Elektrisches Feld
- ☐ Elektromagnetisches Feld
- ☐ Sonstiges: _____



8. In welchen Situationen tritt ein elektrisches Feld auf? ☐

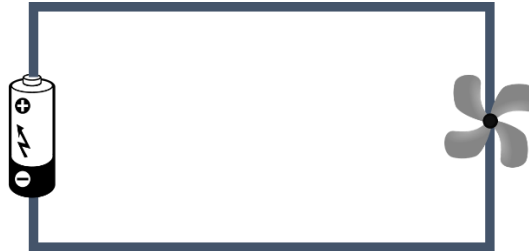
Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

- ☐ Im Raum um eine Batterie, die mit nichts verbunden ist.
- ☐ Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter.
- ☐ Im Raum um einen Stabmagneten.
- ☐ In keinem der oben genannten Beispiele.

9. **Beschreibe**, was ein elektrisches Feld ist und wie es dargestellt werden kann. ☐

10. Auf dem Bild ist ein geschlossener Stromkreis zu sehen, der aus einem Ventilator, zwei Leiterkabeln und einer Batterie besteht.

a) **Zeichne** den Weg der Energie in der Skizze ein!



b) **Begründe**, wieso du den Weg so gezeichnet hast!



Energieübertragung II

11. **Beschreibe**, was der Unterschied zwischen einem Wechselstromkreis und einem Gleichstromkreis ist.



12. **Beschreibe**, woran du bei einem elektrischen Föhn erkennen kannst, dass Energie übertragen worden ist.



DANKE für deine Teilnahme!



universität
wien



Fragebogen 2

Hast du deiner Lehrperson eine unterschriebene **Einverständniserklärung** abgegeben?

- ☐ Ja
☐ Nein, aber ich bringe sie nach
☐ Nein

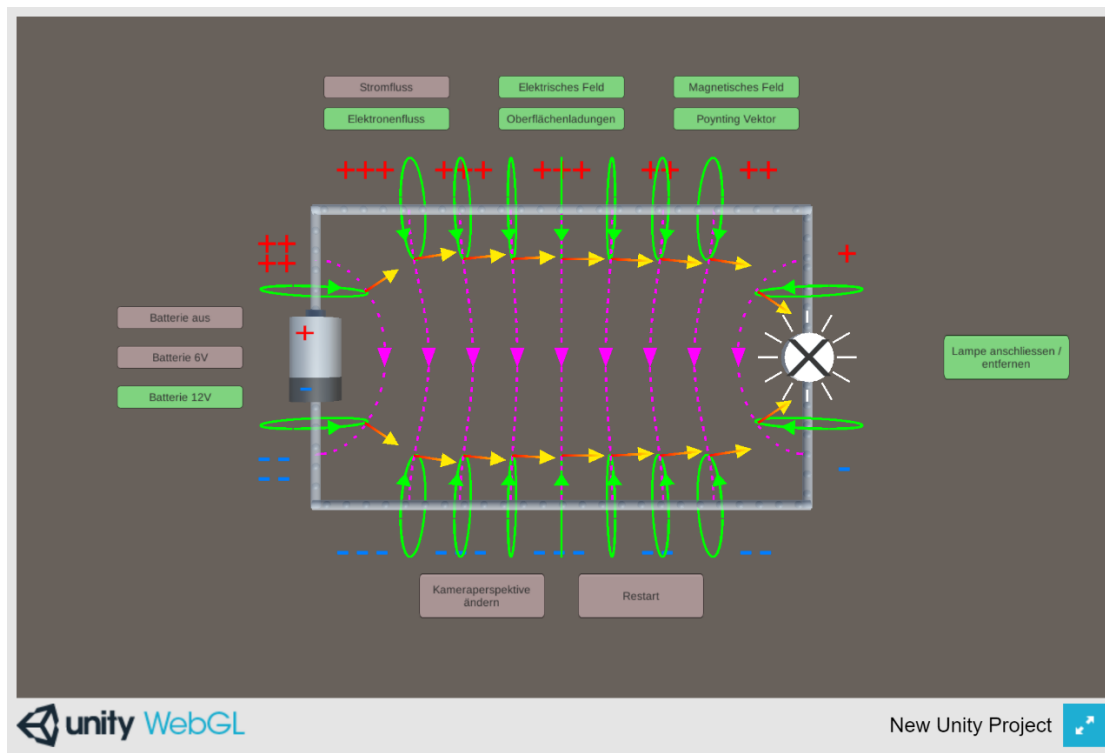
Vielen Dank, dass du am Fragebogen zur Evaluierung der Simulation zur Energieübertragung in elektrischen Systemen teilnimmst.

Die folgenden Fragen dienen dazu einen anonymen Code zu erstellen:

Code:			
Dein Geburtsmonat:	-	-	
Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	-	-	
Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	-	-	

Muster:	02	EN	51
Dein Geburtsmonat:	z.B. Februar: <u>02</u>		
Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	z.B. WI <u>EN</u>		
Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	z.B. (0676) <u>51</u> 8 5188		

Es ist äußerst wichtig, dass du dir bei der Bearbeitung des Fragebogens Mühe gibst und die Fragen vollständig und gewissenhaft beantwortest.



1. Ich denke, dass ich die Simulation gerne häufig benutzen würde.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

2. Ich fand die Simulation unnötig kompliziert.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

3. Ich fand die Simulation einfach zu benutzen.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer Person, die sich damit gut auskennt benötigen, um die Simulation benutzen zu können.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in dieser Simulation haben alle gut zusammengepasst.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

6. Ich denke, die Simulation enthielt zu viele Unstimmigkeiten.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit dieser Simulation sehr schnell lernen.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

8. Ich fand die Simulation sehr umständlich zu nutzen.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der Simulation sehr sicher.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die Simulation zu verwenden.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

11. Ich fände es gut, wenn meine Lehrpersonen die Simulation im Unterricht verwenden würden.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

12. Mithilfe der Simulation würde ich besser lernen als im normalen Unterricht.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

13. Die Simulation würde das Lernen in Physik interessanter machen.

Stimme überhaupt nicht zu 1	2	3	4	Stimme voll zu 5
☐	☐	☐	☐	☐

14. Zusätzliche Anmerkungen (optional):

DANKE für deine Teilnahme!



universität
wien



Fragebogen 3

Hast du deiner Lehrperson eine unterschriebene **Einverständniserklärung** abgegeben?

- ☐ Ja
☐ Nein, aber ich bringe sie nach
☐ Nein

Vielen Dank für deine Teilnahme an diesem Forschungsprojekt zur Evaluation eines neuen Unterrichtsdesigns für den Physikunterricht.

Die folgenden Fragen dienen dazu einen anonymen Code zu erstellen:

Code:	<table><tr><td></td><td></td><td></td></tr></table>				Muster:	<table><tr><td>02</td><td>EN</td><td>51</td></tr></table>	02	EN	51
02	EN	51							
Dein Geburtsmonat:	- -	Dein Geburtsmonat:	z.B. Februar: <u>02</u>						
Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	- -	Die letzten beiden Buchstaben deines Geburtsortes:	z.B. WI <u>EN</u>						
Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	- -	Die ersten beiden Ziffern deiner Telefonnummer (ohne Vorwahl):	z.B. (0676) <u>518</u> 5188						

Es ist äußerst wichtig, dass du dir bei der Bearbeitung des Fragebogens Mühe gibst und die Fragen vollständig und gewissenhaft beantwortest.

Basisinformationen:

1. Wie schätzt du dein Interesse für das Fach Physik ein?

sehr gering ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 *sehr hoch*

2. Was war deine letzte Physiknote?

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

3. Was ist dein Geschlecht?

☐ weiblich ☐ männlich ☐ divers

4. Wie alt bist du?

_____ Jahre

Elektrische Energieübertragungssysteme

1. **Nenne** ein Beispiel für ein kabelgebundenes System. ☐

2. **Nenne** ein Beispiel für ein kabelloses System. ☐

3. **Nenne** ein Beispiel für einen elektrischen Energieumwandler. ☐

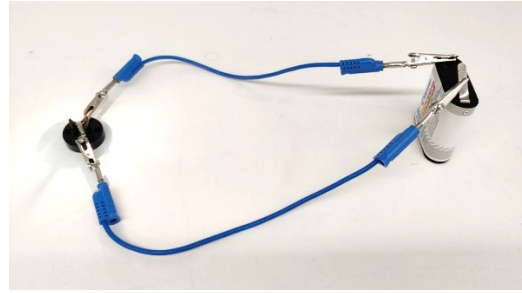
4. **Nenne** ein Beispiel für eine elektrische Energiequelle. ☐

Energieübertragung I

5. **Beschreibe**, was ein magnetische Feld ist und wie es dargestellt werden kann. ☐

6. In welchen Situationen tritt ein magnetisches Feld auf?
Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an. ☐
 - ☐ Im Raum um eine Batterie, die mit nichts verbunden ist.
 - ☐ Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter.
 - ☐ Im Raum um einen Stabmagneten.
 - ☐ In keinem der oben genannten Beispiele.

7. Zu sehen ist ein einfacher Stromkreis mit einer Batterie, zwei Kabeln und einem Lämpchen. Du legst einen Kompass unter eines der Kabel. **Beschreibe**, was passieren wird und **begründe** deine Antwort!



8. Zu sehen ist ein offener Stromkreis, bestehend aus einer Batterie und zwei Kabeln.

Beschreibe, was Oberflächenladungen sind und welche Rolle sie in einem Stromkreis spielen.



9. Zu sehen ist ein einfacher Stromkreis mit einer Batterie, zwei Kabeln und einem Lämpchen. Der Stromkreis ist geschlossen.

Welche Felder bilden sich um den Leiter?

Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.



- ☐ Magnetisches Feld
- ☐ Elektrisches Feld
- ☐ Elektromagnetisches Feld
- ☐ Sonstiges: _____

10. In welchen Situationen tritt ein elektrisches Feld auf? ☐

Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

- ☐ Im Raum um eine Batterie, die mit nichts verbunden ist.
- ☐ Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter.
- ☐ Im Raum um einen Stabmagneten.
- ☐ In keinem der oben genannten Beispiele.

11. **Beschreibe**, was ein elektrisches Feld ist und wie es dargestellt werden kann. ☐

12. Auf dem Bild ist ein geschlossener Stromkreis zu sehen, der aus einem Ventilator, zwei Leiterkabeln und einer Batterie besteht.

a) **Zeichne** den Weg der Energie in der Skizze ein! ☐



b) **Begründe**, wieso du den Weg so gezeichnet hast! ☐

Energieübertragung II

13. **Beschreibe**, was der Unterschied zwischen einem Wechselstromkreis und einem Gleichstromkreis ist. ☐

14. **Beschreibe**, woran du bei einem elektrischen Föhn erkennen kannst, dass Energie übertragen worden ist. ☐
15. Manche Leute behaupten, dass die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich sind, indem sie die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler transportieren. **Erkläre**, ob diese Leute Recht haben. ☐

Feedback

1. Was hat dir besonders gut am Unterrichtskonzept gefallen?
2. Was sollte deiner Meinung nach am Unterrichtskonzept verbessert werden?
3. Was denkst du ist die Grundidee des Unterrichtskonzepts?

DANKE für deine Teilnahme!



universität
wien



Anhang 3:

Kodierleitfaden Fragebogen 1 und 3 (Prä- und Posttest)

KODIERLEITFADEN FRAGEBOGEN 1 und 3

Hinweis: Die Nummerierung der Fragen von 1-12 orientiert sich am Fragebogen 1.

Elektrische Energieübertragungssysteme

Frage 1. Nenne ein Beispiel für ein kabelgebundenes System.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt, wenn ein Beispiel genannt wird, bei dem ein Energieumwandler über Kabel mit einer Energiequelle verbunden sein muss, damit er Energie umwandeln kann. Beispiel: Eine Tischlampe, die über ein Kabel mit der Steckdose verbunden ist, Ein WLAN-Router, der über ein Kabel mit der Steckdose verbunden ist. In diese Kategorie fallen auch: Geschlossene Stromkreise, Alarmanlagen, Toaster, PC, Glätteisen, Föhne, Kabelkopfhörer, WLAN Router...
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	- Dieser Code wird angewandt, wenn ein Beispiel genannt wird, bei dem ein Energieumwandler <i>nicht notwendigerweise</i> über Kabel mit einer Energiequelle verbunden sein muss, damit er Energie umwandeln kann. Beispiel: Ein tragbares elektrisches Gerät wie ein Laptop oder ein Handy kann aufgrund des integrierten Akkus auch ohne einer Kabelverbindung zur Steckdose betrieben werden. - Dieser Code wird angewandt, wenn eine Mehrfachnennung erfolgt, wobei ein Beispiel gemäß des Codes 3 und ein Beispiel gemäß des Codes 1 zu bewerten ist. - Spezialfall: Kopfhörer (hier wird nicht erwähnt, ob es sich um kabelgebundene oder kabellose Kopfhörer handelt, also wird es nur mit „2“ kodiert)
Die Aussage ist nicht korrekt	1	- Dieser Code wird angewandt, wenn ein Beispiel genannt wird, bei dem kein Energieumwandler, nur eine Energiequelle (z. B. Solaranlage) oder nur ein Übertragungsmedium (z. B. Ladekabel fürs Handy, Stromleitung) genannt wird oder ein kabelloses System beschrieben wird (z. B. kabellose Aufladestation fürs Handy). - Dieser Code wird auch angewandt, wenn ein unspezifisches Beispiel genannt wird, das weder mit 3 noch 2 kodiert werden kann (z. B. Stromkreis, Internetanschluss, WLAN → hier gibt es keine Information darüber, ob der Stromkreis geschlossen ist bzw. aus welchen Elementen er besteht). - Weitere Beispiele: Hochspannungsleitungen, Verkabelung, Verteiler, ...
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 2. Nenne ein Beispiel für ein kabelloses System.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	- Dieser Code wird angewandt, wenn ein Beispiel genannt wird, bei dem ein Energieumwandler ohne Kabel betrieben werden kann. Beispiel: Kabellose Kopfhörer, die Energie ohne eine direkte Kabelverbindung empfangen können. - Weitere Beispiele sind: Elektrische Zahnbürsten, Apple Watch, Handy, kabelloses Aufladen (Wireless Charging) eines Handys, Radio, Musikbox, Kamera, ...
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	- Dieser Code wird angewandt, wenn ein Beispiel genannt wird, bei dem nur die Energiequelle eines kabellosen Systems genannt wird (z. B. kabelloses Ladepad, da dieses über Kabel mit einer Steckdose verbunden sein muss, um betrieben werden zu können), nicht jedoch der Energieumwandler. - Dieser Code wird angewandt, wenn eine Mehrfachnennung erfolgt, wobei ein Beispiel gemäß des Codes 3 und ein Beispiel gemäß des Codes 1 zu bewerten ist. - Weitere Beispiele: Induktionsplatte, ... - Spezialfall: Kopfhörer (hier wird nicht erwähnt, ob es sich um kabelgebundene oder kabellose Kopfhörer handelt, also wird es nur mit „2“ kodiert)
Die Aussage ist nicht korrekt	1	- Dieser Code wird angewandt, wenn ein Beispiel genannt wird, bei dem weder ein Energieumwandler noch eine Energiequelle genannt wird (z. B. Airdrop, Bluetooth, ...). - Dieser Code wird angewandt, wenn ein kabelgebundenes, elektrisches System beschrieben wird (z. B. Tischlampe, batteriebetriebene Taschenlampe). - Dieser Code wird außerdem angewandt, wenn eine Energiequelle eines kabelgebundenen, elektrischen Systems genannt wird (z. B. Batterie). - Weitere Beispiele: Blitz, Induktion (als physikalischer Vorgang), WLAN, Wifi, ...
Fehlende Daten	0	Keine Aussage, „?“ , „weiß nicht“ oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 3. Nenne ein Beispiel für einen elektrischen Energieumwandler.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	- Dieser Code wird angewandt, wenn ein elektrischer Energieumwandler als Beispiel genannt wird. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er elektrische Energie in eine andere Form von Energie umwandelt (z. B. Eine Glühlampe wandelt elektrische Energie in Strahlungsenergie um). - Weitere Beispiele: Fahrradlicht, Toaster, Handy, Föhn, Elektromotor, ...
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt, wenn eine Mehrfachnennung erfolgt, wobei ein Beispiel gemäß des Codes 3 und ein Beispiel gemäß des Codes 1 zu bewerten ist.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	- Dieser Code wird angewandt, wenn eine elektrische Energiequelle als Beispiel genannt wird. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine Form von Energie in elektrische Energie umwandelt (z. B. Eine Batterie wandelt chemische Energie in elektrische Energie um; ein Generator wandelt kinetische Energie in elektrische Energie um). - Dieser Code wird angewandt, wenn nur ein Übertragungsmedium (z. B. Ladekabel fürs Handy, Stromleitung) genannt wird. - Dieser Code wird außerdem angewandt, wenn sonstige Antworten, die nicht mit 0 zu kodieren sind, aufgezählt werden (z. B. Transformator). - Weitere Beispiele: Netzgerät, Steckdose, Kraftwerk, Solar(panele), Wasserkraft(werk), Stromaggregat, ...
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 4. Nenne ein Beispiel für eine elektrische Energiequelle.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	- Dieser Code wird angewandt, wenn eine elektrische Energiequelle (z. B. Steckdose, Batterie, Generator, Kraftwerk ...) als Beispiel genannt wird. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine Form von Energie in elektrische Energie umwandelt (z. B. Eine Batterie wandelt chemische Energie in elektrische Energie um). - Weitere Beispiele: Solarpaneel, Photovoltaik-Anlage, Windrad, Wasserkraftwerk, ...
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt, wenn eine Mehrfachnennung erfolgt, wobei ein Beispiel gemäß des Codes 3 und ein Beispiel gemäß des Codes 1 zu bewerten ist.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	- Dieser Code wird angewandt, wenn ein elektrischer Energieumwandler als Beispiel genannt wird. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er elektrische Energie in eine andere Form von Energie umwandelt (z. B. Eine Glühlampe wandelt elektrische Energie in Strahlungsenergie um). - Dieser Code wird angewandt, wenn nur ein Übertragungsmedium (z. B. Ladekabel fürs Handy, Stromleitung) genannt wird. - Der Code wird außerdem angewandt, wenn nur eine Energieform genannt wird (z. B. „Solarenergie“). - Weitere Beispiele: Strom, Sonne, Wasser(kraft), Wind(kraft), Atomkraft, ...
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Energieübertragung I

Frage 5. Beschreibe, was ein magnetische Feld ist und wie es dargestellt werden kann.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort mindestens <i>zwei der drei</i> Punkte enthält: 1) Ein magnetisches Feld beschreibt den Raum / Bereich um einen Magneten oder einen stromdurchflossenen Leiter. <i>Eventuell:</i> Ein magnetisches Feld beschreibt einen Raum, von dem aus eine magnetische Kraft ausgeht. 2) Ein magnetisches Feld kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden. 3) Ein magnetisches Feld kann mithilfe von Magnetfeldlinien / Pfeilen dargestellt werden. Hier werden auch Skizzen von Magnetfeldlinien akzeptiert, solange sie korrekt sind.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort mindestens <i>einen der drei</i> Punkte enthält: 1) Ein magnetisches Feld beschreibt den Raum / Bereich um einen Magneten oder einen stromdurchflossenen Leiter. <i>Eventuell:</i> Ein magnetisches Feld beschreibt einen Raum, von dem aus eine magnetische Kraft ausgeht. 2) Ein magnetisches Feld kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden. 3) Ein magnetisches Feld kann mithilfe von Magnetfeldlinien dargestellt werden. Hier werden auch Skizzen von Magnetfeldlinien akzeptiert, solange sie korrekt sind.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort <i>keinen</i> der drei Punkte enthält: 1) Ein magnetisches Feld beschreibt den Raum / Bereich um einen Magneten oder einen stromdurchflossenen Leiter. <i>Eventuell:</i> Ein magnetisches Feld beschreibt einen Raum, von dem aus eine magnetische Kraft ausgeht. 2) Ein magnetisches Feld kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden. 3) Ein magnetisches Feld kann mithilfe von Magnetfeldlinien dargestellt werden. Hier werden auch Skizzen von Magnetfeldlinien akzeptiert, solange sie korrekt sind.
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 6. In welchen Situationen tritt ein magnetisches Feld auf? Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

a) Im Raum um eine Batterie, die mit nichts verbunden ist.	<i>falsch</i>
b) Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter.	<i>richtig</i>
c) Im Raum um einen Stabmagneten.	<i>richtig</i>
d) In keinem der oben genannten Beispiele.	<i>falsch</i>

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn b) <i>und</i> c) angekreuzt sind.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn b) <i>oder</i> c) angekreuzt sind.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird angewandt wenn weder b) und c) angekreuzt sind. Wenn zusätzlich zu b) oder c) entweder a) oder d) angekreuzt wird, ist die Antwort mit <i>nicht korrekt (1)</i> zu bewerten.
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 7. Zu sehen ist ein einfacher Stromkreis mit einer Batterie, zwei Kabeln und einem Lämpchen. Der Stromkreis ist geschlossen. Welche Felder bilden sich um den Leiter? Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

a) Magnetisches Feld	<i>richtig</i>
b) Elektrisches Feld	<i>richtig</i>
c) Elektromagnetisches Feld	<i>richtig</i>
d) Sonstiges: _____	<i>falsch</i>

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn a) <i>und</i> b) <i>und</i> c) ODER a) und b) ODER c) angekreuzt sind.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn a) oder b) angekreuzt sind.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird bei allen anderen Fällen angewandt.
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 8. In welchen Situationen tritt ein elektrisches Feld auf? Kreuze die zutreffende(n) Antwort(en) an.

a) Im Raum um eine Batterie, die mit nichts verbunden ist.	<i>richtig</i>
b) Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter.	<i>richtig</i>
c) Im Raum um einen Stabmagneten.	<i>falsch</i>
d) In keinem der oben genannten Beispiele.	<i>falsch</i>

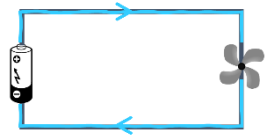
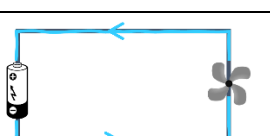
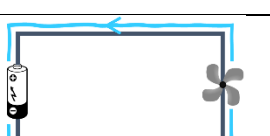
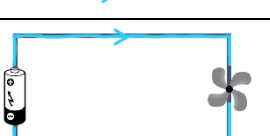
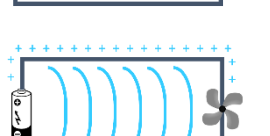
Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn a) <i>und</i> b) angekreuzt sind.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn a) oder b) angekreuzt sind.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird bei allen anderen Fällen angewandt.
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

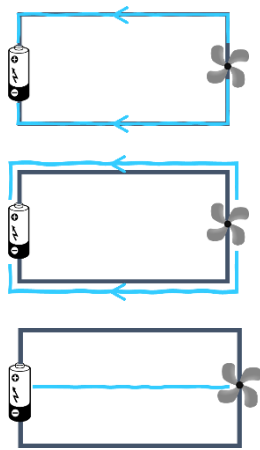
Frage 9. Beschreibe, was ein elektrisches Feld ist und wie es dargestellt werden kann.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest zwei der drei Punkte enthält: 1) Ein elektrisches Feld beschreibt den Raum / Bereich um eine Energiequelle / einen mit einer Energiequelle verbundenen elektrischen Leiter. <i>Eventuell:</i> Ein elektrisches Feld beschreibt einen Raum, von dem aus eine elektrische Kraft ausgeht. Es entsteht durch Oberflächenladungen. 2) Ein elektrisches Feld kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden. 3) Ein elektrisches Feld kann mithilfe von Feldlinien / Pfeilen dargestellt werden.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest einen der drei Punkte enthält: 1) Ein elektrisches Feld beschreibt den Raum / Bereich um eine Energiequelle / einen mit einer Energiequelle verbundenen elektrischen Leiter. <i>Eventuell:</i> Ein elektrisches Feld beschreibt einen Raum, von dem aus eine elektrische Kraft ausgeht. 2) Ein elektrisches Feld kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden. 3) Ein elektrisches Feld kann mithilfe von Feldlinien / Pfeilen dargestellt werden. Beispiel: „Es kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden und gibt an ob/wie in einem Leiter Strom durchfließt.“ → Die Darstellungsform wird hier korrekt beschrieben, allerdings stimmt die Definition nicht. Ein E-Feld gibt nicht an, ob in einem Leiter Strom durchfließt sondern kann vielmehr als der Raum um eine elektrische Ladung beschrieben werden, von dem aus eine elektrische Kraft ausgeht.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort keinen der drei Punkte enthält: 1) Ein elektrisches Feld beschreibt den Raum / Bereich um eine Energiequelle / einen mit einer Energiequelle verbundenen elektrischen Leiter. <i>Eventuell:</i> Ein elektrisches Feld beschreibt einen Raum, von dem aus eine elektrische Kraft ausgeht. 2) Ein elektrisches Feld kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden. 3) Ein elektrisches Feld kann mithilfe von Feldlinien / Pfeilen dargestellt werden. Beispiel: „Wenn der Stromkreis geschlossen ist und ein Strom fließt.“ , „Ein elektrisch geladenes Feld.“ , „En Feld in dem ein Strom fließt“
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 10. Auf dem Bild ist ein geschlossener Stromkreis zu sehen, der aus einem Ventilator, zwei Leiterkabeln und einer Batterie besteht.

a) Zeichne den Weg der Energie in der Skizze ein!

