

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Besonderheiten aus der Welt der Quantenphysik:
Ein Stationenbetrieb für den Schulunterricht

verfasst von | submitted by
Brigitte Schauer BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2025

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

UA 199 520 523 02

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

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach
Mathematik Unterrichtsfach Physik

Betreut von | Supervisor:

Mag. Dr. Beatrix Hiesmayr Privatdoz.

Danksagung

Ich möchte mich hiermit recht herzlich bei allen Personen bedanken, welche mich bei der Erstellung meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Betreuerin Mag. Dr. Beatrix Hiesmayr, welche mir die Umsetzung dieser Arbeit in erster Linie überhaupt ermöglicht hat. Sie fand immer die Zeit mir meine kleinen sowie auch großen Fragen zu beantworten.

Ein weiterer Dank gilt Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf für seine anregenden Ideen während der Themenfindung.

Weiters möchte ich mich bei allen Schulen und vor allem bei den Lehrpersonen bedanken, die mich die Erprobung durchführen lassen haben. Noch ein größerer Dank spreche ich den Schüler:innen der Erprobung aus, da ohne deren Hilfe der Stationenbetrieb nicht verbessert hätte werden können.

Zu guter Letzt bedanke ich mich auch recht herzlich bei meiner Familie, ohne die ich das Studium nicht besuchen hätte können. Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während des gesamten Studiums jederzeit so gut wie möglich unterstützt haben.

Abstract

Die Arbeit zielt darauf ab, einen Stationenbetrieb aus sechs Stationen anzubieten, welcher von Schüler:innen selbstständig erarbeitet werden kann. Damit kann der Betrieb für solche Stunden eingesetzt werden, bei denen schnell Unterrichtsmaterialien beschafft werden müssen, wie es z.B. bei Supplierstunden der Fall sein kann. Mit Stationen 1, 3 und 6 kann eine Einführung stattfinden, wohingegen die restlichen Lernstationen eine Vertiefungsmöglichkeit bieten.

Der Stationenbetrieb ist eine Unterrichtsmethode, bei denen Schüler:innen verschiedene Lernstationen bearbeiten. Die Materialien, die für den Stationenbetrieb für diese Arbeit erstellt wurden, können von den Schüler:innen selbstständig erarbeitet werden. Einige Stationen bieten einen Einstieg in die Welt der Quantenmechanik, wohingegen andere ein Erweiterungsmaterial darstellen. Alltagsbeispiele und das berühmte Gedankenexperiment des österreichischen Nobelpreisträgers Erwin Schrödinger, Schrödingers Katze, bieten abwechslungsreiche Ansichten auf das Thema der Quantenmechanik. Mit Experimenten, Simulationen und Spielen wird für eine Methodenvielfalt gesorgt.

Die Quantenmechanik beschreibt einen Teil der Physik, der für die Gesellschaft heute, sowie auch in Zukunft sehr wichtig ist, weil sie unseren Alltag beschreibt. Um die Quantenphysik zu verstehen, kann der Mensch sich nicht auf seine Intuition verlassen, sondern muss sich auf die abstrakte Welt der Quantenvorgänge einlassen. Deshalb bietet der Stationenbetrieb Arbeitsblätter an, welche als erste Berührungspunkte mit der Quantenmechanik dienen. Schüler:innen können somit schon früh auf die Abstraktheit von quantenmechanischen Vorgängen aufmerksam gemacht werden.

Die erste Station befasst sich mit der Caesar Verschlüsselung, welche die Sicherheiten von Verschlüsselungsverfahren mit der Sicherheit eines Schlüsselaustausches mit Photonen vergleicht.

Thematisch passend dazu, aber nicht darauf aufbauend, wird in Station 3 die Bellsche Ungleichung in der Wigner und d’Espagnat Form hergeleitet.

Für weitere Berührungspunkte mit der Quantenmechanik sorgt auch die Station Schrödingers Katze. Darin wird das berühmte Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger wiedergegeben und die im Kontext angedeuteten Unterschiede zwischen makroskopischer und mikroskopischer Welt beleuchtet.

Zur Vertiefung wird in Station 5 gezeigt, wie sich die Gewinnchancen eines quantenmechanischen Münzspiels im Gegensatz zu einem klassischen verändern würden.

Die Station Quantenmechanik im Alltag führt die Eigenschaft der Verschränkung ein und spricht verschiedene Anwendungsgebiete an, wobei auch die Funktionsweise eines

MRT Gerätes genauer besprochen wird.

Die letzte Vertiefungsstation erklärt das Phänomen der Polarisierung mit Hilfe des mathematischen Bra-Ket Formalismus.

Um die selbstständige Erarbeitung zu ermöglichen wird neben der Methode des Stationenbetriebs die Methode der gestuften Hilfen verwendet. Neben einer Literaturrecherche für das Fachwissen und passende Schüler:innenvorstellungen zu den Stationen wird zur Optimierung des Betriebs eine Erprobung durchgeführt. Der Test fand mit vier Schüler:innengruppen aus der 8., 10., 11. und 12. Schulstufe statt.

Die Ergebnisse haben bestätigt, dass der Stationenbetrieb von den Schüler:innen ohne die Hilfe einer Lehrperson für Physik zur Gänze bearbeitet werden kann. Bei den Stationen 1, 2 und 5 wurde durch die Probe ersichtlich, dass die Schüler:innen eine weitere kleine Hilfestellung zu einzelnen Aufgaben benötigen. Deshalb wurden einzelne Aufgaben mit Tipps, Experimentieranleitungen oder weiteren Hilfskärtchen ergänzt. Im Fall von Station 4 haben Schüler:innen eine Fragestellung überlesen, womit die Aufgabe nur optisch abgeändert wurde. Die restlichen Stationen haben von Anfang an gute Ergebnisse erzielt, weshalb die Stationen 3 und 6 nicht verändert wurden.

Weiters hat die Erprobung gezeigt, dass die Einschätzung des Vorwissens und der Schulstufen richtig sind.

Damit macht der Stationenbetrieb eine Einführung in die Quantenmechanik ab der 8. Schulstufe auch für fachfremde Supplierlehrkräfte möglich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen des Stationenbetriebs	3
2.1	Lehrplanbezug	4
2.2	Schüler:innenvorstellungen	4
2.3	Interessen von Schüler:innen	5
2.4	Didaktische Methoden	6
2.4.1	Stationenbetrieb - Eine Form offenen Unterrichts	6
2.4.2	Gestufte Hilfen	8
3	Erstversion des Stationenbetriebs	8
3.1	Die Caesar Verschlüsselung	9
3.1.1	Fachwissen	9
3.1.2	Vorwissen und Key Ideas	10
3.1.3	1. Station: Die Caesar Verschlüsselung	10
3.1.4	Zusatzmaterial für Station 1	15
3.2	Bra-Ket Formalismus	17
3.2.1	Fachwissen	17
3.2.2	Vorwissen und Key Ideas	19
3.2.3	2. Station: Bra-Ket Formalismus	20
3.2.4	Zusatzmaterialien für Station 2	25
3.3	Bellsche Ungleichung	27
3.3.1	Fachwissen	27
3.3.2	Vorwissen und Key Ideas	29
3.3.3	3. Station: Bellsche Ungleichung	30
3.3.4	Zusatzmaterial für Station 3	32
3.4	Quantenmechanik im Alltag	34
3.4.1	Fachwissen	35
3.4.2	Vorwissen und Key Ideas	37
3.4.3	4. Station: Quantenmechanik im Alltag	37
3.4.4	Zusatzmaterial für Station 4	43
3.5	Quantenspiel	45
3.5.1	Fachwissen	45
3.5.2	Vorwissen und Key Ideas	47
3.5.3	5. Station: Quantenspiel	48

3.5.4	Zusatzmaterial für Station 5	52
3.6	Schrödingers Katze:	54
3.6.1	Fachwissen	54
3.6.2	Vorwissen und Key Ideas	55
3.6.3	Station: Schrödingers Katze	56
3.6.4	Zusatzmaterial für Station 6	60
3.7	Stationen-Pass	62
3.7.1	Der Stationen-Pass	63
4	Erprobung des Stationenbetriebs	64
4.1	Durchführung	64
4.2	Auswertung und Überarbeitung	65
4.2.1	Station 1	65
4.2.2	Station 2	66
4.2.3	Station 3	69
4.2.4	Station 4	69
4.2.5	Station 5	70
4.2.6	Station 6	72
4.2.7	Stationen-Pass	73
5	Leitfaden für Lehrpersonen	73
5.1	Aufbau der Stationen	73
5.2	Zusätzlich benötigtes Material	74
6	Diskussion	74
7	Fazit	77
	Abbildungsverzeichnis	81
	Literatur	86
	Anhang	87
	Anhang A: Überarbeitete Version des Stationenbetriebs	87
	Anhang B: Schüler:innenantworten aus der Erprobung	87

1 Einleitung

Im Jahr 2022 bekam der österreichische Forscher Anton Zeilinger den Nobelpreis verliehen. Dieser wurde ihm gemeinsam mit Alain Aspect und John F. Clauser „für Experimente mit verschränkten Photonen“ (Universität Wien, 2025), dass im Bereich der Quantenphysik einzuordnen ist, verliehen (vgl. Universität Wien, 2025).

Mit Hilfe dieser bahnbrechenden Forschung und dem Wissen aus bereits vergangenen Experimenten, konnten in den Bereichen Medizin, Quantencomputing und Datenverschlüsselung Fortschritte gemacht werden (vgl. Ellerhoff, 2020, S.32). Alleine schon der Quantencomputer soll große Verbesserungen mit sich bringen, wie z.B. Arzneimitteln, wie Tabletten und Impfstoffen bei der schnelleren Entwicklung zu helfen oder Datenübertragungen der Bank sicherer zu gestalten. Aber auch für die Wirtschaft und den An- und Verkauf von Wertpapieren sollen bessere Voraussagen gemacht werden können (vgl. ÖAW, 2023; vgl. Pade, 2024, S.219f.).

Da Erfindungen, basierend auf quantenmechanischen Phänomenen unseren Alltag bereits prägen, ist es umso wichtiger den Schüler:innen eine gute Wissensbasis über die Quantenphysik zu vermitteln.

Dieser Grundgedanke war ausschlaggebend für die Erstellung dieser Arbeit.

Grundsätzlich kommt die Quantenphysik im Lehrplan erst in der 7. Klasse bzw. 11. Schulstufe vor. Einige Stationen dieser Arbeit sollen es Schüler:innen auch schon vor der 11. Schulstufe ermöglichen, Berührungspunkte mit der Quantenmechanik zu schaffen. Das bedeutet, dass bei der Erstellung dieser Stationen darauf geachtet wurde, dass sie so wenig Vorwissen wie nötig von den Schüler:innen verlangen und somit auch in niedrigeren Schulstufen bearbeitet werden können (vgl. RIS, 2025).

Dahinter verbirgt sich die Hoffnung den Schüler:innen zu vermitteln, dass der mikroskopische Teil unserer Welt abstrakter ist, als die sichtbare Alltagswelt. Für diese Vermittlung sind die Stationen 1, 3 und 6 konzipiert worden.

Die erste Station behandelt die Caesar Verschlüsselung. Dabei soll in erster Linie gezeigt werden, wie Caesar schon damals seine Briefe ver- und entschlüsselt hat. Vertieft wird das Ganze, indem auf die Sicherheiten des Verfahrens näher eingegangen wird. Daran anknüpfend wird auf die Sicherheit der Quantenkryptographie übergeleitet.

In der dritten Station wird, unabhängig zu Station 1, die Bellsche Ungleichung behandelt. Darin wird die Wigner und d’Espagnat Form der Ungleichung erarbeitet und schlussendlich auf die Sicherheitsüberprüfung von Schlüsselübertragungen mit Quantenteilchen eingegangen.

Die letzte Station, welche erste Berührungspunkte mit der Quantenmechanik schaffen

soll, ist die Station Schrödingers Katze. In der Station wird das berühmte Gedankenexperiment des österreichischen Nobelpreisträgers Erwin Schrödinger vorgestellt. Dabei ist die Station so aufbereitet, dass die Informationen des Gedankenexperimentes gemeinsam mit den Schüler:innen aufgearbeitet und gleichzeitig der klassischen Physik gegenübergestellt wird. Um einen besseren Übergang von der sichtbaren Welt zum Mikrokosmos zu schaffen wird der Begriff der Dekohärenz eingeführt.

Die andere Hälfte des Stationenbetriebs ist der Vertiefung in die Besonderheiten der Quantenwelt gewidmet. Diese sollen den Schüler:innen aufzeigen, wo die abstrakten Eigenschaften der Quantenphysik bereits Anwendung finden und welche möglichen Veränderungen sie bewirken könnten.

Station 2 untersucht das Experiment der linearen Polarisation und untersucht diese mit Hilfe von mathematischen Hilfsmitteln.

Bei der 4. Station wird zuerst der Begriff der Verschränkung eingeführt und dann einige Anwendungen, wie die Quantenkryptografie und der Quantencomputer besprochen. Die Station befasst sich jedoch am genauesten mit der Funktionsweise eines MRTs.

Anders als die ersten beiden vertiefenden Lernstationen wird bei der 5. Station kein direktes Anwendungsbeispiel genannt. Zuerst wird ein klassisches Münzbeispiel vorgestellt und danach bei der quantenmechanischen Variante die Superposition zusätzlich ins Spiel gebracht. Die Schüler:innen sollen im Anschluss selbst entscheiden, ob und in welchem Rahmen die quantenmechanische Spielvariante umgesetzt werden kann.

Das hat einerseits eine differenzierende Absicht und ermöglicht es den Schüler:innen dadurch selbst zu entscheiden, ob sie Vorteile oder Chancen hinter gewissen quantenmechanischen Eigenschaften erkennen können.

Der Inhalt des Stationenbetriebs deckt jedoch nicht die gesamten Forderungen des Lehrplans für den Bereich der Quantenphysik. Inhaltlich wird nur der Punkt „Besonderheiten der Quantenwelt“ (RIS, 2025) behandelt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen komplett eigenständigen Stationenbetrieb anzubieten, bei dem jede einzelne Station in sich abgeschlossen ist und diese nicht aufeinander aufbauen. Der Stationenbetrieb soll Lehrkräften eine Unterstützung bei der Einführung in die Quantenmechanik sein und auch eine kleine Auswahl an Vertiefungsmöglichkeiten, sowie Alltagsanwendungen bieten.

Um den Stationenbetrieb selbstständig bearbeitbar zu machen, soll die Methode der gestuften Hilfen verwendet werden. Diese Methode soll Lehrkräften die Chance geben Schüler:innen auf die Quantenmechanik in der 7. Klasse vorzubereiten, ohne dass sie viel Zeit für die Stundenvorbereitung investieren müssen.

Geeignete Stunden dafür wären unter anderem normale Unterrichtsstunden, aber auch

Supplierstunden (Durchführung auch von fachfremden Lehrkräften möglich), Stunden nach dem Abschluss eines Kapitels, nach einer Test- oder Schularbeitsrückgabe oder Stunden vor einer längeren Ferienzeit.

Um sicherzustellen, dass die Stationen eigenständig und gut von Schüler:innen zu bearbeiten sind, werden diese an vier Gruppen von Schüler:innen erprobt. Für die Untersuchung werden Schüler:innen aus unterschiedlichen Schulstufen herangezogen. Die unterschiedlichen Schulstufen sollen auch die Eignung der einzelnen Stationen für verschiedene Altersstufen testen.

Die Antworten von den Schüler:innen sollen nach der Erprobung ausgewertet und die Aufgaben herausgesucht werden, bei denen die Lernenden am meisten Schwierigkeiten aufweisen. Nach Art der Fehler werden die Aufgabenstellungen umformuliert, ergänzt oder der inhaltlichen Input überarbeitet. Dadurch soll schlussendlich eine optimierte Version des Stationenbetriebs entstehen.

Die Qualität des Stationenbetriebs soll in erster Linie dadurch zustande kommen, dass in dieser Arbeit auf wichtige Vorkehrungen wie z.B. die Beachtung von Schüler:innenvorstellungen Rücksicht genommen wird. Weitere wichtige Faktoren sind die Berücksichtigung des Lehrplans und die didaktischen Methoden, welche bei den Stationen verwendet wurden. Dabei werden die Vorteile und Funktionsweisen eines Stationenbetriebs und die Methode der gestuften Hilfen erläutert.

Den Kern der Arbeit stellt der Stationenbetrieb dar. Zu jeder Station wird das Fachwissen, sowie auch die Key Ideas und das Vorwissen beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Erprobung angeführt, worauf die überarbeitete Version des Stationenbetriebs folgt. Im letzten Kapitel befindet sich ein kurzer Informationstext für Lehrpersonen, welche den Stationenbetrieb verwenden wollen. Dieser gibt einen kleinen Überblick darüber, wo die wichtigsten Inhalte zu finden sind und auf was bei der Durchführung geachtet werden sollte.

2 Grundlagen des Stationenbetriebs

Um einen geeigneten Stationenbetrieb für Schüler:innen zu erstellen, wurden vor der Erstellung einige grundlegende Informationen recherchiert.

Darunter zählt einerseits das Recherchieren der Inhalte des Lehrplans, wobei sich diese Arbeit nur auf Schüler:innen einer AHS fokussiert. Weiters wurde auch nach Schüler:innenvorstellungen, bezogen auf die Inhalte des Stationenbetriebs, gesucht, um falsche Vorstellungen nicht schon frühzeitig zu unterstützen.

Nicht nur die Inhalte sondern auch der Aufbau und die Methoden der Arbeit sind wichtig,

weshalb die Methode des Stationenbetriebs und der gestuften Hilfen sowie ihre Vorteile in diesem Kapitel vorgestellt werden.

2.1 Lehrplanbezug

In der Schule ist die Behandlung der Quantenphysik, laut Lehrplan für den Schultyp AHS, in der 11. Schulstufe im 6. Semester vorgesehen. Falls für die Klasse mehr als sieben Stunden pro Woche angedacht sind, soll folgender Themenblock erarbeitet werden: „**Quantenphysik:** Besonderheiten der Quantenwelt, Doppelspaltexperiment, Heisenberg’sche Unschärferelation, statistische Deutung“ (RIS, 2025).

Für alle Klassen die weniger als sieben Wochenstunden haben, beschränkt sich das Themengebiet auf das folgende Unterthema:

„**Quantenphysik:** Besonderheiten der Quantenwelt“ (RIS, 2025).

Die Inhalte dieser Arbeit können in den Themenbereich „Besonderheiten der Quantenwelt“ (RIS, 2025) eingeordnet werden. Der Stationenbetrieb ist so konzipiert, dass er ab der 11. Schulstufe im 6. Semester, sowie im Lehrplan vorgesehen, als Ganzes bearbeitbar ist (vgl. RIS, 2025).

2.2 Schüler:innenvorstellungen

Bei der Erstellung eines Stationenbetriebs ist es neben dem Lehrplan äußerst wichtig auf die Schüler:innenvorstellungen zu achten. Da einige Stationen bereits in der Unterstufe bearbeitbar sein sollen, ist es wichtig, dass der Stationenbetrieb zu keinen falschen Schüler:innenvorstellungen führt. Diese könnten dem Verständnis von weiteren Konzepten der Quantenmechanik im Weg stehen und es könnte äußerst schwer sein, diese in der 7. Klasse wieder richtigzustellen (vgl. RIS, 2025).

Daher wurde nach schon bekannten Fehlvorstellungen gesucht, welche Schüler:innen zum Thema der Quantenphysik häufig entwickeln. Die hier vorgestellten Schüler:innenvorstellungen wurden aus dem Buch von den Autoren Duit, Hopf, Schecker und Wilhelm (vgl. Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S. 213ff. und S.229ff.) entnommen.

Das Buch hebt hervor, dass Schüler:innen Schwierigkeiten dabei haben den Welle-Teilchen-Dualismus anzuerkennen. Sie interpretieren den Dualismus so, als ob „das Wellenverhalten und das Teilchenverhalten von Quantenobjekten unverbunden nebeneinanderstehen (‘Mal-so-mal-so-Dualismus’)“ (Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.215).

Da Schwierigkeiten mit dem Dualismus vermieden werden wollen, wird dieser so weit es geht in dieser Arbeit vermieden und auf den Regelunterricht in der 7. Klasse verschoben, sodass Missverständnisse direkt geklärt werden können.

Eine weitere Schüler:innenvorstellung ist folgende: „In Wirklichkeit hat das Elektron einen bestimmten Ort, man kennt ihn nur nicht“ (Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.213). Lernende denken, dass einem Quantenobjekt ein fixer Wert bezüglich den Eigenschaften von Ort und Bahn zugeschrieben werden können. Als Rechtfertigung dafür wird genannt, dass man durch Ungenauigkeit bzw. Unkenntnis seitens der Forscher oder der Schnelligkeit der Quantenobjekte, nicht dazu in der Lage ist, den genauen Messwert herauszufinden (vgl. Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.213).

Aus diesem Gedanken leiten die Schüler:innen auch die Verwendung der Wahrscheinlichkeit ab. Diese wird angeblich dazu gebraucht, um die Ungenauigkeit beim Messvorgang zu berücksichtigen (vgl. Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.213ff.).

Zusätzlich gilt die Unwissenheit auch als Begründung für das „Nicht-Auftreten“ von Zufällen. Schüler:innen sind der Meinung: „In der Physik gibt es keinen Zufall, weil man alles mit physikalischen Gesetzen berechnen kann.“ (Feistmantl, 2017, zitiert nach Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.229) und „Zufällige Ergebnisse sind gleichverteilt“ (Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.230). Für den Fall, dass Schüler:innen beim Experimentieren Messungen vornehmen und ein Messwert öfters auftritt, passiert die Annahme, dass dieser der einzig richtige Messwert ist. Sobald ein Schema in den Messdaten erkennbar ist, wird von Schüler:innen gefolgert, dass es sich um keinen Zufall handeln kann. Denn im Gegenteil dazu sind einige Schüler:innen von der folgenden Aussage überzeugt: „Zufällige Ereignisse sind unstrukturiert“ (Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.231).

Eine weitere Schwierigkeit, welche Schüler:innen mit der Quantenphysik haben ist, dass diese „zwischen der Welt der physikalischen Theorie und der realen Welt“ (Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.230) eine strikte Abgrenzung sehen und dadurch beide Objekte manchmal schwer vereinigen können (vgl. Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.230).

2.3 Interessen von Schüler:innen

Die Interessen von Schüler:innen bezogen auf den Physikunterricht lassen sich in drei Bereiche unterteilen. Ein Bereich beinhaltet die Physik an sich und den technischen Bereich der Physik. Der andere wiederum befasst sich mit Kontexten, die den Körper oder die Umweltgeschehnisse betreffen. Der letzte Bereich beschäftigt sich mit den Konsequenzen und Chancen von neuen Entdeckungen auf das Leben der Bevölkerung (vgl. Fürtbauer, E. M., Herbst, M., Strahl, A., 2016, S.2-5).

Da es Schüler:innen gibt, welche ein Interesse an mehreren Gebieten zeigen, wurden die

Lernenden in vier Interessentypen unterteilt. Der erste Typ ist in jedem Bereich der Physik neugierig und mag naturwissenschaftliche Fächer generell. Der zweite Interessentyp zeigt ein überwiegendes Interesse an der Physik von Umweltgeschehnissen und des Körpers. Überwiegend für die Physik in Bezug mit der Gesellschaft interessieren sich die Schüler:innen des dritten Typs. Außerdem gibt es Schüler:innen, welche sich für keinen Bereich interessieren. Laut Studien von Herbst, Fürtbauer und Strahl, stellte sich heraus, dass der größte Anteil an Schüler:innen dem Interessentyp zwei entsprechen (vgl. Fürtbauer, E. M., Herbst, M., Strahl, A., 2016, S.2-5).

Daher wird in der Arbeit darauf geachtet, dass die meisten Aufgaben das Interesse des zweiten Interessentyps wecken. Nichtsdestotrotz sind auch einige Inhalte eingebaut, welche den ersten und dritten Interessentyp ansprechen.

2.4 Didaktische Methoden

Für die Übermittlung der ausgesuchten Inhalte der Quantenmechanik wurde die Unterrichtsmethode des Stationenbetriebs verwendet. Der Stationenbetrieb wird den offenen Unterrichtsformen zugeordnet, welche einem lehrerzentrierten Unterricht entgegenwirken sollen (vgl. Barz, 2018, S.471-475).

2.4.1 Stationenbetrieb - Eine Form offenen Unterrichts

Ein Stationenbetrieb ist eine Unterrichtsmethode, bei der Lernmaterialien in der Klasse verteilt werden. Schüler:innen können sich dabei grundsätzlich selbst aussuchen, in welcher Reihenfolge die Stationen bearbeitet werden und können sich ihre Bearbeitungszeit selbst einteilen. Ein Vorteil des Stationenbetriebs ist, dass sich die Schüler:innen die Inhalte selbst aneignen können, wobei die Lehrperson bei Nachfrage aushilft. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich der Stationenbetrieb zur Differenzierung eignet (vgl. CAMPUS 02 Fachhochschule der Wirtschaft, 2019).

Es wird zwischen fünf verschiedenen Öffnungsgraden bezüglich des Zeitplans, der Herangehensweise und der Schwierigkeitsstufen unterschieden. Die Unterteilungen in verschiedenen Stufen wurde von dem Handbuch Bildungsreform und Reformpädagogik von Heiner Barz (Barz, 2018, S.471-475) übernommen.

Der kleinste Öffnungsgrad lässt den Schüler:innen die Wahl in welcher Reihenfolge die Stationen bearbeitet werden, wie viel Zeit dafür in Anspruch genommen wird und in welcher Sozialform gearbeitet wird. Dabei gibt es keine Differenzierung und alle Stationen müssen von allen Schüler:innen bearbeitet werden.

Beim nächsten Öffnungsgrad wird differenziert, indem Pflicht- und Wahlstationen ange-

boten werden.