	A1	Der Weg der Energie wird innerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Die Pfeile zeigen vom Pluspol der Energiequelle zum Energieumwandler und zurück zum Minuspol der Energiequelle.
	A2	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Die Pfeile zeigen vom Pluspol der Energiequelle zum Energieumwandler und zurück zum Minuspol der Energiequelle.
	B1	Der Weg der Energie wird innerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Die Pfeile zeigen vom Minuspol der Energiequelle zum Energieumwandler und zurück zum Pluspol der Energiequelle.
	B2	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Die Pfeile zeigen vom Minuspol der Energiequelle zum Energieumwandler und zurück zum Pluspol der Energiequelle.
	C1	Der Weg der Energie wird innerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Die Pfeile zeigen von beiden Anschlüssen der Energiequelle zum Energieumwandler.
	C2	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels (entweder zwischen den Leitern oder außen) gezeichnet. Die Pfeile zeigen von beiden Anschlüssen der Energiequelle zu beiden Anschlüssen des Energieumwandlers.
	D1	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Die Pfeile zeigen von der oberen Seite des Stromkreises zur unteren.
	D2	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Die Pfeile zeigen von der unteren Seite des Stromkreises zur oberen.
	E1	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels als Welle von der Energiequelle zum Energieumwandler gezeichnet. Es fehlen Richtungspfeile.
	F1	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Dabei wird nur ein Pfeil vom Minuspol der Batterie zum Energieumwandler gezeichnet.
	F2	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels gezeichnet. Dabei wird nur ein Pfeil vom Pluspol der Batterie zum Energieumwandler gezeichnet.



G1	Der Weg der Energie wird innerhalb des Leiterkabels (entweder zwischen den Leitern oder außen) gezeichnet. Die Pfeile zeigen von beiden Anschlüssen des Energieumwandlers zu beiden Anschlüssen der Energiequelle.
G2	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels (entweder zwischen den Leitern oder außen) gezeichnet. Die Pfeile zeigen von beiden Anschlüssen des Energieumwandlers zu beiden Anschlüssen der Energiequelle.
H1	Der Weg der Energie wird außerhalb des Leiterkabels direkt von der Batterie zum Ventilator eingezeichnet. Es fehlen Richtungspfeile.

Frage 10 b) Begründe, wieso du den Weg so gezeichnet hast!

Bezeichnung	Beschreibung
Meinung	„Weil es meiner Meinung nach stimmt.“, „Weil es so richtig ist.“
Gelernt	„weil so gelernt.“, „Mal so gesehen“ oder „Weil ich glaube mich daran erinnern zu können das so gelernt zu haben.“
Stromrichtung	„Elektronen fließen weg von Minus.“ „Weil der Strom von der Turbine wegfließt“ „Weil das die physikalische Stromrichtung ist.“
Batterie als Antrieb	„Weil die Batterie den Ventilator betreibt“
Geschlossener Stromkreis	„Weil es ein geschlossener Stromkreis ist“ ohne zusätzliche Informationen
Energierichtung	„Die Energie wirkt immer von + zu -.“, „Weil die Energie beginnt von der Batterie zu fließen“
Energieübertragung	„Wegen dem Poynting-Vektor“, „Weil die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler fließt/ übertragen wird“ oder „Wegen dem Energiefluss“ ohne Verweis darauf, dass die Energie von + zu – oder durch die Kabel fließt. Auch: „Wegen der Linken-Hand-Regel“
PlusMinus	„von + zu -“ ohne Verweis auf Strom oder Energie
MinusPlus	„Von - zu +“ ohne Verweis auf Strom oder Energie
NordSüd	„Weil es von Nord zu Süd fließt“
Magnet	„Weil es bei einem Magneten auch von Plus nach Minus fließt.“
EM Feld	„Weil durch das elektrische und magnetische Feld entsteht das elektromagnetische Feld, das die Stromrichtung zeigt.“
Feldlinien	„Feldlinien bewegen sich immer von - bis +“
divers	Aussagen, die in keine der anderen Kategorien passen
Verweis	Verweis auf eine andere Aufgabe im Test
0	Keine Aussage, „ich weiß es nicht“, „Ich habe geraten“ oder „keine Ahnung“ o.ä.

Mehrfachkodierungen möglich.

Energieübertragung II

Frage 11. Beschreibe, was der Unterschied zwischen einem Wechselstromkreis und einem Gleichstromkreis ist.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest zwei der drei Punkte enthält: 1) Bei einem Gleichstromkreis bewegen sich die Elektronen in eine Richtung. 2) Bei einem Wechselstromkreis bewegen sich die Elektronen hin- und her. 3) Bei einem Gleichstromkreis bleiben die Oberflächenladungen an ihren Positionen. Beim Wechselstromkreis polt die Batterie um, wodurch sich die Anordnung der Oberflächenladung verändert.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest einen der drei Punkte enthält: 1) Bei einem Gleichstromkreis bewegen sich die Elektronen in eine Richtung. 2) Bei einem Wechselstromkreis bewegen sich die Elektronen hin- und her. 3) Bei einem Gleichstromkreis bleiben die Oberflächenladungen an ihren Positionen. Beim Wechselstromkreis polt die Batterie um, wodurch sich die Anordnung der Oberflächenladung verändert.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort keinen der drei Punkte enthält: 1) Bei einem Gleichstromkreis bewegen sich die Elektronen in eine Richtung. 2) Bei einem Wechselstromkreis bewegen sich die Elektronen hin- und her. 3) Bei einem Gleichstromkreis bleiben die Oberflächenladungen an ihren Positionen. Beim Wechselstromkreis polt die Batterie um, wodurch sich die Anordnung der Oberflächenladung verändert. Oder wenn Reichweite, Leistung o.ä. beschreiben wird (z. B. „Wechselstrom hat eine größere Reichweite“).
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 12. Beschreibe, woran du bei einem elektrischen Föhn erkennen kannst, dass Energie übertragen worden ist.

Bezeichnung	Beschreibung
Geräusch	„Durch das Geräusch / den Ton.“
Energieübertragung	„Wenn elektrische Energie übertragen worden ist“
Wärme	„Es kommt Wärme raus“, „Hitze“ als Synonym für Wärme; „Wenn es warm ist“
Energieumwandlung	„Elektrische Energie --> Wärmeenergie / kinetische Energie“ o.ä. auch: „Energie in Luft“ → wird so gedeutet, dass Elektrische Energie in Windenergie umgewandelt wird
Energieerzeugung	„Am Föhn wird Energie erzeugt“
Luft	„Luft wird rausgepustet“ „Am Wind, der rausströmt“ „der Föhn bläst“
Haare trocken	„Wenn meine Haare am Ende trocken sind“
Funktion	„Der Föhn wird funktionieren / arbeiten“ „er lässt sich einschalten“ „wenn er angeht“
Ventilator	„Der Ventilator dreht sich“
Licht	„Es leuchtet ein Licht am Föhn“
divers	Aussagen, die in keine der anderen Kategorien passen
0	Keine Aussage, „ich weiß nicht“ oder „keine Ahnung“ o.ä.

Mehrfachkodierungen möglich.

Zusätzliche Fragen FRAGEBOGEN 3

Frage 7. Zu sehen ist ein einfacher Stromkreis mit einer Batterie, zwei Kabeln und einem Lämpchen. Du legst einen Kompass unter eines der Kabel. Beschreibe, was passieren wird und begründe deine Antwort

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort Punkt 1 und 2 enthält: 1) Um den stromdurchflossenen Leiter entsteht ein Magnetfeld. 2) Der Kompass wird (senkrecht zum Magnetfeld) ausgelenkt.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest einen der zwei Punkte enthält: 1) Um den stromdurchflossenen Leiter entsteht ein Magnetfeld. 2) Der Kompass wird (senkrecht zum Magnetfeld) ausgelenkt. Oder: der Kompass bewegt sich. Beispiel: „Wenn der Stromkreis geschlossen ist bewegt sich die Kompassnadel in die Stromflussrichtung (durch das magnetische Feld).“ → die Annahme, dass sich der Kompass aufgrund des magnetischen Feldes dreht ist korrekt. Allerdings bewegt sich die Kompassnadel senkrecht zum Leiter und nicht in die Stromflussrichtung! Beispiel2: „Die Kompassnadel wird ganz wild rotieren aufgrund des elektromagnetischen Feldes.“ → Ja, der Kompass wird aufgrund des EM Feldes beeinflusst. Allerdings wird er nicht "wild rotieren".
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort keinen der zwei Punkte enthält: 1) Um den stromdurchflossenen Leiter entsteht ein Magnetfeld. 2) Der Kompass wird (senkrecht zum Magnetfeld) ausgelenkt. Oder: der Kompass bewegt sich.
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 8. Zu sehen ist ein offener Stromkreis, bestehend aus einer Batterie und zwei Kabeln.
Beschreibe, was Oberflächenladungen sind und welche Rolle sie in einem Stromkreis spielen.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest <i>zwei der drei</i> Punkte enthält: 1) Oberflächenladungen werden von der Energiequelle (Batterie) auf die Oberfläche (des Leiters) gepumpt. (Die Stärke der Energiequelle bestimmt wie viele Ladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt werden. Sie sind konstante elektrische Ladungen. Sie kommen auch in offenen Stromkreisen vor.) 2) Oberflächenladungen können mit Plus und Minus-Symbolen dargestellt werden. 3) Oberflächenladungen generieren ein elektrisches Feld (im Raum um den Leiter). Beispiel: Oberflächenladungen werden von der Energiequelle auf die Leiter gepumpt (durch die Oberflächenladungen entsteht elektrisches Feld).
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest <i>einen der drei</i> Punkte enthält: 1) Oberflächenladungen werden von der Energiequelle auf die Oberfläche gepumpt. (Die Stärke der Energiequelle bestimmt wie viele Ladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt werden. Sie sind konstante elektrische Ladungen.) 2) Oberflächenladungen können mit Plus und Minus-Symbolen dargestellt werden. 3) Oberflächenladungen generieren ein elektrisches Feld (im Raum um den Leiter).
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort <i>keinen der drei</i> Punkte enthält: 1) Oberflächenladungen werden von der Energiequelle auf die Oberfläche gepumpt. (Die Stärke der Energiequelle bestimmt wie viele Ladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt werden. Sie sind konstante elektrische Ladungen.) 2) Oberflächenladungen können mit Plus und Minus-Symbolen dargestellt werden. 3) Oberflächenladungen generieren ein elektrisches Feld (im Raum um den Leiter).
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Frage 15. Manche Leute behaupten, dass die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich sind, indem sie die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler transportieren. Erkläre, ob diese Leute Recht haben.

Bezeichnung	Code	Beschreibung
Die Aussage ist korrekt	3	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort Punkt 1 <i>und</i> 2 enthält: 1) Nein, diese Leute haben nicht Recht. 2) Die Energie wird durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler transportiert. ODER Bei Wechselstrom bewegen sich die Elektronen nur hin- und her und kommen nicht am Energieumwandler an.
Die Aussage ist teilweise korrekt	2	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort zumindest <i>einen der zwei</i> Punkte enthält: 1) Nein, diese Leute haben nicht Recht. 2) Die Energie wird durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler transportiert. ODER Bei Wechselstrom bewegen sich die Elektronen nur hin- und her und kommen nicht am Energieumwandler an.
Die Aussage ist nicht korrekt	1	Dieser Code wird angewandt wenn die Antwort <i>keinen der zwei</i> Punkte enthält: 1) Nein, diese Leute haben nicht Recht. 2) Die Energie wird durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler transportiert. ODER Bei Wechselstrom bewegen sich die Elektronen nur hin- und her und kommen nicht am Energieumwandler an.
Fehlende Daten	0	Keine Aussage oder „keine Ahnung“ o.ä.

Anhang 4:

Lehrer*innenhandreichung

Arbeitsblätter

Bilderkarten

PPT Folien



universität
wien



Energieübertragung in elektrischen Systemen in der Sekundarstufe II unterrichten

Handreichung für Lehrpersonen



0. VORBEMERKUNGEN

Im Rahmen eines Projekts am AECC der Universität Wien wurde ein neues Unterrichtsdesign zur Energieübertragung in elektrischen Systemen für die Sekundarstufe II entwickelt. Ziel dieses Unterrichtsdesigns ist es, das Thema Energieübertragung für Schüler:innen verständlich zu machen.

Mit der wachsenden Bedeutung von Technologie sollte sich auch der Unterricht entsprechend anpassen und Schüler:innen über die dahinterliegenden Prozesse aufklären (beispielsweise, warum und wie ein Smartphone kabellos mit Energie versorgt werden kann). Das Thema Energieübertragung in der Elektrizitätslehre wird allerdings bisher nur selten ausreichend in Schulen behandelt. Zwar kommen die Begriffe 'Energie' und 'Energieübertragung' im Lehrplan der Oberstufe der Allgemeinbildenden höheren Schulen (AHS) [1] vor, sie werden jedoch auf vielfältige Weisen im Unterricht behandelt. Dabei werden zudem die theoretischen Inhalte zur Planung einer Unterrichtssequenz oftmals so weit vereinfacht, dass sie schließlich fachlich inkorrekt sind.

Der Poynting Vektor stellt eine nicht sehr bekannte, aber sehr anschauliche Möglichkeit dar, die Energieübertragung in elektrischen Systemen zu beschreiben. Leider gibt es bisher nur wenige empirisch erforschte Unterrichtskonzepte zu diesem Thema, die noch dazu für diese Altersstufe geeignet sind. Oftmals sind die entsprechenden Materialien auch nicht so aufbereitet, dass sie direkt im Unterricht eingesetzt werden können, was sie für die meisten Lehrpersonen nicht sehr attraktiv macht.

Das neue Unterrichtsdesigns zur Energieübertragung in elektrischen Systemen bietet einige Vorteile:

- ✓ Es knüpft an spannende Alltagskontexte der Schüler:innen an.

- ✓ Es verwendet anschauliche Hands-on-Versuche, die zum Mitmachen anregen.
- ✓ Es beinhaltet eine vollständige Unterrichtsstruktur, Materialliste und erprobte Arbeitsunterlagen.
- ✓ Es verwendet übersichtliche Darstellungen zur Visualisierung des Gelernten.
- ✓ Es wurde mit Schüler:innen für Schüler:innen entwickelt.
- ✓ Es berücksichtigt aktuelle Forschungsergebnisse der Physikdidaktik.

Das neue Unterrichtsdesign unterteilt sich in sechs Unterrichtssequenzen zu den Themen 'elektrische Energieübertragungssysteme' (ca. 1 UE), 'Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I (Grundlagen)' (ca. 3 UE) und 'Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II (Vertiefung)' (ca. 2 UE). Die vorliegende Lehrer:innenhandreichung bietet eine fachliche Strukturierung mit Erklärungen und möglichen Formulierungen. Die methodische Ausgestaltung wird dabei bewusst der Lehrperson überlassen.

Das Konzept wurde in mehreren Zyklen nach dem Design-Based-Research-Ansatz [2] entwickelt und evaluiert. Zunächst wurden mithilfe einer Literaturrecherche elementare Grundideen, sogenannte 'Key Ideas', formuliert, die dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion [3] folgen. Anschließend wurden drei Interviewrunden mit der Methode der Akzeptanzbefragung [4] mit insgesamt 21 Schüler:innen durchgeführt und mittels Qualitativer Inhaltsanalyse [5] ausgewertet, um die Lehr-Lernumgebung [6] weiterzuentwickeln. Der letzte Schritt besteht darin, das Unterrichtsdesign im realen Klassensetting auszuprobieren und zu evaluieren.

Louisa Winter

Universität Wien

Plattform für Didaktik der Naturwissenschaften

AECC Physik

louisa.winter@univie.ac.at

Benötigte Vorkenntnisse:

Die Lehr-Lern-Sequenz ist für die 7. Klasse (11. Schuljahr) konzipiert. Die Ergebnisse der Interviewstudie haben aber gezeigt, dass die Inhalte auch mit Schüler:innen der 6. Klasse (10. Schuljahr) erfolgreich behandelt werden können. Da die Inhalte Energie und Energieübertragung im österreichischen Lehrplan für beide Schulstufen vorgesehen sind, bleibt es den Lehrpersonen selbst überlassen, wann sie die Lehr-Lern-Sequenz einsetzen möchten. Als Voraussetzung für die Durchführung sollten zuvor folgende Inhalte mit den Schüler:innen behandelt worden sein:

1. **Grundlagen der Elektrizitätslehre:** Wirkungen des elektrischen Stroms, einfacher Stromkreis, Stromstärke, Spannung, elektrischer Widerstand
2. **Elektrische Energie:** Elektrische Energie und Leistung, Energiebereitstellung durch Batterien, Photovoltaik usw.
3. **Felder:** Grundphänomene statischer elektrischer und magnetischer Felder, Feldbegriff, Ladungen als Ursache elektrischer Felder, Ströme als Ursache magnetischer Felder

Falls der dritte Punkt zum Thema „Felder“ noch nicht mit den Schüler:innen behandelt worden ist, muss dies bei der Durchführung dieser Lehr-Lern-Sequenz beachtet werden und gegebenenfalls mehr Zeit zum Üben eingeplant werden.

Strukturierung der Lehr-Lern-Sequenz (ca. 6 UE)

Die Lehr-Lern-Sequenz gliedert sich in drei Blöcke zu je 1- 3 Unterrichtseinheiten (UE) Jede Unterrichtseinheit umfasst 50 Minuten. Die vorliegende Lehrer:innenhandreichung wird mit entsprechenden Arbeitsblättern (inklusive Musterlösungen!), Bilderkarten, einer Power-Point-Präsentation (PPT) und einer Simulation ergänzt. Alle Materialien sind unter dem folgenden Link abrufbar: <https://phaidra.univie.ac.at/o:2154461>

Block 1	Elektrische Energieübertragungssysteme	ca. 1 UE
	1.1 Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme	
	1.2 Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium	
Block 2	Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I	ca. 3 UE
	2.1 Das magnetische Feld	
	2.2 Das elektrische Feld und die Oberflächenladungen	
	2.3 Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss	
Block 3	Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II	ca. 2 UE
	3.1 Gleich- vs. Wechselstromkreise	
	3.2 Energieerhaltung und Prozess der Energieübertragung	

Erklärung der Icons:

	Kognitive Stoppschilder	<i>Kennzeichnen Stellen, die sich in der Vorerhebung als problematisch herausgestellt haben; Es wird auf mögliche Fehlerquellen hingewiesen</i>
	Versuche	<i>Demonstrationsversuche und Hands-On-Versuche</i>
	Digitale Inhalte	<i>(Ergänzende) Inhalte mit digitalen Endgeräten</i>
	Übungen / Aufgaben	<i>Übungen zum Vertiefen und Festigen der Inhalte</i>
	Arbeitsblatt / Textblatt	<i>Material für die Schüler:innen</i>
	Zusatzinfos	<i>Weiterführende Informationen für besonders interessierte Schüler:innen zur Ergänzung und Erweiterung des Wissens</i>
	Konzeptidee	<i>Zugrundeliegende Konzeptidee; Kann als Merksatz ins Heft eingetragen werden.</i>

Designrichtlinien:

- Das vorliegende Unterrichtsdesign ist auch realisierbar für Schulen mit begrenztem Budget.
- Die Hands-on-Versuche sind mit wenig Materialaufwand durchführbar.
- Das Unterrichtsdesign beinhaltet einige digitale Materialien, die aber nicht zwingend eingesetzt werden müssen (für Schulen ohne digitale Endgeräte gibt es Alternativen).

Benötigte Materialien:

- ca. 8 Einfache Stromkreise mit Kabeln, einer Batterie, einem Lämpchen und ggf. einem Elektromotor
- ca. 8 bewegliche Kompassnadeln (3D Druck)
- Arbeitsblätter
- Lehrer:innenhandreichung
- Power-Point-Präsentation

Optionale Materialien:

- Kärtchen mit elektrischen Geräten (kabellos / Kabelgebunden)
- Kärtchen mit Zuordnung der Begriffe: (Energiequelle / Energieumwandler)
- 5 Widerstände (3,3 MΩ)
- 1 Hochspannungsquelle (ca. 6,5 V)
- 1 Strohhalm und Faden
- ca. 8 Strommesszangen
- ca. 30 bedruckte Klarsichtfolien (für alle Schüler:innen)
- je nach Verfügbarkeit bis zu 8 Elektrische Zahnbürsten mit Ladestation (inkl. LED Licht) ODER Spule mit LED

Block 1: Elektrische Energieübertragungssysteme

Diese Sequenz umfasst 1 Unterrichtseinheit.

Inhalte	Materialien
1.1 Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme	PPT, Bilderkarten 1.1 (optional)
1.2 Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium	PPT, Bilderkarten 1.2 (optional)

In dieser Unterrichtssequenz sollen die Schüler:innen zunächst mit der Idee vertraut gemacht werden, dass in elektrischen Systemen Energie übertragen werden kann. Dies wird anhand einiger Alltagskontexte besprochen und veranschaulicht.

1.1 Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme

Schritte	Materialien
1) Begriffsklärung: Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme	PPT
2) Übung und Festigung der neuen Begriffe	Bilderkarten 1.1 (optional)
3) Formulierung eines Merksatzes	

1) Begriffsklärung: Kabelgebundene vs. Kabellose elektrische Systeme

Zu Beginn der Unterrichtssequenz werden einige fundamentale Begriffe mit den Schüler:innen eingeführt, die im gesamten Unterrichtsdesign konsistent weiterverwendet werden sollten. Als Einstieg werden den Schüler:innen dazu verschiedene elektrische Systeme gezeigt, die in zwei unterschiedliche Kategorien geteilt werden können: **Kabellose** oder **kabelgebundene Systeme**. Zur visuellen Unterstützung sollten an dieser Stelle Bilder von elektrischen Systemen gezeigt werden (siehe Abbildung 1).

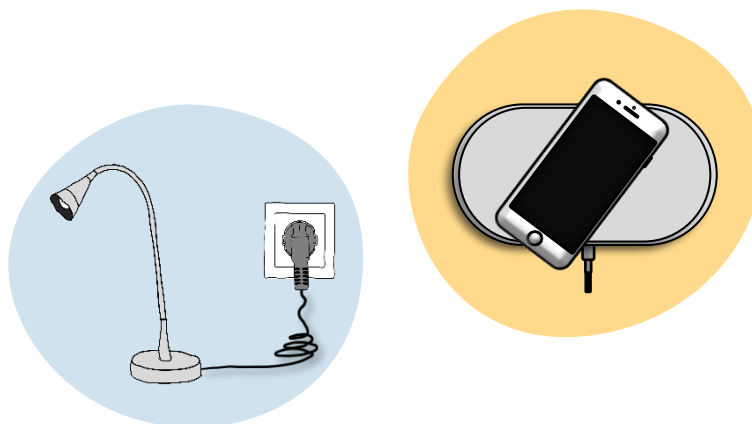


Abbildung 1: Kabelgebundene und kabellose Systeme. Links ist eine Tischlampe zu sehen, die über ein Kabel mit der Steckdose verbunden ist. Rechts ist ein Smartphone zu sehen, bei dem der Akku kabellos am Ladepad geladen werden kann.

Die meisten Schüler:innen sollten zu diesem Zeitpunkt schon mit einfachen Stromkreisen vertraut sein und gleich erkennen, dass in manchen Bildern die Verbindungskabel fehlen. Falls von den Schüler:innen nichts kommt, kann an dieser Stelle aber auch direkt die Definition der beiden Begriffe von der Lehrperson vorgegeben werden.

Am Beispiel der Tischlampe kann beispielsweise mit den Schüler:innen besprochen werden, dass diese über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden ist. Wenn der Schalter bei einer Lampe betätigt wird, geht sie an. Es wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Man kann also sagen, dass hier Energie übertragen wird. Solche elektrischen Systeme werden als **kabelgebundene Systeme** bezeichnet“. Dies kann anschließend für ähnliche elektrische Systeme, wie beispielsweise einem elektrischen Föhn, wiederholt werden. Die Schüler:innen können noch weitere Beispiele aus ihrem Alltag nennen.

In diesem Schritt soll die Energieumwandlung noch nicht im Detail diskutiert werden. Stattdessen soll an den Wirkungen der elektrischen Systeme festgemacht werden, dass Energie übertragen wurde (z. B. wenn der Föhn in der Steckdose angesteckt wird, lässt er sich einschalten und warme Luft strömt heraus).

Analog wird dies für die zweite Kategorie an elektrischen Systemen wiederholt: „Bestimmt hast du schon die neuen Smartphone-Ladestationen gesehen, bei denen dein Smartphone ohne Kabel aufgeladen werden kann. Du musst es dafür nur auf die Station legen. Solche elektrischen Systeme bezeichnen wir als **kabellose Systeme**.“ Als weitere Beispiele bieten sich AirPods, elektrische Zahnbürsten oder andere Gegenstände aus der Alltagswelt der Schüler:innen an.

2) Übung und Festigung der neuen Begriffe



Zum Üben und Festigen sollten an dieser Stelle die Bilderkarten 1.1 an der Tafel befestigt werden. Im Plenum werden dafür die Bilder nach und nach in die zwei Kategorien (kabelloses System –rechte Tafelseite, kabelgebundenes System – linke Tafelseite) eingeteilt. Es können auch gemeinsam weitere Beispiele gesucht werden.

Alternativ kann dies auch in der Form eines Spiels mit den Schüler:innen behandelt werden. Jede:r erhält ein Bild und soll sich, je nach zugehöriger Kategorie (Energiequelle / Energieumwandler), entweder auf die rechte oder linke Seite der Klasse stellen. Anschließend wird mit den Schüler:innen besprochen, warum sie sich für die eine oder andere Seite der Klasse entschieden haben.

3) Formulierung eines Merksatzes

Zusammenfassend lässt sich dies als Merksatz im Heft folgendermaßen eintragen:



Die Energieübertragung kann in **kabelgebundenen** Systemen (z. B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) oder **kabellosen** Systemen (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Smartphone, ...) stattfinden.

1.2 Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium

Schritte	Materialien
1) Begriffsklärung: Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium	PPT
2) Übung und Festigung der neuen Begriffe	Bilderkarten 1.2 (optional)
3) Formulierung eines Merksatzes	

1) Begriffsklärung: Energiequelle, Energieumwandler und Überträgermedium

Als nächstes werden die Bestandteile der elektrischen Systeme eingehender mit den Schüler:innen besprochen, insbesondere die Begriffe **Energiequelle**, **Energieumwandler** und **Überträgermedium**.

Da viele Schüler:innen bereits Vorwissen zu elektrischen Stromkreisen mitbringen und vielleicht andere Begriffe gewohnt sind (z. B. „Verbraucher“ statt „Energieumwandler“, „Spannungsquelle“ statt „Energiequelle“, ...), sollte hier eine Entscheidung getroffen werden, wie man damit umgehen möchte. Es wird empfohlen, Begriffe wie „Verbraucher“ eher zu vermeiden, da sie den Verbrauch der Energie (oder Strom) am elektrischen Gerät suggerieren und somit zu Verständnisschwierigkeiten führen könnten. In diesem Unterrichtsdesign wird daher stets vom „Energieumwandler“ gesprochen, um seine Eigenschaft, Energie umwandeln zu können, hervorzuheben. Letztendlich ist es aber entscheidend, dass die Lehrperson konsistent mit ihrer Begriffswahl bleibt.

Für die Einführung der drei Begriffe können die Lampe, der Föhn, das Smartphone und die elektrische Zahnbürste als Beispiele für **Energieumwandler** genannt werden. Zur Erklärung des Begriffs kann hier ergänzt werden, dass bei einem solchen Energieumwandler **elektrische Energie** in eine **andere Energieform** umgewandelt wird. Neben einem Energieumwandler enthält ein Energieübertragungssystem üblicherweise auch eine **Energiequelle**. Als Beispiele können der Generator, die Batterie, die Solarzelle und die Steckdose genannt werden. Weiters wird besprochen, dass einige elektrische Systeme zusätzlich ein **Überträgermedium** in Form eines Leiterkabels benötigen.

Als konkretes Beispiel kann wieder die Tischlampe besprochen werden: „Die Lampe ist über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden. Die Steckdose wird in diesem Beispiel als Energiequelle bezeichnet, da sie das elektrische System mit elektrischer Energie versorgt. (Hinweis:

Die Energie der Steckdose kommt von einem Kraftwerk, eine weitere Energiequelle). Die Tischlampe bezeichnen wir als Energieumwandler, da sie elektrische Energie in Strahlungs- und Innere Energie umwandelt.“

2) Übung und Festigung der neuen Begriffe



Zum Üben und Festigen kann an dieser Stelle im Plenum eine Liste an Energiequellen und Energieumwandlern erstellt werden (z. B. Energiequelle – rechte Tafelseite, Energieumwandler – linke Tafelseite).

Auch an dieser Stelle kann wieder eine ähnliche Übung wie bei 1.1 durchgeführt werden.



Zum Üben und Festigen bietet es sich an dieser Stelle an, weitere Beispiele für elektrische Systeme mit den Schüler:innen zu besprechen und die Zuordnung der Begriffe Energiequelle und Energieumwandler zu üben (siehe *Bilderkarten 1.2* und *Abbildung 2*).

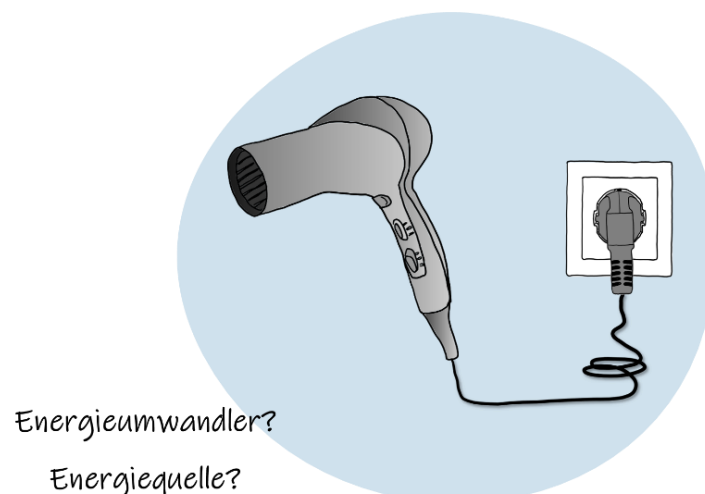


Abbildung 2: Zuordnung der Begriffe Energiequelle und -umwandler an einem Beispiel. Der elektrische Föhn stellt dabei den Energieumwandler und die Steckdose die Energiequelle dar.

3) Formulierung eines Merksatzes

Ins Heft lässt sich ein entsprechender Merksatz eintragen, der zu einem späteren Zeitpunkt immer wieder herangezogen werden kann:



Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer **Energiequelle** (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem **Energieumwandler** (z. B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z. B. Leiterkabel).

Block 2: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern I

Diese Sequenz umfasst 3 Unterrichtseinheiten.

Inhalte		Materialien
2.1	Das magnetische Feld	PPT, Versuch 1, Arbeitsblatt 2.1, Strommesszange (optional)
2.2	Das elektrische Feld und die Oberflächenladungen	PPT, Versuch 2, Arbeitsblatt 2.2, ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad)
2.3	Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss	PPT, Textblatt 2.3, Arbeitsblatt 2.3, ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad), Versuch 3

Im zweiten Block werden Felder thematisiert. Die meisten Schüler:innen haben schon einmal von diesem Begriff gehört, können ihn aber nicht klar definieren. Damit alle Schüler:innen auf dem gleichen Stand sind, ist es wichtig, dass diese Unterrichtssequenz nicht übersprungen wird, auch wenn Teile davon schon in ähnlicher Form in Unterricht durchgeführt worden sind (z. B. der Oersted-Versuch). Die Interviewstudie hat gezeigt, dass Schüler:innen viele Fragen zu den nachfolgenden Versuchen haben und es eine wichtige Erfahrung für sie ist, die Versuche selbst durchführen zu können.

In dieser Unterrichtssequenz sollen die Schüler:innen erkennen, dass es um elektrische Systeme elektromagnetische Felder gibt, die für die Energieübertragung verantwortlich sind. Zur besseren Übersicht wird zunächst das magnetische und anschließend das elektrische Feld einzeln betrachtet. Dazu wird der Raum um den elektrischen Stromkreis genauer unter die Lupe genommen.

2.1 Das magnetische Feld

Schritte		Materialien
1)	Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld	PPT, Versuch 1, Arbeitsblatt 2.1
2)	Erklärung durch Lehrperson	PPT, Arbeitsblatt 2.1
3)	Übungen zum magnetischen Feld	PPT, Versuch 1.1 (optional)
4)	Formulierung eines Merksatzes	

1) Hands-on-Versuch zum magnetischen Feld

Zuerst wird ein einfacher Versuch zum Magnetfeld durchgeführt. Idealerweise sollte er als Hands-on-Versuch in Kleingruppen gemacht werden, da dies wesentlich zur Konzeptbildung der Schüler:innen beitragen kann.



HANDS-ON

Versuch 1: Das magnetische Feld.

Material: 1 Batterie¹, 1 Kabel mit Krokodklemmen, 1 Kompass

Durchführung: Der Kompass wird unter ein Kabel des geöffneten Stromkreises gehalten. Dabei sollte die Kompassnadel entlang des Leiterkabels zeigen (siehe Abbildung 3a). Anschließend wird der Stromkreis geschlossen und die Kompassnadel beobachtet (siehe Abbildung 3b). Der Versuch kann an mehreren Stellen um den Stromkreis wiederholt werden.

Hinweis: Da es sich um einen Kurzschluss handelt, sollte der Versuch nur kurz durchgeführt werden. Die Schüler:innen sollen die Kabel von der Batterie trennen, sobald die Kompassnadel ausgelenkt wurde.

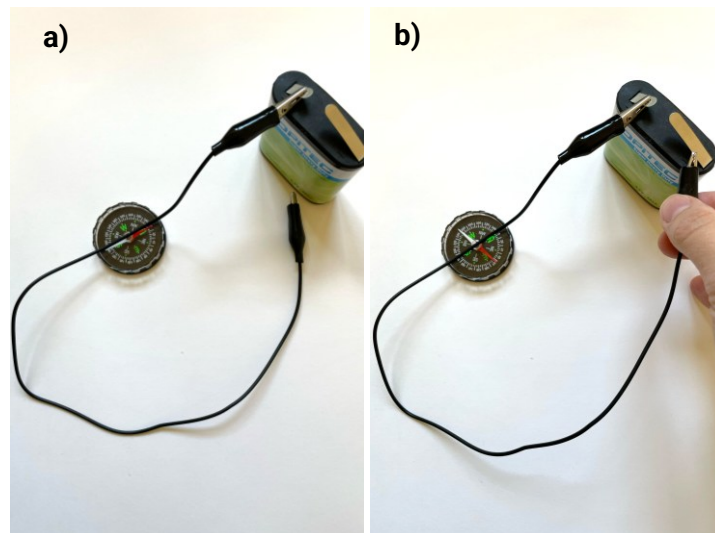


Abbildung 3: Kompass-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes. **a)** Der Kompass wird in einem offenen Stromkreis unter ein Leiterkabel gelegt und zeigt nach Norden. **b)** Der Kompass lenkt sich unter dem stromdurchflossenen Leiter senkrecht zum Kabel aus.

Im Plenum sollten die Beobachtungen und Erklärungen der Schüler:innen festgehalten werden. Vielleicht erwähnen die Schüler:innen dabei, dass die Kompassnadel, abhängig von ihrer Position im Stromkreis, in unterschiedliche Richtungen gezeigt hat.

2) Erklärung durch Lehrperson

Als Erklärungsmodell für diese Beobachtung wird das magnetische Feld mithilfe einer Feldliniendarstellung eingeführt. Den Schüler:innen wird erklärt, dass um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld entsteht. Bringt man den Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, so richtet sich die Kompassnadel senkrecht² dazu aus. Daraus kann

¹ Empfohlen wird eine 4,5 V Batterie (siehe Materialliste).

² Aufgrund des Erdmagnetfeldes wird die Kompassnadel nicht exakt im 90° Winkel abgelenkt. Falls dies von den Schüler:innen beobachtet wird, sollte es diskutiert werden.

geschlossen werden, dass das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter verlaufen muss (siehe Abbildung 4).

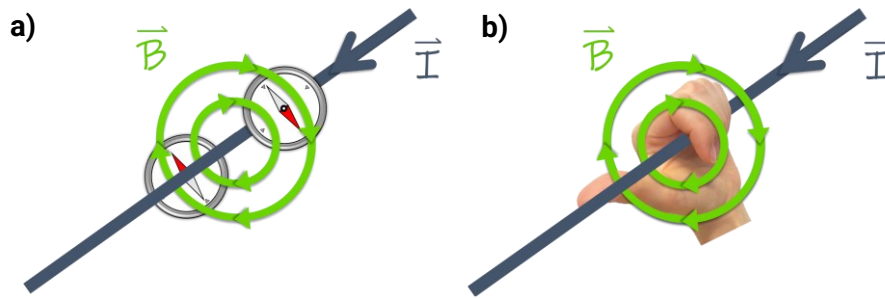


Abbildung 4: Magnetische Feldlinien beim Kompass-Versuch. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines elektrischen Leiters, durch den ein Strom I fließt. Um den Leiter entsteht ein Magnetfeld, das mit kreisförmigen Magnetfeldlinien dargestellt werden kann. **a)** Ein Kompass wird an verschiedene Positionen gehalten und man kann erkennen, dass sich die Nadel entlang des Magnetfelds ausrichtet. **b)** Die Richtung des Magnetfeldes kann mit der linken Hand bestimmt werden: Der Daumen zeigt am Kabel entlang in die Elektronenflussrichtung, die übrigen Finger krümmen sich um das Leiterkabel in Richtung des Magnetfeldes.

Das magnetische Feld kann mit Magnetfeldlinien beschrieben werden. Dabei sollten die Schüler:innen aber deutlich darauf hingewiesen werden, dass die Feldlinien nur eine Anschauungshilfe darstellen, mit denen man einige Eigenschaften von magnetischen Feldern gut beschreiben kann. Die Richtung des Magnetfeldes kann dabei durch die Linke-Hand-Regel besprochen werden: Der Daumen der linken Hand wird in Richtung der Elektronenflussrichtung (von Minus zu Plus) gehalten. Die übrigen Finger krümmen sich um den Leiter und zeigen in die Richtung des Feldverlaufs.

3) Übungen zum magnetischen Feld

Im nächsten Schritt sollte mit den Schüler:innen eine Verständnisaufgabe besprochen werden:



Frage: Warum richtet sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht aus?

Die Schüler:innen sollten erkennen, dass es nur ein Magnetfeld gibt, wenn der Stromkreis geschlossen ist und somit ein Elektronenfluss im Inneren des Leiters zustande kommt. Der Kompass wird daher nur senkrecht zum Leiter ausgelenkt, wenn es ein Magnetfeld um den Leiter gibt.

Als Vertiefung kann die Strommesszange mit den Schüler:innen besprochen werden.



Versuch 1.1: Die Strommesszange

Material: 1 Batterie³, 1 Kabel mit Krokodklemmen, 1 Lämpchen, 1 Strommesszange, ggf. 1 Ventilator

Durchführung: Die Strommesszange wird eingeschaltet, indem das Rädchen auf ‚20A‘ gedreht wird. Über den Knopf ‚Select‘ muss noch Gleichstrom ‚DC‘ ausgewählt werden. Das Display sollte anfangs eine Stromstärke von $I = 0.000\text{ A}$ anzeigen⁴. Der Stromkreis wird geschlossen, indem beide Anschlüsse der Batterie mit beiden Anschlüssen der Lampe verbunden werden⁵. Anschließend wird die Strommesszange an verschiedenen Positionen (vor bzw. hinter dem Energieumwandler) um das Leiterkabel gehalten und der Wert abgelesen (siehe Abbildung 5a und b).

Erklärung: Eine Strommesszange (siehe Abbildung 6) ist ein Gerät, das im Haushalt oder auf der Baustelle überall dort zur Anwendung kommt, wo man elektrische Ströme messen möchte. Wenn die Zange um ein Kabel gehalten wird, misst sie das Magnetfeld, das um den stromdurchflossenen Leiter entsteht. Aus der Stärke des Magnetfeldes wird die Stromstärke berechnet, die am Display abzulesen ist. Die Messung kann man an verschiedenen Positionen im Stromkreis wiederholen um zu zeigen, dass in einem einfachen Stromkreis die Gesamtstromstärke überall gleich groß ist.

HANDS-ON

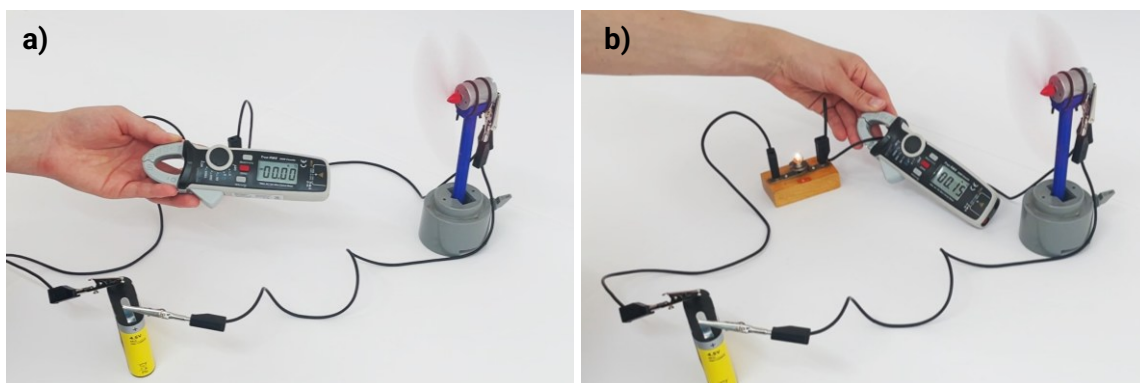


Abbildung 5: Stromzangen-Versuch zum Nachweis des Magnetfeldes. **a)** Das Display der Stromzange zeigt 00.00 A an, wenn sie nicht um ein Kabel gehalten wird. **b)** Das Display der Stromzange zeigt 00.15 A an, wenn die Stromzange um ein Kabel gehalten wird.

³ Empfohlen wird eine 4,5 V Batterie (siehe Materialliste).

⁴ Falls das Display nicht eine Stromstärke von $I = 0.000\text{ A}$ anzeigt, weil in der Nähe elektrische Geräte mit Magnetfeldern vorhanden sind, muss noch auf ‚Zero‘ gedrückt werden.

⁵ Hier kann auch ein Ventilator in Serie geschaltet werden, damit die Messung auch zwischen zwei Energieumwandlern erfolgen kann.

Zur Erklärung kann wieder das magnetische Feld mithilfe von Magnetfeldlinien dargestellt werden:

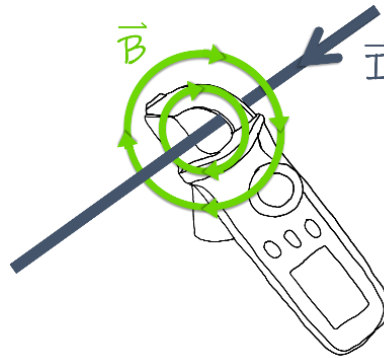


Abbildung 6: Magnetische Feldlinien beim Stromzangen-Versuch. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines elektrischen Leiters, durch den ein Strom I fließt. Um den Leiter entsteht ein Magnetfeld, das mit kreisförmigen Magnetfeldlinien dargestellt werden kann. Die Strommesszange wird um den Leiter gehalten und bestimmt die Stromstärke über das Magnetfeld.



Video zum Versuch 1.2: Die Strommesszange

Falls keine Strommesszange für eine reale Demonstration vorhanden ist, gibt es alternativ ein Video in den Materialien.

4) Formulierung eines Merksatzes

Als Merksatz kann noch folgende Formulierung ins Heft eingetragen werden:



Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **magnetisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden.

2.2 Das elektrische Feld und die Oberflächenladungen

Schritte	Materialien
1) Kognitives Stoppschild	PPT
2) Wiederholung und Vertiefung zu elektrischen Energiequellen	PPT
3) Kognitives Stoppschild	PPT
4) Oberflächenladungen in einem offenen Stromkreis	PPT
5) Formulierung eines Merksatzes	
6) Demo-Versuch zum elektrischen Feld	Versuch 2, Arbeitsblatt 2.2, ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad)
7) Erklärung durch Lehrperson	Arbeitsblatt 2.2
8) Elektrisches Feld in einem offenen und geschlossenen Stromkreis	PPT
9) Übungen zum elektrischen Feld	
10) Formulierung eines Merksatzes	

1) Kognitives Stoppschild

Zu Beginn dieses Abschnitts sollten die Schüler:innen darauf aufmerksam gemacht werden, dass in weiterer Folge eine zweite Art von Feld besprochen wird, das sich vom magnetischen Feld unterscheidet. Die Ergebnisse der Interviewstudie haben gezeigt, dass ein Kognitives Stoppschild an dieser Stelle hilfreich sein kann, um Schüler:innen vor der Verwechslung vom magnetischen und elektrischen Feld zu warnen. Dieses könnte folgendermaßen lauten:



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Bisher haben wir vom magnetischen Feld um den Leiter gesprochen. Nun schauen wir uns ein anderes Feld genauer an. Dieses unterscheidet sich in Ursache, Form und Richtung vom magnetischen Feld!

2) Wiederholung und Vertiefung zu elektrischen Energiequellen

Um das elektrische Feld einzuführen wird zunächst ein kleiner Exkurs zu Oberflächenladungen vorgenommen. Mit den Schüler:innen wird wiederholt, dass es verschiedene Arten von Energiequellen (z. B. Generator, Batterie, Solarzelle, ...) gibt. Ergänzend dazu wird erklärt, dass elektrische Energiequellen immer dieselbe Wirkung haben (auch wenn sie sich äußerlich voneinander unterscheiden): Es kommt zu einer Verschiebung von Ladung im Inneren. Bei einem Pol entsteht somit ein Überschuss an negativ geladenen Elektronen. Am anderen Pol fehlen diese Elektronen, was insgesamt zu einer positiven Ladung führt. Die Ladungen werden als Oberflächenladungen bezeichnet, da sie sich auf der Oberfläche des Leiters befinden (siehe Abbildung 7). Die Stärke der Energiequelle bestimmt wie viele Ladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt werden.

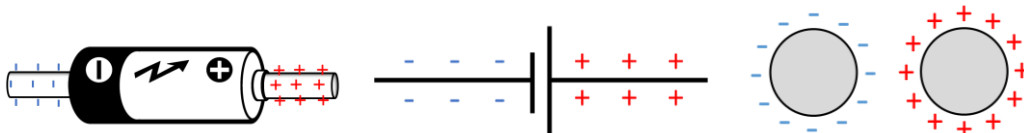


Abbildung 7: Unterschiedliche Darstellungen für Oberflächenladungen. Links ist eine Batterie zu sehen, an deren Polen sich negative und positive Oberflächenladungen sammeln. In der Mitte ist die Darstellung der Batterie als Schaltsymbol zu sehen. Rechts ist ein Querschnitt des Leiters zu sehen, der mit dem positiven und negativen Pol der Batterie verbunden ist. Man kann erkennen, dass sich die Oberflächenladungen rund um den Leiter verteilen.

3) Kognitives Stoppschild

Die Ergebnisse der Interviewstudie haben gezeigt, dass manche Schüler:innen die Oberflächenladungen mit den Ladungen im Leiterinneren verwechseln, wenn dies nicht explizit besprochen wurde. Es ist daher sinnvoll, an dieser Stelle ein kognitives Stoppschild einzubauen, das die Schüler:innen auf diese Verwechslungsgefahr hinweisen soll:



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Beachte, dass die Oberflächenladungen von den Ladungen im Inneren des Leiters zu unterscheiden sind!

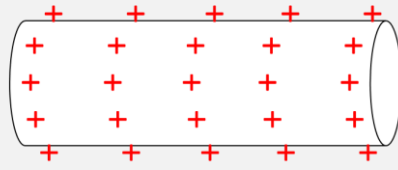


Abbildung 8: Abschnitt eines Leiters mit positiven Oberflächenladungen. Die positiven Ladungen an der Oberfläche werden mit einem Plus „+“ rund um den Leiter dargestellt, negative mit einem Minus „-“.

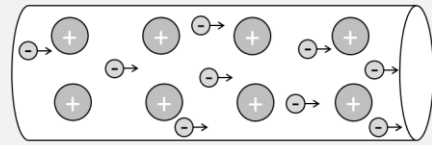


Abbildung 9: Abschnitt eines Leiters mit Ladungen im Leiterinneren. Die Ladungen im Inneren des Leiters werden eingekreist und grau gezeichnet, um sie von den Oberflächenladungen zu unterscheiden.

Es bietet sich auch an, diese Ladungen durch unterschiedliche Darstellungsformen zu unterscheiden. Die Oberflächenladungen werden in diesem Unterrichtsdesign immer mit einem roten Plus „+“ oder blauen Minus „-“ gekennzeichnet (siehe Abbildung 8), während die Ladungen im Leiterinneren als eingekreiste, graue Plus „+“ bzw. Minus „-“ dargestellt werden. Diese Darstellungsformen sollen den Schüler:innen helfen, Oberflächenladungen und Ladungen im Leiterinneren klar voneinander unterscheiden zu können.

4) Oberflächenladungen in einem offenen Stromkreis

Als Nächstes kann mit den Schüler:innen besprochen werden, wie sich die Oberflächenladungen auf einem Kabel verteilen, dass mit der Energiequelle verbunden ist (siehe Abbildung 10).