Um den Stationenbetrieb eine weitere Stufe offener zu gestalten, ist die Mitwirkung der Schüler:innen bei der Erstellung der Aufgaben und der darin behandelten Lernzielen erforderlich.

Die letzte Stufe der Offenheit eines Betriebs kann nur dadurch erreicht werden, wenn die Schüler:innen die Ziele und Stationen selbst erstellen. Dabei soll von den Schüler:innen der Lehrplan berücksichtigt werden und die Lehrkraft greift nur ein, falls die Schüler:innen dazu neigen, das Thema zu verfehlen.

In dieser Arbeit wurde der zweite Öffnungsgrad gewählt, bei dem zwischen Pflichtstationen, in Form von Einführungsaufgaben sowie Wahlstationen mit Vertiefungsmaterial unterschieden wird. Zusätzlich wurde in dieser Arbeit das ungefähre Schwierigkeitslevel jeder Station eingeschätzt und angegeben. Dadurch können Schüler:innen, nach absolvieren der Pflichtstationen, ihren Wissensstand ungefähr einschätzen und gezielter Stationen auswählen, um im passenden Schwierigkeitsgrad gefördert werden zu können. Ein weiterer Grund, dass Wahl- und Pflichtstationen für den Betrieb gewählt wurden ist, dass dadurch unterschiedliche Interessentypen angesprochen werden können. Der Stationenbetrieb wurde nicht für eine spezifische Klasse erstellt, wodurch eine weitere Öffnung mit spezieller Anpassung an einzelne Schüler:innen nicht gemacht wurde.

Der Zweck von offenen Unterrichtsmaterialien einerseits ist es die Schüler:innen zu selbstständigem Handeln und Entscheiden aufzufordern und andererseits fördert es die Selbststeuerung der Schüler:innen. Von weiterem Vorteil ist auch die Differenzierungsmöglichkeit (vgl. Barz, 2018, S.471-475). Verglichen mit einem lehrerzentrierten Unterricht können Kompetenzen und Wissen genauso gut erlernt werden. Anders als im Regelunterricht kann es zur Steigerung der Kreativität führen und wirkt sich positiv auf die Lernhaltung von Schüler:innen aus (vgl. Barz, 2018, S.471-475).

Diese Erfolge können mit einem Stationenbetrieb nur dann erfüllt werden, falls dieser eine gute Qualität aufweist. „Die besten Lernerfolge werden durch Methodenvielfalt erreicht“ (Jäkel, 2021, S.352). Daher wurde darauf geachtet, dass innerhalb der Stationen verschiedene Methoden, wie z.B. Spiele, Experimente und Videos zum Vermitteln der Lerninhalte verwendet wurden.

Weiters empfiehlt Jäkel, dass Lehrkräfte (bzw. in diesem Fall der Stationenbetrieb) Rücksicht auf die folgenden wichtigen Punkte nehmen sollten: Motivierung von Schüler:innen, Konzentrationsspanne, Aufnahmefähigkeit von neuem Wissen, Vorwissen, Alltagsbezug, Methodenvielfalt und eine zeitnahe Repetition zur Festigung des gelernten Wissens (vgl. Jäkel, 2021, S.351f.).

Daher wurde bei der Erstellung der Stationen darauf geachtet, dass nicht zu viel In-

put auf einmal vermittelt wird und verschiedene Methoden verwendet werden, um die Konzentrationsspanne aufrechtzuerhalten. Weiters wurden die Aufgaben so erstellt, dass Schüler:innen ihr neu erlerntes Wissen auch reflektieren, mit Vorwissen verknüpfen und auch festigen sollen. Da das Thema der Quantenmechanik an sich sehr abstrakt ist, wurde besonders darauf geachtet einen Alltagsbezug herzustellen oder bekannte Anwendungsgebiete zu nennen.

Zusätzlich dazu erwähnt Hilbert Meyer in seiner Aufzählung von Merkmalen guten Unterrichts die Wichtigkeit von differenzierter Förderung der Schüler:innen. Aus diesem Grund wurden für fast alle Aufgaben Hilfskärtchen mit gestufte Hilfen erstellt (vgl. Meyer, 2010, S.228 zitiert nach Fohr, 2020, S.178).

2.4.2 Gestufte Hilfen

Gestufte Hilfen sind ein zusätzliches Material, welche als Hilfestellung zur Bearbeitung von Lernaufgaben bereitgestellt werden können. Diese bestehen aus schriftlichen Kärtchen, welche pro Aufgabe anfangs einen leichte Hilfestellung liefern, aber je mehr Kärtchen man zieht, bis zur tatsächlichen Lösung der Aufgabe führt. Die Kärtchen können nach Bedarf von den Schüler:innen gezogen werden, um ihnen das erarbeiten der Lernaufgaben besser zu ermöglichen (vgl. Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M., 2013, S.369).

Die Vorteile eines Stationenbetriebs mit gestuften Hilfen im Vergleich zu einem Stationenbetrieb sind, dass Schüler:innen „ein größeres Kompetenzerleben [...] sowie eine höhere Motivation“ (Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M., 2013, S.375f.) haben. Weitere Vorteile eines Stationenbetriebs mit gestuften Hilfen sind, dass Schüler:innen nach der Bearbeitung mehr Wissen wiedergeben können und auch ein besseres Verständnis über den Inhalt haben (vgl. Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M., 2013, S.376).

3 Erstversion des Stationenbetriebs

Der Stationenbetrieb besteht aus sechs Stationen. Dabei bieten die Stationen 2, 4, 5 eine Vertiefung in dem Gebiet der Quantenphysik. Die anderen Stationen stellen eine Einführung in die abstrakte Welt der Quantenmechanik dar.

Zu jeder Station des Betriebs sind das Fachwissen, die Key Ideas und das von den Schüler:innen benötigte Vorwissen angegeben. Im Anschluss sind die Arbeitsblätter der Station, sowie die zusätzlichen Materialien angeführt.

3.1 Die Caesar Verschlüsselung

Die Caesar Verschlüsselung bietet einen Einstieg in die Welt der Kryptographie. Durch diese Station sollen die Schüler:innen verstehen, wie Ver- und Entschlüsselungen funktionieren. Weiters wird auf die Sicherheit und die Möglichkeiten sowie auch Chancen aufmerksam gemacht, welche eine Quantenverschlüsselung bringen könnte.

3.1.1 Fachwissen

Die Verschlüsselungsart hat seinen Namen vom berühmten Römer Julius Cäsar. Denn dieser verschlüsselte seine wichtigsten Nachrichten, indem er jeden Buchstaben der Nachricht, mit dem dritten Nachfolger im Alphabet austauschte (vgl. Beutelspacher, 2015, S.5f.).

Dieser Verschlüsselungstyp zählt zu den Verschiebechiffren, bei denen mit Hilfe von Verschiebungen im Alphabet, Nachrichten ver- und entschlüsselt werden. Für das Verfahren wird ein Schlüssel benötigt. Der Schlüssel ist eine Zahl, die angibt, um wie viele Stellen im Alphabet verschoben werden muss. Sender und Empfänger der Nachricht benötigen den Schlüssel, um ver- oder entschlüsseln zu können. Zu diesem Schlüssel sollten jedoch nur Empfänger und Sender Zugriff haben, da sonst jeder die Nachricht mit Hilfe des Schlüssels dekodieren kann (vgl. Beutelspacher, 2015, S.5 und S.8).

Zur Erleichterung des Ver- und Entschlüsselns kann eine Chiffrierscheibe helfen. Diese besteht aus zwei kreisrunden Scheiben, welche im Mittelpunkt zusammengehalten werden. Die äußere sowie auch innere Scheibe besitzen am Rand eine Auflistung des gesamten Alphabets, welches in unserem Fall aus 26 Buchstaben besteht. Zum Ver- oder Entschlüsseln müssen die Scheiben zueinander verschoben werden. Im Fall der Caesar Verschlüsselung müssen die Scheiben so verschoben werden, dass der Buchstabe A außen über dem Buchstaben D steht. Zum Entschlüsseln einer Nachricht werden die inneren Buchstaben durch die äußeren ersetzt und beim Verschlüsseln die äußeren durch die inneren ersetzt (vgl. Beutelspacher, 2015, S.7f.).

Der Versuch eine Nachricht mit Hilfe einer Verschiebeverschlüsselung geheimzuhalten, ist jedoch kein sicheres Verfahren. Falls bekannt ist, dass die Verschlüsselung durch eine Verschiebung gemacht wurde, können bei der Chiffrierscheibe alle Kombinationen bzw. alle 26 Schlüssel ausprobiert werden und damit die geheime Nachricht entschlüsselt werden (vgl. Beutelspacher, 2015, S.11).

Die Quantenkryptographie hingegen bietet eine sicherere Kommunikationsweise. Der Schlüssel wird mit Hilfe von Quantenteilchen z.B. Photonen (Lichtteilchen), erstellt (vgl. Hochschule Luzern, 2024).

Dabei werden verschränkte Photonenpaare erzeugt, welche die Eigenschaften haben, miteinander auf spukhafte Weise verbunden zu sein. Das Vorteilhafte an der Verschränkung ist, falls der Zustand eines Photons durch eine Messung verändert wird, legt es automatisch den Zustand des anderen Photons von verschränkten Photonenpaars fest (vgl. Scherer, 2016, S.200).

Nachdem Messungen an den verschränkten Photonen durchgeführt wurden, kann durch einsetzen der Messwerte in die Bellsche Ungleichung überprüft werden, ob ein Hackangriff stattgefunden hat. Setzt man die Messwerte in die Bell'sche Ungleichung ein und erhält eine mathematisch wahre Aussage, ist ein Hackangriff bestätigt (vgl. Scherer, 2016, S.200f).

3.1.2 Vorwissen und Key Ideas

Für diese Station sollten die Schüler:innen den Begriff des Teilchens kennen, welcher im Lehrplan unter „Modellvorstellungen [...] z[.]B[.] Teilchenmodelle“ (RIS, 2025) für die 7. Schulstufe vorgesehen ist. Daher kann die Station der Caesar Verschlüsselung schon mit Schüler:innen der 8. Schulstufe bearbeitet werden (vgl. RIS, 2025).

Die Key Ideas, welche den Schüler:innen durch die Stationen vermittelt werden sollen, sind:

- **Key Idea 1:** Die Caesar Verschlüsselung basiert auf eine Verschiebung der Buchstaben im Alphabet (vgl. Beutelspacher, 2015, S.5-8).
- **Key Idea 2:** Der Schlüssel ist ein Zahl, welche benötigt wird um Nachrichten zu ver- oder entschlüsseln (vgl. Beutelspacher, 2015, S.5-8).
- **Key Idea 3:** Die Sicherheit gibt an, wie leicht oder schwer eine bestimmte Verschlüsselungsart zu entschlüsseln ist.
- **Key Idea 4:** In der Quantenkryptographie werden verschränkte Photonen zur Schlüsselübertragung verwendet (vgl. Hochschule Luzern, 2024).

3.1.3 1. Station: Die Caesar Verschlüsselung

Stell dir vor du möchtest deinem besten Freund oder deiner besten Freundin eine geheime Botschaft schicken. Diese sollst aber nur du und deine ausgewählte Person lesen können. Dazu benutzt man das Verfahren der Verschlüsselung, sodass nur diejenigen, die einen Schlüssel besitzen, die geheime Nachricht entschlüsseln können.

Schon Julius Caesar hat vor ungefähr 100-44 Jahre vor der Geburt Jesus Christus seine Briefe verschlüsselt. Aus diesem Grund hat diese Verschlüsselungsart auch ihren Namen. So wollte er verhindern, dass die Feinde seine wichtigen Briefe an das Militär lesen konnten (vgl. Leimeister, 2021, S.119).

Wie entschlüsselt man die geheime Nachricht?

Für jeden Buchstaben, den du von der Nachricht entschlüsseln möchtest, musst du im Alphabet 3 Buchstaben zurückgehen. Das heißt, dass in einer verschlüsselten Nachricht ein E eigentlich für den Buchstaben B steht, und ein U ist in Wirklichkeit für ein R. Falls du beim A angekommen bist, musst du von Z ausgehend zurückgehen, d.h. ein B steht für ein Y (vgl. Manz, 2019, S.7).

Zum Verschlüsseln müssen die Buchstaben wie in Abbildung 1 geändert werden.

Klartext																									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C
Geheimtext																									

Abbildung 1: Verschlüsselung einer Nachricht

Zum Entschlüsseln sollen die Buchstaben wie in Abbildung 2 geändert werden.

Geheimtext																									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
Klartext																									

Abbildung 2: Entschlüsselung einer Nachricht

Aufgabe 1 (W): Wende das Entschlüsselungsverfahren an, um die folgende Nachricht zu entschlüsseln.
 Die geheime Nachricht lautet: Gdv kdvw gx wroo jhpdfkw !
 Entschlüsselt bedeutet das: _____!

Einfacher funktioniert die Verschlüsselung und Entschlüsselung mit einer Chiffrierscheibe. Diese besteht aus zwei Scheiben, welche beweglich sind. Auf der äußeren Scheibe befinden sich die Buchstaben der verschlüsselten Nachricht und auf der inneren Scheibe die Buchstaben des lesbaren Textes.

Aufgabe 2 (W): Wende eine Chiffrierscheibe an, um selbst einen Text zu verschlüsseln. Dazu muss das Utensil erstmal zusammengebaut werden.

Anleitung für die Chiffrierscheibe:

Auf der letzten Seite dieser Station befindet sich die Vorlage zum Ausschneiden und zusätzlich brauchst du eine Musterbeutelklammer.

Schritt 1: Schneide zuerst beide Scheiben aus. Das Pluszeichen in der Mitte der Scheiben soll eingeschnitten und die schraffierte Stelle unter dem Buchstaben A ausgeschnitten werden.

Schritt 2: Lege die kleinere Scheibe mittig über die größere Scheibe und stecke die Musterbeutelklammer durch das Plus.

Schritt 3: Befestige die untere Seite der Musterbeutelklammer, sodass die Scheiben zusammenhalten, sich die Scheiben aber separat drehen können.

Schritt 4: Drehe die kleinere Scheibe so weit bis du die Zahl 3 im kleinen Fenster siehst.

Verschlüsse den folgenden Text, indem du die Chiffrierscheibe anwendest.

Die lesbare Nachricht lautet: Treffpunkt um vier Uhr nachmittags beim Park!

Die verschlüsselte Nachricht ist: _____!

Man braucht immer einen Schlüssel!

Bis jetzt war der Schlüssel bei dieser Station die Zahl 3. Der Schlüssel sagt dem Sender und Empfänger der Nachricht, um wie viele Buchstaben man im Alphabet vor- oder zurückrücken muss. Caesar hätte auch einen anderen Schlüssel, z.B. eine Verschiebung um 10 Buchstaben nehmen können.

Aufgabe 3 (E): Experimentiere mit der Chiffrierscheibe. Suche dir dazu selbst eine Nachricht aus und bestimme dazu den verschlüsselten Text. Wähle dazu deinen eigenen Schlüssel. Beachte, dass der Schlüssel eine Zahl von 0 bis 25 sein sollte.

Der Schlüssel: _____!

Die lesbare Nachricht: _____!

Der verschlüsselte Text: _____!

Aufgabe 4 (S): Bewerte die Sicherheit dieser geheimen Kommunikationsart und begründe, warum du dich für sicher/nicht sicher entschieden hast.

Wie sicher ist dieses Verfahren?

Die Sicherheit dieser Art von Kommunikation zwischen zwei Menschen hängt von der Sprache ab. Möchte man einen deutschen Text entschlüsseln und verschlüsseln ist die Sicherheit bei der Caesar Verschlüsselung mit ca. 17 Prozent gegeben (vgl. Manz, 2019, S.7f.). Sobald klar ist, dass ein Text mit der Hilfe von Verschiebungen des Alphabets verschlüsselt wurde, kann die Nachricht auf jeden Fall entschlüsselt werden. Da das Alphabet aus einer endlichen Anzahl von Buchstaben besteht, könnte man jeden Schlüssel von 0 bis 25 ausprobieren, um die Nachricht zu dechiffrieren. Vor allem bei langen Texten kann darauf geachtet werden, welcher Buchstabe am häufigsten auftritt, da das im deutschsprachigen Raum ein Hinweis auf die Verwendung des Buchstaben E sein kann (vgl. Beutelspacher, 2015, S.11ff.).

Quantenkryptographie – Wie funktioniert geheimes Kommunizieren mit Quanten?

Aufgabe 5 (W): Fasse das YouTube Video mit dem Titel „Quantenkryptographie einfach erklärt“ (Hochschule Luzern, 2024) in eigenen Worten zusammen und benutze dabei die folgenden Fachbegriffe:

Photon, Verschränkung, Beobachtung, Sicherheit, Quantencomputer



Vorlage zum Ausschneiden

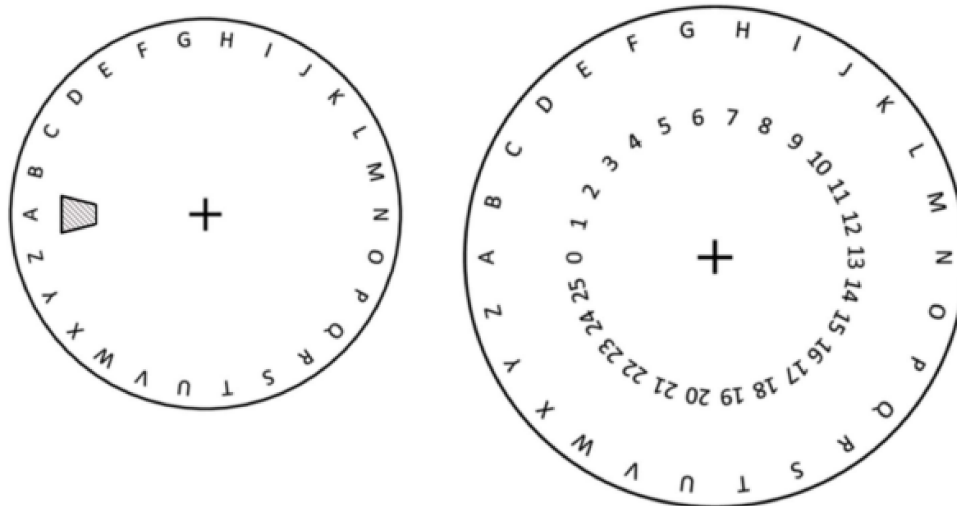


Abbildung 3: Chiffrierscheibe (Universität Wien, 2023)

3.1.4 Zusatzmaterial für Station 1

Hilfskärtchen

(S1) Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Schau dir nochmals den Text „Wie funktioniert das Entschlüsselungsverfahren?“ an. Versuche herauszufinden, wie viele Buchstaben man beim Entschlüsseln im Alphabet vor- oder zurückgehen muss.	Antwort zum Hilfskärtchen: Für jeden Buchstaben, den du entschlüsseln möchtest, musst du 3 Buchstaben im Alphabet zurückgehen. (Gdv => Das, weil G -> D , D -> A , V -> S)
(S1) Hilfskärtchen zu Aufgabe 2: Schau dir nochmals den Text „Wie funktioniert das Entschlüsselungsverfahren?“ an. Versuche herauszufinden, wie viele Buchstaben man beim Entschlüsseln im Alphabet vor- oder zurückgehen muss. Das bedeutet, dass du beim Verschlüsseln genau das Gegenteil tun musst.	Antwort zum Hilfskärtchen: Für jeden Buchstaben, den du verschlüsseln möchtest, musst du 3 Buchstaben im Alphabet vorgehen. (vier => ylhu, weil V -> Y , I -> L , E -> H , R -> U)
(S1) 1. Hilfskärtchen zu Aufgabe 3: Der Schlüssel ist die Anzahl von Buchstaben, die man beim Verschlüsseln im Alphabet nach vorne gehen muss.	Antwort zum Hilfskärtchen: Du darfst dir selbst den Schlüssel aussuchen. Verstelle die Chiffrierscheibe so, dass du im ausgeschnittenen Loch deine ausgewählte Zahl siehst.
(S1) 2. Hilfskärtchen zu Aufgabe 3: Denk dir eine Nachricht aus, welche du verschlüsseln möchtest und schreib diese zu dem Punkt: „Die lesbare Nachricht:“. Jeden Buchstaben, den du gewählt hast, findest du auf der inneren Scheibe der Chiffrierscheibe. Wenn du den Buchstaben auf der inneren Scheibe entdeckt hast, schreibst du den Buchstaben ab, der genau darübersteht (auf der äußeren Scheibe).	Antwort zum Hilfskärtchen: Hast du z.B. den Schlüssel 5 gewählt, dann wird A -> F , G -> L , X -> C
(S1) Hilfskärtchen zu Aufgabe 4: Überlege dir, ob es eine ganz sichere Methode gibt, den Schlüssel herauszufinden.	Antwort zum Hilfskärtchen: Wenn man jeden Schlüssel ausprobiert und anfängt das Wort zu übersetzen, sieht man, ob etwas lesbares herauskommt. Solange das nicht der Fall ist, muss die Chiffrierscheibe weitergedreht werden.

(S1) Hilfskärtchen zu Aufgabe 5: Finde die Stellen im Video an denen die Begriffe Photon, Verschränkung, Beobachtung, Sicherheit und Quantencomputer vorkommen.	Antwort zum Hilfskärtchen: Photonen (Zeit 0:50) Verschränkung (Zeit 0:55) Beobachtung (Zeit 1:06) Sicherheit (Zeit 1:12) Quantencomputer (Zeit 1:20)
--	---

Lösungskärtchen

(S1) Lösung zu Aufgabe 1: Das hast du toll gemacht!
(S1) Lösung zu Aufgabe 2: Wuhiisxqnw xp ylhu Xku qdfkplwvdjv ehlp Sdun!
(S1) Lösung zu Aufgabe 3: Schlüssel: 5 Nachricht: Hallo Verschlüsselt: Mfqqt
(S1) Lösung zu Aufgabe 4: Das Verfahren ist nicht sicher. Man kann mit der Chiffrierscheibe jeden Schlüssel nacheinander ausprobieren und versuchen die ersten paar Worte zu übersetzen. Wenn lesbare Worte bei der Entschlüsselung herauskommen, hat man den Schlüssel gefunden.
(S1) Lösung zu Aufgabe 5: Für die Quantenkryptografie werden Photonen(Lichtteilchen) verwendet. Um die Quantenkryptografie so sicher wie möglich zu machen, verwendet man die Eigenschaft der Verschränkung. Diese hat die Eigenschaft mit einem weiteren quantenmechanischen Teilchen verbunden zu sein und zugleich ihre Zustände ändern zu können. Durch eine Messung (Beobachtung) verändern die Photonen ihre Zustände, weshalb damit sofort überprüfbar ist, ob ein Lauschangriff gemacht wurde. Quantencomputer verwenden auch diese praktischen Quanteneigenschaften, um damit zu rechnen (vgl. Hochschule Luzern, 2024).

Begriffskärtchen

Verschränkung:

Verschränkte Quantenteilchen, wie z.B. zwei Photonen (Lichtteilchen), haben die Eigenschaft, dass sie sich gegenseitig „beeinflussen“ können. Sie benehmen sich, als wären sie „durch ein unsichtbares Band über beliebig lange Distanzen miteinander verbunden [...]“. Albert Einstein nannte dies eine ‚spukhafte‘ Fernwirkung“ (Ellerhoff, 2020, S.12).

3.2 Bra-Ket Formalismus

In der Station Bra-Ket Formalismus wird einerseits der physikalische Begriff der Polarisation und die mathematische Nachvollziehbarkeit von Polarisationsexperimenten anhand der Dirac Notation (= Bra-Ket Formalismus) vorgestellt.

Die Station ist die abstrakteste des gesamten Betriebs. Ein großer Teil der Station besteht aus der Einführung und Anwendung der Dirac Notation, was sie auch sehr mathematiklastig macht. Aus diesen zwei Gründen besitzt die Station die höchste Niveaustufe und wird als Wahlstation für Interessierte angeboten.

3.2.1 Fachwissen

Licht ist eine elektromagnetische Welle. Dabei steht das elektrische Feld senkrecht auf dem magnetischen Feld. Die Polarisation ist ein Quantenzustand und eine Eigenschaft von Licht, die aussagt, in welche Richtung das elektrische Feld schwingt (vgl. Slama, 2020, S.261).

Dabei wird im Stationenbetrieb zwischen unpolarisiertem und linear polarisiertem Licht unterschieden. Bei linear polarisiertem Licht gibt es nur eine ausgezeichnete Richtung in die das elektrische Feld schwingt. Dahingegen tritt bei unpolarisiertem Licht jede Schwingungsrichtung mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf (vgl. Slama, 2020, S.261ff.).

Unpolarisiertes Licht ist z.B. bei der Sonne zu finden. Um unpolarisiertes Licht zu linear polarisiertem Licht zu machen, können Polarisationsfilter verwendet werden (vgl. Slama, 2020, S.263).

„Fällt auf einen Polarisator eine Lichtwelle mit beliebiger Polarisation, so wird nur der Anteil der einfallenden Polarisation durch den Polarisator durchgelassen, der parallel zur Polarisatorachse steht“ (Slama, 2020, S.263).

Nach zwei Polarisatoren mit der Winkeldifferenz α kann die Leistung des Lichts niedriger

werden. Mit dem Gesetz von Malus kann die übrig gebliebene Leistung berechnet werden (vgl. Slama, 2020, S.263).

$$P_{danach} = P_{davor} \cdot \cos(\alpha)^2$$

Um Polarisationsexperimente nachvollziehen zu können wird der Bra-Ket Formalismus bzw. auch Dirac Notation genannt, herangezogen.

Die Notation, von Paul Dirac erfunden, wird dazu verwendet Zustände von Quanten als mathematisches Objekt darzustellen, um mit ihnen rechnen zu können. Diese Objekte sind im mathematischen Hilbertraum definiert (vgl. Werner, 2023, S.420f.).