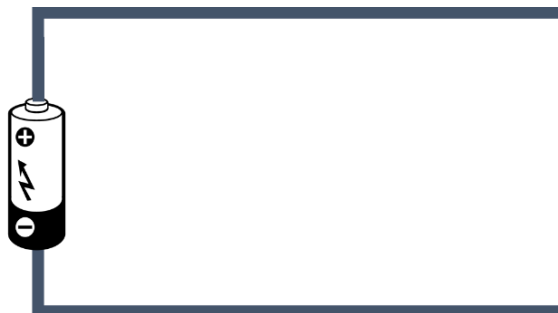


Abbildung 10: Einfacher Stromkreis mit Batterie und Kabeln.

Die Schüler:innen sollen zunächst alleine überlegen, wie sich die Oberflächenladungen verteilen könnten, wenn die Anschlüsse der Batterie jeweils mit einem losen Kabel verbunden sind. Zur Auflösung kann die Musterlösung (siehe Abbildung 11) mit den Schüler:innen besprochen werden. Am Pluspol der Batterie verteilen sich positive Oberflächenladungen, während sich am Minuspol negative Oberflächenladungen gleichmäßig entlang des gesamten Kabels verteilen. Sie sind rund um den Leiter angeordnet und statisch, d.h. sie bewegen sich nicht wie die Elektronen im Leiterinneren bei einem geschlossenen Stromkreis!



Abbildung 11: Oberflächenladungen in einem offenen Stromkreis. Die Ladungen verteilen sich im ersten Moment gleichmäßig entlang der Kabel und bleiben dann statisch auf der Leiteroberfläche. Zu beachten ist, dass die Ladungen hier exemplarisch an einer Seite des Leiters gezeichnet werden, sich aber tatsächlich rund um den Leiter anordnen (siehe Abbildung 8).

5) Formulierung eines Merksatzes

Die Oberflächenladungen werden im nächsten Schritt als Ursache eines elektrischen Feldes interpretiert. Man könnte an dieser Stelle schon im Heft einen Merksatz festhalten aber mit den Schüler:innen besprechen, dass der zweite Satz erst im Folgenden besprochen wird:



Energiequellen pumpen **Oberflächenladungen** auf die Leiteroberfläche. Diese generieren ein elektrisches Feld.

6) Demo-Versuch zum elektrischen Feld

Im nächsten Schritt lernen die Schüler:innen das elektrische Feld näher kennen. Dazu wird ein Demonstrationsversuch mit einer Hochspannungsquelle gezeigt.



Video zum Versuch 2: Das elektrische Feld.

Alternativ zu Versuch 2 kann an dieser Stelle auch ein Video⁶ des Versuchs gezeigt werden. Dies kann entweder gemeinsam mit der Klasse am Beamer oder in Einzel- bzw. Paararbeit mit digitalen Endgeräten (z. B. iPads) erfolgen.

⁶ Zur Verfügung stehen drei Versuchsvideos mit verschiedenen Variationen: 1) Durchführung mit einem geschlossenen Stromkreis und einem Strohhalm, 2) Durchführung mit einem offenen Stromkreis und einem Strohhalm und 3) Durchführung mit einem geschlossenen Stromkreis und einem Alufolienstück. Dabei sollte jedenfalls Variation 1 mit den Schüler:innen angeschaut werden. Die anderen beiden Variationen sind optional.



DEMO-
VERSUCH

Versuch 2: Das elektrische Feld.

Material: Stromkreis mit isolierten Hochspannungskabeln, vier Reihenwiderstände ($U = 6,5 \text{ kV}$; $R = 5 \times 3,3 \text{ M}\Omega$) und ein Strohhalm, der an einem bunten Faden⁷ befestigt wird⁸

Durchführung: Der Versuch wird, wie in den Abbildungen unten zu sehen, aufgebaut. An einem Faden wird ein kurzer Strohhalm befestigt und in die Nähe des Leiterkabels gebracht. Es bietet sich an, den Faden an einem Holzspieß o. ä. zu befestigen. Der Strohhalm wird zuerst an die äußeren Widerstände gehalten und anschließend zum mittleren Widerstand gebracht.

Hinweis: Da bei dem Versuch eine sehr hohe Spannung benötigt wird, ist es wichtig, dass die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen (siehe Box unten) getroffen werden. Alternativ kann an dieser Stelle ein Video (siehe Materialien) gezeigt werden.

Sicherheitshinweise für den Hochspannungsversuch:

- Gleichstrom ab 120V, Wechselstrom ab 50V (bei 50Hz) und allgemein Strom ab 50mA sind lebensbedrohlich.
- Der Versuch darf nur von Lehrkräften nach einer Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden. Alternativ steht ein Video zur Verfügung.
- Elektrische Stromkreise mit hohen Spannungen oder Strömen sollten nur mit einer Hand bedient werden, um einen Stromfluss über das Herz zu vermeiden. Die zweite Hand kann hinter dem Rücken platziert werden.
- Personen mit Herzschrittmacher dürfen sich nicht in der Nähe aufhalten, da starke elektromagnetische Felder auftreten können.
- Brandgefahr besteht durch Kurzschlussströme, Leckströme, Funkenüberschlag oder überbeanspruchte Bauteile. Das Bereithalten von Wasser, Sand, Feuerlöscher oder Feuerdecke ist daher eine wichtige Vorsichtsmaßnahme! Vor dem Löschen eines Brandes muss sichergestellt werden, dass keine Spannung anliegt.
- Die Verkabelungen sollten vor der Inbetriebnahme von einer zweiten Person geprüft werden. Sogenannte ‚Stolperdrähte‘ sind zu vermeiden.
- Für den Versuch sind ausschließlich hochspannungstaugliche Kabel und isolierte Stecker zu verwenden.
- Nach dem Ausschalten des Geräts kann noch eine hohe Spannung anliegen (Kondensator) – Vorsicht!

⁷ Es wird die Verwendung eines roten Fadens empfohlen, damit die Schüler:innen ihn klar erkennen können.

⁸ Alternativ kann statt einem Strohhalm auch ein kleines Alufolienstück verwendet werden (siehe Video). Dabei kann die Anziehung und Abstoßung am Leiter beobachtet werden, die unterschiedlichen Ladungen sind aber nicht erkennbar.

7) Erklärung durch Lehrperson

Den Schüler:innen wird im Anschluss an den Versuch erklärt, dass um einen Leiter, der mit einer Energiequelle verbunden ist, ein elektrisches Feld entsteht. Dies wird durch die Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche hervorgerufen. Bringt man einen Strohhalm oder ein kleines Stück Alufolie in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung (Anziehung / Abstoßung) beobachtet werden (siehe Abbildung 12). Beim Strohhalm kann zudem die unterschiedliche Ladungsart an den äußeren Widerständen beobachtet werden – je nachdem, welche Seite des Strohhalms zum Widerstand gedreht ist.

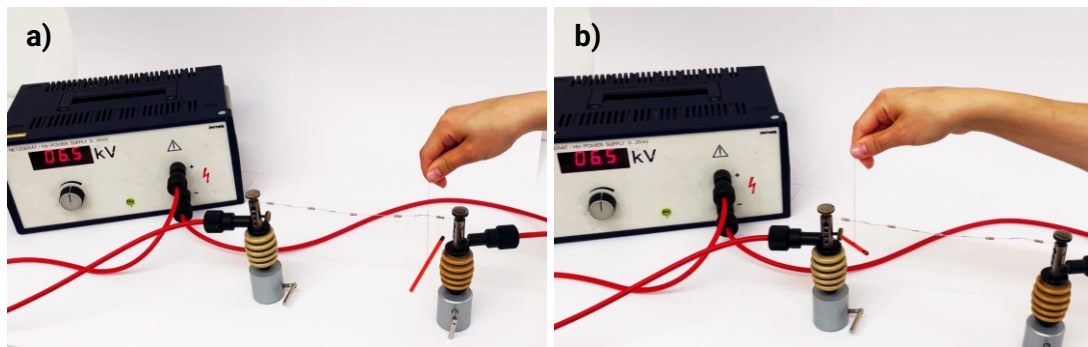


Abbildung 12: Versuch zum elektrischen Feld. Zu sehen ist eine Hochspannungsquelle, die mit fünf in Serie geschalteten Ohm'schen Widerständen über ein Stativ verbunden ist. An die Widerstände wird ein Strohhalm gehalten, der über einen Faden aufgehängt wird. **a)** das schwarz angemalte Ende des Strohhalms wendet sich dem Widerstand rechts außen zu. **b)** das andere Ende des Strohhalms wendet sich dem Widerstand links außen zu.

8) Elektrisches Feld in einem offenen und geschlossenen Stromkreis

Anschließend wird näher auf die Oberflächenladungen als Ursache des elektrischen Feldes eingegangen: Die Energiequelle pumpt Oberflächenladungen auf den Leiter, die sich dort verteilen und ein elektrisches Feld verursachen⁹. Das elektrische Feld kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden, die von Plus zu Minus verlaufen (siehe Abbildung 13)¹⁰. Das elektrische Feld der Oberflächenladungen verursacht einen Stromfluss im elektrischen Stromkreis, sobald er geschlossen vorliegt, also jeder Anschluss der Energiequelle mit je einem Anschluss des Energieumwandlers verbunden ist (siehe Abbildung 14).

⁹ Die Oberflächenladungen im offenen Stromkreis verteilen sich gleichmäßig entlang des gesamten Kabels, das mit dem jeweiligen Pol der Energiequelle verbunden ist. Bei einem geschlossenen Stromkreis ist diese Verteilung etwas komplizierter [7], [8], [9], wird aber hier vereinfacht dargestellt.

¹⁰ Der Einfachheit halber wird darauf verzichtet, die elektrischen Feldlinien außerhalb des Stromkreises zu zeichnen. Stattdessen werden die Feldlinien nur zwischen den Leiterkabeln dargestellt.

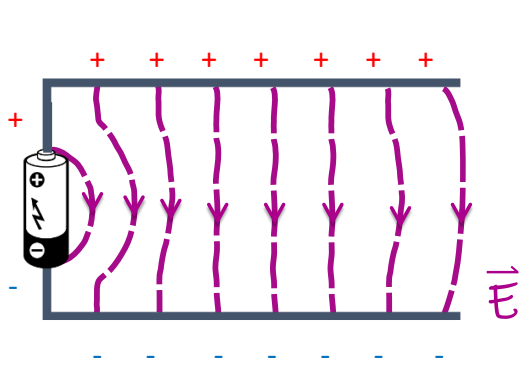


Abbildung 13: Darstellung des elektrischen Feldes im offenen Stromkreis.

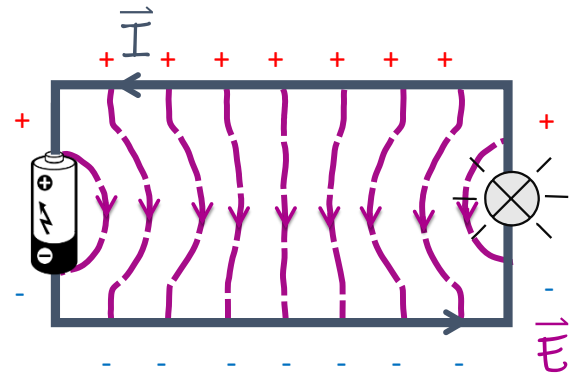


Abbildung 14: Darstellung des elektrischen Feldes im geschlossenen Stromkreis.

9) Übungen zum elektrischen Feld



Im Plenum können noch weitere elektrische Systeme mit den Schüler:innen gesammelt werden, bei denen ebenfalls ein elektrisches Feld entsteht. Beispiele, die oft von Schüler:innen genannt werden sind unter anderem: Lampen, Smartphones, elektrische Zahnbürsten, Spielekonsolen, Glätteisen, Föhn, Taschenlampen, Drucker, Lampen, Hochspannungsleitungen, Batterien, Fernseher, Mixer. Aus dieser Sammlung soll deutlich werden, dass alle elektrischen Systeme auch von elektrischen Feldern umgeben sind.

10) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann ein entsprechender Eintrag gemacht werden:



Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **elektrisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.

2.3 Das elektromagnetische Feld und der Energiefluss

Schritte	Materialien
1) Kognitives Stoppschild	PPT
2) Erklärung durch Lehrperson	Textblatt 2.3
3) Übungen zur Energie-Hand-Regel	Arbeitsblatt 2.3
4) Simulation zum Elektromagnetischen Feld	ggf. digitales Endgerät (z. B. iPad)
5) Optionale Erweiterung: Poynting Vektor	
6) Formulierung eines Merksatzes	
7) Kognitives Stoppschild	PPT
8) Hands-On-Versuch zur Energieübertragung	Versuch 3
9) Optionale Erweiterung: Mind-Map	

1) Kognitives Stoppschild

Zu Beginn dieses Abschnitts sollte wieder ein kognitives Stoppschild eingebaut werden. Den Schüler:innen sollte klar gemacht werden, dass das elektromagnetische Feld, das im folgenden besprochen wird, kein neues, drittes Feld ist, sondern vielmehr die kombinierte Wirkung des elektrischen und magnetischen Feldes darstellt. Es wird empfohlen die folgende Wortwahl zu wählen:



KOGNITIVES STOPPSCHILD:

- Bis jetzt haben wir einzeln über das elektrische und das magnetische Feld gesprochen, wobei jedes seine eigene Ursache, Form und Richtung hat.
- Wissenschaftler:innen verwenden den Begriff „elektromagnetisches Feld“ (kurz: EM-Feld), um die Kombination dieser beiden Felder zu benennen.
- Aber lass dich nicht verwirren! Das elektromagnetische Feld hat keine Richtung wie das elektrische und das magnetische Feld und wird daher auch nicht durch einen der Pfeile in der Abbildung dargestellt! Der Ausdruck "elektromagnetisches Feld" bedeutet einfach "die kombinierte Wirkung des elektrischen und des magnetischen Feldes".

2) Erklärung durch Lehrperson

Nun kann das elektromagnetische Feld genauer besprochen werden. Mit den Schüler:innen sollte zunächst wiederholt werden, dass sie bereits das elektrische Feld, welches durch die Oberflächenladungen entsteht, und das magnetische Feld, welches durch den Stromfluss im Leiter zustande kommt, kennengelernt haben. Neu hinzu kommt nun die Kombination der beiden Feldern: Gemeinsam ergeben das magnetische und das elektrische Feld das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand (siehe Abbildung 15) hergeleitet werden: Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss ebenfalls senkrecht darauf einzeichnen¹¹.

Mit den Schüler:innen sollte besprochen werden, dass die Energie von der Batterie durch das elektromagnetische Feld bis zum Energieumwandler übertragen wird. Dies kann meist direkt an der Energieumwandlung beobachtet werden (z. B. Lämpchen leuchtet).

An dieser Stelle kann das Textblatt 2.3 ausgegeben werden, um Abbildung 16 gemeinsam zu besprechen.

¹¹ Es ist wesentlich, dass hier die Linke-Hand-Regel und nicht die Rechte-Hand-Regel verwendet wird, da in diesem Unterrichtsdesign durchwegs die physikalische Stromrichtung (Elektronenflussrichtung vom Minus- zum Pluspol der Batterie) verwendet wird.

Energie-Hand-Regel für die linke Hand

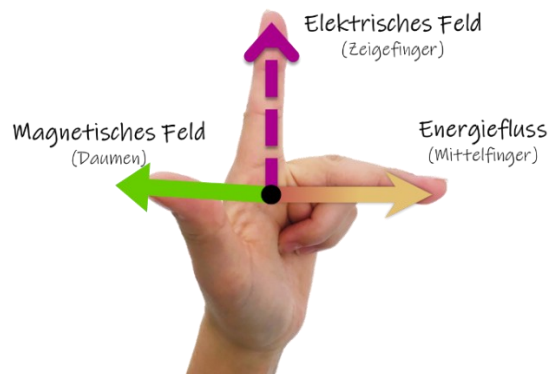
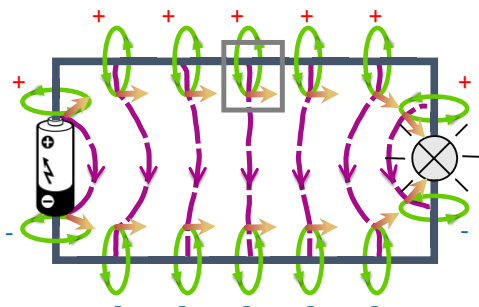


Abbildung 15: Energie-Hand-Regel für die linke Hand.

3) Übungen zur Energie-Hand-Regel



Die Energie-Hand-Regel für die linke Hand sollte unbedingt mit den Schüler:innen an zwei oder drei Stellen anhand Abbildung 16 eingeübt werden. Manche Schüler:innen sind vielleicht mit der Rechten-Hand-Regel vertraut und müssen sich hier ggf. umgewöhnen. Als Hilfestellung bietet es sich daher an, auf die Fingerspitzen die Abkürzungen der Felder (El, B, En) und zu schreiben.



Legende:

- Elektrisches Feld (Zeigefinger)
- Magnetisches Feld (Daumen)
- Energiefluss (Mittelfinger)

Abbildung 16: Konstruktion des Energieflusses im einfachen Stromkreis mithilfe des elektromagnetischen Feldes.

4) Simulation zum Elektromagnetischen Feld

Simulation zum EM Feld:



Zur Visualisierung kann an dieser Stelle eine Simulation zum EM-Feld verwendet werden. Es wird empfohlen, die Anwendung zunächst mit den Schüler:innen zu öffnen und ihnen dann Zeit zu geben, sie näher zu erkunden.



schmidro.it.ch.io/etransp-m

5) Optionale Erweiterung: Poynting Vektor



Der Poynting Vektor beschreibt das Kreuzprodukt aus dem elektrischen und magnetischen Feld: $\vec{S} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right) (\vec{E} \times \vec{B})$.¹²

6) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann noch folgender Merksatz notiert werden:



Die Energieübertragung findet durch das **elektromagnetische Feld** statt. Dies kann mit dem **Energiefluss** beschrieben werden.

7) Kognitives Stoppschild

Die Interviewstudie hat ergeben, dass es wichtig ist, den Unterschied zwischen dem Energiefluss und dem Stromfluss explizit anzusprechen. Hierzu eignet sich wieder ein kognitives Stoppschild.



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Der Energiefluss beschreibt den Fluss der Energie, der Stromfluss den Fluss des Stromes!

8) Hands-On-Versuch zur Energieübertragung

Zur Übung und Festigung kann an dieser Stelle ein kleiner Versuch durchgeführt werden. Dazu wird ein einfacher Stromkreis mit einer Batterie und einem Ventilator aufgebaut. Die Schüler:innen sollten diesen Versuch möglichst selbst durchführen und ihre Ideen in einer Paararbeit diskutieren. Erst dann wird die Auflösung im Plenum besprochen.



Versuch 3: Das elektromagnetische Feld.

Material: 4,5 V Batterie, 2 Kabel mit Klemmen, 1 Ventilator

Durchführung: Die Batterie wird über zwei Kabeln mit dem Ventilator verbunden. Daraufhin beginnt der Ventilator sich zu drehen.

Hinweis: Statt Ventilatoren können auch kleine Lämpchen verwendet werden.

Aufgabenstellung: Betätigst du den Schalter bei einem Ventilator, so scheint dieser sofort anzugehen. Woher kommt die Energie, um den Ventilator zu betreiben und wie wird diese übertragen? Verwende für deine Erklärung das vorgestellte Konzept.

LÖSUNG: Die Energie wird über das EM Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen.

HANDS-ON

¹² Mit besonders leistungsstarken Klassen kann die mathematische Beschreibung des Energieflusses besprochen werden. Dies könnte aber auch auf einige Schüler:innen abschreckend wirken, weshalb es sich anbietet, diese Erweiterung als Differenzierungsmöglichkeit einzubauen.

Was hier schön verdeutlicht werden kann, ist, dass der Energieübertragungsprozess erst dann ermöglicht wird, wenn es sowohl ein E-Feld als auch ein B-Feld gibt. Das E-Feld kommt durch den Anschluss an eine Energiequelle zustande. Das B-Feld wird erst durch einen Stromfluss (AC oder DC) hervorgerufen. Erst wenn diese Bedingungen bestehen, kann Energie durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energieumwandler übertragen werden!

9) Optionale Erweiterung: Mind-Map



Zur Erweiterung kann an dieser Stelle ein Mind-Map (siehe Abbildung 17 als Beispiel) von den Schüler:innen erstellt werden. Es bietet sich an, dieses später als Deckblatt für die Unterlagen zu verwenden. Die Schüler:innen sollen alle bisher besprochenen Begriffe zu Papier bringen und miteinander verknüpfen, um eine Hilfestellung für künftige Aufgaben zu haben. Zum Schluss können die wichtigsten Begriffe mit einem Farbstift markiert werden. Es ist wichtig für diese Aktivität genug Zeit einzuplanen.

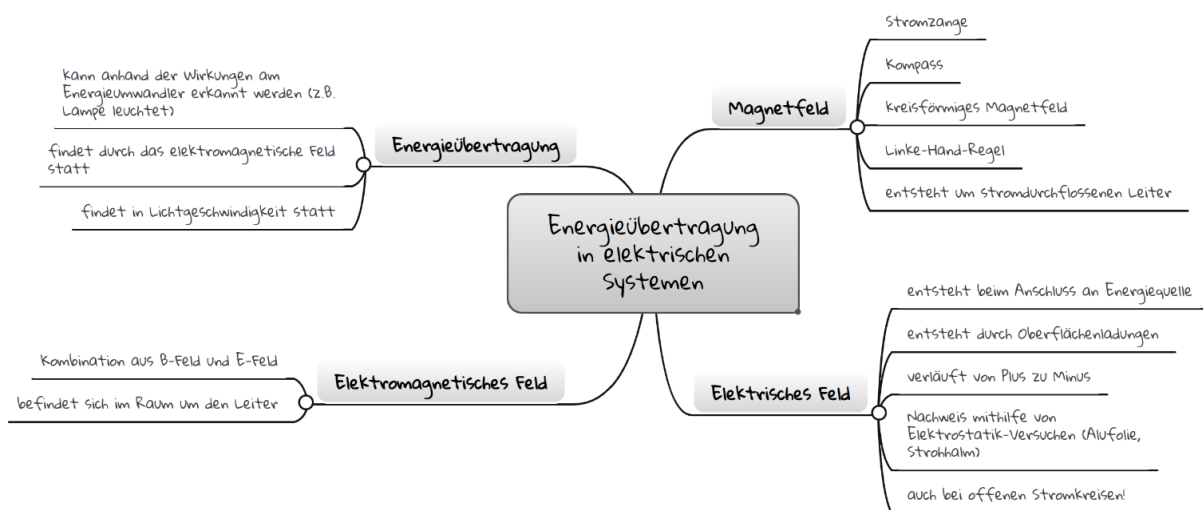


Abbildung 17: Mind-Map zur Energieübertragung in elektrischen Systemen.

Block 3: Energieübertragung mit elektromagnetischen Feldern II

Diese Sequenz umfasst 2 Unterrichtseinheiten.

Inhalte		Materialien
3.1	Gleich- vs. Wechselstromkreise	PPT, Video zum Wechselstromkreis, ggf. digitales Endgerät (z. B. IPad)
3.2	Energieerhaltung und Prozess der Energieübertragung	PPT, Textblatt 3.2

In diesem Abschnitt soll mit den Schüler:innen besprochen werden, dass die Energieübertragung sowohl in Gleich- als auch in Wechselstromkreisen erfolgen kann.

3.1 Gleich-vs. Wechselstromkreise

Schritte		Materialien
1)	Wiederholung und Vertiefung der Energieübertragung mittels EM-Felder	PPT
2)	Erklärung durch Lehrperson: Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen	PPT
3)	Video zum Wechselstromkreis	ggf. digitales Endgerät (z. B. IPad)
4)	Optionale Erweiterung: Wechselstromkreise mittels EM-Wellen beschreiben	
5)	Formulierung eines Merksatzes	

1) Wiederholung und Vertiefung der Energieübertragung mittels EM-Felder

Mit den Schüler:innen wird zunächst wiederholt, dass ein elektrisches System aus einer Energiequelle und einem Energieumwandler besteht. Außerdem wird manchmal ein Übertragemedium (z. B. Leiterkabel) benötigt. Die Energiequelle (z. B. Batterie) pumpt Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche, die ein elektrisches Feld im Raum um den Leiter hervorrufen. Bei einem geschlossenen Stromkreis entsteht außerdem ein Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld um den Leiter erzeugt. Gemeinsam ergeben das elektrische und das magnetische Feld um den Leiter das sogenannte elektromagnetische Feld (kurz: EM-Feld). Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann mithilfe der Energie-Hand-Regel für die linke Hand hergeleitet werden (siehe Abbildung 15).



Die Schüler:innen sollen an dieser Stelle die Richtung des Energieflusses mit Hilfe der Energie-Hand-Regel an einer Stelle im Stromkreis herleiten, um die Inhalte der letzten Einheit zu wiederholen.

2) Erklärung durch Lehrperson: Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen

Ergänzt wird nun die Unterscheidung zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen. Wir empfehlen dafür die folgende Formulierung zu wählen: „In Gleichstromkreisen bewegen sich die Elektronen im Leiterinneren¹³ gerichtet vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle. Bei Wechselstromkreisen hingegen bewegen sie sich hin- und her“ (siehe Abbildung 18).

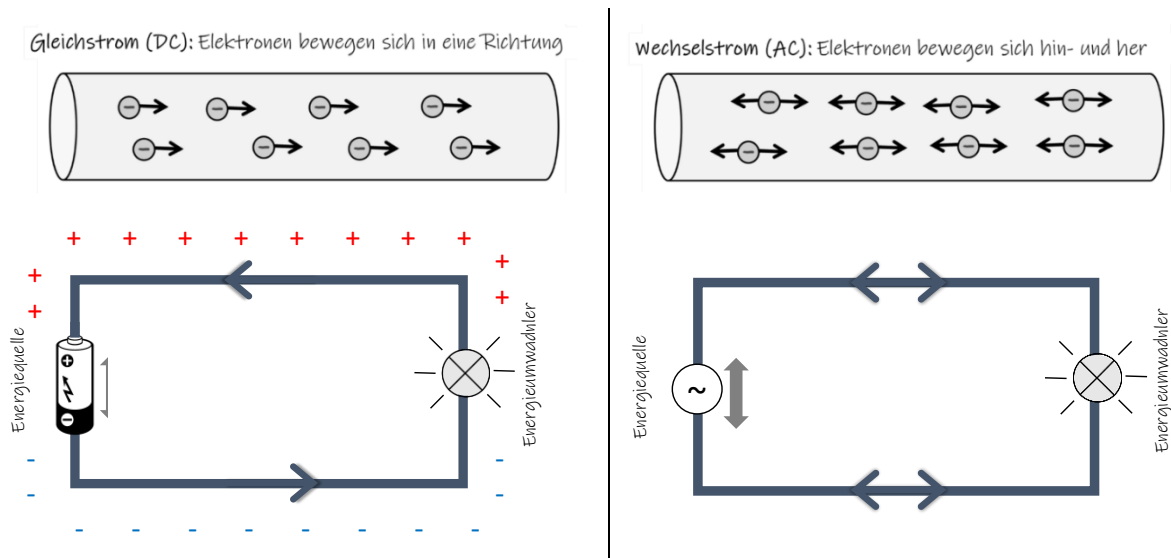


Abbildung 18: Gegenüberstellung eines Gleichstrom- und Wechselstromkreises. Oben ist jeweils ein Ausschnitt des Leiterkabels zu sehen, unten der geschlossene Gleich- bzw. Wechselstromkreis. Die Stromrichtung I ist mit grauen Pfeilen markiert.

Einigen Schüler:innen ist diese Unterscheidung vielleicht schon von früheren Unterrichtsstunden bekannt. Es ist dennoch essentiell, dass dieser Punkt nicht übersprungen wird, da davon ausgegangen werden kann, dass mindestens ein:e Schüler:in den Gleich- und Wechselstromkreis nicht klar voneinander unterscheiden kann.

Zum Einüben des Wechsels zwischen Gleichstrom- und Wechselstromkreisen sollten gezielte Schritt-für-Schritt Fragen gestellt werden.

Frage 1: Was verändert sich beim magnetischen Feld, wenn die Energiequelle umgepolt wird?

Antwort: Der Elektronenfluss im Leiterinneren verläuft immer vom Minus- zum Pluspol. Wird die Batterie also umgedreht, kehrt sich auch der Elektronenfluss um. Mithilfe der Linken-Hand-Regel kann die Richtung des Magnetfeldverlaufs bestimmt werden: Der Daumen zeigt in Richtung des Elektronenflusses und die übrigen Finger krümmen sich um den Leiter und

¹³ Es ist wichtig, immer wieder mit den Schüler:innen einzuüben, dass die Elektronen im Leiterinneren den Stromfluss bilden. Diese sind von den stationären Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche zu unterscheiden.

zeigen damit die Richtung des Magnetfeldes an. Das Magnetfeld verläuft jetzt also andersherum.

Frage 2: Was verändert sich beim elektrischen Feld, wenn die Energiequelle umgepolt wird?

Antwort: Wenn die Batterie umgedreht wird, verteilen sich die Oberflächenladungen auch anders: Am positiven Pol der Batterie werden positive Oberflächenladungen, am negativen Pol der Batterie werden negative Oberflächenladungen auf die Leiteroberfläche gepumpt. Dies führt zu einer Umkehrung des elektrischen Feldes, das immer von den positiven zu den negativen Ladungen verlaufen muss.

Frage 3: Was verändert sich beim Energiefluss, wenn die Energiequelle umgepolt wird?

Antwort: Wenn die Batterie umgedreht wird, kehrt sich die Richtung des elektrischen und magnetischen Feldes um (siehe **Frage 1** und **2**). Mithilfe der Energie-Hand-Regel für die Linke Hand kann nun die Richtung des Energieflusses bestimmt werden: Der Daumen zeigt in Richtung des Magnetfeldes, der Zeigefinger in Richtung des elektrischen Feldes und der Mittelfinger in Richtung des Energieflusses. Da sich sowohl die Richtung des elektrischen als auch des magnetischen Feldes umgekehrt haben, zeigt der Energiefluss weiterhin in die selbe Richtung: von der Energiequelle zum Energieumwandler.

Mit den Schüler:innen kann nun besprochen werden, dass ein realer Wechselstromkreis in der Regel nicht aus einer Batterie besteht, die man ständig ein- und ausbauen muss. Stattdessen polt die Wechselstromquelle von selbst 100 Mal in der Sekunde um. Dafür wird ein eigenes Schaltsymbol verwendet (siehe Abbildung 18).

3) Video zum Wechselstromkreis



Video zum Wechselstromkreis: Zur Visualisierung des Wechselstromkreises kann an dieser Stelle ein Videoausschnitt eines Videos von ‚Veritasium‘ mit den Schüler:innen geschaut werden. Dabei sollte das Video immer wieder gestoppt werden, um die Inhalte genau mit der Klasse zu besprechen.

4) Optionale Erweiterung: Wechselstromkreise mittels EM-Wellen beschreiben



Zur Erweiterung kann an dieser Stelle mit den Schüler:innen besprochen werden, dass im Wechselstromkreis von einer elektromagnetischen Welle die Rede ist, die sich von der Energiequelle zum Energieumwandler ausbreitet und dadurch Energie überträgt. Dass dies auch in kabellosen Systemen stattfinden kann, ist nur noch ein kleiner Schritt.

5) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann anschließend folgender Merksatz festgehalten werden:



Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld erfolgt sowohl bei **Gleich-** als auch **Wechselstromkreisen**.

3.2 Energieerhaltung und Prozess der Energieübertragung

Schritte	Materialien
1) Erklärung durch Lehrperson: Energieerhaltung	
2) Veranschaulichung der Energieübertragung	PPT
3) Übungen zur Energieerhaltung und -übertragung	
4) Formulierung eines Merksatzes	
5) Erklärung durch Lehrperson: Prozess der Energieübertragung	
6) Formulierung eines Merksatzes	
7) Rucksackmodell	PPT
8) Übung zum Wechselstromkreis	

1) Erklärung durch Lehrperson: Energieerhaltung

In dieser Sequenz wird der Energieerhaltungssatz besprochen und auf das Konzept angewendet. Den Schüler:innen wird dafür erklärt, dass die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler durch das elektromagnetische Feld stattfindet. Dabei sollte möglichst die folgende Formulierung gewählt werden: „Die Menge an Energie, die von der Energiequelle abgegeben wird, entspricht (in einem idealen Stromkreis) der Menge Energie, die am Energieumwandler wieder aufgenommen wird (Energieerhaltung).“ Wichtig ist dabei zu betonen, dass in der Realität wird ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Dies bedeutet aber nicht, dass die Energie „verbraucht“ wird.

2) Veranschaulichung der Energieübertragung

Zur Veranschaulichung kann an dieser Stelle ein Bild eines elektrischen Föhns gezeigt werden. Die Schüler:innen werden im Plenum gefragt, wie man an diesem Föhn erkennen kann, dass Energie übertragen wurde. Die Schüler:innen werden darauf unterschiedliche Antworten geben, beispielsweise „er lässt sich einschalten“ oder „er bläst warme Luft heraus“. Dies wird folgendermaßen interpretiert: „Wir können anhand der Wirkung am Energieumwandler erkennen, dass Energie übertragen wurde. Dies geschieht mithilfe des elektromagnetischen Feldes. Alternativ kann eine elektrische Zahnbürste gezeigt werden. Wird diese auf die Ladestation gestellt und ist diese mit der Steckdose verbunden, so leuchtet in der Regel eine LED auf, die

kennzeichnet, dass Energie übertragen wird. Sind ausreichende Materialien vorhanden, kann dies auch in Kleingruppen beobachtet und besprochen werden.

3) Übungen zur Energieerhaltung und -übertragung



Zum Üben können die Schüler:innen weitere Energieumwandler nennen und beschreiben, woran man die Energieübertragung erkennen kann. Beispiele: Elektrischer Föhn, AirPods, Glätteisen, ...

4) Formulierung eines Merksatzes

Im Heft kann nun folgender Merksatz aufgeschrieben werden:



Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie **umgewandelt** (z. B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).

5) Erklärung durch Lehrperson: Prozess der Energieübertragung

Im nächsten Schritt lernen die Schüler:innen mehr über den Prozess der Energieübertragung. Die Lehrperson erklärt, dass die Energieübertragung von der Energiequelle zum Energieumwandler durch das elektromagnetische Feld stattfindet. Dies geschieht in Lichtgeschwindigkeit, also sehr schnell.

6) Formulierung eines Merksatzes

Die Schüler:innen können dazu den folgenden Merksatz im Heft eintragen:



Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld findet in Lichtgeschwindigkeit statt.

7) Rucksackmodell

Da das sogenannte ‚Rucksackmodell‘¹⁴ (siehe Abbildung 19) eine gängige Vorstellung bei Schüler:innen ist, wird anschließend auf die Bedeutung der Elektronen im elektrischen Stromkreis eingegangen. Die Schüler:innen sollen erkennen, dass Elektronen für die Energieübertragung zwar wichtig, aber nicht ausschließlich dafür verantwortlich sind. Vielmehr sind sie die Ursache des Magnetfeldes, das gemeinsam mit dem elektrischen Feld das elektromagnetische Feld formt, welches für die Energieübertragung erforderlich ist.

¹⁴ Rucksackmodell: Einige Schüler:innen glauben, dass die Elektronen im Stromkreis bei der Batterie mit Energie ‚betankt‘ werden und diese bis zum elektrischen Gerät tragen, wo sie ‚abgeladen‘ wird. Dann bewegen sie sich wieder zur Batterie, um erneut mit Energie ‚betankt‘ zu werden [9].

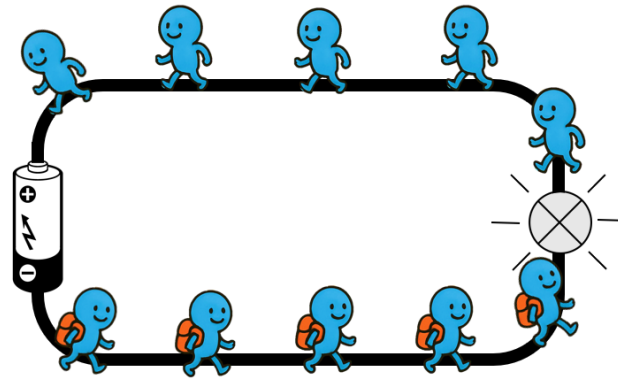


Abbildung 19: Schüler:innenvorstellung ‚Rucksackmodell‘ nach Härtel [10]. Zu sehen sind die Elektronen als kleine Wesen, die an der Batterie mit Energie beladen werden. Diese Energiepakete laden sie am Energieumwandler ab. Anschließend gehen die kleinen Wesen wieder zurück zur Batterie um neu beladen zu werden.

Zunächst wird mit den Schüler:innen besprochen, dass sich die Elektronen im Leiterinneren bei einem geschlossenen Stromkreis mit einem ‚Bummeltempo‘ von $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ vom Minus- zum Pluspol der Energiequelle bewegen.

Anschließend werden die Schüler:innen gebeten, auf folgende Aussage zu antworten, indem sie das neu erlernte Konzept verwenden:

Frage : Manche Leute behaupten, dass die Elektronen für die Energieübertragung verantwortlich sind, indem sie die Energie von der Energiequelle zum Energieumwandler transportieren. Haben diese Leute Recht?

Antwort: Nein, denn die Energieübertragung findet durch das elektromagnetische Feld statt. Die Elektronen sind nur insofern wichtig, dass sie durch ihre Bewegung ein Magnetfeld hervorrufen.

8) Übung zum Wechselstromkreis

Darüber hinaus kann noch eine Übung mit den Schüler:innen zum Wechselstromkreis gemacht werden:



Frage: In Wechselstromkreisen bewegen sich die Elektronen hin und her. Erkläre, warum die Elektronen auch in diesem Fall nicht für die Energieübertragung verantwortlich sein können.

Antwort: Die Elektronen nahe bei der Energiequelle kommen bei einem Wechselstromkreis niemals am Energieumwandler an, sondern bewegen sich nur hin und her. Dadurch verursachen sie ein wechselndes Magnetfeld, welches gemeinsam mit dem elektrischen Feld ein EM Feld formt. Durch das EM Feld kann die Energie übertragen werden.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF), *Verordnung des Bundesministers für Unterricht und Kunst vom 14. November 1984 über die Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen: BGBl. Nr. 88/1985*. Zugriff am: 31. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568&FassungVom=2018-09-01>
- [2] C. Haagen-Schützenhöfer, "Lehr- und Lernprozesse im Anfangsoptikunterricht der Sekundarstufe I," Kumulative Habilitationsschrift, Bruck/Mur, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://static.uni-graz.at/fileadmin/nawi-institute/Physik/Physikdidaktik/Mitarbeiter/Habil_Haagen.pdf
- [3] U. Kattmann, R. Duit, H. Gropengiesser und M. Komorek, "Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung," Jg. 3, S. 3–18, 1997.
- [4] H. Wiesner und R. Wodzinski, "Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen," in *Lernen in den Naturwissenschaften*, R. Duit, Hg., Kiel: IPN, 1996, S. 250–274.
- [5] U. Kuckartz, *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, 3. Aufl. (Grundlagentexte Methoden). Weinheim, Basel: Beltz Juventa, 2016.
- [6] *Englisch: teaching-learning-sequence (TLS)*.
- [7] I. Galili und E. Goihbarg, "Energy transfer in electrical circuits: A qualitative account," *American Journal of Physics*, Jg. 73, Nr. 2, S. 141–144, 2005. doi: 10.1119/1.1819932. [Online]. Verfügbar unter: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1819932>
- [8] J. D. Jackson, "Surface charges on circuit wires and resistors play three roles," *American Journal of Physics*, Jg. 64, Nr. 7, S. 855–870, 1996, doi: 10.1119/1.18112.
- [9] H. Härtel, "Voltage and Surface Charges What Wilhelm Weber already knew 150 years ago," *European Journal of Physics Education*, Jg. 12, Nr. 3, S. 19–31, 2021.
- [10] H. Härtel, "The electric voltage," in *Aspects of understanding electricity: Proceedings of an international workshop*, R. Duit, C. v. Rhöneck und W. Jung, Hg., 1985, S. 353–362.

Weiterführende Literatur

- I. M. Sefton, "Understanding Electricity and Circuits: What the Text Books Don't Tell You," Sydney, Proceedings of the 9th Science Teachers Workshop, 2002.
- R. W. Chabay und B. A. Sherwood, *Matter & interactions*, 4. Aufl. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

Lehrer:innenhandreichung zur Energieübertragung in elektrischen Systemen für die Sekundarstufe II

Dieses Projekt ist am Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik | (AECC Physik) AECC der Universität Wien in Zusammenarbeit mit der PH Wien entstanden. Besonderer Dank geht an Forschungsgruppe von Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf für die Unterstützung in der Entwicklungsphase und an alle Lehrer:innen und Schüler:innen, die an dieser Studie teilgenommen haben.



universität
wien



Vielen Dank an Roman Schmid von der ETH Zürich für die Entwicklung der Simulation zum elektromagnetischen Feld.

ETH zürich

Vielen Dank an Derek Müller von Veritasium für die Erlaubnis Ausschnitte aus seinem Video 'The Big Misconception about Electricity' zu verwenden.



Version 08/2025, Wien, AT

Louisa Winter

Universität Wien, AECC Physik



Arbeitsblatt 2.1 | Versuch 1: Magnetisches Feld

Benötigtes Material:

- ✓ 1 Batterie (4,5 V)
- ✓ 1 Kabel
- ✓ 2 Krokoklemmen
- ✓ 1 Kompass

! Wichtiger Sicherheitshinweis !

- Bitte führe den Versuch nicht durch, wenn du einen **Herzschrittmacher** o.ä. besitzt.
- Da bei dem Versuch ein Kurzschluss entsteht, sollte der Versuch nur **maximal eine Minute lang** durchgeführt werden.
- Bitte **entferne die Kabel von der Batterie**, sobald du deine Beobachtung mit der Kompassnadel gemacht hast, damit die Bauteile nicht zu heiß werden.
- Falls Probleme auftreten sollten, wende dich bitte gleich an deine **Lehrperson!**

Durchführung:

1. Befestige die beiden Krokoklemmen an je einem Ende des Kabels.
2. Lege das Kabel, die Batterie und den Kompass wie in Abb. 1 vor dich.
3. Schließe nun den Stromkreis, indem du je ein Kabelende mit je einem Pol der Batterie verbindest (siehe Abb. 2).
4. Beobachte den Kompass. Bewege den Kompass anschließend langsam um das Kabel und beobachte erneut, was passiert.



Abb. 1



Abb. 2

Beobachtung: Wie verhält sich die Kompassnadel in der Nähe des Kabels **a)** bevor du den Stromkreis schließt und **b)** danach?

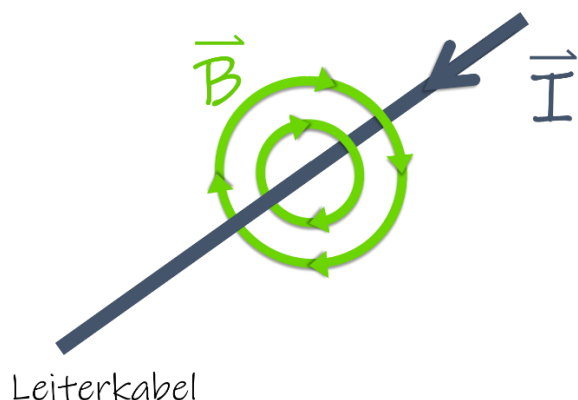
a) Die Kompassnadel richtet sich nach Norden aus, egal wo sie an das Leiterkabel gehalten wird.

b) Die Kompassnadel richtet sich senkrecht zum Kabel aus. Bewegt man sie um das Leiterkabel, wird sie weiterhin senkrecht abgelenkt.

Erklärung: Notiere die Erklärung der Lehrperson hier.

Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein Magnetfeld. Bringt man einen Kompass in die Nähe eines geraden Leiters, so richtet sich die Kompassnadel senkrecht dazu aus. Daraus kann geschlossen werden, dass das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter verlaufen muss. Dies kann mithilfe von Feldlinien dargestellt werden (siehe Skizze unten).

Die Skizze sollte mit den Schüler:innen vervollständigt werden. Das Magnetfeld (B-Feld) wird kreisförmig um den Leiter gezeichnet.





Arbeitsblatt 2.1 | Versuch 1: Magnetisches Feld

Benötigtes Material:

- ✓ 1 Batterie (4,5 V)
- ✓ 1 Kabel
- ✓ 2 Krokodklemmen
- ✓ 1 Kompass

! Wichtiger Sicherheitshinweis !

- Bitte führe den Versuch nicht durch, wenn du einen **Herzschrittmacher** o.ä. besitzt.
- Da bei dem Versuch ein Kurzschluss entsteht, sollte der Versuch nur **maximal eine Minute lang** durchgeführt werden.
- Bitte **entferne die Kabel von der Batterie**, sobald du deine Beobachtung mit der Kompassnadel gemacht hast, damit die Bauteile nicht zu heiß werden.
- Falls Probleme auftreten sollten, wende dich bitte gleich an deine **Lehrperson!**

Durchführung:

1. Befestige die beiden Krokodklemmen an je einem Ende des Kabels.
2. Lege das Kabel, die Batterie und den Kompass wie in Abb. 1 vor dich.
3. Schließe nun den Stromkreis, indem du je ein Kabelende mit je einem Pol der Batterie verbindest (siehe Abb. 2).
4. Beobachte den Kompass. Bewege den Kompass anschließend langsam um das Kabel und beobachte erneut, was passiert.



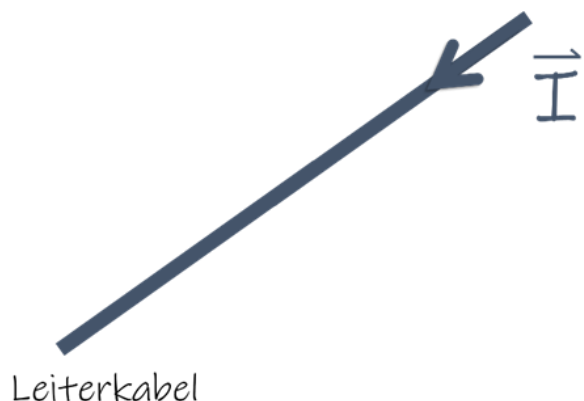
Abb. 3



Abb. 4

Beobachtung: Wie verhält sich die Kompassnadel in der Nähe des Kabels **a)** bevor du den Stromkreis schließt und **b)** danach?

Erklärung: Notiere die Erklärung der Lehrperson hier.





Arbeitsblatt 2.2 | Versuch 2: Elektrisches Feld

Benötigtes Material:

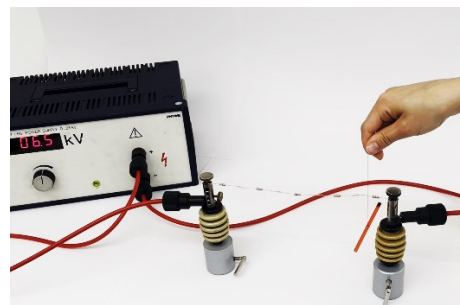
- ✓ 1 Hochspannungsquelle
- ✓ 2 Hochspannungskabel
- ✓ 4 Reihenwiderstände
- ✓ 1 Strohhalm
- ✓ 1 Faden
- ✓ 1 Holzspieß (optional)

! Wichtiger Sicherheitshinweis !

- Der Versuch darf nur von Lehrkräften nach einer Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden. Alternativ steht ein Video zur Verfügung.
- Bei diesem Versuch kommt Hochspannung (im Bereich von mehreren Kilovolt) zum Einsatz.
- Gleichstrom ab 120V, Wechselstrom ab 50V (bei 50Hz) und allgemein Strom ab 50mA sind lebensbedrohlich.

Durchführung:

1. Der Stromkreis wird, wie in der Abbildung zu sehen, aufgebaut.
2. An einem Faden wird ein Strohhalm befestigt. Es bietet sich an, den Faden an einem Holzspieß o. ä. zu befestigen.
3. Der Strohhalm wird nun an die äußeren Widerstände gehalten.
4. Anschließend wird der Strohhalm zwischen den dritten und vierten Widerstand gehalten.



Beobachtung: Wie verhält sich der Strohhalm in der Nähe des Kabels **a)** an den äußeren Widerständen und **b)** zwischen dem zweiten und dritten Widerstand?

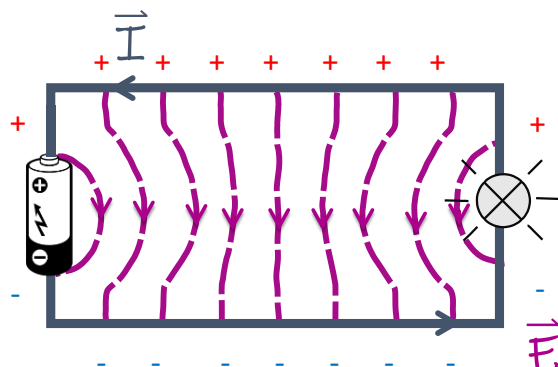
a) Der Strohhalm wird in der Nähe der äußeren Widerstände elektrostatisch abgelenkt.

b) Der Strohhalm wird zwischen dem zweiten und dritten Widerstand nicht abgelenkt.

Erklärung: Notiere die Erklärung der Lehrperson hier.

Um den Leiter, der mit einer Energiequelle verbunden ist, entsteht ein elektrisches Feld, das durch die Oberflächenladungen auf der Leiteroberfläche hervorgerufen wird. Bringt man einen Strohhalm in die Nähe des Leiters, kann eine Wechselwirkung (Anziehung / Abstoßung) beobachtet werden. Zwischen dem zweiten und dritten Widerstand gleichen sich die positiven und negativen Ladungen aus und es kommt zu keiner Wechselwirkung.

Ähnlich verhält sich dies in einem einfachen Stromkreis: Die Oberflächenladungen gleichen sich beim Widerstand aus.