Der „Hilbert-Raum [ist] ein (vollständiger) komplexer Vektorraum mit einem Skalarprodukt“ (Filk, 2019, S.70). Ein Zustand bzw. ein Element des Hilbertraums wird mit einem Ket $|\psi\rangle$ dargestellt, der einem Spaltenvektor entspricht. „Der zugehörige Bra-Vektor $\langle\psi|$ ist ein Element des Dualraums, das wegen des Skalarprodukts einem Element des Vektorraums zugeordnet werden kann“ (Universität Freiburg, 2024).

Mit dem Ket-Vektor können z.B. die Polarisationsrichtungen von Photonen angegeben werden. Zusätzlich zu den Rechenregeln des komplexen Vektorraumes gilt auch das innere Produkt. Das innere Produkt $\langle\dots|\dots\rangle$ führt zu einer komplexen Zahl als Ergebnis und wird wie folgt gerechnet (vgl. Werner, 2023, S.421).

Beispiel: Seien $|x\rangle = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ ein Element aus dem Hilbertraum und $\langle y| = (y_1 \ y_2)$ ein Element aus dem dualen Hilbertraum, dann wird das innere Produkt wie folgt gerechnet.

$$\langle y| |x\rangle = \langle y|x\rangle = (y_1 \ y_2) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = y_1 \cdot x_1 + y_2 \cdot x_2$$

Um Polarisationsexperimente nachvollziehen zu können, benötigt man nicht nur Zustandsvektoren der Photonen. Weiters benötigt man auch eine mathematische Darstellung des Polarisationsfilters, welche durch einen Messoperator bzw. Projektionsoperator definiert ist. Ist ein Polarisationsfilter in Richtung 0° eingestellt (Vektor in Richtung 0° ist durch $H = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ dargestellt) wird der Filter mathematisch dargestellt durch $|H\rangle\langle H|$ (vgl. Werner, 2023, S.421).

„Ein Operator, der durch ein Symbol gekennzeichnet wird, drückt aus, dass eine bestimmte Rechenvorschrift auf eine hinter ihm stehende Größe durchgeführt werden soll“

(Werner, 2023, S.169). Für den Fall, dass ein vertikal $V = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ polarisiertes Photon einen horizontal eingestellten Polarisationsfilter passiert, sieht die mathematische Darstellung wie folgt aus: $|H\rangle \underbrace{\langle H| \langle V|}_{\in \mathbb{C}}$ (vgl. Werner, 2023, S.421f.).

Mit diesen Hilfsmitteln kann jedoch keine Voraussage über die Polarisierung einzelner Photonen gemacht werden. In der Quantenmechanik können nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden (vgl. Werner, 2023, S.426).

„Das Betragsquadrat der Amplitude ergibt die Wahrscheinlichkeit, dass das entsprechende Photon den α -Filter passiert“ (Filik, 2019, S.19). Die Amplitude für ein vertikal polarisiertes Photon, welches durch einen horizontal eingestellten Polarisator geschickt wird wäre $\langle H | V \rangle$ (vgl. Universität Freiburg, 2024).

3.2.2 Vorwissen und Key Ideas

Die Station kann nicht nur als Erweiterung für Physikstunden, sondern auch für den Mathematikunterricht verwendet werden.

Für diese Station sollte man sich mit der Lehrkraft für Mathematik, absprechen, ob die Schüler:innen das benötigte Vorwissen bereits besitzen.

Aus dem Bereich der Mathematik sollten die Schüler:innen die Grundlagen der Wahrscheinlichkeit und der Winkelfunktionen kennen, welche in der 10. Schulstufe behandelt werden. Weiters wird aus der 9. Schulstufe das mathematische Vorwissen über Vektoren, Einheitsvektoren und Skalarprodukt benötigt (vgl. RIS, 2025).

Als physikalisches Vorwissen benötigen die Schüler:innen ein Grundwissen über die Begriffe Leistung und Intensität, welche im Lehrplan in der 9. und 10. Schulstufe besprochen werden.

Somit wird diese Station erst für die 11. Schulstufe empfohlen (vgl. RIS, 2025). Die Grundideen, welche die Stationen übermitteln sollen sind:

- **Key Idea 1:** Bei einem unpolarisiertem Licht hat jede Polarisationsrichtung dieselbe Auftrittswahrscheinlichkeit (vgl. Slama, 2020, S.261ff.).
- **Key Idea 2:** Bei polarisiertem Licht tritt nur eine Polarisationsrichtung auf (vgl. Slama, 2020, S.261ff.).
- **Key Idea 3:** Ein Polarisator lässt nur Lichtteile parallel zu seiner Polarisationsrichtung passieren (vgl. Slama, 2020, S.263).
- **Key Idea 4:** Der Bra ist durch einen Spaltenvektor gegeben (vgl. Universität Freiburg, 2024).
- **Key Idea 5:** Der Ket ist durch einen Zeilenvektor gegeben (vgl. Universität Freiburg, 2024).

- **Key Idea 6:** Zustände können durch einen Vektor dargestellt werden (vgl. Universität Freiburg, 2024).
- **Key Idea 7:** Eine Messung (bzw. ein Messoperator) fragt das Vorhandensein eines Zustandes ab (vgl. Filk, 2019, S.19).
- **Key Idea 8:** Fällt Licht durch zwei lineare Polarisatoren kann es zu einem Leistungsabfall des Lichts kommen (vgl. Slama, 2020, S.263).

3.2.3 2. Station: Bra-Ket Formalismus

Der Bra-Ket Formalismus ist eine Notation in der Physik mit der physikalische Zustände und Änderungen (Operatoren) angegeben werden. Um den Fachbegriff Zustand besser verstehen zu können wird das Computerprogramm namens „Simulation zum Polarisationsfilter“ (Technische Universität Braunschweig, o.D.) zur Hilfe genommen.

Polarisation: „ist [...] eine Richtungseigenschaft [...] des Lichts“ (Pospiech, 2021, S.4).

- **Unpolarisiertes Licht**, wie in Abbildung 4 dargestellt, hat die Eigenschaft, dass jede Polarisationsrichtung mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftritt. „Es entsteht z.B. in [...] der Sonne oder auch in Glühlampen“ (Slama, 2020, S.263).
- **Linear polarisiertes Licht**, wie in Abbildung 4 zu sehen, hat hingegen nur eine ausgezeichnete Polarisationsrichtung. Das bedeutet, dass eine Richtung zu 100 % auftritt und alle anderen nicht auftreten (vgl. Slama, 2020, S.261ff.).

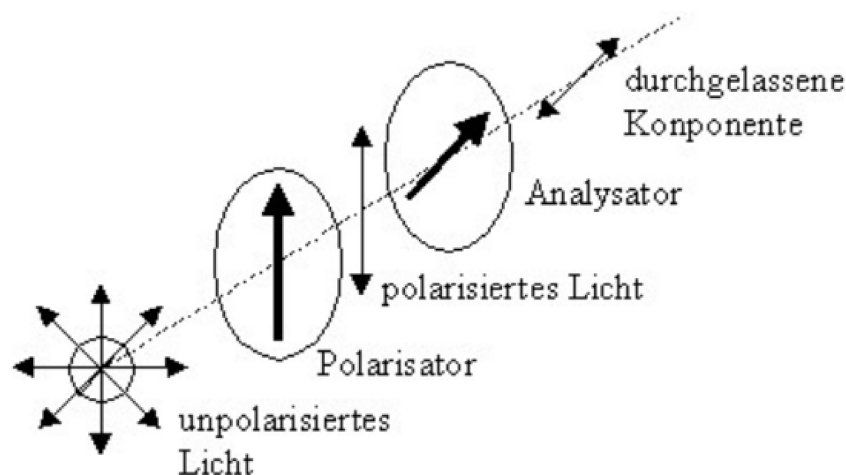


Abbildung 4: Skizze von unpolarisiertem und polarisiertem Licht (Heidorn, o.D.)

Aufgabe 1 (S): Unpolarisiertes Licht kann linear polarisiert werden, wenn es durch einen Polarisator bzw. Polarisationsfilter geschickt wird. Der Polarisator lässt nur Lichtanteile parallel zu seiner eingestellten Polarisationsrichtung passieren (vgl. Slama, 2020, S.263). Stell eine Hypothese auf, wie sich die Intensität bzw. Leistung des Lichts aus einer Glühbirne (=unpolarisiertes Licht) verändert, wenn dieses durch einen Polarisationsfilter geschickt wird.

Aufgabe 2 (E): Scanne den QR-Code und lade die „Simulation zum Polarisationsfilter“ (Technische Universität Braunschweig, o.D.) herunter. Dokumentiere deine Beobachtungen, während du die Simulation erkundest. Erwähne in deiner Dokumentation die folgenden Fachbegriffe:

Quelle, Intensität (in $\frac{W}{m^2}$) bzw. **Leistung** (in W)(=heller/dunkler), **Polarisator** (=Polfilter), **Schirm, Polarisationsrichtung**



Dirac Notation

Die Dirac Notation wird verwendet, um mit Zuständen und Operatoren rechnen zu können. Mit Hilfe dieses Konzeptes werden wir einen tieferen Einblick über den Vorgang der Polarisation bekommen.

Zustände werden in der Physik durch einen Ket Vektor $|Zustand\rangle$ beschrieben. Wenn ein Photon (=Lichtteilchen) horizontal (bzw. vertikal) polarisiert ist kann es wie folgt dargestellt werden.

$$|H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \left(\text{bzw. } |V\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$$

Der Bra Vektor ist gegeben durch einen transponierten („liegenden“) Vektor. Beispiele dafür sehen wie folgt aus:

$$\langle H| = (1, 0) \quad (\text{bzw. } \langle V| = (0, 1))$$

Stoßen ein Bra und ein Ket (in dieser Reihenfolge) zusammen, rechnest du es als Skalarprodukt, wie du es aus der Schule kennst.

Aufgabe 3 (W): Berechne:

(Ein vorgerechnetes Beispiel: $\langle H| |H\rangle = (1, 0) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 1$)

$\langle H|V\rangle =$

$\langle V|H\rangle =$

$\langle V|V\rangle =$

Nachvollziehbarkeit des Polarisationsfilter Experiments

Durch den Polarisator wird eine Messung am Photon vorgenommen. Ein Polarisator ist mathematisch durch einen Operator $\hat{M}$ gegeben. Wird zum Beispiel ein Polarisator in die horizontale Richtung eingestellt, dann ist der Operator gegeben durch $\hat{M} = |H\rangle \langle H|$ (vgl. Filk, 2019, S.89).

Definition des Fachbegriffs Operator:

„Ein Operator, der durch ein Symbol gekennzeichnet wird, drückt aus, dass eine bestimmte Rechenvorschrift [...] durchgeführt werden soll“ (Werner, 2023, S.169, zitiert nach Kacser, 1970, S.249).

Zusätzlich zum horizontalen und vertikalen Zustand gibt es noch viele weitere Polarisationsrichtungen. Ein weiteres Beispiel wäre z.B. ein Polarisator, welcher Lichtanteile parallel zum 45° Winkel durchlässt. Die dazu passenden Ket Vektoren sind:

$$|+45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |-45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Bemerkung: Der konstante Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ vor den Vektoren kürzt den Vektor auf die Länge 1. Mit Hilfe dessen bekommt man die Gesamtwahrscheinlichkeit und es geht nichts verloren.

Beispiel: Gegeben ist ein vertikal polarisiertes Licht. Dieses wird durch den ersten Polarisator, der vertikal gerichtet ist, geschickt. Anschließend wird das Licht durch einen zweiten, diesmal $+45^\circ$ polarisierten Filter gesendet, wie in der Abbildung 5 skizziert ist. Welche Aussagen können im Voraus über die Polarisationsrichtung, ihre Durchlasswahrscheinlichkeit und die Leistung des Lichts gemacht werden.

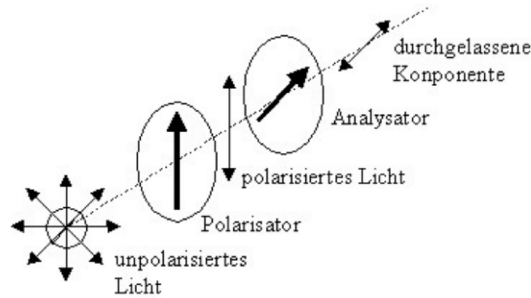


Abbildung 5: Skizze des Versuchsaufbaus (Heidorn, o.D.)

1. Schritt: Das vertikal polarisierte Licht wird durch einen vertikalen Polarisator geschickt, wodurch eine Messung stattfindet. Für diesen Polarisator gilt der Messoperator: $\hat{M} = |V\rangle \langle V|$.

$$\hat{M} |V\rangle = |V\rangle \langle V| |V\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \underbrace{(0, 1)}_{=1} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot 1 = 1 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 1 \cdot |V\rangle$$

Nach dem ersten Polarisator ist das Photon vertikal polarisiert. Die Durchlasswahrscheinlichkeit kann durch das Betragsquadrat ermittelt werden. In unserem Beispiel folgt $|1|^2=1$, woraus folgt, dass der Zustand des Photons zu 100% den vorausgesagten Zustand annimmt (vgl. Universität Freiburg, 2024).

2. Schritt: Das vertikal polarisierte Licht wird durch einen $+45^\circ$ gerichteten Polarisator geschickt, wodurch eine Messung stattfindet. Für diesen Polarisator gilt: $\hat{M} = | +45^\circ \rangle \langle +45^\circ |$. Konstante Faktoren können herausgehoben werden.

$$\hat{M} |V\rangle = | +45^\circ \rangle \langle +45^\circ | |V\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} (1, 1)}_{=1} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot 1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Nach dem zweiten Polarisator ist das Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von

$$\left| \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \right|^2 = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ (=25\%)} \text{ im Zustand } | +45^\circ \rangle.$$

3. Schritt: Die Leistung des Lichts kann mit dem Gesetz von Malus berechnet werden.

„Fällt linear polarisiertes Licht der Leistung P_0 auf den Polarisator, dessen Polarisationsrichtung einen Winkel α zur Polarisatorachse besitzt, beträgt die transmittierte Leistung P_t hinter dem Polarisator nach dem sogenannten Gesetz von Malus“ (Slama, 2020, S.263). Die folgende Formel wurde aus dem Buch von Slama (2020) übernommen und lautet:

$$P_t = P_0 \cdot \cos(\alpha)^2$$

Zwischen dem Anfangszustand und dem ersten Polarisator haben sich die Polarisationsrichtung um 0° unterschieden.

$$P_t = P_0 \cdot \cos^2(0^\circ) = P_0 \cdot 1 = P_0$$

Das bedeutet, dass nach dem ersten Polarisator die ganze Leistung erhalten geblieben ist.

Zwischen dem ersten und zweiten Polarisator gibt es eine Differenz von 45° .

$$P_t = P_0 \cdot \cos^2(45^\circ) = P_0 \cdot 0,5 = \frac{1}{2}P_0$$

Nach dem zweiten Filter hat das Licht nur mehr die Hälfte der Anfangsleistung.

Aufgabe 4 (S):

a) Vergleiche dein jetziges Wissen aus dem Beispiel mit deiner Hypothese von Aufgabe 1.

b) Untersuche, anhand deiner Erkenntnisse vom Beispiel, den Zusammenhang von Lichtleistung und folgender Aussage: Der Polarisator lässt nur Lichtanteile parallel zu seiner eingestellten Polarisationsrichtung passieren (vgl. Slama, 2020, S.263).

3.2.4 Zusatzmaterialien für Station 2

Hilfskärtchen

(S2) 1. Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Lies dir nochmals die Definitionen über „unpolarisiertes Licht“ und „linear polarisiertem Licht“ durch. Was ist der wesentliche Unterschied?	Antwort zum 1. Hilfskärtchen: Unpolarisiertes Licht hat die Eigenschaft, dass jede Richtung gleichwahrscheinlich ist. Polarisiertes Licht hat nur eine Ausbreitungsrichtung (vgl. Slama, 2020, S.263f.).
(S2) 2. Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Überlege dir, was genau ein Polarisator mit unpolarisiertem Licht machen muss, sodass danach das Licht polarisiert ist.	Antwort zum 2. Hilfskärtchen: Der Polarisator lässt nur Licht parallel zu seiner Richtung durch und filtert alle anderen Richtungen raus (vgl. Slama, 2020, S.263).
(S2) 3. Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Überlege, wie das Licht hinter dem Polarisator aussehen kann, wenn einige Lichtrichtungen herausgefiltert worden sind und hinter dem Polarisator nur mehr ein Teil des Lichts auftritt.	Antwort zum 3. Hilfskärtchen: Je weniger Licht durch den Polarisator tritt, desto schwächer ist die Intensität bzw. Leistung des Lichts. Dadurch beobachtet man ein dunkleres Licht (vgl. Slama, 2020, S.263).
(S2) Hilfskärtchen zu Aufgabe 3: Mit allgemeinen Variablen kann die Rechenregel wie folgt dargestellt werden: Ersterem mal Ersterem addiert mit Letzterem mal Letzterem. $(a, b) \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = a \cdot c + b \cdot d$	
(S2) 1. Hilfskärtchen zu Aufgabe 4: Überlege, um welche Kernaussage ging es in der Hypothese von Aufgabe 1?	Antwort zum 1. Hilfskärtchen: Intensität bzw. Leistung Das Licht hinter dem Polarisator ist nicht mehr so hell wie davor. ODER Das Licht hinter dem Polarisator ist dunkler. ODER Die Intensität/Leistung des Lichts ist niedriger (vgl. Slama, 2020, S.263).

(S2) 2. Hilfskärtchen zu Aufgabe 4: Lies dir das Beispiel nochmals durch, um herauszufinden in welchem Schritt die Leistung/Intensität des Lichts behandelt wird und was die Kernaussage des Rechenschrittes ist.	Antwort zum 2. Hilfskärtchen: In Schritt 3 wird die Endleistung des Lichts nach zwei Polarisatoren berechnet. Das Fazit ist, dass am Ende nur mehr die Hälfte an Leistung da ist. Daraus kann man ableiten, dass Polarisationsfilter zu einer Intensitätsabschwächung führen können.
---	--

Lösungskärtchen

(S2) Lösung zu Aufgabe 1: Das Licht hinter dem Polarisator ist nicht mehr so hell wie davor. ODER Das Licht hinter dem Polarisator ist dunkler. ODER Die Intensität/Leistung des Lichts ist niedriger.
(S2) Lösung zu Aufgabe 2: Die Quelle entsendet unpolarisiertes Licht. Wenn das Licht durch zwei Polarisatoren fällt, dessen Polarisationsrichtungen einen Unterschied von 90° haben, verschwindet das Licht. In diesem Fall sieht man am Schirm kein Bild mehr. Das bedeutet, dass das Licht hinter den Polarisatoren eine Intensität von $0 \frac{W}{m^2}$ hat bzw. eine Leistung von 0 W hat.
(S2) Lösung zu Aufgabe 3: $\langle H V \rangle = (1, 0) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0$ $\langle V H \rangle = (0, 1) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0 = 0$ $\langle V V \rangle = (0, 1) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 = 1$
(S2) Lösung zu Aufgabe 4: a) Im Beispiel wurden zwei Polarisatoren mit einem Richtungsunterschied von 45° verwendet. Am Ende des Beispiels wurde gezeigt, dass nur mehr die Hälfte der Intensität/Leistung vorhanden ist. Das bedeutet, dass Polarisationsfilter dazu führen können, dass das Licht an Intensität/Leistung verliert. b) Da der Polarisator nur Licht parallel zur Polarisationsrichtung des Filters durchlässt, ist die Lichtleistung niedriger als davor.

Begriffskärtchen

Operator

Operatoren sind dir schon untergekommen. Zum Beispiel zählt die Ableitung, welche dir aus der Mathematik bekannt ist, als Operator. Wenn man das Symbol der Ableitung sieht, dann muss man nach den Ableitungsregeln rechnen bzw. einer Rechenvorschrift folgen (vgl. Werner, 2023, S.169).

Wahrscheinlichkeit (wie wahrscheinlich ist es, dass...):

Die Wahrscheinlichkeit ist ein Maß, mit dem man den „Grad [...] der Möglichkeit des Eintretens bzw. der Voraussagbarkeit eines Ereignisses“ (Duden, 2025) angeben kann.

Mit einer Wahrscheinlichkeitsaussage können wir Ausdrücken eine gewisse Wertigkeit oder Gewicht hinzufügen. Eine Wahrscheinlichkeit wird durch eine Zahl von inklusive 0 bis 1 angegeben (vgl. Stegen, 2020, S.6).

3.3 Bellsche Ungleichung

Die Themen Datenschutz und Hackerangriffe sind heutzutage allgegenwärtig. Verschlüsselungen finden unter anderem Anwendung in Banken und beim Datentransfer. Mit Hilfe von Quanten und der Bellschen Ungleichung sollen Ver- und Entschlüsselungen noch sicherer sein als sie es heute sind.

3.3.1 Fachwissen

Die Bellsche Ungleichung wurde von John Steward Bell aufgestellt. Er nahm an, dass es bei verschränkten Quantenteilchen weitere, noch unbekannte, Variablen zu entdecken gibt (vgl. Scherer, 2016, S.2). Das würde dazu führen, „dass die Ergebnisse gemeinsamer Spinmessungen zweier Teilchen als diskrete Zufallsvariable mit einer gemeinsamen Verteilung dargestellt werden können“ (Scherer, 2016, S.91). Diese Theorie wurde durch Experimente jedoch widerlegt (vgl. Scherer, 2016, S.91).

Die Bell'sche Ungleichung in der allgemeinen Form (Scherer, 2016, S.98) lautet:

$$|E[s_{p1}^A s_{p2}^B] - E[s_{p1}^A s_{p3}^B] + E[s_{p4}^A s_{p2}^B] + E[s_{p4}^A s_{p3}^B]| \leq 2$$

Dabei stehen die $s_{p_i}^{A,B}$ mit $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ für die Messwerte der gemessenen Teilchenpaare, welche nur die Messwerte 1 und -1 annehmen können (vgl. Scherer, 2016, S.98). Weiters steht das $E[\dots]$ für den auszurechnenden Erwartungswert (vgl. Scherer, 2016, S.102).

Die Messwerte von verschränkten Zuständen, verletzt die Bell'sche Ungleichung. Das ist

leider keine allgemeingültige Aussage, da das „nur für bestimmte Kombinationen der Spinrichtung“ (Scherer, 2016, S.102) gilt.

Berücksichtigt man die Spinrichtung beim Experimentieren kann dadurch bei einem Schlüsselaustausch mit verschränkten Quantenteilchen nachgewiesen werden, ob ein Lauschangriff stattgefunden hat. Denn sobald ein Hacker versuchen würde die verschränkten Teilchen zwischen zwei Personen zu messen, würde dieser Vorgang die verschränkten Zustände zu separablen Zuständen ändern, welche die Bell'sche Ungleichung erfüllen (vgl. Scherer, 2016, S.200).

Zum einfacheren Verständnis der Bellschen Ungleichung wird die Variante von Eugene Wigner und Bernard d'Espagnat vorgestellt. Man betrachtet drei verschiedene Eigenschaften X , Y , Z , welche jeweils entweder erfüllt sein können oder nicht. Das führt dazu, dass man insgesamt sechs Zustände X , $\neg X$, Y , $\neg Y$, Z , $\neg Z$ im System hat. Gleichzeitig können nur zwei verschiedene Eigenschaften gemessen werden, da Observablen nicht dem Kommutativgesetz gehorchen (vgl. Filk, 2019, S.200f.).

Die Bellsche Ungleichung stellt folgenden Zusammenhang dar, wobei N die Anzahl darstellt, wie häufig zwei verschiedene Eigenschaften gemessen wurden (vgl. Filk, 2019, S.200f.).

$$N(X, Y) \leq N(X, Z) + N(Z, Y)$$

Der Beweis der Ungleichung lässt sich grafisch, siehe Abbildung 6, durch ein Mengendiagramm zeigen.

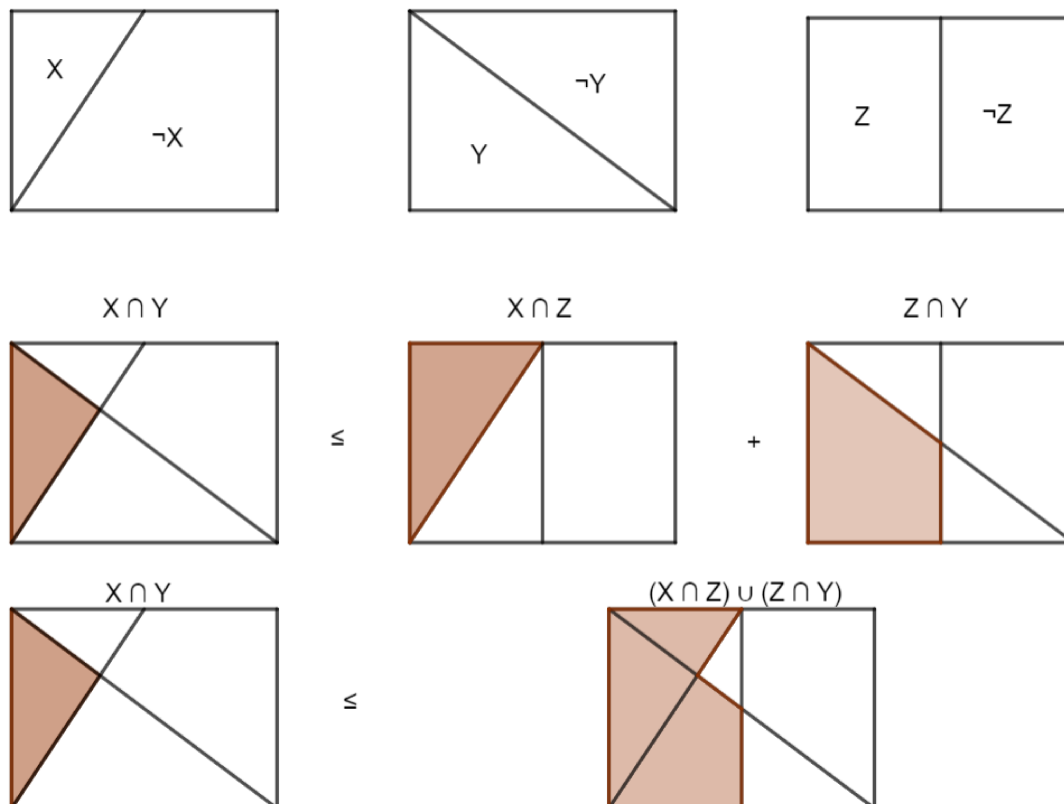


Abbildung 6: Beweis der Bell Ungleichung in Form von Winter und d’Espagnat (vgl. Embacher, 2000)

3.3.2 Vorwissen und Key Ideas

Diese Station wird für die 10. Schulstufe empfohlen, da als Vorwissen die Mengenlehre aus dem Fach Mathematik von der 9. Schulstufe erforderlich ist (vgl. RIS, 2025).