Arbeitsblatt 2.2 | Versuch 2: Elektrisches Feld

Benötigtes Material:

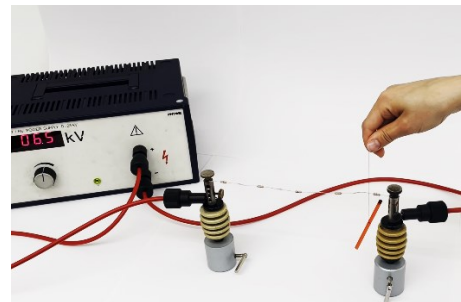
- ✓ 1 Hochspannungsquelle
- ✓ 2 Hochspannungskabel
- ✓ 4 Reihenwiderstände
- ✓ 1 Alufolienstück
- ✓ 1 Faden
- ✓ 1 Holzspieß o.ä.

! Wichtiger Sicherheitshinweis !

- Der Versuch darf nur von Lehrkräften nach einer Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden. Alternativ steht ein Video zur Verfügung.
- Bei diesem Versuch kommt Hochspannung (im Bereich von mehreren Kilovolt) zum Einsatz.
- Gleichstrom ab 120V, Wechselstrom ab 50V (bei 50Hz) und allgemein Strom ab 50mA sind lebensbedrohlich.

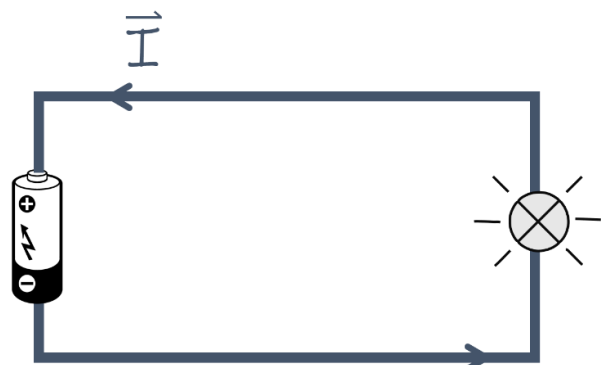
Durchführung:

1. Der Stromkreis wird, wie in der Abbildung zu sehen, aufgebaut.
2. An einem Faden wird ein Strohhalm befestigt. Es bietet sich an, den Faden an einem Holzspieß o. ä. zu befestigen.
3. Der Strohhalm wird nun an die äußeren Widerstände gehalten.
4. Anschließend wird der Strohhalm zwischen den dritten und vierten Widerstand gehalten.



Beobachtung: Wie verhält sich der Strohhalm in der Nähe des Kabels **a)** an den äußeren Widerständen und **b)** zwischen dem zweiten und dritten Widerstand

Erklärung: Notiere die Erklärung der Lehrperson hier.





Arbeitsblatt 2.3 | Versuch 3: Das elektromagnetische Feld

Benötigtes Material:

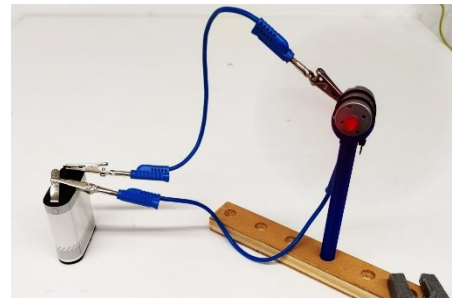
- ✓ 1 Batterie (4,5 V)
- ✓ 2 Kabel
- ✓ 2 Krokoklemmen
- ✓ 1 Motor
(z. B. Ventilator)

! Wichtiger Sicherheitshinweis !

- Bitte führe den Versuch nicht durch, wenn du einen **Herzschrittmacher** o.ä. besitzt.
- Bitte **entferne die Kabel von der Batterie**, sobald du deine Beobachtungen gemacht hast.
- Falls Probleme auftreten sollten, wende dich bitte gleich an deine **Lehrperson!**

Durchführung:

1. Befestige die beiden Krokoklemmen an je einem Ende des Kabels.
2. Schließe den Stromkreis, indem du über die Kabel je einen Anschluss der Batterie mit je einem Anschluss des Motors verbindest.
3. Nachdem du deine Beobachtung gemacht hast, öffnest du den Stromkreis wieder, indem du die Kabel von der Batterie entfernst.



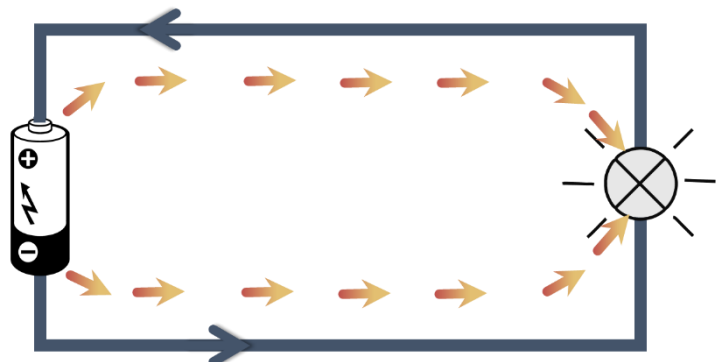
Beobachtung: Was kannst du beobachten, sobald der Stromkreis geschlossen vorliegt?

Sobald der Stromkreis geschlossen vorliegt, scheint sich der Motor sofort zu drehen zu beginnen.

Erklärung: Woher kommt die Energie, um den Motor zu betreiben und wie wird diese übertragen? Verwende für deine Erklärung das vorgestellte Konzept.

Der Energieübertragungsprozess findet nur dann statt, wenn es sowohl ein E-Feld als auch ein B-Feld gibt. Das E-Feld kommt durch den Anschluss an eine Energiequelle (in diesem Fall eine Batterie) zustande. Das B-Feld wird erst durch einen Stromfluss hervorgerufen. Erst wenn diese Bedingungen bestehen, kann Energie durch das elektromagnetische Feld von der Energiequelle zum Energiewandler, im Raum um den Leiter, übertragen werden!

Die Skizze sollte mit den Schüler:innen vervollständigt werden. Der Energiefluss sollte von der Energiequelle zum Energiewandler entlang der Kabel eingezeichnet werden.





Arbeitsblatt 2.3 | Versuch 3: Das elektromagnetische Feld

Benötigtes Material:

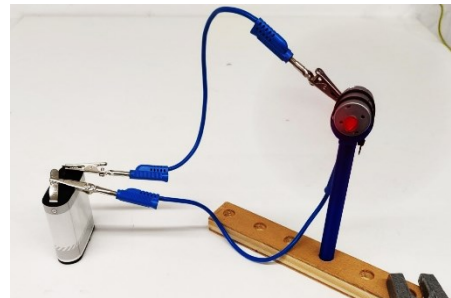
- ✓ 1 Batterie (4,5 V)
- ✓ 2 Kabel
- ✓ 2 Krokodklemmen
- ✓ 1 Motor
(z. B. Ventilator)

! Wichtiger Sicherheitshinweis !

- Bitte führe den Versuch nicht durch, wenn du einen **Herzschrittmacher** o.ä. besitzt.
- Bitte **entferne die Kabel von der Batterie**, sobald du deine Beobachtungen gemacht hast.
- Falls Probleme auftreten sollten, wende dich bitte gleich an deine **Lehrperson!**

Durchführung:

1. Befestige die beiden Krokodklemmen an je einem Ende des Kabels.
2. Schließe den Stromkreis, indem du über die Kabel je einen Anschluss der Batterie mit je einem Anschluss des Motors verbindest.
3. Nachdem du deine Beobachtung gemacht hast, öffnest du den Stromkreis wieder, indem du die Kabel von der Batterie entfernst.



Beobachtung: Was kannst du beobachten, sobald der Stromkreis geschlossen vorliegt?

Erklärung: Woher kommt die Energie, um den Motor zu betreiben und wie wird diese übertragen? Verwende für deine Erklärung das vorgestellte Konzept.





Textblatt 2.3 | Der Energiefluss

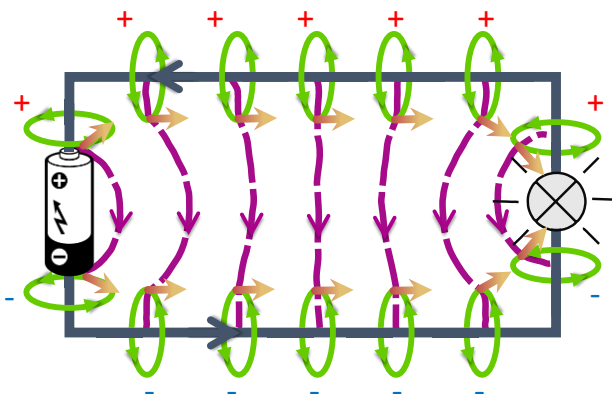
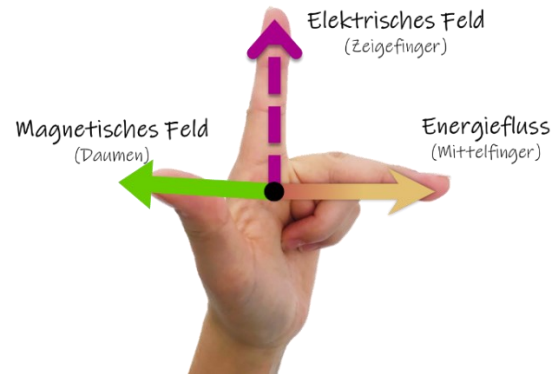
Du kennst bereits das elektrische Feld, welches durch die Oberflächenladungen entsteht, und das magnetische Feld, welches durch den Stromfluss im Leiter zustande kommt.

Neu hinzu kommt nun die Kombination der beiden Feldern: Gemeinsam ergeben das magnetische und das elektrische Feld das sogenannte **elektromagnetische Feld** (kurz: EM-Feld).

Der Energiefluss durch dieses EM-Feld kann näherungsweise mithilfe der **Energie-Hand-Regel für die linke Hand** hergeleitet werden: Stehen das elektrische Feld (E-Feld) und das Magnetfeld (B-Feld) senkrecht zueinander, so kann man den Energiefluss ebenfalls senkrecht darauf einzeichnen.

Die Energie kann nun von der Batterie durch das elektromagnetische Feld bis zum Energieumwandler übertragen werden. Dies geschieht im Raum um die Leiterkabel. Die Wirkungen dieser Energieübertragung kann meist in Form einer Energieumwandlung am Energieumwandler beobachtet werden (z. B. Lämpchen leuchtet).

Energie-Hand-Regel für die linke Hand



Legende:

- Elektrisches Feld (Zeigefinger)
- Magnetisches Feld (Daumen)
- Energiefluss (Mittelfinger)

Simulation zum EM Feld:



- Öffne die Simulation zum elektromagnetischen Feld.
- Stelle die Spannung der Batterie ein und schließe den Stromkreis.
- Durch Auswahl der entsprechenden Knöpfe kannst du die Felder sichtbar machen.



schmidro.it/ch.io/etransp-m



KOGNITIVES STOPPSCHILD: Der Energiefluss beschreibt den Fluss der Energie, der Stromfluss den Fluss des Stromes!

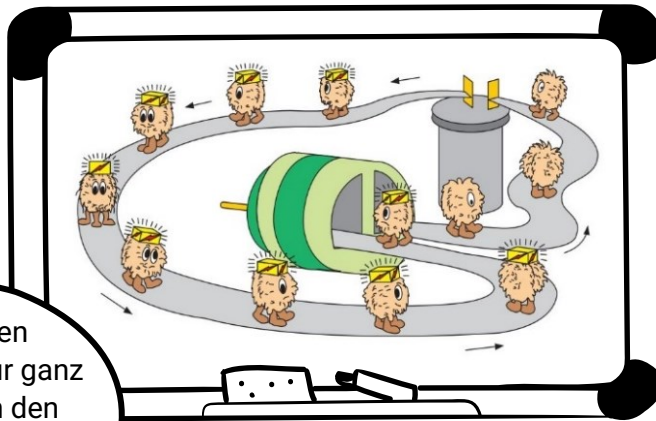


Textblatt 3.2 | Der Prozess der Energieübertragung

Das sogenannte ‚Rucksackmodell‘ (siehe Abbildung unten) besagt, dass die Elektronen im Stromkreis bei der Batterie mit Energie ‚betankt‘ werden und diese bis zum elektrischen Gerät tragen, wo sie ‚abgeladen‘ wird. Die Elektronen bewegen sich anschließend wieder zur Batterie, um erneut mit Energie ‚betankt‘ zu werden.

Die Elektronen verbrauchen am Weg zum Umwandler Energie!

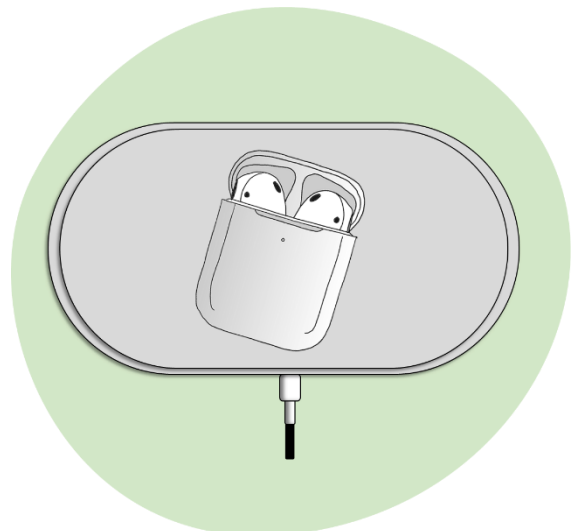
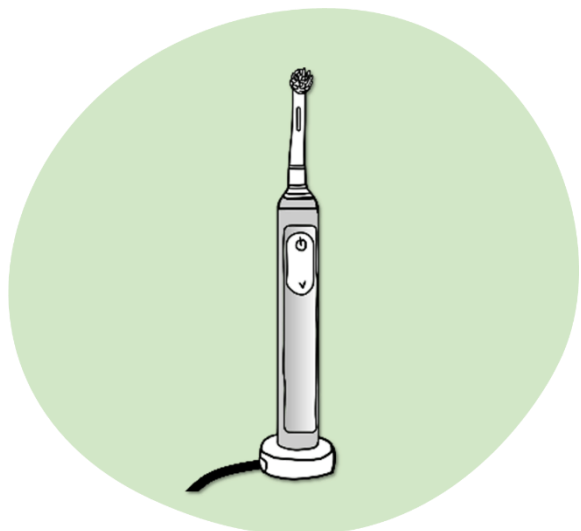
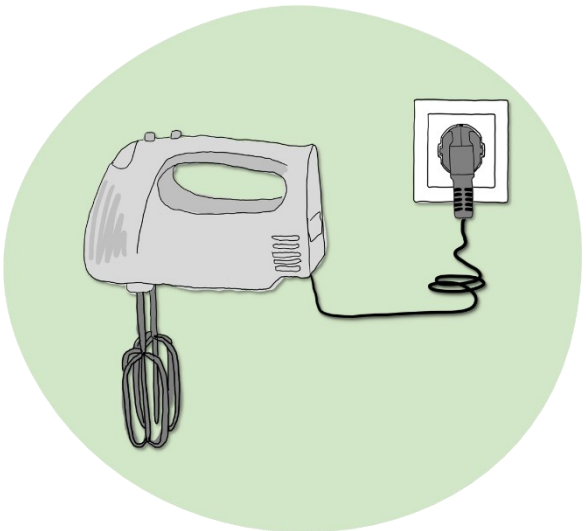
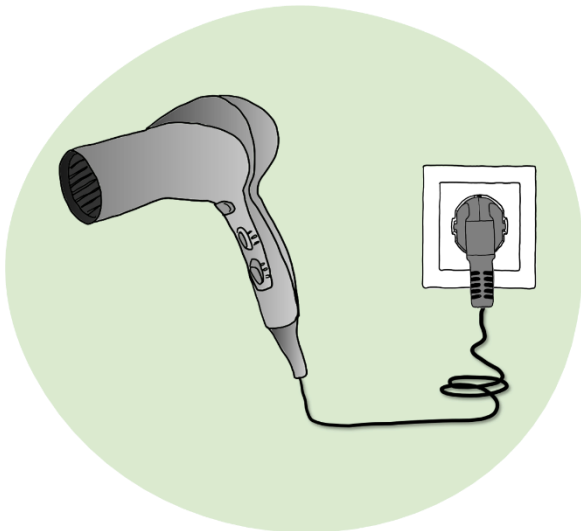
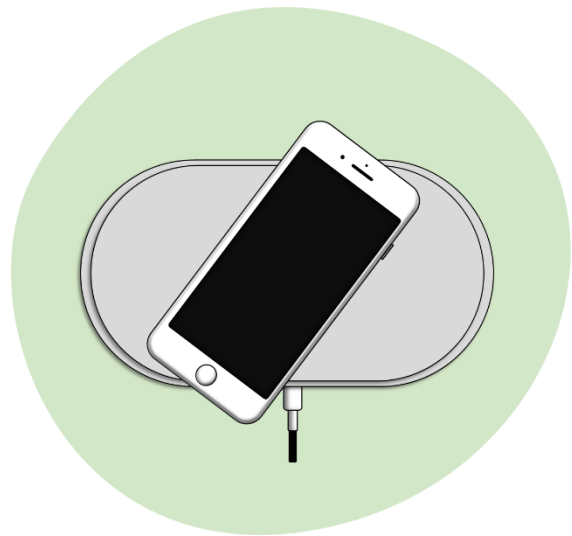
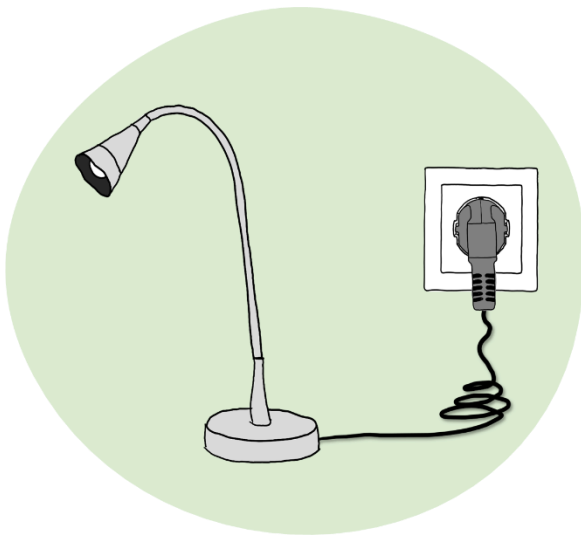
Die Elektronen laden nicht nur die Energie am Umwandler ab, sondern sie werden dort auch verbraucht!

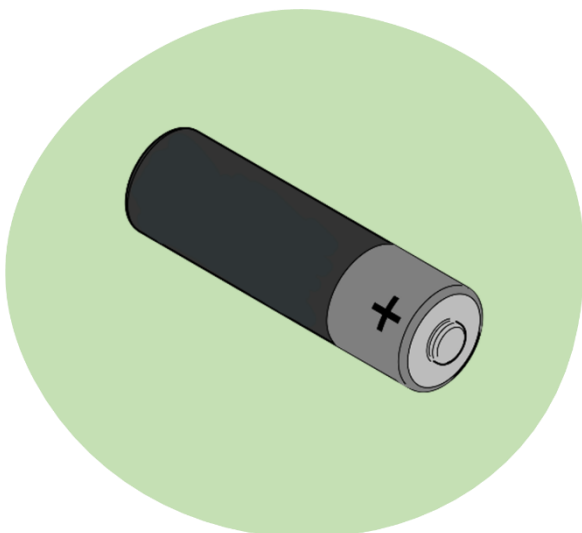
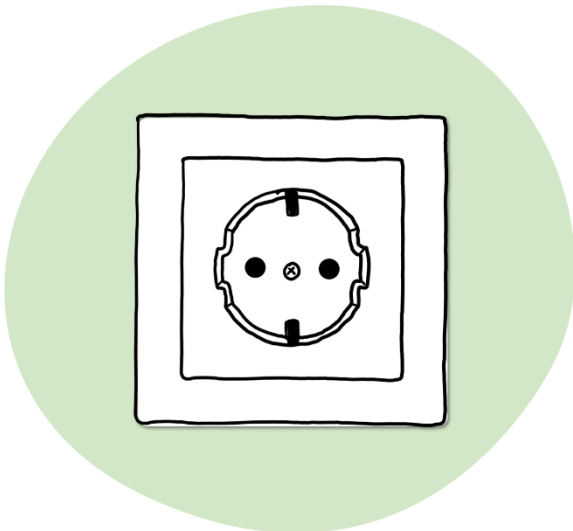
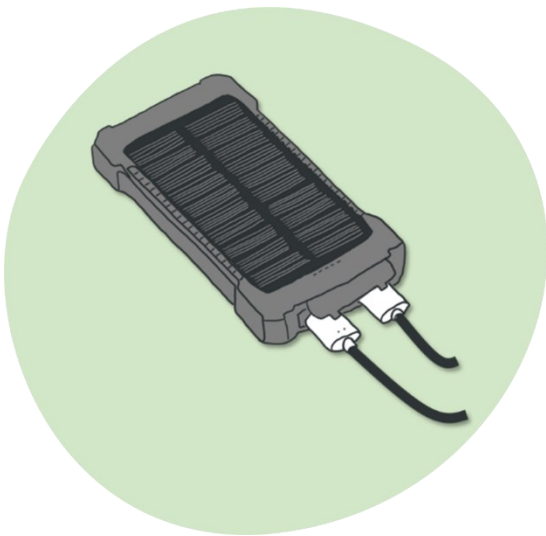


Die Elektronen bewegen sich nur ganz langsam durch den Stromkreis, sie können daher nicht die Energie übertragen.

Die Elektronen spielen eine wichtige Rolle im Stromkreis. Durch die Bewegung der negativ geladenen Elektronen im Leiter entsteht ein Magnetfeld, das gemeinsam mit dem elektrischen Feld den Energiefluss erzeugt.

Was denkst du?

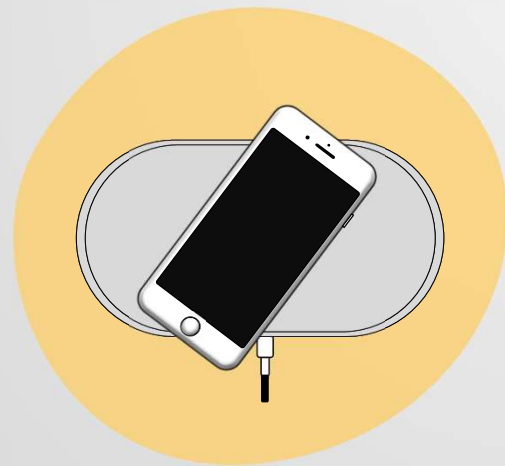
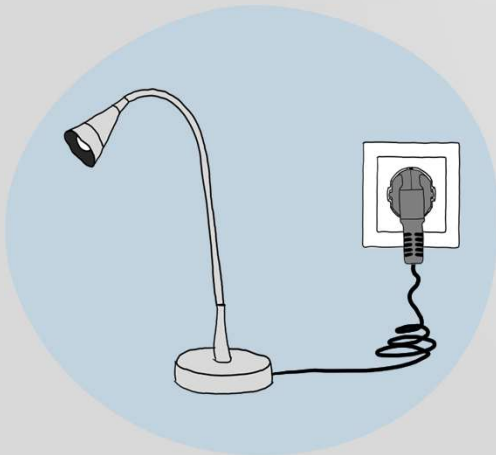




Energieübertragung in elektrischen Systemen

© Louisa Winter | Vers. 3.0

1.1



1.1



Bilderkarten 1.1

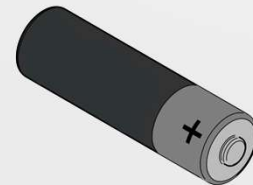
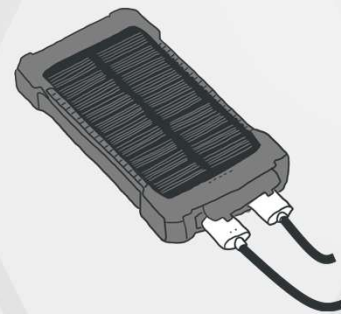
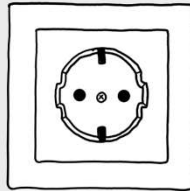
1.1



Die Energieübertragung kann in **kabelgebundenen** Systemen (z. B. elektrischer Mixer, elektrischer Föhn, ...) *oder* **kabellosen** Systemen (z. B. elektrische Zahnbürste, drahtloses Aufladen beim Smartphone, ...) stattfinden.