Die Station kann nicht nur für Physikstunden, sondern auch für den Mathematikunterricht verwendet werden.

Die Station behandelt folgende Key Ideas:

- **Key Idea 1:** Die Bellsche Ungleichung ist ein Sicherheitstest im Bereich der Quantenschlüsselübertragung (vgl. Scherer, 2016, S.200).
- **Key Idea 2:** Erfüllen die Messwerte eines Schlüsselaustausches die Ungleichung, kann ein Lauschangriff stattgefunden haben (vgl. Scherer, 2016, S.200).

3.3.3 3. Station: Bellsche Ungleichung

Die Bellsche Ungleichung wird z.B. in der Quantenkommunikation als Sicherheitstest verwendet. Falls zwei Firmen einen Quantenschlüssel austauschen, um Daten entschlüsseln zu können, kann mit Hilfe der Ungleichung ein Hackerangriff aufgedeckt werden. Wenn es dem Angreifer gelingen würde, sich den Schlüssel zu sichern, könnte sich dieser damit Zutritt zu geheimen Bankdaten verschaffen (vgl. ÖAW, 2023).

Um die Bellsche Ungleichung besser nachvollziehen zu können, wird ein klassisches Beispiel zur Erklärung herangezogen.

Angenommen man betrachtet viele komplett identisch aussehende Zwillingspaare (diese repräsentieren verschränkte Teilchen, siehe Station ‚Quantenmechanik im Alltag‘). Wir untersuchen die Zwillinge anhand von drei äußerlichen Merkmalen wie z.B. klein/nicht klein, braunhaarig/nicht braunhaarig, grünäugig/nicht grünäugig. Diese Merkmale berücksichtigen nur die Merkmale, welche angeboren sind und keine gefärbten Haare, Kontaktlinsen oder eventuelle Schönheitsoperationen (vgl. Quantinger, o.D., S.96ff.).

Aufgabe 1 (W): Nenne alle acht möglichen Kombinationen von äußerlichen Merkmalen, in denen die Zwillingspärchen zugeteilt werden können.

Man kann die folgende allgemeingültige Aussage über alle komplett identisch aussehenden Zwillingspaare machen.

Aussage: Es gibt weniger oder gleich viele Zwillingspärchen, die klein sind oder braune Haare haben, als Zwillinge, die klein oder grünäugig sind, zusammen mit den Zwillingen, welche grünäugig oder braunhaarig sind. In einer Formel ausgedrückt kann man den Zusammenhang wie folgt ausdrücken (vgl. Quantinger, o.D., S.96ff.). Um die Gültigkeit der

$$Z(\text{klein} + \text{braunhaarig}) \leq Z(\text{klein} + \text{grünäugig}) + Z(\text{braunhaarig} + \text{nicht grünäugig})$$

Ungleichung zu zeigen, benötigt es keine komplizierten Rechnungen. Durch die Verwendung von Mengendiagrammen aus der Mathematik, kann die Aussage bewiesen werden.

Aufgabe 2 (E): Beweise die Wigner und d’Espagnat Form von der Bellschen Ungleichung. In der ersten Zeile der Abbildung 7 sind die Grundmengen angeführt. In der zweiten Zeile sollst du die passende Schnittmenge zeigen und in der letzten Zeile die rechten zwei Mengen zusammenfügen.

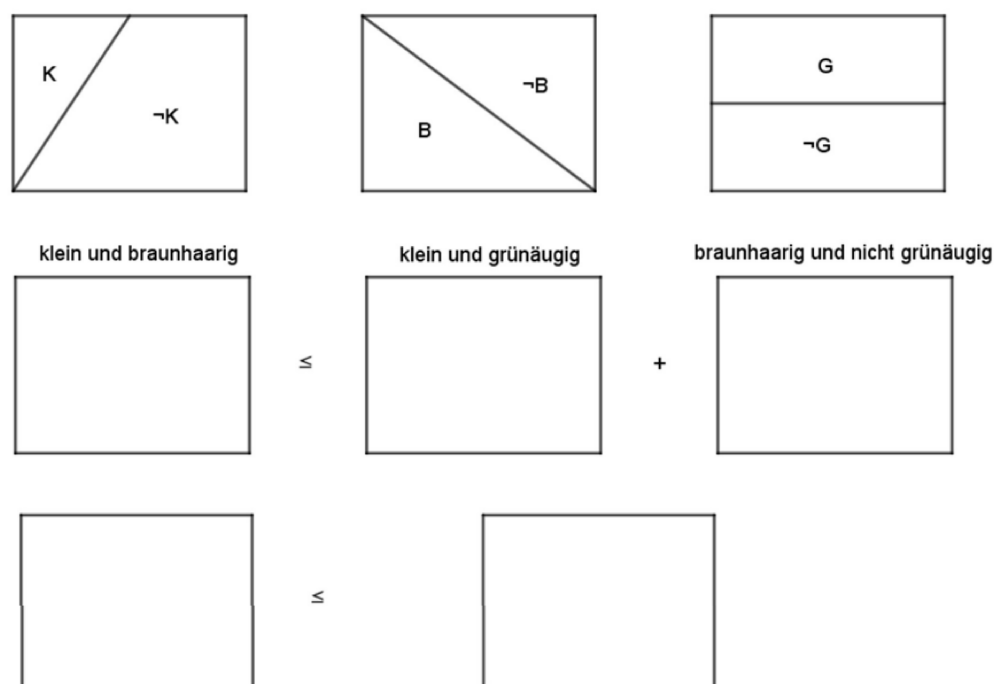


Abbildung 7: Vorlage zum Beweis der Bellschen Ungleichung in Wigner und d’Espagnat Form (eigene Darstellung(vgl. Embacher, 2000))

Die originale Bellsche Ungleichung stützt sich, statt auf Menschen und ihre Eigenschaften, auf Quantenobjekte und deren Eigenschaften, wie z.B. Polarisationsrichtungen. (Beachte: Polarisation: „ist [...] eine Richtungseigenschaft [...] des Lichts“ (Pospiech, 2021, S.4).)

Erfüllen die Messwerte, von z.B. verschränkten Photonen bei einer quantenmechanischen Schlüsselübertragung, die Bellsche Ungleichung, dann kann bestätigt werden, dass ein Hackerangriff stattgefunden hat (vgl. Scherer, 2016, S.100ff. und S.200f.).

3.3.4 Zusatzmaterial für Station 3

Hilfskärtchen

(S3) Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Überlege dir, was Kombinationen der drei Eigenschaften sein könnten. Es sollen alle mögliche Varianten, wie die Zwillinge aussehen könnten, dabei sein. Insgesamt sind es 8 Kombinationen.	Antwort zum Hilfskärtchen Eine Kombination würde wie folgt aussehen. Klein, braunhaarig, grünäugig.
--	--

(S3) Hilfskärtchen zu Aufgabe 2: Eine Schnittmenge von zwei Mengen erhält man, wenn man die eine Menge (=Fläche) findet, bei denen beide Mengen überlappen. In Abbildung 8 beschreibt die braun gekennzeichnete Menge die Schnittmenge von A und B. (In einem Kontext eingebunden kann die braune Menge Menschen beschreiben, die z.B. Arbeiter und bärtig sind.)
--

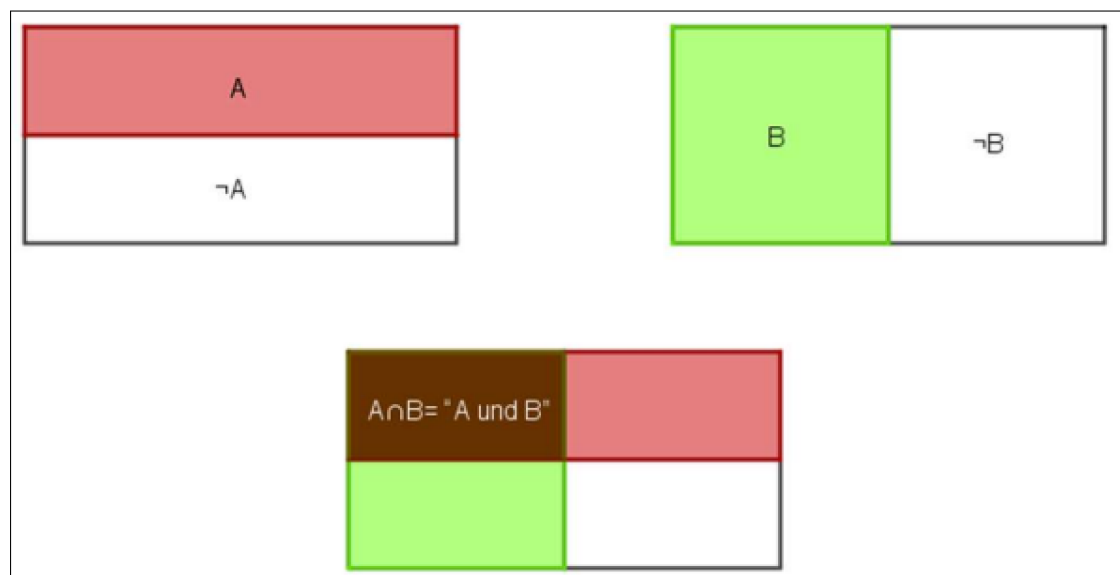


Abbildung 8: Beweis der Bellschen Ungleichung (eigene Darstellung)

Lösungskärtchen

(S3) Lösung zu Aufgabe 1:

1. Klein, braunhaarig und grünäugig.
2. Klein, braunhaarig und nicht grünäugig.
3. Klein, nicht braunhaarig und grünäugig.
4. Klein, nicht braunhaarig und nicht grünäugig.
5. Nicht klein, braunhaarig und grünäugig.
6. Nicht klein, braunhaarig und nicht grünäugig.
7. Nicht klein, nicht braunhaarig und grünäugig.
8. Nicht klein, nicht braunhaarig und nicht grünäugig.

(S3) Lösung zur Aufgabe 2:

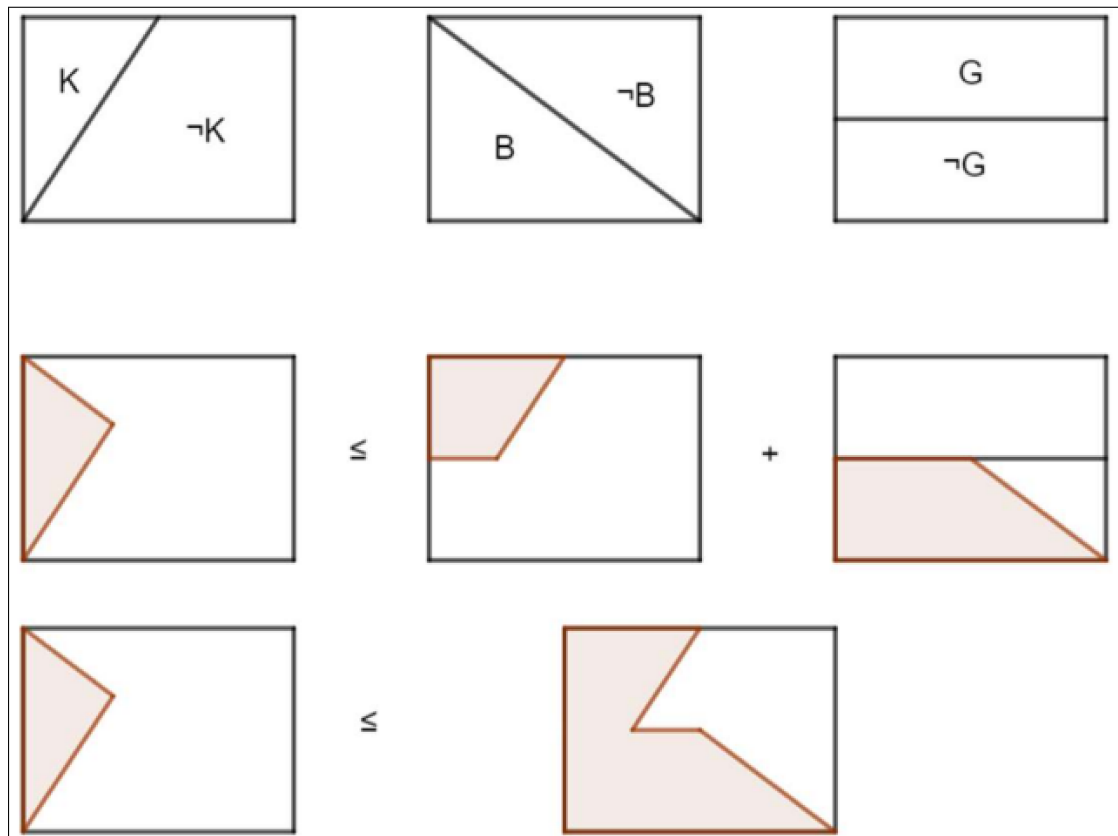


Abbildung 9: Beweis der Bellschen Ungleichung (eigene Darstellung)

Begriffskärtchen

Polarisation:

Polarisation: „ist [...] eine Richtungseigenschaft [...] des Lichts“ (Pospiech, 2021, S.4). Unpolarisiertes Licht, wie in Abbildung 10 dargestellt, hat die Eigenschaft, dass jede Polarisationsrichtung mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftritt. „Es entsteht z.B. in [...] der Sonne oder auch in Glühbirnen“ (Slama, 2020, S.263). Linear polarisiertes Licht, wie in Abbildung 10 zu sehen, hat hingegen nur eine ausgezeichnete Polarisationsrichtung. Das bedeutet, dass eine Richtung zu 100% auftritt und alle anderen nicht auftreten (vgl. Slama, 2020, S.263f.).

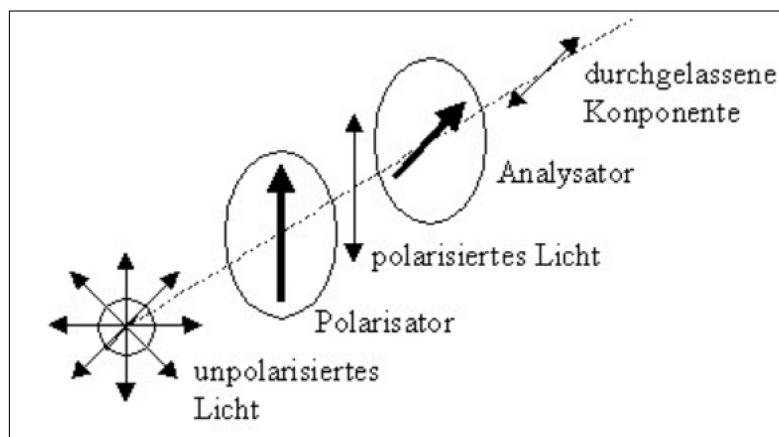


Abbildung 10: Skizze von unpolarisiertem und polarisiertem Licht (Heidorn, o.D)

Verschränkung:

Verschränkte Quantenteilchen, wie z.B.: zwei Photonen (Lichtteilchen), haben die Eigenschaft, dass sie sich gegenseitig „beeinflussen“ können. Sie benehmen sich, als wären sie „durch ein unsichtbares Band über beliebig lange Distanzen miteinander verbunden [...]“. Albert Einstein nannte dies eine ‚spukhafte‘ Fernwirkung“ (Ellerhoff, 2020, S.12).

3.4 Quantenmechanik im Alltag

Die Quantenmechanik prägt den heutigen Alltag mehr als den meisten bewusst ist. Unter anderem im Bereich der Medizin findet die Quantenphysik Anwendung, wie z.B. beim Laser, MRT und der Medikamentenforschung (vgl. Ellerhoff, 2020, S.4 und S.32).

Vor allem die Eigenschaft der Verschränkung von Quanten bringt ein sehr großes Po-

tential mit sich. Damit könnte in Zukunft der Quantencomputer und ein sicheres Verschlüsselungsverfahren ermöglicht werden (vgl. Ellerhoff, 2020, S.30f.; vgl. ÖAW, 2023).

3.4.1 Fachwissen

Eine Verschränkung kann zwischen zwei oder mehreren Quantenobjekten bestehen, wobei in der Station nur zwei Objekte miteinander verschränkt werden (vgl. Pade, 2024, S.87f.).

Wenn zwei Quantenobjekte miteinander verschränkt sind, verhalten sie sich so als wären sie „durch ein unsichtbares Band über beliebig lange Distanzen miteinander verbunden [...] und [können] sich augenblicklich gegenseitig [...] beeinflussen“ (Ellerhoff, 2020, S.12). Dabei wird dem gesamten System eine Zustandsfunktion zugeordnet, wobei dem einzelnen Quantenteilchen keine zugeordnet werden kann (vgl. Pade, 2024, S.87). Erst der Messvorgang an einem Teilchen des verschränkten Teilchenpaars bestimmt dessen Zustand und legt auch den Zustand des Partners automatisch fest. Nach der Messung ist die Verschränkung aufgelöst (vgl. Pade, 2024, S.90f.).

Um die Quanteneigenschaft der Verschränkung genauer zu beschreiben, betrachte man folgendes Beispiel. Man nehme zwei Teilchen, welche durch eine Messung auf die Polarisationsrichtung $+45^\circ$ $|+\rangle$ oder auf die Polarisationsrichtung -45° $|-\rangle$ abgefragt werden. Werden die zwei Teilchen gleichnamig verschränkt (z.B. $|++\rangle$ oder $|--\rangle$), weiß man bei der Messung des ersten Teilchens automatisch, dass bei einer Messung des zweiten, dieser denselben Zustand annimmt. Das bedeutet, falls die Messung des ersten Teilchens $|+\rangle$ ergibt, nimmt das zweite automatisch bei einer Messung auch den Zustand $|+\rangle$ an (vgl. Pade, 2024, S.87-91).

Bemerkung: Die Schreibweise $|++\rangle$ wird als Vereinfachung für $|+\rangle|+\rangle$ geschrieben (vgl. Pade, 2024, S.86).

Andererseits können zwei Teilchen auch gegengleich (z.B. $|+-\rangle$ oder $| - + \rangle$) verschränkt werden. Wird bei der Messung eines Teilchens des verschränkten Paares der Zustand $|+\rangle$ gemessen, dann nimmt das zweite Teilchen automatisch den Zustand $|-\rangle$ an (vgl. Pade, 2024, S.87-91).

Heutige Forscher:innen können zwei Quantenobjekte verschränken und Messungen an ihnen durchführen. Zum Experimentieren werden sehr gerne Photonen verwendet (vgl. Pade, 2024, S.103f.).

Die Vorteile der Verschränkung sind vor allem für zukünftige Technologien besonders wichtig.

Mit Hilfe der Eigenschaft der Verschränkung, soll es möglich sein, einen sicheren Schlüs-

selbstaustausch zum Ver- und Entschlüsseln von Daten, zu gewährleisten (vgl. Pade, 2024, S.203). Die in der dritten Station vorgestellte Bellsche Ungleichung soll diese Sicherheit garantieren.

Weiters findet die Quantenmechanik auch Anwendung in der Medizin. Die Kernspintomografie hat das Ziel, Bilder vom (knochenfreien) Innenleben eines Menschen zu erstellen (vgl. Schmüser, 2012, S.3f.). Der Aufbau einer MRT Maschine ist in Abbildung 11 dargestellt.

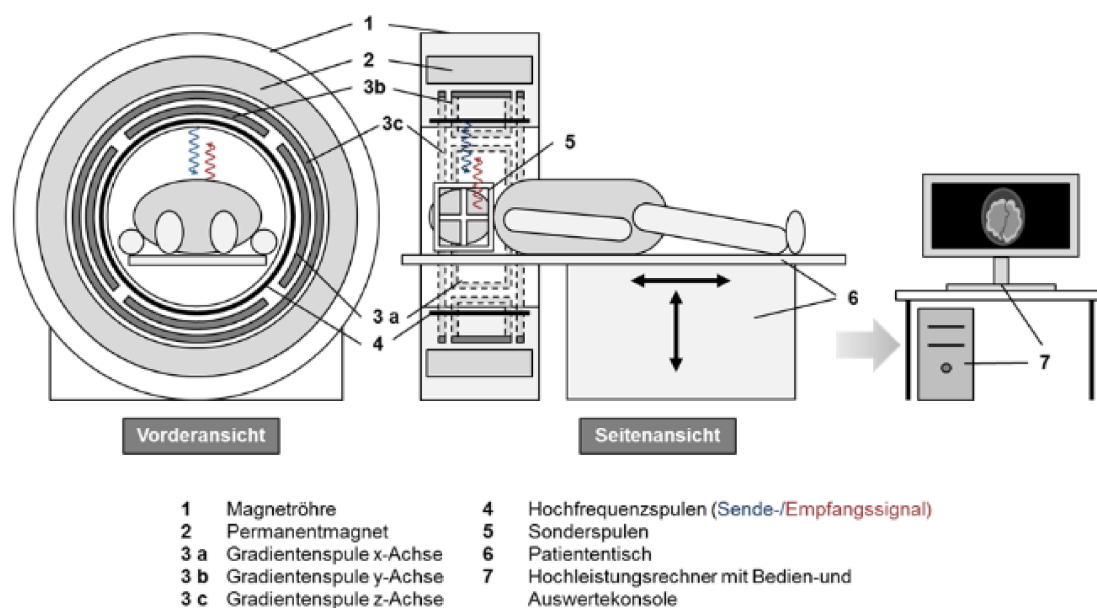


Abbildung 11: Der Aufbau einer MRT Maschine (Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.)

Die Maschine erzeugt ein Magnetfeld um den Körper des Patienten. Dabei richtet sich der Kernspin der Protonen, von den Wasserstoffatomen des Wassers im Körper, aus (vgl. Pade, 2024, S.82f.). Der Kernspin ist klassisch schwer vorstellbar, kann aber wie eine Art Eigendrehimpuls des Protons angesehen werden (vgl. Paetz gen. Schieck, 2020, S.9f.). Darüber hinaus wird eine Aussendung von Frequenzen vorgenommen. Diese führt zu einer Energieübertragung, wodurch es „zu einer messbaren Änderung der Magnetisierung“ (Pade, 2024, S.82f.) kommt. Aus diesen Messdaten kann der Computer Bilder aus dem Inneren des Körpers erstellen (vgl. Pade, 2024, S.82f.).

Eine weitere Anwendung, welche in der Station erwähnt wird, ist der Quantencomputer. Beim klassischen Computer werden Bits verwendet, welche den Zustand $|0\rangle$ oder $|1\rangle$ annehmen können. Ein Quantencomputer kann aber zusätzlich auch eine Superposition

beider Zustände annehmen, was Quantenbit genannt wird (vgl. Pade, 2024, S.207).

Das Phänomen der Superposition besagt, dass wenn unendlich viele Teilchen gemessen werden, welche sich in einer Superposition von zwei Zuständen befinden, dann haben ca. die Hälfte der Teilchen den Zustand $|0\rangle$ und die andere Hälfte den Zustand $|1\rangle$ angenommen (vgl. Elstner, 2021, S.343f.).

Quantencomputer existieren schon, nur sind diese noch nicht alltagstauglich. Die Gesellschaft erhofft sich durch die Weiterentwicklung und Forschung an Quantencomputern bessere Voraussagen über Aktienkurse und eine schnellere Entwicklung von Arzneimitteln (vgl. Ellerhoff, 2020, S.32; vgl. Pade, 2024, S.220).

3.4.2 Vorwissen und Key Ideas

Der Stationenbetrieb Quantenmechanik im Alltag ist ab der 11. Schulstufe geeignet. Als Vorwissen werden aus der Unterstufe die Kenntnisse über Teilchen, des Atomkerns und der Prozentrechnung benötigt. Aus der 6. Klasse sollten Begriffe wie Magnetfeld, Resonanz, Wahrscheinlichkeit, Protonen und Spule bekannt sein (vgl. RIS, 2025).

Die Schüler:innen sollten aus der Station folgendes Wissen mitnehmen:

- **Key Idea 1:** Verschränkte Teilchen können sich gegenseitig beeinflussen (vgl. Ellerhoff, 2020, S.12).
- **Key Idea 2:** Misst man unendlich viele Teilchen, welche sich in einer Superposition von zwei Zuständen befinden, werden ca. die Hälfte der Teilchen Zustand 1 und die andere Hälfte Zustand 2 annehmen (vgl. Elstner, 2021, S.343f.).
- **Key Idea 3:** Ein Proton besitzt die Eigenschaft eines Kernspins (vgl. Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.).
- **Key Idea 4:** Durch die Magnetisierung von Protonen im Körper kann das MRT Gerät Bilder des Körperinneren erstellen (vgl. Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.).

3.4.3 4. Station: Quantenmechanik im Alltag

Die Verschränkung

Das Konzept der Verschränkung haben wir einem österreichischen Nobelpreisträger namens Erwin Schrödinger zu verdanken.

Verschränkung:

Verschränkte Quantenteilchen, wie z.B. zwei Photonen (Lichtteilchen), haben die Eigenschaft, dass sie sich gegenseitig „beeinflussen“ können. Sie benehmen sich, als wären sie „durch ein unsichtbares Band über beliebig lange Distanzen miteinander verbunden [...]“. Albert Einstein nannte dies eine ‚spukhafte‘ Fernwirkung“ (Ellerhoff, 2020, S.12).

Aufgabe 1 (E): [Gruppenarbeit 3-4 Personen] Im Jahr 2024 gab es auf den Sozialen Plattformen wie TikTok und YouTube den Trend der „Twin Telepathy Challenge“. Falls du diesen Trend verpasst hast, recherchiere kurz auf YouTube wie die Challenge funktioniert.

Sucht euch gemeinsam fünf Anweisungen oder Fragen aus und filmt eure Reaktionen. Nenne eine Superkraft, die der Mensch bräuchte, um die Twin Telepathy Challenge erfolgreich meistern zu können.

Aufgabe 2 (W): (Puzzle) Auf der letzten Seite der Station befindet ein Beispiel mit klassischen Objekten, welches das Phänomen der Verschränkung versucht zu veranschaulichen. Da Gummibälle keine Quantenobjekte sind können diese dementsprechend nicht wirklich verschränkt sein. Die richtige Reihenfolge des klassischen Beispiels ist schon festgelegt, wohingegen die dazu passende quantenmechanische Erklärung ungeordnet vorliegt.

Ordne jedem Abschnitt des klassischen Beispiels die dazu passende quantenmechanische Variante (vgl. Schmüser, 2012, S.142) zu, indem du die einzelnen Abschnitte ausschneidest und der Reihenfolge nach in dein Heft klebst.

Klassisch vs. quantenmechanisch: Der Gummiball, auch wenn dieser seine Farbe noch nicht gezeigt hat, hat von Anfang an eine festgelegte Farbe. Nur wir Menschen wissen erst welche Farbe dieser annimmt, sobald wir den Ball sehen. Im Gegensatz dazu nimmt ein Quantenteilchen vor unserem ‚hinsehen‘ eine Superposition von beiden Farbzuständen an.

Fazit: Wären die Teilchen nicht miteinander verschränkt, hätte jedes Teilchen eine Wahrscheinlichkeit von 0,5 nach oben und eine Wahrscheinlichkeit von 0,5 nach unten abgelenkt zu werden. Doch bei entgegengesetzt, verschränkten Teilchen nimmt das zweite Teilchen nach der Messung des ersten Teilchens, automatisch den anderen Zustand an. (In der Quantenmechanik gibt es auch Verschränkungen, welche nach einer Messung dem zweiten Teilchen denselben Zustand zuordnet (vgl. Pade, 2024, S.87 und S.90).)

Verschränkte Quantenobjekte existieren nicht nur, sondern wir können selbst auch welche erzeugen. Eine Verschlüsselung mit verschränkten Quantenobjekten soll so sicher sein, dass in der Zukunft das gesamte Online-Banking gegen jeden Hackerangriff geschützt werden kann (vgl. ÖAW, 2023). Zwar sind die heutigen, klassischen Verschlüsselungsverfahren noch sicher genug, da ein Hacker mehrere Jahre brauchen würde, um zu unseren Daten zu gelangen. Falls ein gut funktionierender Quantencomputer existiert, könnte dieser in sehr kurzer Zeit an unsere Daten gelangen (vgl. Ellerhoff, 2020, S.30f.).

Anwendungen der Quantenmechanik

Ist das alles nur Wunschdenken?

Aufgabe 3 (S): Bewerte, ob eine sichere Quantenverschlüsselung in nächster Zukunft greifbar ist und begründe deine Meinung. Du kannst dir den Artikel (QR-Code) mit dem Titel „Quantentechnologie basiert auf Nobelpreis-würdigem Wissen“ von der Austrian Institute of Technology (2022) zur Hilfe nehmen.



Eine Anwendung, welche man aus dem Alltag kennt und auf Eigenschaften der Quantenmechanik basiert, ist der Laser. Dieser wird nicht nur gerne im Bauwesen, sondern auch in der Medizin im Bereich der Augen verwendet (vgl. Ellerhoff, 2020, S.4). In der Medizin basiert die Funktion des Kernspintomographen ebenfalls auf der quantenmechanischen Eigenschaft des Spins.

Aufgabe 4 (W): Folgende Ausschnitte aus der Website der Technischen Hochschule Mittelhessen zeigen die Funktionsweise eines MRTs auf.

Erkläre den Begriff des Spins und erläutere was dieser Fachbegriff mit der Arbeitsweise eines MRTs zu tun hat. Verwende dabei folgende Begriffe: **Dreh-(ung)**, **Magnet** und **ausrichten**.

Technischer Aufbau und Funktionsweise der Modalität

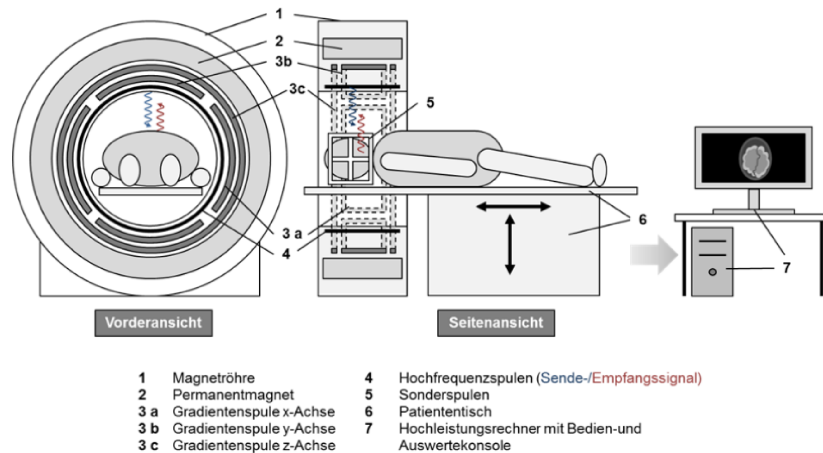


Abbildung 12: Aufbau eines MRTs (Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.)

Das Prinzip der Magnetresonanztomographie beruht auf Resonanzeffekten des Kernspins der Protonen, die sich im Atomkern befinden. Den Kernspin oder Drehimpuls kann man sich ähnlich wie die Rotationsbewegung der Erde um ihre eigene Achse vorstellen. Meist verwendet man die Protonen des Wasserstoffs, da der Mensch zum größten Teil aus Wasser und dieses wiederum aus Wasserstoffatomen besteht. Die verschiedenen Körpergewebe haben einen unterschiedlich hohen Wasser- bzw. Protonenanteil, der im Prinzip gemessen und dargestellt wird. Die Protonen können als kleine Stabmagnete verstanden werden, die sich im Magnetfeld der Magnetröhre ausrichten und eine Magnetisierung entlang des Magnetfeldes aufweisen. Beim Senden eines hochfrequenten Signals mit der Hochfrequenzspule (4) klappen diese „Stabmagnete“ um und die Magnetisierung der Protonen in diese Richtung geht auf null. Wird das Signal wieder ausgeschaltet, so richten sich diese „Stabmagnete“ wieder im Magnetfeld aus und es erfolgt eine Magnetisierung in diese Richtung. Dabei senden diese nun ein Signal aus, das mit der Hochfrequenzspule (4) empfangen bzw. gemessen werden kann. Die Zeit mit der die Magnetisierung in Richtung des angelegten Magnetfeldes wieder erreicht wird, ist für jedes Gewebe unterschiedlich lang. Senkrecht zum angelegten Magnetfeld baut sich beim Senden des hochfrequenten Signals auch eine Magnetisierung der Protonen auf, die jedoch beim zurückklappen wieder zerfällt. Auch diese Zerfallszeit der Magnetisierung ist gewebetypisch. Je nachdem wie groß das Magnetfeld ist, benötigt man eine andere Frequenz um die Protonen zum umklappen zu bewegen. Man nennt diese Frequenz Larmorfrequenz. Da viel Raum zwischen Patient und Hochfrequenzspule die Bildqualität beeinträchtigt, werden vor allem im Kopf und Gelenkbereich Sonderspulen (5) möglichst nahe um den Patienten angebracht um die Bildqualität zu verbessern. Durch so genannte Gradientenspulen (3 a-c) entlang der drei Raumachsen (x-, y- und z-Achse) wird das magnetische Feld vor jeder Messung so in seiner Stärke verändert, dass es jeweils entlang einer Achse gleichmäßig ansteigt bzw. abfällt. Durch Änderung der Frequenzen und Schalten der einzelnen Gradientenspulen (3 a-c) können nun so einzelne Schichten gemessen und die gemessenen Signale einem Ort zugewiesen werden. Ein Hochleistungsrechner (7) berechnet anschließend aus den Messdaten das Bild. Der Hochleistungsrechner mit Bedien- und Auswertekonsolen (7) befindet sich außerhalb des magnetisch abgeschirmten Untersuchungsraumes. Von dort aus kann die Untersuchung auch gestartet und mit dem Patienten über Lautsprecher bzw. Kopfhörer kommuniziert werden.

Abbildung 13: Prinzip eines MRTs (Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.)

Antwort zu Aufgabe 4:

Eine weitere Anwendung stellt der Quantencomputer dar. Im Vergleich zu den Computern, welche wir aus dem Alltag kennen, kann der Quantencomputer eine sehr große Anzahl von gegebenen Werten durchsuchen und auch wichtige Daten ver- und entschlüsseln. Die Gesellschaft erhofft sich auch eine Lösung für derzeit unbeantwortete Probleme zu finden. Unter anderem sollen auch dadurch bessere Risikoberechnungen für den An- und Verkauf von Wertpapieren ermittelt werden können (vgl. Pade, 2024, S.219f.). Auch in der Medizin und der Arzneykunde wird auf die Weiterforschung im Bereich des Quantencomputers gesetzt, um mögliche Medikamente und Impfstoffe zu untersuchen (vgl. Ellerhoff, 2020, S.32).

Tipp für interessierte Quantenmechaniker:

Die Website IBM (Link: QR-Code) bietet eine Online-Plattform, bei welcher man einen Quantencomputer ausprobieren kann.

Achtung: Voraussetzung dafür sind Grundverständnisse übers Programmieren, der Quantenmechanik und das Ansehen von Tutorials zum Programm Qiskit (vgl. IBM, o.D). Der kostenlose Zugriff ist beschränkt auf 10 Minuten pro Monat. Ich empfehle die Verwendung eines Laptops bzw. Computers und kein Handy.



Abschnitte (zum Ausschneiden) zu Aufgabe 2:

1. Beispiel mit klassischen Objekten (vgl. Embacher, o.D):

2. Ausgangszustand: Wir haben zwei (rot oder grün) leuchtfähige und ‚verschränkte‘ Gummibälle gegeben.

3. Zustände: Solange keiner der Personen einen Gummiball aufprallen lässt, befindet sich dieser in einer Superposition von Zustand ‚Rot‘ und Zustand ‚Grün‘. Sobald eine Person eine Box öffnet und einen von den Gummibällen auf dem Boden aufkommen lässt, dann nimmt der Ball einen der beiden Zustände ‚Rot‘ oder ‚Grün‘ an.

4. Distanz: Jeder Gummiball ist in einer separaten Box verpackt und wird auf zwei Personen aufgeteilt. Eine Person bleibt in Österreich und eine andere fliegt nach Japan.

5. Messung: Angenommen die Person in Japan öffnet die Box und der Ball leuchtet beim Springen rot auf, dann ist der Zustand dieses Balles ‚Rot‘.

6. Verschränkung: Dadurch, dass die Person in Japan die Farbe seines Balls bestimmt hat, weiß man automatisch, dass die Person in Österreich den grünen Ball hat.

Quantenmechanisches Beispiel (vgl. Schmüser, 2012, S.142):

Wenn die Quantenobjekte durch ein inhomogenes Magnetfeld geschossen werden, können sie entweder den Zustand nach ‚oben abgelenkt‘ oder nach ‚unten abgelenkt‘ annehmen. Zu 50% wird das erste Quantenobjekt nach oben und somit das zweite nach unten abgelenkt. Und zu 50% wird das erste Teilchen nach unten und somit das zweite nach oben abgelenkt werden.

Die zwei Quantenobjekte werden räumlich getrennt.

Da beide Quantenobjekte verschränkt sind, nimmt das zweite Quantenobjekt automatisch den anderen Zustand an.

Eins der Quantenobjekte wird durch ein inhomogenes Magnetfeld geschickt und wird nach unten abgelenkt.

Wir haben zwei entgegengesetzt, verschränkte Quantenobjekte gegeben.

3.4.4 Zusatzmaterial für Station 4

Hilfskärtchen

(S4) Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Um alle Aufgaben mit deinem Kollegen gleich lösen zu können, müsstet ihr euch irgendwie absprechen. In Fantasiefilmen existiert eine Fähigkeit, bei der man sich insgeheim absprechen kann. Wie nennt man diese?	
(S4) Hilfskärtchen zu Aufgabe 2: Lies dir alle möglichen quantenmechanischen Abschnitte durch und überlege, welche Abschnitte davon den Ausgangszustand, Zustände, Distanz, Messung oder Verschränkung beschreiben könnten. Achte auf die Formulierung und etwaige Wörter, welche die Zuteilung erleichtern	
(S4) Hilfskärtchen zu Aufgabe 3: Nimm dir den Artikel vom QR-Code zur Hand. Suche einen Abschnitt, bei dem darüber gesprochen wird, ob Quantenverschlüsselung einem Wunschenken entspricht, was dem Konzept noch für die Umsetzung fehlt oder eventuelle Testläufe, welche stattgefunden haben.	Antwort zum Hilfskärtchen: In dem fünften Absatz (der Absatz vor der zweiten Unterüberschrift) kann man passende Informationen zur Aufgabe finden.
(S4) Hilfskärtchen zu Aufgabe 4: Mit Hilfe des Textes soll der Fachbegriff Spin mit den Worten Drehung, Magnet und ausrichten erklärt werden. Markiere diese Wörter mit einem Leucht- oder Buntstift im Text, damit du einen besseren Überblick über die wichtigsten Sätze im Text bekommst.	Antwort zum Hilfskärtchen: Die wichtigsten Sätze sind: 2, 5, 7, 8, 9, 10.

Lösungskärtchen

(S4) Lösung zu Aufgabe 1: Um jede Aufgabe gleich machen zu können, müsste man telepathische Fähigkeiten besitzen.	
(S4) Lösung zu Aufgabe 2:	
1. Beispiel mit klassischen Objekten (vgl. Embacher, o.D.):	Quantenmechanisches Beispiel (vgl. Schmüser, 2012, S.142):
2. Ausgangszustand: Wir haben zwei (rot oder grün) leuchtfähige und ‚verschränkte‘ Gummibälle gegeben.	Wir haben zwei entgegengesetzt, verschränkte Quantenobjekte gegeben.

3. Zustand: : Solange keiner der Personen einen Gummiball aufprallen lässt, befindet sich dieser in einer Superposition von Zustand ‚Rot‘ und Zustand ‚Grün‘. Sobald eine Person eine Box öffnet und einen von den Gummibällen auf dem Boden aufkommen lässt, dann nimmt der Ball einen der beiden Zustände ‚Rot‘ oder ‚Grün‘ an.	Wenn die Quantenobjekte durch ein inhomogenes Magnetfeld geschossen werden, können sie entweder den Zustand nach ‚oben abgelenkt‘ oder nach ‚unten abgelenkt‘ annehmen. Zu 50% erste Quantenobjekt nach oben und somit das zweite nach unten abgelenkt. Und zu 50% kann das erste Teilchen nach unten und somit das zweite nach oben abgelenkt werden.
4. Distanz: Jeder Gummiball ist in einer separaten Box verpackt und wird auf zwei Personen aufgeteilt. Eine Person bleibt in Österreich und eine andere fliegt nach Japan.	Die zwei Quantenobjekte werden räumlich getrennt.
5. Messung: Angenommen die Person in Japan öffnet die Box und der Ball leuchtet beim Springen rot auf, dann ist der Zustand dieses Balles ‚Rot‘.	Eins der Quantenobjekte wird durch ein inhomogenes Magnetfeld geschickt und wird nach unten abgelenkt.
6. Verschränkung: Dadurch, dass die Person in Japan die Farbe seines Balls bestimmt hat, weiß man automatisch, dass die Person in Österreich den grünen Ball hat.	Da beide Quantenobjekte verschränkt sind, nimmt das zweite Quantenobjekt automatisch den anderen Zustand an.

(S4) Lösung zu Aufgabe 3:

Ja. Quantenmechanische Schlüsselübertragungen haben schon in Österreich, sowie auch über Satellit bereits stattgefunden (vgl. Austrian Institute of Technology, 2022).

(S4) Lösung zu Aufgabe 4:

Um sich über den Spin eines Quantenteilchens ein ungefähres Bild machen zu können, kann man sich den Spin wie eine Drehung, um die eigene Körperachse denken. Durch einen Magneten im MRT-Gerät wirkt auf den menschlichen Körper ein Magnetfeld. Das Magnetfeld richtet die Quantenteilchen im Körper aus. Schaltet man ein spezielles Signal dazwischen, entmagnetisiert sich die Quantenteilchen. Die gemessenen Zeiten, welche die Protonen zur Magnetisierung und Entmagnetisierung benötigen, kann anschließend von einem Computer in Bilder umgewandelt werden (Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.).

Begriffskärtchen

Superposition:

Wenn sich ein Teilchen in Superposition von zwei Zuständen befindet, werde ich das Teilchen, nach einer Messung, in einem der beiden Zustände auffinden. Messe ich viele solcher Teilchen, weiß ich, dass ich ca. 50% davon in dem ersten Zustand und die anderen 50% in dem zweiten Zustand auffinden werde. In dem Kontext von Schrödingers Katze kann man folgendes sagen: Wenn ich die Kiste öffne, werde ich die Katze entweder tot oder lebendig vorfinden. Öffne ich viele solcher Kisten, weiß ich, dass im Schnitt die Hälfte aller Fälle die Katzen tot und die andere Hälfte lebendig auffinden werden (vgl. Elstner, 2021, S.343f.).

Verschränkung:

Verschränkte Quantenteilchen, wie z.B. zwei Photonen (Lichtteilchen), haben die Eigenschaft, dass sie sich gegenseitig „beeinflussen“ können. Sie benehmen sich, als wären sie „durch ein unsichtbares Band über beliebig lange Distanzen miteinander verbunden [...]“. Albert Einstein nannte dies eine ‚spukhafte‘ Fernwirkung“ (Ellerhoff, 2020, S.12).

3.5 Quantenspiel

Bei dieser Station werden quantenmechanische Eigenschaften auf ein Münzspiel angewendet. Dadurch sollen die Schüler:innen erkennen, welches Potential hinter der Quantenmechanik steckt und wie sie sich von bekannten Alltagsvorstellungen unterscheidet.

3.5.1 Fachwissen

Beim Münzspiel treten zwei Spieler:innen gegeneinander an. Spieler:in 1 kommt zweimal zum Zug, wobei Spieler:in 2 nur einmal an der Reihe ist (vgl. Meyer, 1998).

Anfangs wird die Münze mit der Zahl nach oben gerichtet in die blickdichte Box gelegt und der Deckel verschlossen. Anschließend beginnt das Spiel. Bei jedem Spielzug darf die Spielperson, die am Zug ist, entscheiden, ob die Münze umgedreht werden soll oder nicht (vgl. Meyer, 1998).

Dabei ist zu beachten, dass der Spielzug nur notiert wird und die Münze nicht wirklich umgedreht werden soll. Im Stationenbetrieb sind Spielzugkarten vorgefertigt. Dabei müssen die Schüler:innen nur mehr die Karte, mit ihrem ausgewählten Zug, verdeckt in die Hand nehmen.

Am Ende des Spiels werden die Spielzüge der Spieler:innen an die Münze angewendet. Zeigt die Münze schlussendlich Zahl, dann hat Spieler:in 1 gewonnen (vgl. Meyer, 1998).

Mathematisch werden die Zustände der Münze bzw. ob Zahl oder Kopf nach oben zeigt durch folgende Vektoren realisiert (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.):

$$|Z\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und } |K\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Die beiden Züge werden in der Mathematik durch die folgenden Matrizen dargestellt (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.):

$$\hat{U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } \hat{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Das Zirkumflex über den Buchstaben B und U kann in der Physik und Mathematik verwendet werden, um Operatoren zu markieren. Gängigere Operatoren können aber auch durch andere Zeichen angegeben sein. Operatoren wirken auf das was rechts von ihnen steht mit einer gewissen Rechenvorschrift. Ein bekanntes Beispiel dafür ist das Integral, dass vor einer Funktion steht und auf diese Funktion mit vordefinierten Rechenregeln wirkt (vgl. Werner, 2023, S.169).

In der klassischen Variante sind die Gewinnchancen für beide Spieler:innen gleich groß. Die Gewinnverteilung ist an Tabelle 1 abzulesen (vgl. Meyer, 1998).

Züge der Spieler:innen		Züge von Spieler:in 1			
		UU	UB	BU	BB
Zug von Spieler:in 2	U	Spieler:in 2	Spieler:in 1	Spieler:in 1	Spieler:in 2
	B	Spieler:in 1	Spieler:in 2	Spieler:in 2	Spieler:in 1

Tabelle 1: Gewinnchancen beim klassischen Münzspiel

Bringt man zusätzlich die Quantenmechanik ins Spiel können sich die Gewinnchancen der Spieler:innen ändern.

Man nehme an Spieler:in 2 hat weiterhin nur die zwei Zugmöglichkeiten: Umdrehen und Beibehalten. Aber Spieler:in 1 kann zusätzlich einen quantenmechanischen Zug $\hat{Q}$ $= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ anwenden (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.).

Das Vorteilhafte an dem quantenmechanischen Zug ist, dass Spieler:in 1 durch die Anwendung im ersten Zug, die Münze in eine Superposition von Kopf und Zahl bringen kann. Dieser Fall wird zur Nachvollziehbarkeit in der nachfolgenden Rechnung gezeigt (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.):

$$\hat{Q} |Z\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 1 \cdot 0 \\ 1 \cdot 1 + (-1) \cdot 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \left[= \frac{1}{\sqrt{2}} (|Z\rangle + |K\rangle) \right]$$

Egal welchen Zug Spieler:in 2 macht, die Superposition bleibt erhalten. Zur Veranschaulichung werden beide möglichen Züge von Spieler:in 2 angeführt (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.).

Falls sich Spieler:in 2 dafür entscheidet die Münze umzudrehen, kommt es zu folgendem Endzustand der Münze (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.):

$$\hat{U} \frac{1}{\sqrt{2}}(|Z\rangle + |K\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{U}|Z\rangle + \hat{U}|K\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K\rangle + |Z\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Falls sich Spieler:in 2 dafür entscheidet, den Münzzustand beizubehalten, kommt es zu folgendem Endzustand der Münze (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.):

$$\hat{B} \frac{1}{\sqrt{2}}(|Z\rangle + |K\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{B}|Z\rangle + \hat{U}|K\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|Z\rangle + |K\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wenn jetzt Spieler:in 1 erneut den quantenmechanischen Zug einsetzt, zeigt die Münze mit der Zahlenseite nach oben und Spieler:in 1 hat gewonnen. In folgender Rechnung wird der dritte Spielzug rechnerisch dargestellt (vgl. Technische Universität Braunschweig, o.D.):

$$\hat{Q} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 1 + (-1) \cdot 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |Z\rangle$$

Der quantenmechanische Spielzug führt im Endeffekt dazu, dass Spieler:in 1 im klaren Vorteil gegenüber Spieler:in 2 ist.

3.5.2 Vorwissen und Key Ideas

Die Station kann nicht nur als Erweiterung für Physikstunden, sondern auch für den Mathematikunterricht verwendet werden.

Die Station über Quantenspiele eignet sich ab der zweiten Hälfte der 11. Schulstufe.

Als Vorwissen benötigen die Schüler:innen Kenntnisse von der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Vektorrechnung vom Fach Mathematik aus der 6. Klasse. Um den Operatorbegriff verstehen zu können benötigen die Schüler:innen eine kleine Einführung in das Thema Ableitung bzw. Differenzieren, welche in der 7. Klasse, im ersten Semester besprochen wird (vgl. RIS, 2025).

Die Station soll folgende Key Ideas an die Schüler:innen vermitteln:

- **Key Idea 1:** Zustände in der Physik können durch Vektoren dargestellt werden (vgl. Pade, 2024, S.87-91).

- **Key Idea 2:** Wird ein Operator auf einen Zustand angewendet, führt man eine Rechenvorschrift auf den Zustand aus (vgl. Werner, 2023, S.169).
- **Key Idea 3:** Eine Superposition ist ein Zustand (vgl. Pade, 2024, S.207; vgl. Elstner, 2021, S.343f.).

3.5.3 5. Station: Quantenspiel

Münzspiel

Die Idee des Quantenmünzspiels ist von David A. Meyer, dessen Publikation 1999 mit dem Titel QUANTUM STRATEGIES als Basis für beide Münzspiele in dieser Station dient. Einflüsse des didaktische MILQ-Konzepts finden sich auch in der quantenmechanischen Variante des Münzspiels wieder.

1. Klassische Variante:

Material: Für das Münzspiel wird eine Münze, eine kleine Schachtel mit Deckel, Spielkarten und zwei Spielpersonen benötigt.

Spielablauf:

Die Münze wird am Anfang der Runde mit der Zahl nach oben in die Schachtel gelegt und die Schachtel durch den Deckel verschlossen. Während des ganzen Spiels wird die Box dann nicht mehr geöffnet.

Das Spiel besteht aus 3 Zügen, wobei die Spielpersonen abwechselnd an der Reihe sind. Das bedeutet, dass Spieler 1, welcher anfängt, zweimal (1. und 3. Zug) und Spieler 2 nur einmal (2. Zug) am Zug ist. Während eines Zugs entscheidet man sich heimlich, ob man die Münze umdrehen oder nicht umdrehen möchte. Je nachdem wie man entschieden hat, nimmt man sich ein Kärtchen mit der Beschriftung **U** für umdrehen oder **B** für das Beibehalten der aktuellen Münzsituation. Nach dem dritten Zug offenbaren alle Spielpersonen ihre ausgewählten Kärtchen und können in der Spieltabelle überprüfen, ob schlussendlich Kopf oder Zahl nach oben zeigt.