1.2

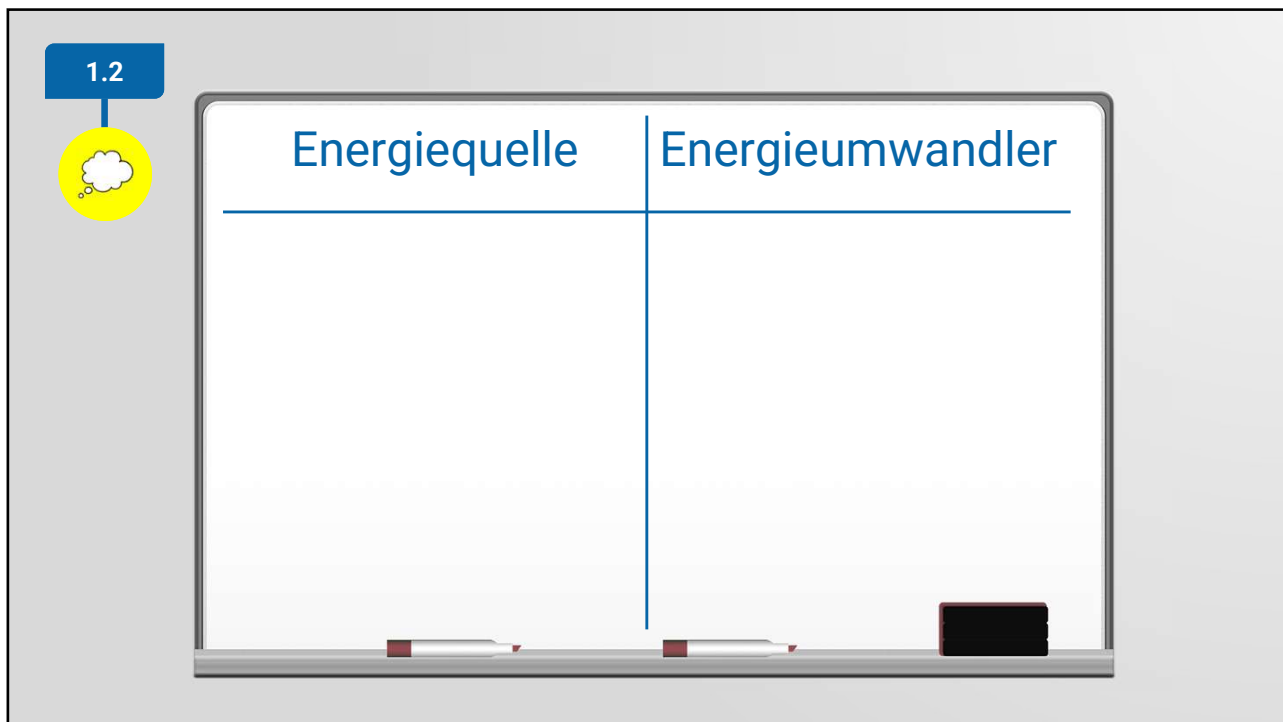
In elektrischen
Systemen gibt es
Energiequellen ...



1.2

... und
Energieumwandler.





1.2

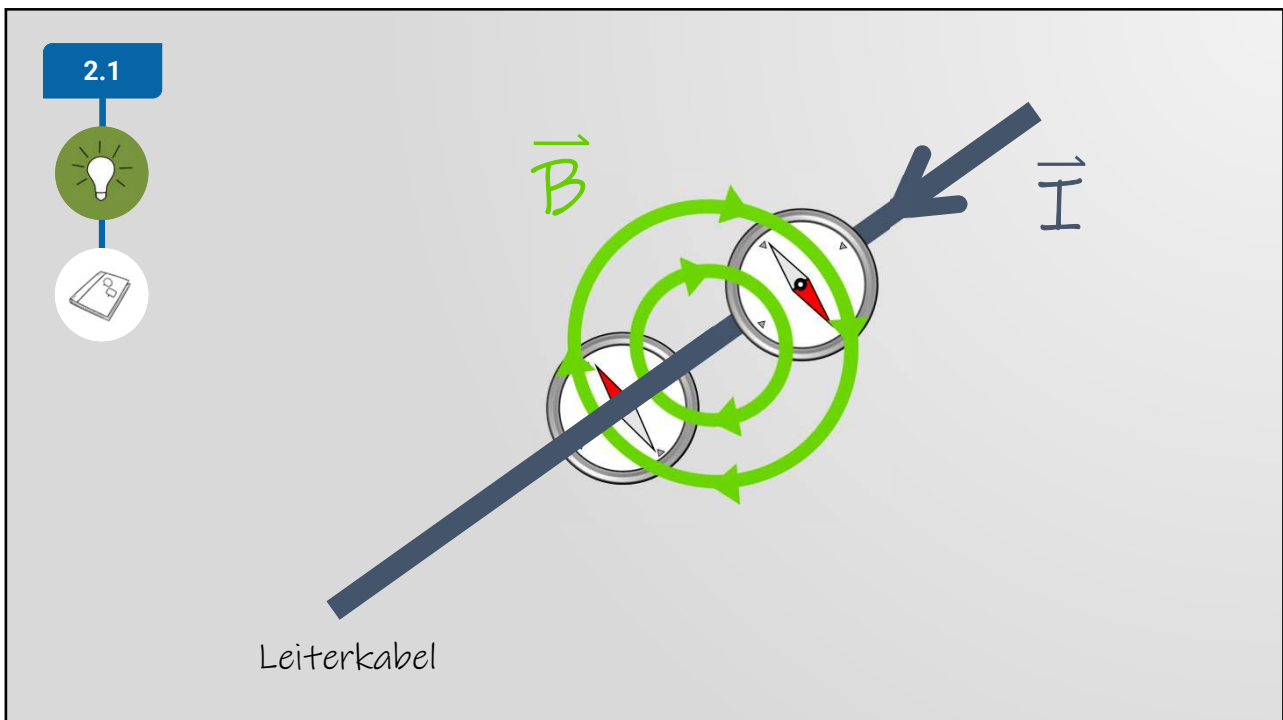
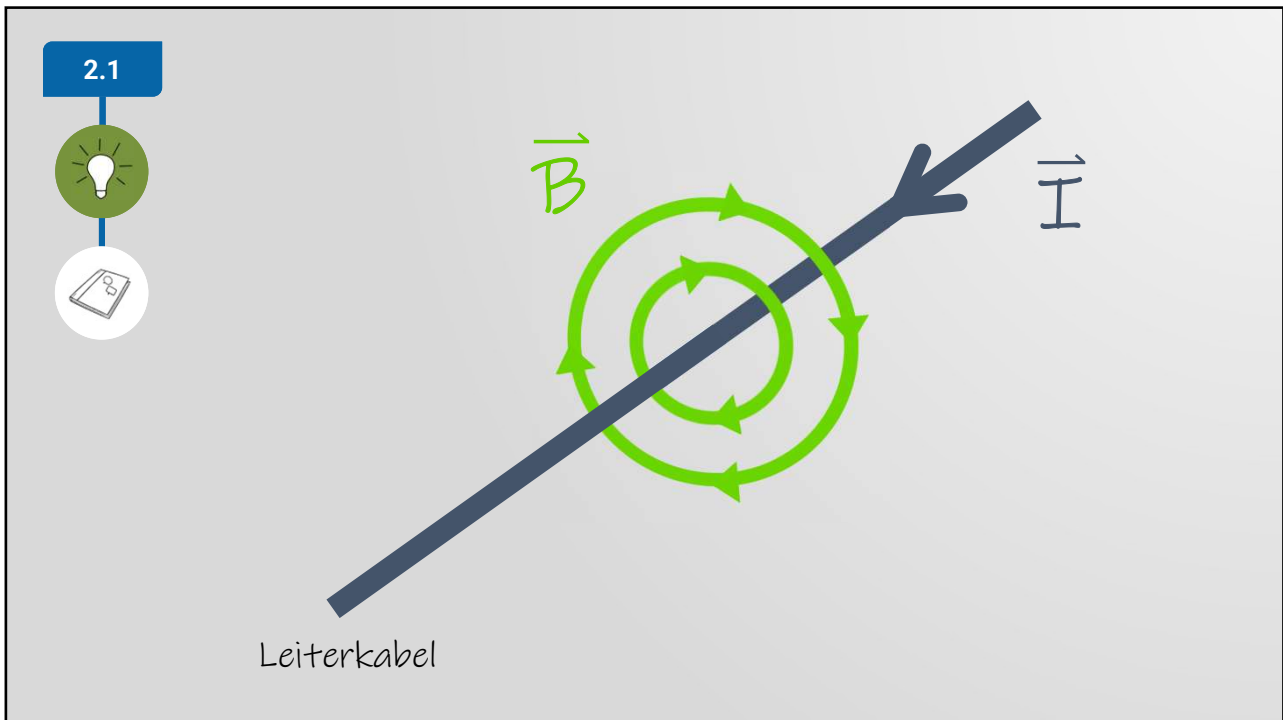


Ein Energieübertragungssystem besteht normalerweise aus einer **Energiequelle** (z. B. Generator, Batterie, PV-Anlage) und einem **Energieumwandler** (z. B. Lämpchen oder Elektrogerät). Einige Energieübertragungssysteme benötigen zudem noch ein **Überträgermedium** (z. B. Leiterkabel).

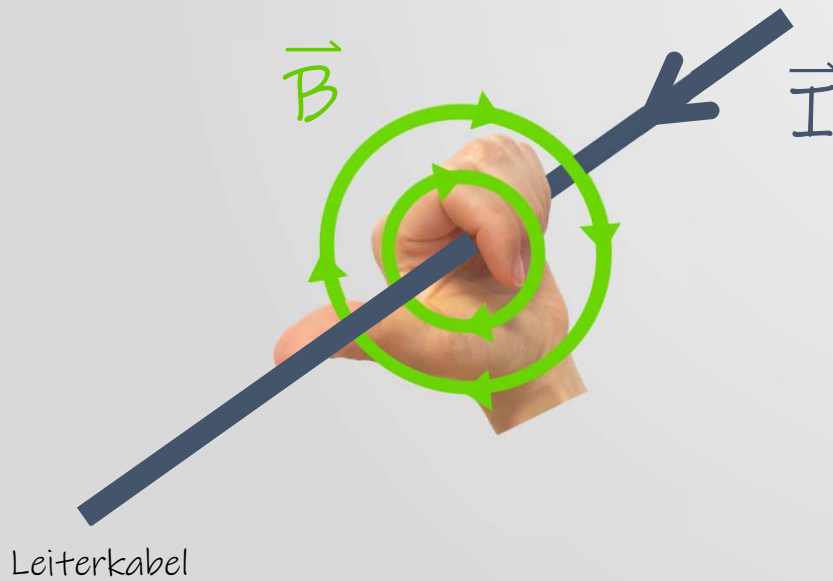
2.1



Versuch 1



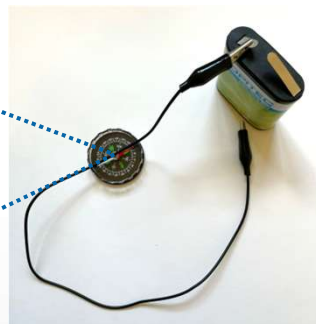
2.1



2.1



Warum richtet sich die Kompassnadel in einem offenen Stromkreis nicht aus?

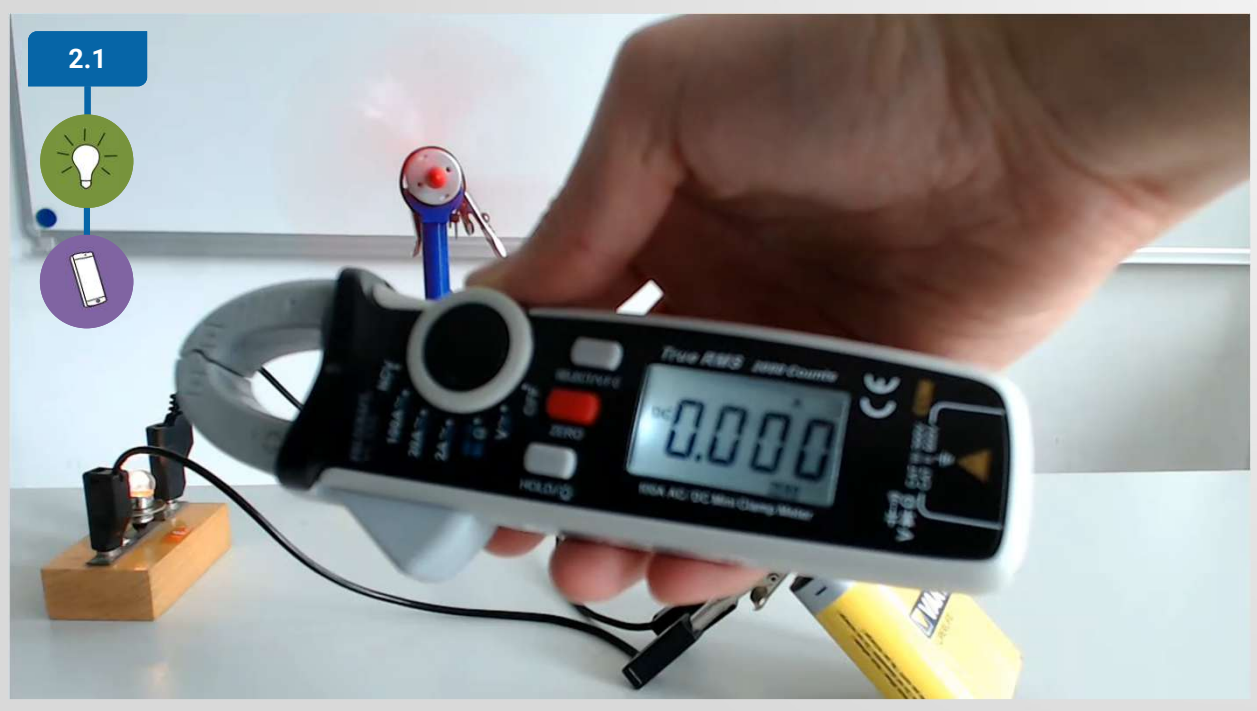


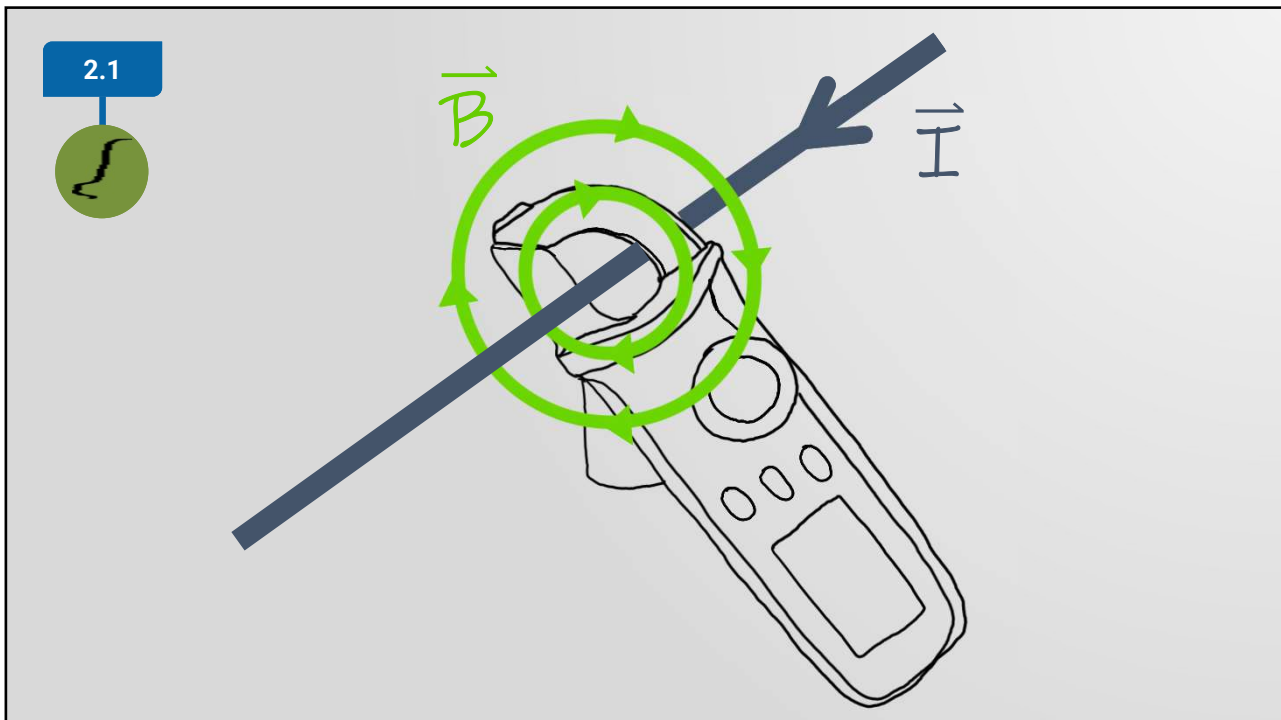
2.1



Versuch 1.1

2.1





2.1

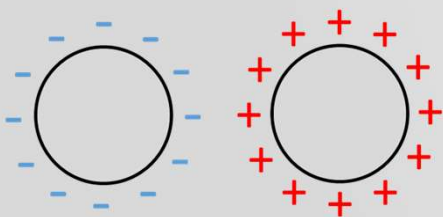
Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **magnetisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Stromzange, Kompass) bestimmt werden.

2.1



Bisher haben wir vom **magnetischen Feld** um den Leiter gesprochen. Nun schauen wir uns ein anderes Feld genauer an. Dieses unterscheidet sich in Ursache, Form und Richtung vom magnetischen Feld!

2.2



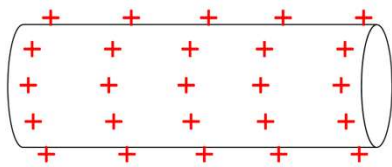
Die Oberflächenladungen befinden sich rund um den Leiter und bewegen sich nicht.



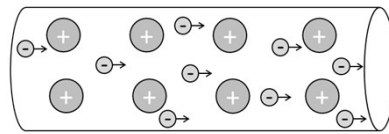
2.2



Beachte, dass die **Oberflächenladungen** von den **Ladungen im Inneren des Leiters** zu unterscheiden sind!

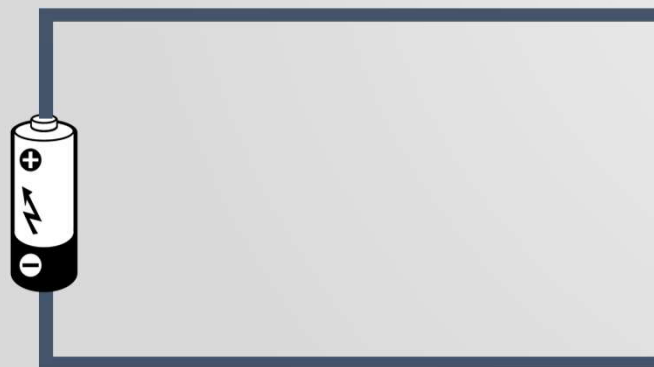


Oberflächenladungen



Ladungen im Leiterinneren

2.2



2.2



2.2



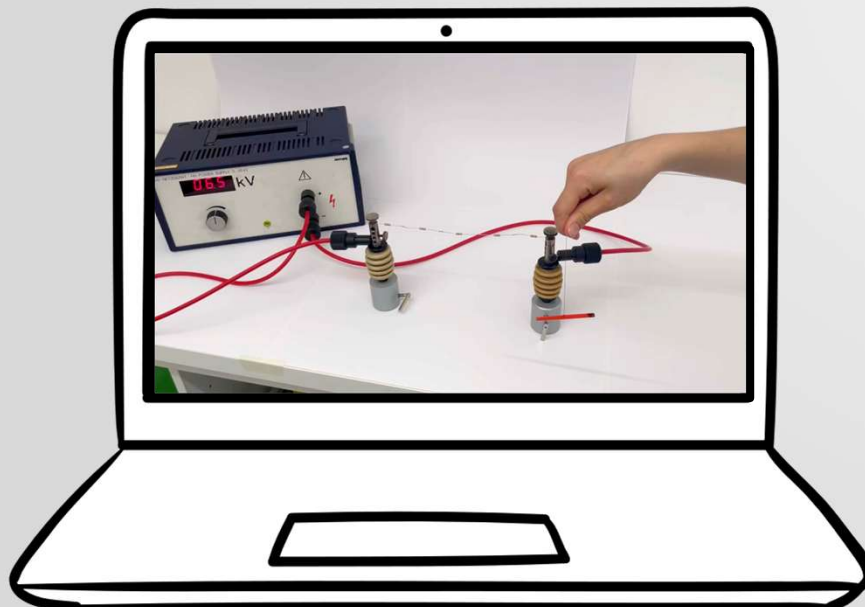
Energiequellen pumpen **Oberflächenladungen** auf die Leiteroberfläche. Diese generieren ein elektrisches Feld.

2.2

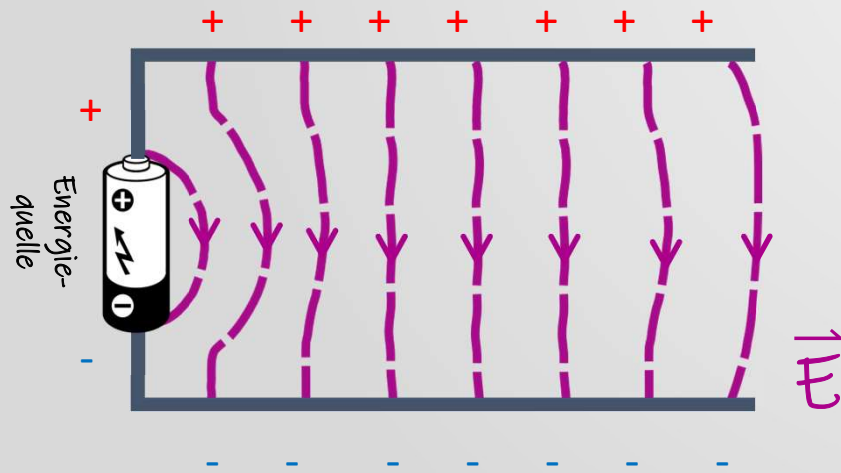


Versuch 2

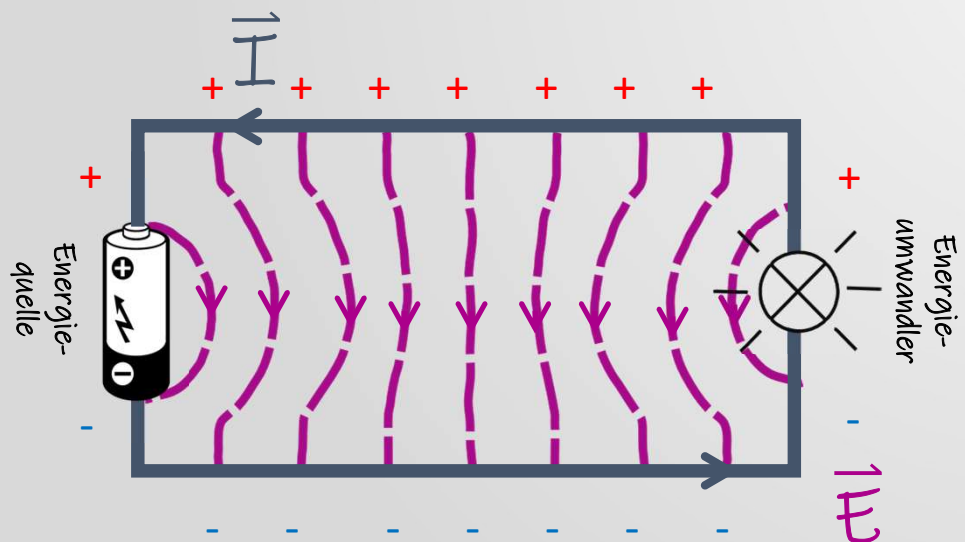
2.2



2.2



2.2



2.2



Bei welchen elektrischen Systemen treten ebenfalls elektrische Felder im Umfeld auf?

2.2



Um einen stromdurchflossenen Leiter gibt es ein **elektrisches Feld**. Dieses kann mit geeigneten Messgeräten (z. B. Strohhalm, Alufolienstück) bestimmt werden.

2.3



Bis jetzt haben wir einzeln über das **elektrische** und das **magnetische** Feld gesprochen, wobei jedes seine eigene Ursache, Form und Richtung hat.

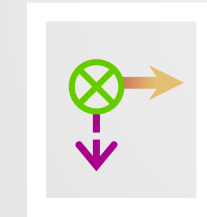
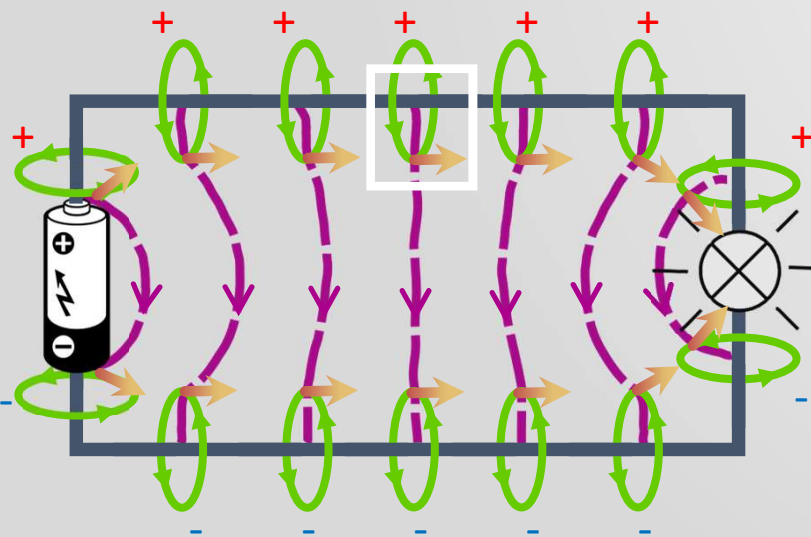
Wissenschaftler*innen verwenden den Begriff „**elektromagnetisches Feld**“ (**kurz: EM Feld**), um die Kombination dieser beiden Felder zu benennen.