Ziel des Spiels:

Spieler 1 hat gewonnen, wenn die Münze am Ende der Partie mit der Zahl nach oben zeigt. Falls das Symbol Kopf nach oben zeigt, hat Spieler 2 die Partie gewonnen.

Aufgabe 1 (E): Schneide alle Spielutensilien auf der letzten Seite aus und spiele mit deinem Partner 4 Runden. Untersuche die Gewinnstrategie des Spiels und arbeite heraus mit welchen Wahrscheinlichkeiten Spieler 1 oder Spieler 2 das Spiel gewinnt.

Spieler 1 gewinnt mit einer Wahrscheinlichkeit von _____.

Spieler 2 gewinnt mit einer Wahrscheinlichkeit von _____.

2. Quantenmechanische Variante:

Angenommen Spieler 1 kann zusätzlich zu den klassischen Spielzügen U und B einen quantenmechanischen Spielzug Q nutzen. Könnte er damit jedes Spiel gewinnen?

Wählen wir den Zustand $|Z\rangle$ für den Fall, dass die Münze mit der Zahlseite nach oben gerichtet ist und $|K\rangle$ falls die Kopfseite nach oben zeigt. Ein Zustand wird in der Physik durch einen Vektor dargestellt. Zur Übersichtlichkeit werden für $|Z\rangle$ und $|K\rangle$ zwei Einheitsvektoren verwendet, die normal aufeinander stehen.

Aufgabe 2 (W):

Recherchiere im Internet.

a) Nenne die Eigenschaft eines Einheitsvektors.

b) Erkläre auch den Begriff des Basisvektors.

Der Einheitsvektor hat die Eigenschaft, dass _____.

Basisvektor:

Die folgenden zwei Vektoren wurden für die Zustände Kopf und Zahl gewählt.

$$|Z\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |K\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Für die Spielzüge werden die Operatoren $\hat{U}$, $\hat{B}$ und $\hat{Q}$ verwendet, welche in jedem Zug auf den aktuellen Zustand der Münze angewendet werden können.

Definition des Fachbegriffs Operator: „Ein Operator, der durch ein Symbol gekennzeichnet wird, drückt aus, dass eine bestimmte Rechenvorschrift [...] durchgeführt werden soll“ (Werner, 2023, S.169, zitiert nach Kacser, 1970, S.249).

Operatoren sind dir schon untergekommen. Zum Beispiel zählt die Ableitung, welche dir aus der Mathematik bekannt ist, als Operator. Wenn man das Symbol der Ableitung

sieht, dann muss man nach den Ableitungsregeln rechnen (vgl. Werner, 2023, S.169). In diesem Münzbeispiel haben wir drei verschiedene Operatoren. Der Operator $\hat{U}$ führt dazu, dass sich mein Zahlenvektor in den Kopfvektor verwandelt oder umgekehrt. Der Operator $\hat{B}$ führt zu keiner Änderung meines Vektors. Der Operator $\hat{Q}$ angewandt auf den Ausgangszustand ($|Z\rangle$ =Zahl oben) führt zu einer Superposition von $|Z\rangle$ und $|K\rangle$ oder zur Auflösung einer Superposition. Wird also der Operator $\hat{Q}$ ein zweites Mal angewendet, löst dieser die Superposition wieder auf (d.h. $\hat{Q}(\hat{Q}|Z\rangle) = \hat{B}|Z\rangle = |Z\rangle$) und man bekommt den Ausgangszustand. Zur besseren Überschaubarkeit wird die Gewinnstrategie in Tabelle 2 gezeigt.

Beachte, dass der konstante Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ vor den Vektoren den Vektor auf die Länge 1 kürzt. Mit Hilfe dessen bekommt man die Gesamtwahrscheinlichkeit und es geht nichts verloren.

Die Gewinnstrategie:

Ausgangszustand	$ Z\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$		
1. Zug (Spieler:in 1)	Quantenmechanischer Spielzug $\frac{1}{\sqrt{2}} (Z\rangle + K\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$		
2. Zug (Spieler:in 2)	Umdrehen $\frac{1}{\sqrt{2}} (K\rangle + Z\rangle)$	$\xleftrightarrow{\text{dasselbe}}$ $= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} =$	Nicht umdrehen $\frac{1}{\sqrt{2}} (Z\rangle + K\rangle)$
3. Zug (Spieler:in 1)	Quantenmechanischer Spielzug $ Z\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$		

Tabelle 2: Die Gewinnstrategie

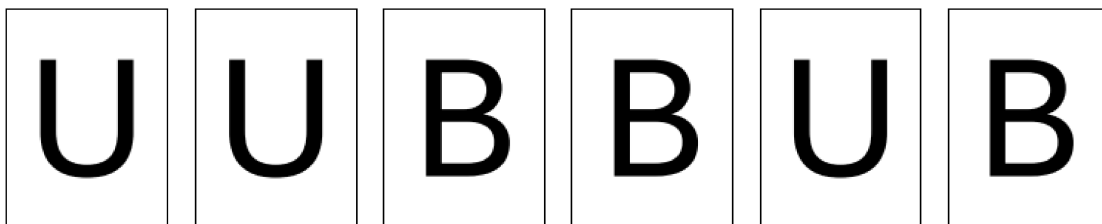
Wie man in Tabelle 2, der Gewinnstrategie, sieht, ist es egal für welchen klassischen Operator sich Spieler:in 2 entscheidet, dieser ist chancenlos ausgeliefert.

Aufgabe 3 (S): Beurteile, ob die quantenmechanische Gewinnstrategie für die Zukunft realistisch erscheint.

Vorlage zum Ausschneiden

Gewinner:in des Spiels ist		Züge von Spieler:in 1			
		UU	UB	BU	BB
Zug von Spieler:in 2	U	Spieler:in 2	Spieler:in 1	Spieler:in 1	Spieler:in 2
	B	Spieler:in 1	Spieler:in 2	Spieler:in 2	Spieler:in 1

Tabelle 3: Spieltabelle



3.5.4 Zusatzmaterial für Station 5

Hilfskärtchen

(S5) 1. Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Sammle alle Spielzugkombinationen, die im Spiel vorkommen könnten. Überlege dir anhand der Kombinationen, welcher Spieler wie oft gewinnt und ob jemand einen Vorteil hat.	Antwort zum 1. Hilfskärtchen: Jeder Spielzug, der gemacht werden kann, findet sich in der folgenden Auflistung wieder. Keiner der Spieler hat einen Vorteil. 1. UUU 2. UUB 3. UBU 4. UBB 5. BUU 6. BUB 7. BBU 8. BBB
(S5) 2. Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: In diesem Fall kann die Laplace Wahrscheinlichkeit verwendet werden, weil dafür die folgende Voraussetzung gilt. „In Laplace-Experimenten haben alle Ergebnisse [...] dieselbe Wahrscheinlichkeit“ (Weitz, 2021, S.797). Die Laplace Wahrscheinlichkeit kann mit Hilfe der folgenden Regel bestimmt werden. „Anzahl der günstigen Fälle durch Anzahl der möglichen Fälle“ (Weitz, 2021, S.797). Die folgende Formel wurde aus dem Buch von Weitz (Weitz, 2021, S.797) entnommen: $P(A) = \frac{ A }{ \Omega }$	Antwort zum 2. Hilfskärtchen: Damit Spieler 1 gewinnen kann, sind für ihn die Kombinationen 1, 2, 6, 7 günstig. Die Anzahl der Kombinationen, die für ihn günstig wären, sind also 4 Spiele. Insgesamt mögliche Spielausgänge gibt es jedoch 8. $P(\text{Spieler:in 1 gewinnt}) = \frac{4}{8} = 0.5$. Für Spieler 2 gibt es genauso 4 Spielverläufe von insgesamt 8, die ihn zum Sieger erklären würden. $P(\text{Spieler:in 2 gewinnt}) = \frac{4}{8} = 0.5$.
(S5) Hilfskärtchen zu Aufgabe 2: Recherchiere im Internet den Begriff „Einheitsvektor“. Achte besonders auf eine Definition, welche die Länge des bestimmten Vektors betrifft. Recherchiere im Internet den Begriff „Basisvektor“ und Beispiele von Basisvektoren. Achte besonders auf das Auftreten von Einheitsvektoren, wie die Basisvektoren zueinanderstehen und was diese aufspannen.	

Lösungskärtchen

(S5) Lösung zu Aufgabe 1:

Jeder Spieler hat eine Wahrscheinlichkeit von 0.5, dass er das Spiel gewinnt. ODER Die Gewinnchance ist 50/50. ODER Jeder Spieler hat eine 50%-ige Chance zu gewinnen.

(S5) Lösung zu Aufgabe 2:

Ein Einheitsvektor ist ein Vektor, der eine Länge von 1 hat. So einen Vektor nennt man auch normiert (vgl. Goebbels & Ritter, 2023, S.494 und S.509).

Basisvektoren stehen aufeinander normal und spannen z.B. unser Koordinatensystem (mit x- und y-Achse) oder den Raum (mit x-, y- und z-Achse) auf (vgl. Waldmann, 2017, S.102-110).

(S5) Lösung zu Aufgabe 3:

Zu dieser Aufgabe gibt es keine richtige oder falsche Antwort, da deine eigene Beurteilung der Theorie zählt. Aber eine mögliche Antwort wäre: Es ist schwer vorstellbar, dass bei einem realen Münzspiel ein quantenmechanischer Zug eingesetzt werden kann. Da die Münzen keine Quantenobjekte sind, ist es somit unmöglich. Was aber realistischer erscheint ist, dass wenn das Spiel von zwei Spieler:innen über einen Quantencomputer gespielt wird, quantenmechanische Spielstrategien verwendet werden können.

Begriffskärtchen

Superposition:

Wenn sich ein Teilchen in Superposition von zwei Zuständen befindet, werde ich das Teilchen, nach einer Messung, in einem der beiden Zustände auffinden. Messe ich viele solcher Teilchen, weiß ich, dass ich ca. 50% davon in dem ersten Zustand und die anderen 50% in dem zweiten Zustand auffinden werde. In dem Kontext von Schrödingers Katze kann man folgendes sagen: Wenn ich die Kiste öffne, werde ich die Katze entweder tot oder lebendig vorfinden. Öffne ich viele solcher Kisten, weiß ich, dass im Schnitt die Hälfte aller Fälle die Katzen tot und die andere Hälfte lebendig auffinden werden (vgl. Elstner, 2021, S.343f.).

Wahrscheinlichkeit (wie wahrscheinlich ist es, dass...):

Die Wahrscheinlichkeit ist ein Maß, mit dem man den „Grad [...] der Möglichkeit des Eintretens bzw. der Voraussagbarkeit eines Ereignisses“ (Duden, 2025) angeben kann.

Mit einer Wahrscheinlichkeitsaussage können wir Ausdrücken eine gewisse Wertigkeit oder Gewicht hinzufügen. Eine Wahrscheinlichkeit wird durch eine Zahl von inklusive 0 bis 1 angegeben (vgl. Stegen, 2020, S.6).

3.6 Schrödingers Katze:

Das Gedankenexperiment Schrödingers Katze wurde vom Physiker Erwin Schrödinger 1935 vorgestellt (vgl. Schrödinger, 1935, S.812).

Dieses soll die Abstraktheit der Quantenmechanik theoretisch an einer makroskopischen Umgebung veranschaulichen.

3.6.1 Fachwissen

„Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern mu[ss]): in einem GEIGERschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, da[ss] im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und bestätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, da[ss] die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben“ (Schrödinger, 1935, S.812).

Er sah darin eine Möglichkeit die Superposition und die Rolle der Messung in der Quantenmechanik mit der Hilfe von makroskopischen Objekten zu erklären.

Wenn man die Wellenfunktionen der Katze und des Atoms betrachtet, bestehen diese jeweils aus einer Superposition von zwei Wellenfunktionen. Beim Atom sind die Zustände zerfallen ϕ_1 und unzerfallen ϕ_2 möglich und bei der Katze die Zustände tot ψ_1 und lebendig ψ_2 . Die Superpositionen werden wie folgt dargestellt (vgl. Elstner, 2021, S.352f.):

$$\Psi_{katze}(t) = a(t)\psi_1 + b(t)\psi_2$$

$$\Phi_{Atom}(t) = c(t)\phi_1 + d(t)\phi_2$$

Mit Hilfe der Wellenfunktionen kann in der Quantenmechanik eine Wahrscheinlichkeitsaussage gemacht werden. Das Betragsquadrat der Wellenfunktion Ψ_{Katze} gibt z.B. an, wie wahrscheinlich es ist, eine Katze, die auf die Eigenschaft tot beobachtet wird, auch tot aufzufinden (vgl. Elstner, 2021, S.353).

Die Messung führt in der Quantenmechanik dazu, dass die Wellenfunktion kollabiert. Damit befindet sich das Quantenobjekt nach der Messung in dem Zustand, welchen die Messung ergeben hat und man kann keine Aussage „über die Quantenobjekte vor der Messung“ (Elstner, 2021, S.354) treffen (vgl. Elstner, 2021, S.352ff.).

Grundsätzlich beschreibt die Superposition das Folgende: Misst man ein Ensemble von Teilchen, welche sich in einer Superposition von zwei Zuständen befinden, wird die Hälfte der Teilchen den einen Zustand und die andere Hälfte den anderen Zustand annehmen (vgl. Elstner, 2021, S.343f.).

Der Grund, warum Quantenphänomene nicht der Alltagsvorstellung entsprechen, liegt an der Dekohärenz. Ein echtes Tier würde „mit ihrer Umgebung wechselwirken“ (Müller, o.D.). Dadurch, dass echte Katzen atmen müssen und daher ständig mit Luftmolekülen wechselwirken, reduziert sich der Zustand der Katze von der Superposition auf einen Teilzustand davon (vgl. Müller, o.D.).

3.6.2 Vorwissen und Key Ideas

Sobald die Schüler:innen ein Grundwissen über Teilchen, Atome und den Zerfallsprozess besitzen, kann der Stationenbetrieb bearbeitet werden. Laut Lehrplan wird in der Unterstufe folgende Eigenschaft über Teilchen vermittelt: „Nimmt man an, dass Dinge aus klein(st)en Teilchen bestehen, so kann oft das Verhalten des ganzen Systems vorhergesagt werden“ (RIS, 2025). Und in der 8. Schulstufe sollen Schüler:innen „den radioaktiven Zerfall als Zufallsprozess im Atomkern verstehen und mit Hilfe von Modellen darstellen“ (RIS, 2025).

Daher kann die Station mit Klassen, welche sich in der 9. Schulstufe befinden, durchgeführt werden. Das Ziel der Station ist es, mit dem Gedankenexperiment einen kleinen Einstieg in die Welt der Quantenmechanik zu geben. Durch die Alltagsobjekte, unter denen sich die Schüler:innen etwas Greifbares vorstellen können, wird in die abstrakte Quantenphysik übergeleitet. Der Stationenbetrieb beinhaltet folgende Key Ideas:

- **Key Idea 1:** Die Superposition ist ein Zustand (vgl. Elstner, 2021, S.356).
- **Key Idea 2:** Misst man unendlich viele Teilchen, welche sich in einer Superposition von zwei Zuständen befinden, werden ca. die Hälfte der Teilchen Zustand 1 und die andere Hälfte Zustand 2 annehmen (vgl. Elstner, 2021, S.343f.).
- **Key Idea 3:** Eine Messung in der Quantenmechanik führt zu einem Kollaps der Wellenfunktion und zu einer Reduzierung der Superposition (vgl. Müller, o.D.).

3.6.3 Station: Schrödingers Katze

Wichtig: Dieses Station ist nur ein Gedankenexperiment. Keiner Katze wurde ein Schaden hinzugefügt!

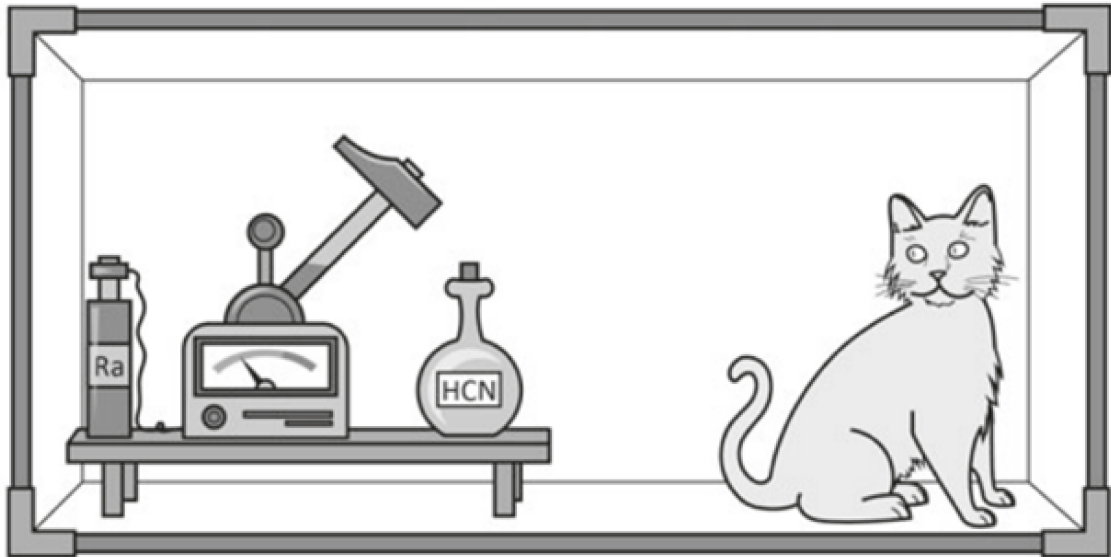


Abbildung 14: Schrödingers Gedankenexperiment (Elstner, 2021, S.352)

Die Quantenphysik ist schwer zu verstehen, da wir die Phänomene nicht sehen und damit auch nicht nachvollziehen können. Der berühmte Physiker Erwin Schrödinger hatte jedoch die Idee ein (Gedanken-)Modell zu erstellen, um die Quantenmechanik anhand dieses Beispiels zu erklären.

Schrödinger beschreibt das Gedankenexperiment wie folgt:

„Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern mu[ss]): in einem GEIGERschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, da[ss] im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und bestätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, da[ss] die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben“ (Schrödinger, 1935, S.812).

Info: Ein Relais ist ein anderes Wort für Schalter.

Aufgabe 1 (W): Verwende das Internet, um den Begriff Gedankenexperiment zu beschreiben.

Aufgabe 2 (W): Stell dir vor du brichst die Stahlkammer auf und siehst hinein. Welche Zustände könnte die Katze haben?

1.Möglichkeit: _____

2.Möglichkeit: _____

Die Quantenmechanik befasst sich mit den Gesetzmäßigkeiten in der Welt der Teilchen (vgl. Elstner, 2021, S.31). Dort herrschen andere Regeln als jene, die wir aus unserem Alltag kennen. Diese Unterschiede sind in der Tabelle 4 aufgelistet.

Alltag	Quantenmechanik
Die Katze ist tot. ODER Die Katze ist lebendig.	Wenn niemand hinschaut, nimmt die Katze eine Superposition von tot und lebendig ein (vgl. Schrödinger, 1935, S.812). NUR wenn man hinschaut, muss die Katze einen toten ODER lebendigen Zustand einnehmen. (Hinschauen = Messung machen)
Achtung! In unserem Gedankenexperiment nimmt die Katze in der Box die Stelle von z.B. einem Teilchen ein. Unser Verstand sagt uns, dass eine echte Katze niemals eine Superposition von tot und lebendig gleichzeitig annehmen kann. Aber Quantenteilchen können wirklich eine Superposition von zwei Zustände gleichzeitig einnehmen.	

Tabelle 4: Superposition

Die Situation als Comic	
Alltag	Quantenmechanik

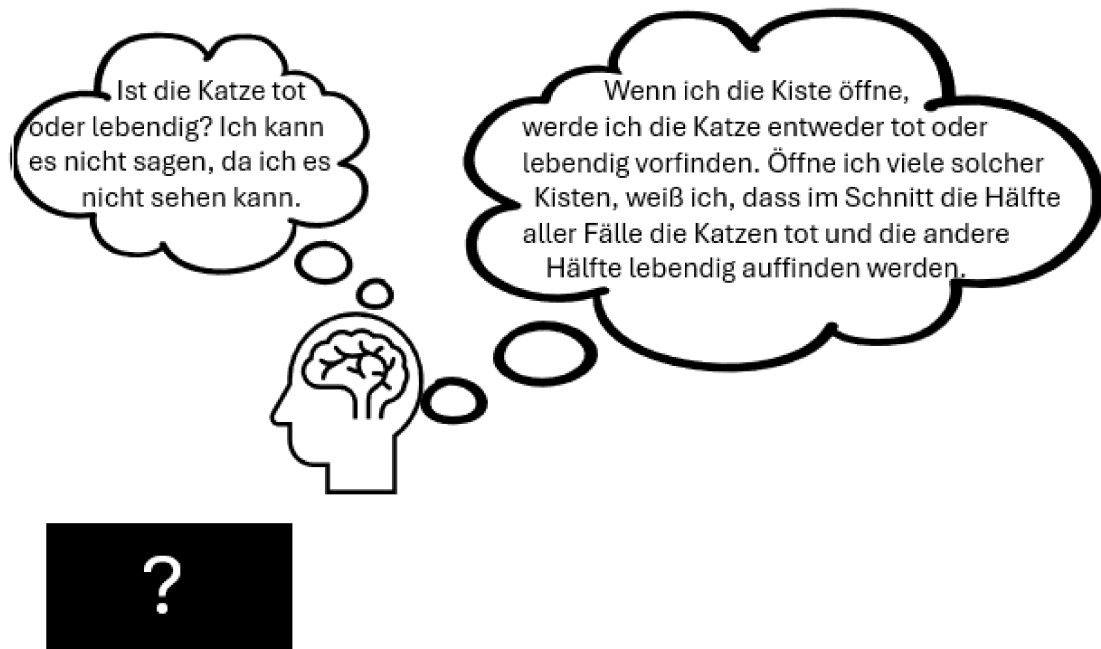


Abbildung 15: Gedankengänge der Alltagswelt vs. Quantenwelt

Superposition? Sowas gibt es doch im Alltag nicht, oder doch?

Ausgabe 3 (S): Stelle eine Hypothese auf, wie es dazu kommen kann, dass wir dieses Phänomen nicht alltäglich sehen?

Dekohärenz: Warum fällt es uns so schwer, die Quantenmechanik zu akzeptieren?

Alles, was wir im Alltag sehen, nimmt immer nur einen Teilzustand der Superposition an. Das liegt daran, dass eine echte Katze zwar aus lauter Atomen besteht, diese aber die ganze Zeit mit Luftteilchen, Licht oder im Allgemeinen mit der Umgebung zusammenstoßen. Dadurch werden jederzeit Messungen an der Katze durchgeführt, die für uns das Sehen von Quantenphänomenen mit freiem Auge unmöglich macht. Deshalb sehen wir eine Katze immer nur entweder lebendig oder tot.

Aber schauen wir uns Objekte an, die etwas kleiner sind, mit diesen kann Superposition gezeigt werden. Die Superposition existiert und kann z.B. durch den Effekt der Polarisation bewiesen werden (vgl. Caltech, 2024). (Tipp: Wie Polarisation funktioniert erfährst du in der Station ‚Bra-Ket Formalismus‘.)

Aufgabe 4 (W): Öffne YouTube und schaue dir das Video „Schrödingers Katze“ von dem Kanal „100SekundenPhysik“ an. Erkläre folgende Begriffe, die in dem Video vorgestellt werden: Makrokosmos, Mikrokosmos und Superposition.

Achtung: Mit der Aussage „keinen festen Zustand“ (100SekundenPhysik, 2015, 01:46) ist im Video gemeint, dass das Teilchen eine Superposition von mehreren Zuständen annimmt!



BONUSFRAGE: Betrachte im Video das Zeitintervall von 0:44 - 0:56. Beschreibe in welcher Superposition von Zuständen sich das Elektron vor der Beobachtung bzw. Messung befindet.

3.6.4 Zusatzmaterial für Station 6

Hilfskärtchen

(S6) 1. Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Schau dir das Wort „Gedankenexperiment“ genauer an und überlege, was das Wort bedeuten könnte.	Antwort zum 1. Hilfskärtchen: Gedankenexperiment kann in zwei Worte aufgeteilt werden: Gedanken: etwas das nur im Kopf stattfindet. Experiment: „wissenschaftlicher Versuch, durch den etwas entdeckt, bestätigt oder gezeigt werden soll“ (Duden, 2025).
(S6) 2. Hilfskärtchen zu Aufgabe 1: Überlege dir, wozu man in der Physik Gedankenexperimente braucht? Bei welchen Experimenten glaubst du ist ein Gedankenexperiment sinnvoll?	Antwort zum 2. Hilfskärtchen: Gedankenexperimente sind dann sinnvoll, wenn ein Experiment schwer durchzuführen ist. Es gibt Objekte, die zu groß oder zu klein sind und deshalb kein Experiment direkt vorstellbar ist. Es gibt auch Experimente, die zu gefährlich sein könnten.
(S6) Hilfskärtchen zu Aufgabe 3: Überlege dir, was ausschlaggebend ist, dass das Gedankenexperiment die Ergebnisse zeigt, die wir auch im Alltag akzeptieren würden und keine Superposition von Zuständen.	Antwort zum Hilfskärtchen: Die Messung bzw. die Beobachtung.
(S6) Hilfskärtchen zu Aufgabe 4: Suche die Stellen im Video, wo die Begriffe vorkommen. Höre dir die Sequenzen noch einmal an. Es kann dir auch helfen die gesagten Sätze 1:1 abzuschreiben oder die Untertitelfunktion anzuschalten, sodass du nachlesen kannst was gesagt wurde.	Antwort zum Hilfskärtchen: Mikrokosmos: ab 0:35 Superposition: ab 1:40 Makrokosmos: ab 0:10

Lösungskärtchen

(S6) Lösung zu Aufgabe 1:

Ein Gedankenexperiment ist eine Methode eine Theorie zu erklären, indem gedanklich eine Vorstellung vom Konzept erstellt wird (vgl. Perkowitz, 2020).