2.3



Aber lass dich nicht verwirren! Das elektromagnetische Feld hat keine Richtung wie das elektrische und das magnetische Feld und wird daher auch nicht durch Pfeile dargestellt! Der Ausdruck "**elektromagnetisches Feld**" bedeutet einfach "**die kombinierte Wirkung des elektrischen und des magnetischen Feldes**".

2.3



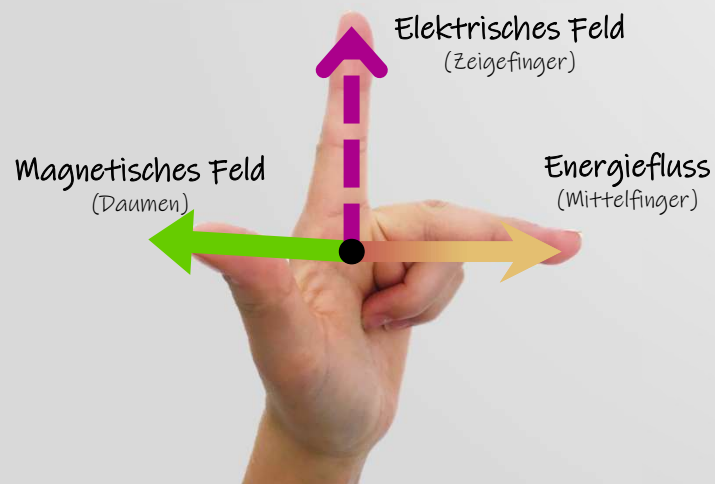
Legende:

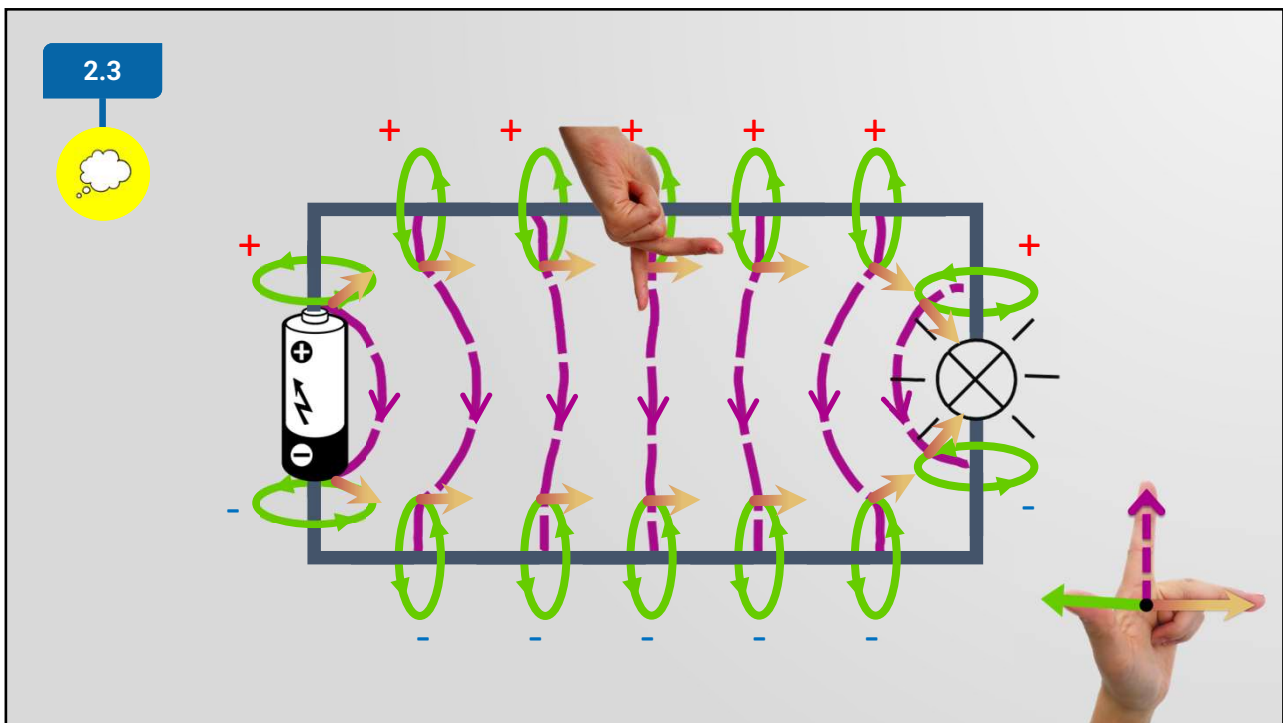
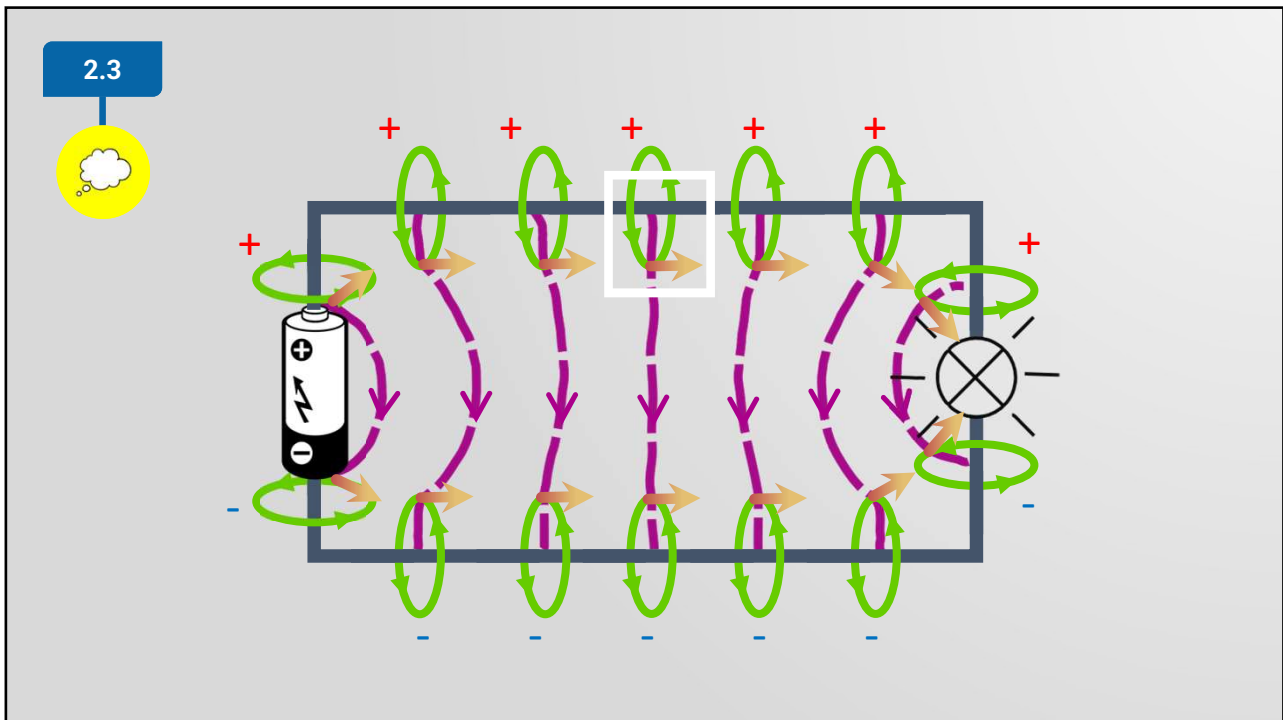
-  Elektrisches Feld (Zeigefinger)
-  Magnetisches Feld (Daumen)
-  Energiefluss (Mittelfinger)

2.3

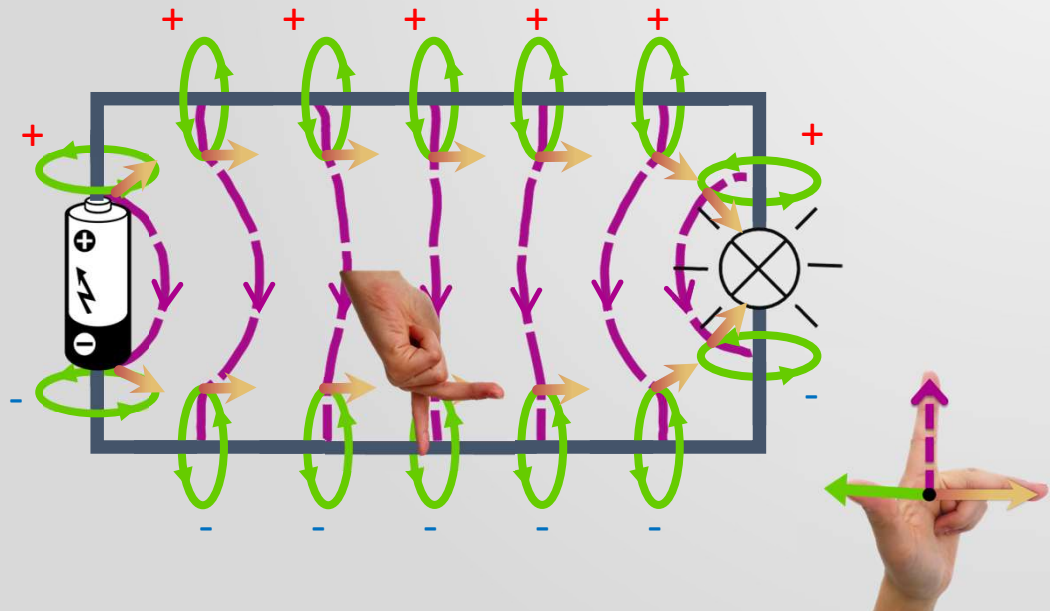


Energie-Hand-Regel für die linke Hand





2.3

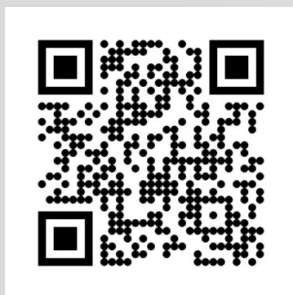


2.3



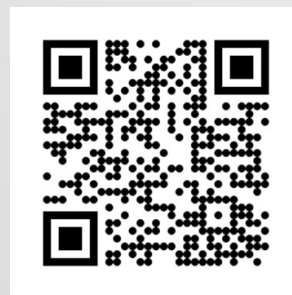
Simulation zum EM-Feld

Laptop-Version:



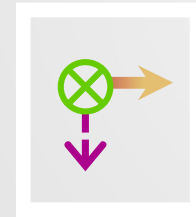
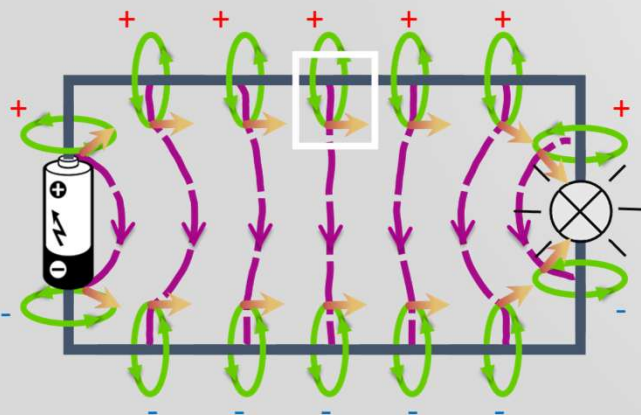
schmidro.itch.io/etransp

Smartphone-Version:



schmidro.itch.io/etransp-m

2.3



Legende:

- Elektrisches Feld (Zeigefinger)
- Magnetisches Feld (Daumen)
- Energiefluss (Mittelfinger)

$$\vec{S} = \left(\frac{1}{\mu_0} \right) (\vec{E} \times \vec{B})$$

2.3



Die Energieübertragung findet durch das **elektromagnetische Feld** statt. Dies kann mit dem **Energiefluss** beschrieben werden.

2.3

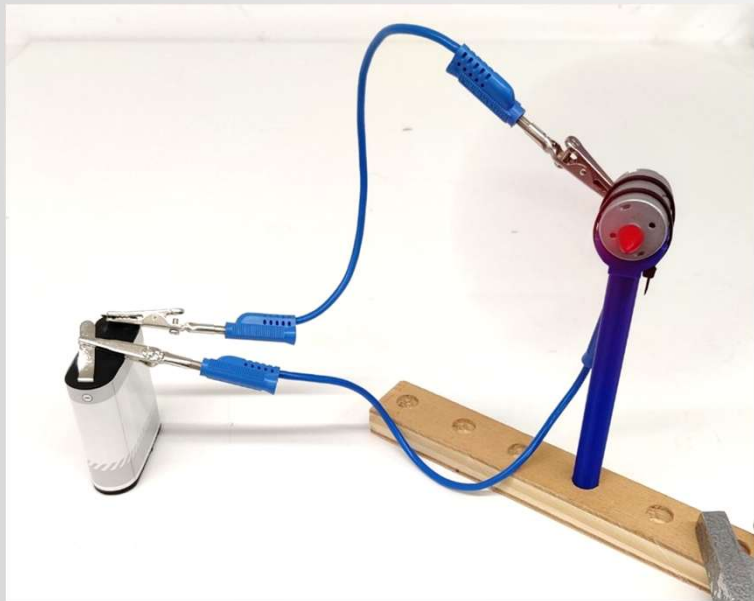


Der **Energiefluss** beschreibt den Fluss der **Energie**,
der **Stromfluss** den Fluss des **Stromes**!

2.3



Versuch 3

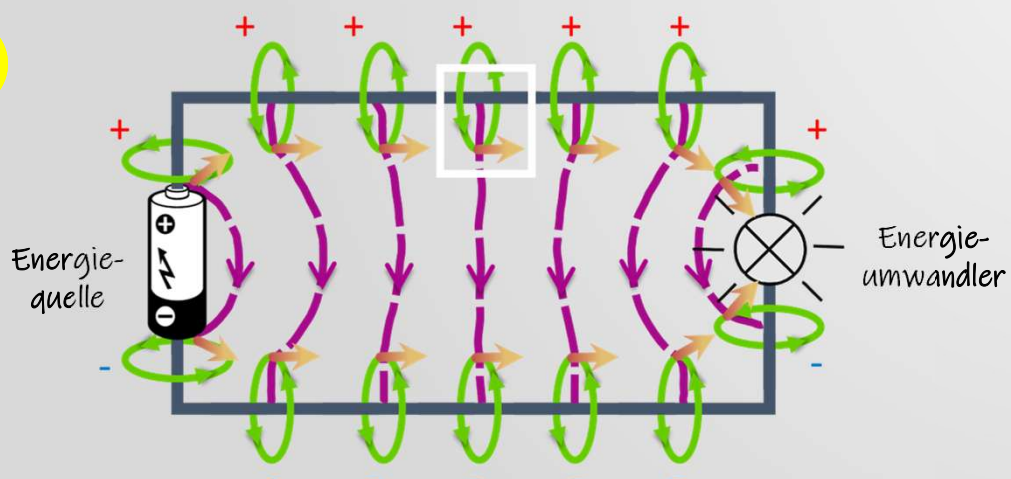


2.3



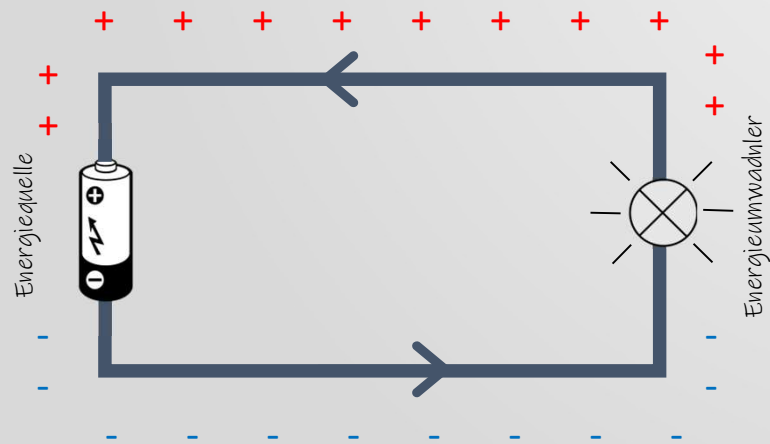
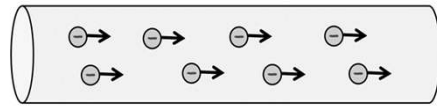
Erstelle eine **Mind-Map** zu den bisher besprochenen Begriffen, um deine Gedanken zu ordnen.

3.1



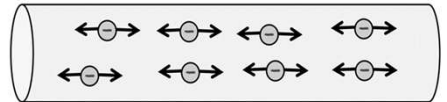
3.1

Gleichstrom (DC): Elektronen bewegen sich in eine Richtung



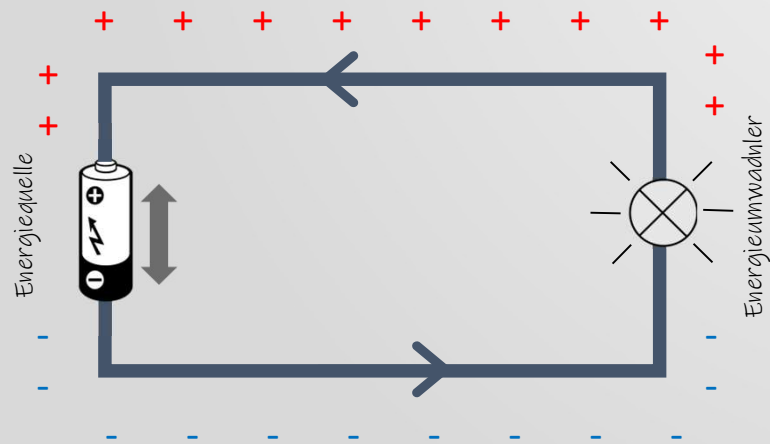
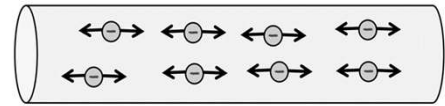
3.1

Wechselstrom (AC): Elektronen bewegen sich hin- und her



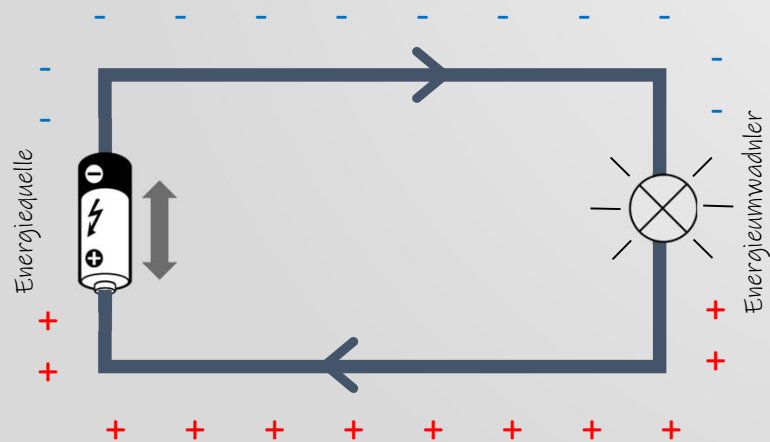
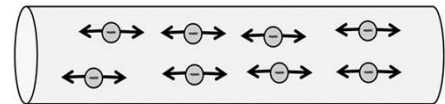
3.1

Wechselstrom (AC): Elektronen bewegen sich hin- und her

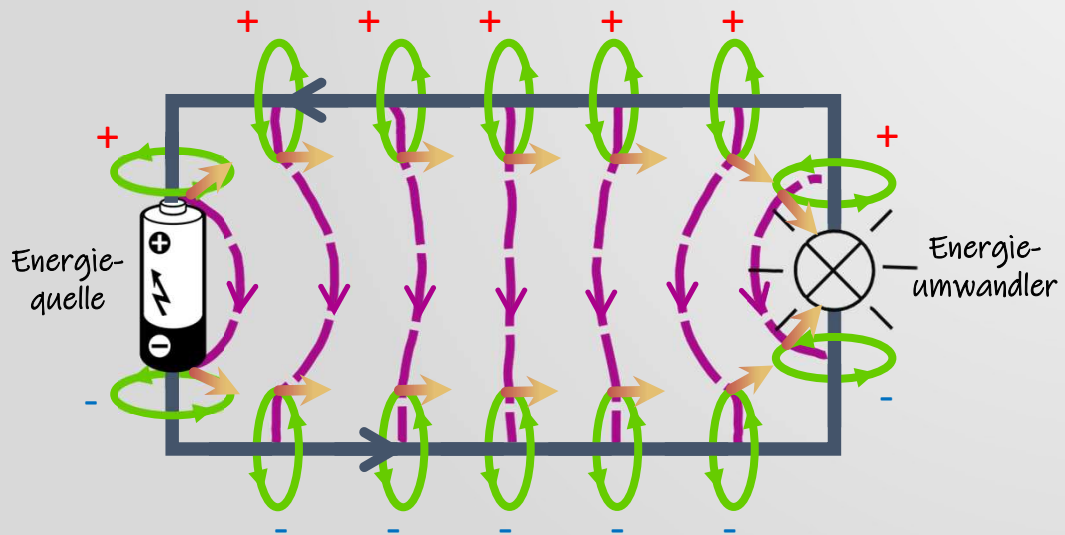


3.1

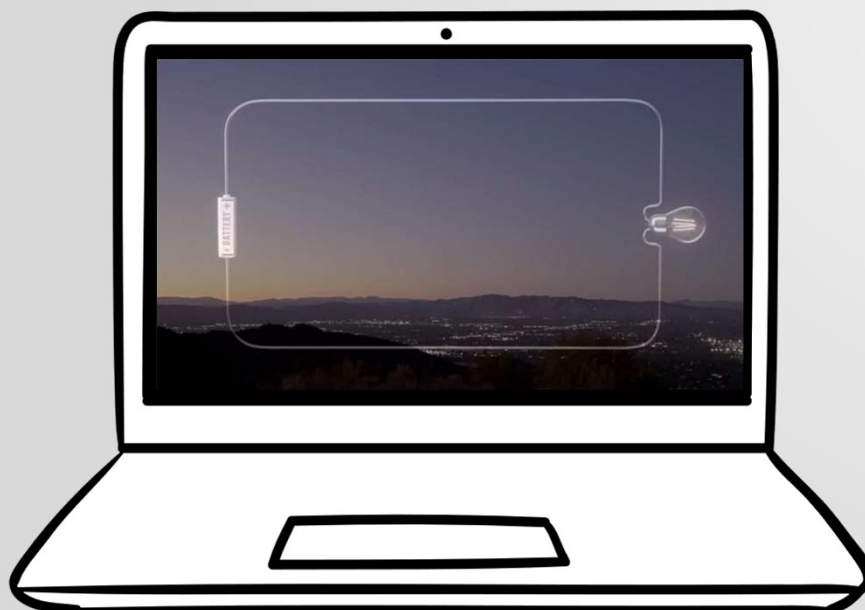
Wechselstrom (AC): Elektronen bewegen sich hin- und her



3.1



3.1



3.1



Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld kann sowohl bei **Gleich-** als auch **Wechselstromkreisen** erfolgen.

3.2



Energieumwandler	Woran erkenne ich die Energieübertragung?

3.2



Die Energie, die von der Energiequelle durch das Feld übertragen wird, kommt (beinahe) vollständig beim Energieumwandler an. Dort wird sie in eine andere Form von Energie **umgewandelt** (z. B. elektrische Energie in Strahlungsenergie).

3.2

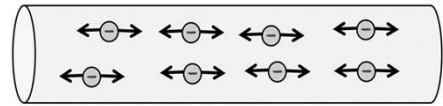


Die Energieübertragung durch das elektromagnetische Feld findet in Lichtgeschwindigkeit statt.

3.2



Wechselstrom (AC): Elektronen bewegen sich hin- und her



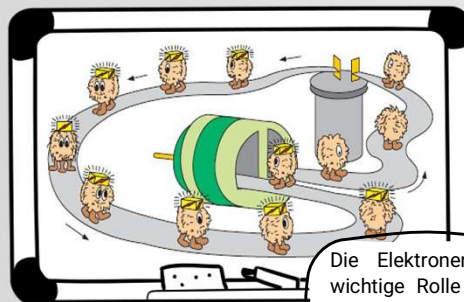
3.2



Die Elektronen verbrauchen am Weg zum Umwandler Energie!

Die Elektronen laden nicht nur die Energie am Umwandler ab, sondern sie werden dort auch verbraucht!

Die Elektronen bewegen sich nur ganz langsam durch den Stromkreis, sie können daher nicht die Energie übertragen.



Die Elektronen spielen eine wichtige Rolle im Stromkreis. Durch die Bewegung der negativ geladenen Elektronen im Leiter entsteht ein Magnetfeld, das gemeinsam mit dem elektrischen Feld den Energiefluss erzeugt.