(S6) Lösung zu Aufgabe 2:

Die Katze wird entweder tot oder lebendig aufgefunden.

(S6) Lösung zu Aufgabe 3:

Das Phänomen der Superposition bzw. der Mischform von Zuständen sehen wir im Alltag nicht, weil Sehen = Messen bedeutet. Durch die Messung ändert sich der Zustand zu **einem** Teilzustand der Superposition.

(S6) Lösung zu Aufgabe 4:

Makrokosmos beschreibt die Welt der Größenordnung unserer Alltagsgegenstände. Der Mikrokosmos beschreibt die Welt von kleinsten Objekten, wie Quantenteilchen. Superposition beschreibt das Phänomen, dass Teilchen mehrere Zustände gleichzeitig einnehmen können (vgl. 100SekundenPhysik, 2015).

(S6) Lösung zur Bonusaufgabe:

Ein Elektron kann eine Superposition von mehreren Positionen gleichzeitig einnehmen (vgl. 100SekundenPhysik, 2015).

Begriffskärtchen

GEIGERsches Zählrohr:

Das GEIGERsche Zählrohr (oder Geiger-Müller Zählrohr) dient „zum Nachweis und zur Messung radioaktive[r] Strahlung“ (Korff & Heering, 2022, S.260).

Superposition:

Wenn sich ein Teilchen in Superposition von zwei Zuständen befindet, werde ich das Teilchen, nach einer Messung, in einem der beiden Zustände auffinden. Messe ich viele solcher Teilchen, weiß ich, dass ich ca. 50% davon in dem ersten Zustand und die anderen 50% in dem zweiten Zustand auffinden werde. In dem Kontext von Schrödingers Katze kann man Folgendes sagen: Wenn ich die Kiste öffne, werde ich die Katze entweder tot oder lebendig vorfinden. Öffne ich viele solcher Kisten, weiß ich, dass im Schnitt die Hälfte aller Fälle die Katzen tot und die andere Hälfte lebendig auffinden werden (vgl. Elstner, 2021, S.343f.).

Polarisation:

Polarisation: „ist [...] eine Richtungseigenschaft [...] des Lichts“ (Pospiech, 2021, S.4). Unpolarisiertes Licht, wie in Abbildung 16 dargestellt, hat die Eigenschaft, dass jede Polarisationsrichtung mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftritt. „Es entsteht z.B. in [...] der Sonne oder auch in Glühlampen“ (Slama, 2020, S.263).

Linear polarisiertes Licht, wie in Abbildung 16 zu sehen, hat hingegen nur eine ausgezeichnete Polarisationsrichtung. Das bedeutet, dass eine Richtung zu 100% auftritt und alle anderen nicht auftreten (vgl. Slama, 2020, S.263f.).

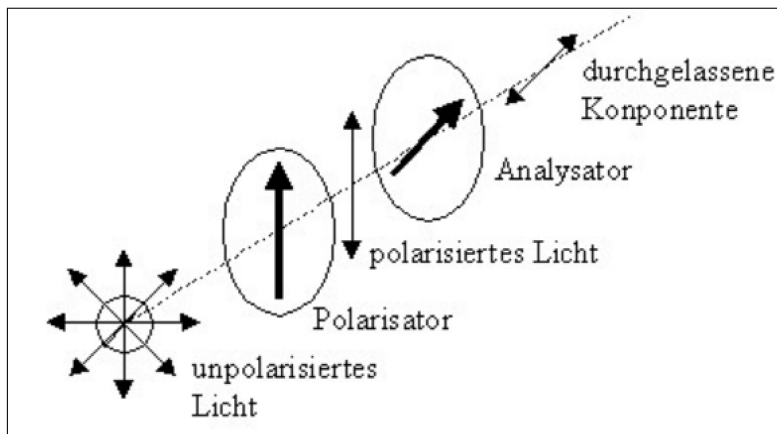


Abbildung 16: Skizze von unpolarisiertem und polarisiertem Licht (Heidorn, o.D)

3.7 Stationen-Pass

Der Stationen-Pass gibt eine Übersicht über alle Stationen. Dabei bekommen die Schüler:innen Einsicht auf die Pflicht- und Wahlstationen sowie auf den Schwierigkeitsgrad und die ungefähre Zeitdauer. Bei den angegebenen Zusatzmaterialien wissen die Schüler:innen direkt, welche Materialien benötigt werden, um die Aufgaben bearbeiten zu können.

In der untersten Zeile ist ein Bereich freigelassen worden, damit Schüler:innen Fragen an die Lehrkraft notieren können. So ist es den Schüler:innen möglich Fragen aufzuschreiben, welche für die Lehrperson bei der Abgabe ersichtlich sind.

3.7.1 Der Stationen-Pass

Nr.:	Name der Station (Wahl / Pflicht)	Personenanzahl	Niveau	Status (✓ / □)	Zeit
1.	Die Caesar Verschlüsselung (P)	Einzelaufgabe	▲ ▲ ▲	□	20 min
Zusatzmaterial: Schere, Hilfs- und Lösungskärtchen, Handy, Musterbeutelklammer, Begriffskärtchen (Verschränkung, Wahrscheinlichkeit)					
2.	Bra-Ket Formalismus (W)	Einzelaufgabe	▲ ▲ ▲	□	20 min
Zusatzmaterial: (Lehrer-)Computer, Hilfs- und Lösungskärtchen, Handy, Begriffskärtchen (Operator)					
3.	Bellsche Ungleichung (P)	Einzelaufgabe	▲ ▲ ▲	□	15 min
Zusatzmaterial: Hilfs- und Lösungskärtchen, Begriffskärtchen (Verschränkung, Polarisation)					
4.	Quantenmechanik im Alltag (W)	Gruppenarbeit (4 Personen)	▲ ▲ ▲	□	20 min
Zusatzmaterial: Handy, Schere, Kleber, Hilfs- und Lösungskärtchen, Begriffskärtchen (Superposition, Verschränkung)					
5.	Quantenspiel (W)	Partnerarbeit	▲ ▲ ▲	□	20 min
Zusatzmaterial: Handy, Spielutensilien (sind in der Station beigelegt), Hilfs- und Lösungskärtchen, Begriffskärtchen (Wahrscheinlichkeit, Superposition)					
6.	Schrödingers Katze (P)	Einzelaufgabe	▲ ▲ ▲	□	15 min
Zusatzmaterial: Handy, Hilfs- und Lösungskärtchen, Begriffskärtchen (GEIGERsches Zählrohr, Superposition, Polarisation)					
Offengebliebene Fragen:					

4 Erprobung des Stationenbetriebs

Die Erprobung wurde mit Schüler:innen aus vier verschiedenen Schulstufen durchgeführt. Darunter befinden sich die folgenden Jahrgangsstufe: 8. Schulstufe, 10. Schulstufe, 11. Schulstufe und 12. Schulstufe.

4.1 Durchführung

In den ersten fünf Minuten bekamen die Schüler:innen eine kleine Einführung, wie der Stationenbetrieb aufgebaut ist und wo die Stationen mit den dafür benötigten Materialien zu finden sind. Die Zusatzmaterialien wie Hilfskärtchen, Lösungskärtchen und Begriffskärtchen wurden im Voraus laminiert und zu den Stationen beigelegt. Die Bastelutensilien, wie Musterbeutelklammern, Scheren und Kleber wurden vorne am Tisch der Lehrperson bereitgestellt.

Da die Methode des Stationenbetriebs allen Schüler:innen schon bekannt war, gab es diesbezüglich keinerlei Nachfragen oder Probleme bei der Durchführung. Bei den Hilfskärtchen gab es jedoch verschiedene Reaktionen von den Schüler:innen. Für die erste Erprobungsgruppe wurden die Hilfskärtchen am Lehrertisch aufgelegt. Bei dieser Gruppe wurde beobachtet, dass die Schüler:innen keine der Hilfskärtchen und Lösungskärtchen verwendeten. Aufgrund dieser Beobachtung wurden die Stationen bei den andern Schüler:innengruppen im gesamten Physiksaal verteilt. Das führte dazu, dass Schüler:innen sich bei Bedarf Hilfs- und Lösungskärtchen eher geholt haben. Falls Schüler:innen ersichtliche Probleme bei der Bearbeitung einer Station hatten, wie z.B. das Leerlassen oder Überspringen einer Aufgabe, wurden sie von der Lehrperson darauf aufmerksam gemacht, dass es Hilfskärtchen zur Unterstützung gibt. In einer Klasse wurde zusätzlich darauf hingewiesen, dass es bei einer Benützung von Zusatzmaterial zu keinen negativen Auswirkungen kommen würde.

Jedoch haben einige Schüler:innen sich trotzdem dazu entschieden einige Aufgaben nicht zu bearbeiten und auch nicht auf die Hilfskärtchen zurückzugreifen.

Bei den meisten Schüler:innen hat die Bearbeitung der Stationen jedoch ohne ersichtliche Probleme funktioniert. Während der Bearbeitung gab es keine inhaltlichen Zwischenfragen seitens der Schüler:innen. Das spricht für die gute Bearbeitbarkeit des Stationenbetriebs und hat gezeigt, dass der Betrieb auch für Supplierstunden mit fachfremden Lehrpersonen geeignet ist.

4.2 Auswertung und Überarbeitung

Nach der Erprobung wurden die einzelnen Aufgaben mit einem dreiteiligen Bewertungssystem beurteilt. Die Aufgaben wurden mit ✓ bewertet, wenn aus der Sicht der Lehrperson das Ziel der Aufgabe von den Schüler:innen erreicht wurde. Mit ~ wurden Aufgaben gekennzeichnet, welche nicht gänzlich erfüllt wurden. Ein × wurde nur dann vergeben, wenn aus der Sicht der Lehrperson die Aufgabenstellung verfehlt wurde.

Wenn Tabellenfelder nicht ausgefüllt sind, wurden diese Aufgaben von den Lernenden nicht bearbeitet bzw. nicht ausgefüllt. Im Fall, dass im Bewertungsfeld zusätzlich das Symbol (!) daneben angeführt ist, wurde entweder teilweise oder komplett von den Lösungskärtchen abgeschrieben.

4.2.1 Station 1

Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 5 die Auswertungen der einzelnen Aufgaben aus Station 1 angeführt.

Station 1: Caesar Verschlüsselung					
	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4	Aufgabe 5
Schüler:in 1	✓	~	~	×	~
Schüler:in 2	✓	✓	✓	×	
Schüler:in 3	✓	✓	✓	✓	✓
Schüler:in 4	✓	✓	✓	×	✓
Schüler:in 5	✓	✓	✓	~	✓
Schüler:in 6	✓	✓	✓	✓	✓
Schüler:in 7	✓	✓	✓	×	✓
Schüler:in 8	✓	✓	✓	×	✓(!)
Schüler:in 9	✓	✓	✓	×	✓
Schüler:in 10	✓	×	×	×	
Schüler:in 11	✓	×	✓	✓	✓
Schüler:in 12	✓	×	×	✓	✓
Schüler:in 13	✓	✓	✓	×	×
Fazit	13 (✓)	9 1 3 (✓) (~) (×)	10 1 2 (✓) (~) (×)	4 1 8 (✓) (~) (×)	9 1 1 (✓) (~) (×)

Tabelle 5: Auswertung von Station 1

Die Auswertung der Station hat gezeigt, dass die Ver- und Entschlüsselung (Beispiel Nr. 1-3) sehr gut funktioniert hat.

Die Aufgabe Nr. 4 wurde von 8/13 Schüler:innen nicht wie erwartet gelöst. Die Schü-

ler:innen hatten als Aufgabe die Sicherheit von Verschiebe-Verschlüsselungen zu bewerten.

Schüler:in 1 und 2 haben das Verfahren als sicher eingestuft, aber nebenbei erwähnt, dass es lange dauern würde es zu entschlüsseln. Das Wort „lang“ ist relativ, aber diese Aussagen lassen vermuten, dass ihnen der Fakt bewusst war, dass die Nachrichten entschlüsselt werden können.

Aus diesem Grund wurde die Aufgabenstellung „Bewerte die Sicherheit dieser geheimen Kommunikationsart und begründe warum du dich für sicher/nicht sicher entschieden hast.“ abgeändert zu der Formulierung, welche in Tabelle 6 ersichtlich ist.

Aufgabe 4 (S): Bewerte die Sicherheit dieser geheimen Kommunikationsart und begründe warum du dich für sicher/nicht sicher entschieden hast.

(Tipp: Stell dir vor es geht eine durch die Chiffrierscheibe verschlüsselte Nachricht durch die Bankreihen. Den Text aus der Nachricht würdest du gerne entziffern und lesen. Überlege z.B. wie du „JCNNQ“ entschlüsseln könntest.)

Bewerte: Das Caesar-Verschlüsselungsverfahren ist:

- ☐ überwiegend sicher.
- ☐ eher nicht so sicher.

Begründe:

Tabelle 6: Überarbeitung von Aufgabe 4 aus Station 1

Bei Aufgabe 5 wurden die Schüler:innen gebeten ein Video über die Quantenkryptografie kurz zusammenzufassen. Dabei sind fünf Schlüsselwörter gegeben, welche die Schüler:innen inkludieren sollen. Drei der elf Schüler:innen, welche die Aufgabe bearbeitet haben, vergaßen auf den Begriff Quantencomputer. Da dieser Begriff für das Verständnis über Vorgehensweise der Quantenkryptografie nicht dringend notwendig ist, wurde die Aufgabe nicht überarbeitet.

Da auch keine falschen Schüler:innenvorstellungen entdeckt wurden, hat diesbezüglich keine Änderung stattgefunden.

4.2.2 Station 2

Tabelle 7 gibt eine kurze Auskunft über die Ergebnisse von Station 2.

Bemerkung: Die Nummerierung der Schüler:innen wurde bewusst anders, als bei der Auswertung der ersten Station gewählt, da Schüler:in 1 und Schüler:in i nicht dieselbe

Person sind.

Station 2: Bra-Ket Formalismus				
	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4
Schüler:in i	×		✓	
Schüler:in ii	~			
Schüler:in iii	✓			
Schüler:in iv			✓	
Schüler:in v	✓			
Schüler:in vi	✓	~	✓	✓
Schüler:in vii	×	✓	✓	✓ (!)
Schüler:in viii	✓	✓	✓	
Schüler:in ix	✓	~	✓	
Schüler:in x	✓	✓	✓	✓
Schüler:in xi	✓	✓	✓	~
Fazit	7 1 2 (✓) (~) (×)	4 2 (✓) (~)	8 (✓)	3 1 (✓) (~)

Tabelle 7: Auswertung von Station 2

Bei Aufgabe 1, bei der die S-Kompetenz der Schüler:in abgefragt wurde, haben acht von elf Schüler:innen eine sinnvolle Hypothese aufstellen können.

Nur vier von elf Lernenden haben die Aufgabe 2 zur Gänze erfüllen können. Weitere zwei Schüler:innen haben die Aufgabe größtenteils erfüllt und die übrigen fünf haben das Beispiel nicht ausgefüllt.

Wegen der niedrigen Erfolgsquote wurde das Beispiel erweitert. Anstatt, dass die Schüler:innen komplett frei mit der Simulation Experimentieren dürfen, wird das Experimentieren jetzt angeleitet. Das soll den Effekt mit sich bringen, dass Schüler:innen sich besser unterstützt fühlen und auch die gewünschten Polarisierungseffekte sehen. Die alte und die neue Version der Aufgabe sind in Tabelle 8 dargestellt.

Alte Version
Aufgabe 2 (E): Scanne den QR-Code und lade die „Simulation zum Polarisationsfilter“ herunter. Dokumentiere deine Beobachtungen, während du die Simulation erkundest. Erwähne in deiner Dokumentation die folgenden Fachbegriffe: Quelle, Intensität (in $\frac{W}{m^2}$) bzw. Leistung (in W) (=heller/dunkler), Polarisator (=Polfilter), Schirm, Polarisationsrichtung
Neue Version
Aufgabe 2(E): Für diese Aufgabe benötigst du einen Computer oder einen Laptop! Suche nach der „Simulation zum Polarisationsfilter“ von der Technischen Universität Braunschweig (o.D.) und öffne das Simulationsprogramm. Bevor du experimentierst, muss das Experiment noch vorbereitet werden. Schritt 1: Starte das Programm und entferne links unten bei „Instrumente“ den Polfilter 1 und Polfilter 3. Schritt 2: Schalte die Quelle auf „Ein“ . (a) Was beobachtest du? (b) Schalte jetzt den Polfilter 1 an. Dokumentiere was der Polarisationsfilter bewirkt. Schritt 3: Schalte nun den Polfilter 3 zusätzlich ein. Ändere die Polarisationsrichtungen, indem du bei den Polfiltern die Stäbchen bewegst. Tipp: Stell bei einem Filter eine fixe Zahl z.B. 0° ein und ändere nur beim zweiten die Polarisationsrichtung. (c) Dokumentiere wie sich das Licht in Abhängigkeit von der Winkeldifferenz der Polfilter verhält. Erwähne in deiner Dokumentation die folgenden Fachbegriffe: Intensität bzw. Leistung, Polarisator, Polarisationsrichtung

Tabelle 8: Überarbeitung von Aufgabe 2 aus Station 2

Die dritte Aufgabe haben acht von elf Schüler:innen richtig bearbeitet, weshalb keine Änderung vorgenommen wurde.

Die letzte Aufgabe der Station wurde nur von vier Schüler:innen bearbeitet. Schuld daran könnte die Komplexität des vorgerechneten Beispiels am Schluss der Station sein. Da die Komplexität jedoch notwendig und beabsichtigt ist, wird die Aufgabe als Differenzierungsaufgabe für interessierte und motivierte Schüler:innen angesehen und beibehalten. Aus dem Grund, dass keine falschen Schüler:innenvorstellungen gefunden wurden, ist die

Station nicht weiter verändert worden.

4.2.3 Station 3

Wie die Schüler:innenaussagen bewertet wurden, ist der Tabelle 9 zu entnehmen.

Station 3: Bellsche Ungleichung														
	Schüler:in													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Bsp. 1	✓		✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bsp. 2	~	×	~	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Fazit	1. Bsp.: 12 (✓) 1 (×)							2. Bsp.: 9 (✓) 2 (~) 1 (×)						

Tabelle 9: Auswertung von Station 3

Bei der Auswertung sind keine falschen Schüler:innenvorstellungen festgestellt worden. Da die Mehrzahl der Schüler:innen die Station richtig gelöst haben und der Rest kleine Fehler gemacht hat, wird die Station als Ganzes in die neue Version übernommen.

4.2.4 Station 4

Nach der Erprobung erzielte die Station 4, wie in Tabelle 10 zu sehen ist, folgende Ergebnisse:

Station 4: Quantenmechanik im Alltag				
	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4
Schüler:in a	✓	✓	✓	✓
Schüler:in b		✓	✓	✓
Schüler:in c		✓	✓	✓
Schüler:in d		✓	✓	✓
Schüler:in e		✓	✓	✓
Schüler:in f		✓	✓	✓
Schüler:in g	✓	✓	✓	✓(!)
Schüler:in h	✓	✓	✓	✓
Schüler:in i		×	✓	✓
Schüler:in j		✓	✓	
Fazit	3 (✓)	9 1 (✓) (×)	10 (✓)	9 (✓)

Tabelle 10: Auswertung von Station 4

Die Ergebnisse der Aufgaben 2-4 sind sehr erfolgreich ausgefallen. Bei Beispiel 1 wurden

die Experimente zwar durchgeführt, jedoch haben die meisten Schüler:innen keine Antwort oder Bemerkung in das Feld Aufgabe 1 geschrieben.

Da die meisten Schüler:innen sonst alle anderen Beispiele ausgefüllt haben, wird vermutet, dass die Frage nach dem Experiment überlesen wurde. Deshalb wurde entschieden, dass die Fragestellung aus Aufgabe 1 nur optisch besser hervorgehoben wird. Die beiden Versionen vor und nach der Änderung sind in Tabelle 11 dargestellt.

Alte Version
Aufgabe 1 (E): [Gruppenarbeit 3-4 Personen] Im Jahr 2024 gab es auf den Sozialen Plattformen wie TikTok und YouTube den Trend der „Twin Telepathy Challenge“ . Falls du diesen Trend verpasst hast, recherchiere kurz auf YouTube wie die Challenge funktioniert. Sucht euch gemeinsam fünf Anweisungen oder Fragen aus und filmt eure Reaktionen. Nenne eine Superkraft, die der Mensch bräuchte, um die „Twin Telepathy Challenge“ erfolgreich meistern zu können.
Neue Version
Aufgabe 1 (E): [Gruppenarbeit 3-4 Personen] Im Jahr 2024 gab es auf den Sozialen Plattformen wie TikTok und YouTube den Trend der „Twin Telepathy Challenge“ . Falls du diesen Trend verpasst hast, recherchiere kurz auf YouTube wie die Challenge funktioniert. Sucht euch gemeinsam fünf Anweisungen oder Fragen aus und filmt eure Reaktionen. Fragestellung: Nenne eine Superkraft, die der Mensch bräuchte, um die „Twin Telepathy Challenge“ erfolgreich meistern zu können.

Tabelle 11: Überarbeitung von Aufgabe 1 aus Station 4

Einige Schüler:innen, welche sich Notizen zu Aufgabe 1 gemacht haben, gaben eine unerwartete Antwortmöglichkeit an. Da die Antworten jedoch sinnvoll und richtig sind und die weiteren Aufgabenstellungen nicht negativ beeinflussen, wurde die volle Punktezahl vergeben und das Beispiel nicht weiter verändert.

Nachdem bei der Auswertung keine falschen Schüler:innenvorstellungen erkennbar waren, ist die Station nicht weiter abgeändert worden.

4.2.5 Station 5

Die Auswertung der einzelnen Aufgaben aus Station 5 lassen sich aus der Tabelle 12 herauslesen.

Station 5: Quantenspiel			
	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3
Schüler:in A	✓	✓	✓
Schüler:in B	✓	✓	✓
Schüler:in C	✓	~	✓
Schüler:in D	✓	~	✓
Schüler:in E	✓	✓	
Schüler:in F	×	✓	✓
Schüler:in G	✓	✓	
Schüler:in H	✓	✓	
Schüler:in I	✓	✓	
Schüler:in J	✓		
Schüler:in K	×	✓	×
Fazit	9 2 (✓) (×)	8 2 (✓) (~)	5 1 (✓) (×)

Tabelle 12: Auswertung von Station 5

Die Aufgabe 1 und 2 haben überwiegend gut funktioniert.

Das Beispiel 3 haben jedoch viele Schüler:innen nicht ausgefüllt. Das könnte den Grund haben, dass das nachvollziehen der quantenmechanischen Gewinnstrategie beim Münzspiel sehr abstrakt und mathematisch ist.

Darüber hinaus sind bei der Auswertung der Aufgabe 3 zwei schriftliche Aussagen von Schüler:innen A und B aufgefallen. In der Aufgabe sollten die Schüler:innen reflektieren, ob eine Gewinnstrategie, bei der eine Superposition von zwei Zuständen erzeugt wird, realistisch erscheint. Dabei schreibt Schüler:in A „Nein. Das geht nur in der Quantenwelt.“ (vgl. Anhang B) und Schüler:in B meint dazu „nur in der Quantenwelt möglich“ (vgl. Anhang B).

Die Aussagen lassen vermuten, dass Schüler:innen die „Welt der physikalischen Theorie und der realen Welt“ (Duit & Hopf & Schecker & Wilhelm, 2018, S.230) bezogen auf die Quantenmechanik nicht miteinander vereinen können.

fünf von elf Schüler:innen haben die Aufgabe trotzdem sinnvoll bearbeiten können. Da es zu dieser Aufgabe bei der Erprobung kein Hilfskärtchen für Denkanstöße gegeben hat, wurde entschieden ein Hilfskärtchen hinzuzufügen. Die Aufgabenstellung wurde daher nicht verändert, sondern nur um eine Hilfestellung erweitert.

Das neue Hilfskärtchen für die Aufgabe 3 kann in Tabelle 13 betrachtet werden.

(S5) Hilfskärtchen zu Aufgabe 3:
Sei dir bewusst, dass die quantenmechanische Gewinnstrategie nur mit Quantenteilchen funktioniert.

Frage 1: Was bedeutet das für eine klassische Münze, die du beim Münzspiel in der Hand hältst? Kann man hierbei diese Gewinnstrategie anwenden?

Aber beachte, dass wir auch schon Quantencomputer besitzen. Stell dir vor du spielst das Münzspiel mit deinem Freund über den Quantencomputer.

Frage 2: Scheint dann die quantenmechanische Gewinnstrategie realisierbar?
(Tipp: Falls du dir noch unsicher bist, was ein Quantencomputer ist und wie er funktioniert, recherchiere kurz im Internet!)

Tabelle 13: Hilfskärtchen zu Aufgabe 3 aus Station 5

4.2.6 Station 6

Die Auswertung der einzelnen Stationen sind in Tabelle 14 ersichtlich.

Station 6: Schrödingers Katze					
	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4	Bonusaufgabe
Schüler:in 001	✓	✓	~	✓	
Schüler:in 002	✓	✓		~	
Schüler:in 003	✓	✓	✓		
Schüler:in 004	✓	✓	×	✓	✓
Schüler:in 005	✓	✓	✓(!)	✓(!)	✓
Schüler:in 006	✓	✓	×		
Schüler:in 007	✓	✓	✓	✓	
Schüler:in 008	✓	✓	✓	✓	✓
Schüler:in 009	✓	✓	✓	✓	✓
Schüler:in 010	✓	✓	✓	✓	✓
Schüler:in 011	✓	✓	×	✓	✓
Fazit	11 (✓)	11 (✓)	6 1 3 (✓) (~) (×)	8 1 (✓) (~)	6 (✓)

Tabelle 14: Auswertung von Station 6

Die Beispiele 1, 2, 4 und Bonus wurden von der Mehrheit der Schüler:innen richtig beantwortet.

Bei der Aufgabe 3 haben mehr als die Hälfte eine sinnvolle Hypothese aufstellen können.

Da nach der Aufgabe das Thema erst richtig vertieft wird und in Frage 4 nochmals inkludiert ist, wird die Fragestellung beibehalten.

4.2.7 Stationen-Pass

Nach der Erprobung hat sich gezeigt, dass einige Stationen doch schwerer zu bearbeiten sind als vorher gedacht. Da die Stationen 3, 4 und 6 die erfolgreichsten waren, wurde entschieden, dass das Niveau für die Stationen 3 und 4 auf dieselbe Stufe wie Station 6, die niedrigste Niveaustufe, herabgestuft wird.

Die Station 1 war zu einfach eingestuft und wird deshalb auf die mittlere Schwierigkeitsstufe, so wie bei Station 5, angehoben. Bei Station 2 musste bezüglich der Niveaustufe keine Änderung vorgenommen werden.

5 Leitfaden für Lehrpersonen

In diesem Kapitel wird eine kurze Übersicht gegeben, wie die Stationen aufgebaut sind und was in der Vorbereitung zu beachten ist.

5.1 Aufbau der Stationen

Die Stationen sind für unterschiedliche Schulstufen bearbeitbar, da für jede Station ein anderes Vorwissen benötigt wird. Die Empfehlung, ab welchen Schulstufen die einzelnen Stationen bearbeitbar sind, findet sich bei jeder einzelnen Station in Kapitel 3 unter dem Punkt Vorwissen und Key Ideas. Die ungefähre Bearbeitungsdauer der einzelnen Stationen sind im Stationen-Pass im Kapitel 3.7.1 angeführt. Diese sind nur eine Empfehlung, weshalb beachtet werden muss, dass einzelne Schüler:innen etwas mehr Zeit brauchen könnten.

Grundsätzlich sollte der Stationenbetrieb, dank des Zusatzmaterials der gestuften Hilfen, von den Schüler:innen selbstständig bearbeitbar sein. Für den Fall, dass Schüler:innen einzelne Fachwörter nicht verstehen, gibt es noch zusätzlich Begriffskärtchen zum Nachlesen.

Falls sich Lehrpersonen über das Thema der Station informieren wollen, ist die Möglichkeit in dem Unterkapitel 3 im Punkt Fachwissen gegeben. Darin wird das Fachwissen, welches in der Station behandelt wird kurz und übersichtlich erklärt.

5.2 Zusätzlich benötigtes Material

Zusätzlich zu den Stationen, die man im Kapitel Anhang findet, benötigt man Scheren zum Ausschneiden und Musterbeutelklammern, sowie Kleber zum Basteln. Weiters ist die Verwendung eines Laptops oder eines Computers für zwei Aufgaben erforderlich. Damit kann die Simulation in Station 2 geöffnet werden sowie auch der Quantencomputer in Station 4 ausprobiert werden. Die Simulation wurde ausgewählt, damit der Stationenbetrieb für alle Schulen bearbeitbar ist. Falls das benötigte Equipment für Experimente mit Polarisationsfiltern in der Schule vorhanden ist, kann dadurch die Simulation ersetzt werden.

6 Diskussion

In dieser Arbeit wurde ein Stationenbetrieb zur Quantenphysik für die AHS erarbeitet. Dieser soll den Physik- und Mathematiklehrkräften sowie auch fachfremden Supplierlehrkräften als Unterstützung für den Unterricht bereitgestellt werden.

Der Betrieb behandelt dabei jedoch nicht die gesamten Forderungen, welche der Lehrplan an den Unterricht zur Quantenmechanik fordert. Die Pflichtstationen eignen sich zur Einführung in die Quantenmechanik. Bei den Wahlstationen gehen einige Inhalte der Stationen auch über die Forderungen des Lehrplans hinaus. Ein Teil des Betriebs dient der Vertiefung, wohingegen der andere Teil Alltagsanwendungen von Quanteneigenschaften zeigt.

Das Ziel der Arbeit ist es, dass Schüler:innen in der Lage sind den Stationenbetrieb eigenständig zu bewältigen. Die einzelnen Stationen sollen auf dem Vorwissen der Schüler:innen aufbauen und somit den niedrigeren Schulstufen eine Einführung in die Quantenmechanik ermöglichen sowie den höheren Schulstufen eine Vertiefung in die Thematik bieten.

Wegen der hohen Abstraktheit des Themas wurden Alltagsanwendungen und Erklärungen anhand von makroskopischen Objekten hinzugefügt. Die Alltagsanwendungen sollen jedoch auch die Wichtigkeit der Quantenphysik für die Gesellschaft hervorheben.

Zur Unterstützung für die Schüler:innen wurde zusätzlich die Methode der gestuften Hilfen verwendet. In einer Klasse, wo die Hilfskärtchen am Lehrertisch platziert wurden, haben die Schüler:innen keinen Gebrauch davon gemacht. Durch eine Verteilung der Stationen und Hilfskärtchen im gesamten Klassenzimmer hat die Verwendung besser funktioniert. Das könnte einerseits daran liegen, dass die Schüler:innen durch das nach vorne kommen zum Lehrertisch ungewollt kurz im Fokus der Lehrperson stehen. Ande-

rerseits wollen auch einige möglicherweise nicht den Eindruck erwecken, dass sie nur die Lösung abschreiben.

Mit Hilfe einer Erprobung durch vier Schüler:innengruppen wurde jede Stationen von mindestens zehn Schüler:innen bearbeitet. Dadurch konnte eine Auswertung von den Antworten der Schüler:innen erfolgen, welche gezeigt hat, dass einige Stationen eine Änderung benötigen.

Einige Aufgaben wurden trotz weniger Schüler:innenantworten nicht verändert, da diese als Differenzierung dienen.

Die Erprobung von der ersten Station hat gezeigt, dass der größte Teil der Schüler:innen in der Lage war die Aufgaben 1, 2, 3, 5 vollständig und sinnvoll zu bearbeiten. Das bestätigt, dass die Aufgaben passend für die 8. Schulstufe heruntergebrochen wurden. Bei der Auswertung ist die Aufgabe 4 herausgestochen, da diese von den meisten Schüler:innen nicht wie erwartet beantwortet wurde. Teilweise schien es so, als ob es den Schüler:innen schwer gefallen ist, sich eine Meinung zur Sicherheit der Caesar-Verschlüsselung zu bilden. Einige widersprüchliche Aussagen bei den Antworten der Schüler:innen machten die Auswertung etwas schwierig. Um diese Schwierigkeiten in Zukunft bei der Verwendung der Station zu vermeiden, wurde ein Beispiel als Denkanstoß für die Schüler:innen hinzugefügt. Die Hoffnung ist, dass die Schüler:innen damit ihre Meinungen auf ein konkretes Beispiel anwenden und besser verschriftlichen können. Dieser Tipp soll Schüler:innen, welche bei der Aufgabe Schwierigkeiten haben, in eine mögliche Denkrichtung leiten.

Bei der zweiten Station hat die Auswertung gezeigt, dass zwei Aufgaben von weniger als der Hälfte der Schüler:innen bearbeitet wurden. Dies lässt darauf schließen, dass entweder die Aufgabenstellungen schwieriger zu bearbeiten waren oder der Input der Station zu schwierig für die meisten Lernenden war. Schon bei der Erstellung wurde die Station mit der höchsten Schwierigkeitsstufe bewertet und als Vertiefungs- und Differenzierungsmöglichkeit für leistungsstärkere oder interessierte Schüler:innen gesehen.

Die erstere der beiden Problemaufgaben wurde so interpretiert, dass die Schüler:innen nicht mit der Offenheit des Experimentierbeispiels zurechtgekommen sind. Aus diesem Grund wurde das Experimentieren mehr angeleitet und präzisere Fragestellungen formuliert.

Die letzte Aufgabe wurde nicht verändert, da die Abstraktheit und die Anwendung von Mathematik notwendig war, um den Sachverhalt korrekt darzulegen.

Die Erprobung der Station 3 hat gezeigt, dass alle Aufgaben sehr gut mit der Unterstützung der Hilfskarten zu bearbeiten sind. Das hatte zur Folge, dass die Station als Ganzes übernommen wurde.

Auch die vierte Station war mit Ausnahme von einer Aufgabe sehr erfolgreich. Diese ei-

ne Aufgabe wurde jedoch von vielen Schüler:innen nicht ausgefüllt. Die Aufgabe besteht neben einer Fragestellung zusätzlich noch aus einer Aktivität. Das wird als ein möglicher Grund dafür angesehen, dass die Schüler:innen die Fragestellung überlesen haben und deshalb nicht ausgefüllt haben. Zur Verbesserung der Aufgabe wurde die Fragestellung in der neuen Version optisch hervorgehoben.

Die Probedurchführung bei Station 5 hat hervorgebracht, dass mehr als die Hälfte der Schüler:innen Schwierigkeiten mit Aufgabe 3 hatten. Dabei wurden die Schüler:innen befragt, ob sie eine quantenmechanische Spielstrategie für umsetzbar halten. Bei der Auswertung sind einige sehr interessante Schüler:innenantworten, die nicht erwartet wurden, gekommen. Diese Meinungen hatten jedoch trotzdem einen richtigen Kern, weshalb sie richtig gewertet wurden. Da sehr interessante Antworten kamen, aber dennoch mehr als die Hälfte die Aufgabe nicht bearbeitet hat, wurde entschieden nicht die Aufgabe zu ändern, sondern ein Hilfskärtchen hinzuzufügen. Dieses soll Schüler:innen, welche sich auch eine ähnliche Meinung zur Aufgabe bilden können, nicht zu beeinflussen und den anderen Lernenden eine Chance geben das Beispiel beantworten zu können.

Schrödingers Katze war bei dem Probedurchlauf auch sehr erfolgreich. Das hat nicht nur gezeigt, dass die Station bearbeitbar ist, sondern auch für die passende Schulstufe eingestuft wurde. Auch die Anzahl der ausgefüllten Aufgaben lässt darauf schließen, dass der Stationenbetrieb eigenständig von Schüler:innen zu bearbeiten ist.

Als Fazit kann über die Erprobung gesagt werden, dass sie im Großen und Ganzen gut funktioniert hat und es nur wenige Schüler:innen gab, welche die Lösungen abgeschrieben haben. Die Ergebnisse zeigen, dass der Betrieb für die vorgeschlagenen Schulstufen geeignet ist.

Die Schüler:innen haben während der Bearbeitung keine Fragen bezüglich des fachlichen Inhaltes der Stationen gestellt, obwohl sie die Möglichkeit dazu gehabt hätten. Das spricht für die Eigenständigkeit des Stationenbetriebs mit gestuften Hilfen, so wie die Methode es in der Literatur von Schmidt-Weigand, Franke-Braun und Hänze verspricht (vgl. Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M., 2013, S.369). Dadurch dass die Lehrkraft zu keinem fachlichen Inhalt der Stationen befragt wurde, hätte stattdessen eine fachfremde Supplierkraft mit den Testklassen höchstwahrscheinlich dieselben Ergebnisse erzielen können.

Die Stationen 3, 4, 6 haben die höchste Erfolgsquote, weshalb das eingestufte Niveau auf Stufe 1 herabgesetzt wurde. Mit einem kleinen Abstand folgen darauf die Stationen 1 und 5, welche ein Schwierigkeitsniveau von 2 von 3 Punkten haben. Am schlechtesten haben die Schüler:innen die Station 2 bearbeiten können, weshalb diese die höchste Schwierigkeitsstufe (3 von 3) bekommen hat.

Die Untersuchungen zur Bearbeitbarkeit des Stationenbetriebs beschränken sich auf mindestens zehn Personen pro Station. Für genauere Aussagen über den Stationenbetrieb könnten weitere Forschungsmaßnahmen wie z.B. eine größere Schüler:innenanzahl oder ein anderer Schultyp herangezogen werden. Zusätzliche Interviews oder Fragebögen könnten einen Überblick über den tatsächlichen Lernzuwachs zeigen oder einen besseren Einblick über die Schüler:innenvorstellungen geben. Inhaltlich beschränkt sich diese Arbeit nur auf ausgewählte Themen der Quantenmechanik, die zu ersten Berührungspunkten oder einer Vertiefung von „Besonderheiten der Quantenwelt“ (RIS, 2025) führen. Stationen, welche die gesamte Quantenphysik, wie sie im Lehrplan vorgesehen ist, behandeln, hätten zusätzlich zu den jetzigen Stationen den Rahmen der Arbeit gesprengt. Nichtsdestotrotz stellt die aktuelle Version des Stationenbetriebs eine gute Grundlage dar, um eventuell mit einem anderen Stationenbetrieb über die Quantenmechanik verbunden zu werden.

7 Fazit

Der Stationenbetrieb ist vollständig und ohne Hilfe der Lehrkraft zu bearbeiten. Das macht die Stationen für eine Anwendung bei wenig Vorbereitungszeit oder für Suppliestunden geeignet. Durch die Erprobung mit verschiedenen Klassen hat sich außerdem gezeigt, dass die Eignung von einigen Stationen bezüglich einer niedrigeren Schulstufe bestätigt werden konnte.

Für die Erprobung wurden vier Schulstufen (8, 10, 11, 12) herangezogen. Nach der Erprobung wurden die Antworten der Schüler:innen auf Richtigkeit, Missverständnisse und falsche Schüler:innenvorstellungen untersucht.

Die erste Station behandelt die Caesar Verschlüsselung, welche Nachrichten mit Hilfe einer Verschiebung im Alphabet verschlüsselt. In der Station wird die Sicherheit von Verschlüsselungen besprochen und dann auf die Quantenkryptographie übergeleitet. Bei der Auswertung der Erprobung hat sich herausgestellt, dass viele Aussagen der Schüler:innen widersprüchlich waren. Daher wurde die Aufgabenstellung um einen Tipp erweitert, der den Schüler:innen bei der Beurteilung helfen soll.

In der zweiten Station wird der Bra-Ket Formalismus bezüglich der Polarisierung von Licht eingeführt. Die Schüler:innen lernen zuerst den Begriff der Polarisierung durch ein experimentelles Umfeld kennen. Danach soll der Bra-Ket Formalismus als mathematisches Hilfsmittel eingeführt werden, um die Polarisierungsexperimente nachvollziehen zu können. Diese Station ist absichtlich herausfordernd, vertiefend und differenzierend. Bei der Testung hat sich jedoch herausgestellt, dass viele Schüler:innen mit dem Ex-

perimentierteil, auf das die gesamte Station aufbaut, Probleme haben. Deshalb wurde entschieden das Experiment in der Aufgabenstellung mehr anzuleiten.

Durch die Bellsche Ungleichung in der dritten Station werden Schüler:innen über die Sicherheitsüberprüfung bei der Schlüsselübertragung mit verschränkten Quanten aufgeklärt. Es wurde die Wigner und d’Espagnat Form der Bellschen Ungleichung vorgestellt, was zu einer guten Bearbeitbarkeit durch die Schüler:innen führte. Wegen der hohen Erfolgsquote wurde keine Aufgabe verändert.

Die vierte Station führt den Begriff der Verschränkung ein und nennt quantenmechanische Anwendungen. Nach der Durchführung des Betriebs wurde ersichtlich, dass die Fragestellung in Aufgabe 1 von Schüler:innen überlesen wurde, weshalb das Beispiel optisch verändert wurde.

Das vorletzte Beispiel der Station ist darauf ausgelegt, Schüler:innen auf der Basis eines quantenmechanischen Münzspiels zu zeigen, wie Eigenschaften von Quanten die Gewinnstrategien beeinflussen könnten. Dabei ist nach der Bewertung aufgefallen, dass Schüler:innen die Quantenmechanik von unserer realen Welt trennen. Daher wurde ein Hilfskärtchen hinzugefügt, welches die Schüler:innen darauf hinweisen soll, dass bereits Maschinen existieren, welche quantenmechanische Eigenschaften nutzen.

Die Auswertungen der letzten Station hat auch bestätigt, dass das Vorwissen der Schüler:innen gut eingeschätzt worden ist. Dabei wird das Gedankenexperiment von Schrödingers Katze erzählt, welches die Abstraktheit der Quantenmechanik anhand eines makroskopischen Beispiels zeigt. Genauer werden Tatsachen der Quantenmechanik mit denen des Makrokosmos gegenübergestellt und die Unterschiede herausgearbeitet. Um die Geschehnisse den Schüler:innen plausibler zu machen, wird der Begriff der Dekohärenz eingeführt.

Die Erprobung hat gezeigt, dass trotz guter Vorbereitung dennoch falsche Schüler:innenvorstellungen entstehen können. Doch durch die Testung war es möglich die Antworten der Schüler:innen gemeinsam mit den Aufgabenstellungen zu reflektieren, um den Betrieb optimieren zu können.

Die Schwierigkeitsstufen von Station 3 und 4 wurden heruntergesetzt, da diese zu einfach eingestuft wurden. Bei Station 1 war genau das Gegenteil der Fall, wo das Niveau hinaufgesetzt werden musste.

Die Erprobung mit mindestens zehn Schüler:innen pro Station hat gezeigt, dass die Aufgaben, dank der Methode der gestuften Hilfen, selbstständig zu bearbeiten sind.

Weiterführende Forschungen könnten den Betrieb noch mehr optimieren und eine Einsicht auf die Schüler:innenvorstellungen geben. Weitere mögliche Erweiterungen könnten Interviews, Tests oder Fragebögen darstellen. Diese könnten z.B. mit mehreren Schü-

ler:innen, anderen Schultypen oder Schulstandorten durchgeführt werden.

Abbildungsverzeichnis

1	Verschlüsselung einer Nachricht	11
2	Entschlüsselung einer Nachricht	11
3	Chiffrierscheibe (Universität Wien, 2023)	14
4	Skizze von unpolarisiertem und polarisiertem Licht (Heidorn, o.D.)	20
5	Skizze des Versuchsaufbaus (Heidorn, o.D.)	23
6	Beweis der Bell Ungleichung in Form von Winter und d’Espagnat (vgl. Embacher, 2000)	29
7	Vorlage zum Beweis der Bellschen Ungleichung in Wigner und d’Espagnat Form (eigene Darstellung(vgl. Embacher, 2000))	31
8	Beweis der Bellschen Ungleichung (eigene Darstellung)	32
9	Beweis der Bellschen Ungleichung (eigene Darstellung)	33
10	Skizze von unpolarisiertem und polarisiertem Licht (Heidorn, o.D)	34
11	Der Aufbau einer MRT Maschine (Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.)	36
12	Aufbau eines MRTs (Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.)	40
13	Prinzip eines MRTs (Technische Hochschule Mittelhessen, o.D.)	40
14	Schrödingers Gedankenexperiment (Elstner, 2021, S.352)	56
15	Gedankengänge der Alltagswelt vs. Quantenwelt	58
16	Skizze von unpolarisiertem und polarisiertem Licht (Heidorn, o.D)	62

Tabellenverzeichnis

1	Gewinnchancen beim klassischen Münzspiel	46
2	Die Gewinnstrategie	50
3	Spieltabelle	51
4	Superposition	57
5	Auswertung von Station 1	65
6	Überarbeitung von Aufgabe 4 aus Station 1	66
7	Auswertung von Station 2	67
8	Überarbeitung von Aufgabe 2 aus Station 2	68
9	Auswertung von Station 3	69
10	Auswertung von Station 4	69
11	Überarbeitung von Aufgabe 1 aus Station 4	70
12	Auswertung von Station 5	71

13	Hilfskärtchen zu Aufgabe 3 aus Station 5	72
14	Auswertung von Station 6	72

Literatur

- [1] 100SekundenPhysik. (2015, 27.Dezember). Schrödingers Katze [Video]. YouTube. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=bitYXYlmT2Y>. Abgerufen am: 31.12.2024.
- [2] Austrian Institute of Technology. (2022). Quantentechnologie basiert auf Nobelpreiswürdigem Wissen. Link: <https://www.ait.ac.at/blog/gut-verschluesselt-mit-hilfe-vonquanten>. Abgerufen am: 03.01.2025.
- [3] Barz, H. (2018). Handbuch Bildungsreform und Reformpädagogik (1st ed. 2018.). Springer Fachmedien Wiesbaden: Imprint: Springer VS.
- [4] Beutelspacher, A. (2015). Kryptologie: Eine Einführung in die Wissenschaft vom Verschlüsseln, Verbergen und Verheimlichen (10., aktualisierte Aufl. 2015). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [5] Caltech. (2024). Was ist Superposition und warum ist sie wichtig?. Link: <https://scienceexchange.caltech.edu/topics/quantum-science-explained/quantumsuperposition>. Abgerufen am: 31.12.2024
- [6] CAMPUS 02 Fachhochschule der Wirtschaft. (2019). LEHR- UND LERNMETHODEN. Stationenbetrieb. Link: <https://www.campus02.at/hochschuldidaktik/lehrmethoden/stationenbetrieb/>. Abgerufen am: 03.04.2025.
- [7] Duden. (2025). Experiment, das. Link: <https://www.duden.de/node/43603/revision/1446156>. Abgerufen am: 14.01.2025.
- [8] Duit, R., Hopf, M., Schecker, H., Wilhelm, T. (2018). Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. Springer Spektrum.
- [9] Ellerhoff, B. M. (2020). Mit Quanten rechnen : Quantencomputer für Neugierige (1st ed. 2020). Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Spektrum.
- [10] Elstner, M. (2021). Physikalische Chemie II: Quantenmechanik und Spektroskopie. Springer Spektrum.
- [11] Embacher, F. (2000). EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung. Link: <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/EPR/>. Abgerufen am: 17. November 2024.

- [12] Embacher, F. (o.D.). Verschränkung für Nicht-PhysikerInnen. Link: <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/Verschraenkung/>. Abgerufen am: 01.01.2025.
- [13] Filk, T. (2019). Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende. Springer Spektrum.
- [14] Fohr, T. (2020). Integrierte Sprachbildung im Fach Kunst: Eine Studie zur Sekundarstufe I, Klasse 5. De Gruyter Mouton.
- [15] Fürtbauer, E. M., Herbst, M., Strahl, A. (2016). Interesse an Physik - in Salzburg. PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung. Link: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/682>. Abgerufen am: 03.04.2025.
- [16] Goebbels, S., & Ritter, S. (2023). Normierte Vektorräume: Lineare Algebra trifft Analysis. In Mathematik verstehen und anwenden: Differenzial- und Integralrechnung, Lineare Algebra. Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Heidorn, D. (o.D.). 3.Licht. Link: http://www.dieter-heidorn.de/Physik/SS/K09__EMWellen/K3_Licht/K3_Licht.html. Abgerufen am: 12.01.2025.
- [18] Hochschule Luzern. (25.06.2024). Quantenkryptographie einfach erklärt. [Video]. YouTube. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=nEGHC24Lajs>. Abgerufen am: 07.01.2025.
- [19] IBM. (o.D.). Qiskit. Link: <https://www.ibm.com/quantum/qiskit>. Abgerufen am: 14.01.2025.
- [20] Jäkel, L. (2021). Faszination der Vielfalt des Lebendigen - Didaktik des Draußen-Lernens (1st ed. 2021). Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Spektrum.
- [21] Kacser, C. (1970). Einführung in die spezielle Relativitätstheorie. Berliner Union.
- [22] Korff, S., & Heering, P. (2022). Das Geiger-Müller Zählrohr. In Kanonische Experimente der Physik. Springer Berlin Heidelberg.
- [23] Leimeister, J. M. (2021). Einführung in die Wirtschaftsinformatik (13th ed. 2021). Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Gabler.
- [24] Lüth, H. (2009). Quantenphysik in der Nanowelt: Schrödingers Katze bei den Zwergen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- [25] Manz, O. (2019). Verschlüsseln, Signieren, Angreifen : Eine kompakte Einführung in die Kryptografie (1st ed. 2019). Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Spektrum.
- [26] Meyer, D. A. (1999). Quantum Strategies. Physical Review Letters, 82(5), 1052–1055. Link: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.1052> . Abgerufen am: 28.12.2024.
- [27] Müller, R. (o.D.). Dekohärenz - vom Erscheinen der klassischen Welt. Link: www.milq.info/data/_uploaded/Downloads/Lehrgang/milq_kap6_info_IT6_dekohaerenz.pdf. Abgerufen am: 08.November.2024.
- [28] ÖAW. (2023). Alltagstauglicher Quantenschlüsselaustausch über den Dächern Wiens. Link: <https://www.oeaw.ac.at/news/alltagstauglicher-quantenschluesselaustauschueber-den-daechern-wiens-2>. Abgerufen am: 02.01.2025.
- [29] Pade, J. (2024). Quantenmechanik zu Fuß : Anwendungen und Erweiterungen. Band 2 (2. Auflage). Springer Spektrum.
- [30] Paetz gen. Schieck, H. (2020). Spin - Was Ist das Eigentlich?: Ein Abstrakter Quantenmechanischer Begriff, Experimentelle Nachweise und Anwendungen (First edition.). Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- [31] Perkowitz, S. (2020). Gedankenexperiment. Link: <https://www.britannica.com/science/Gedankenexperiment>. Abgerufen am: 31.12.2024.
- [32] Pospiech, G. (2021). Quantencomputer & Co : Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformation verständlich erklärt (1st ed. 2021). Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Spektrum.
- [33] Quantinger, A. (o.D.). Verschränkung - ein Quantenrätsel für jedermann. Link: https://www.oeaw.ac.at/fileadmin/Institute/IQOQI-Vienna/PDF/publications-zeilinger/2005_-_Aus_den_ElfenbeintA__rmen__der_Wissenschaft_-_VerschrN__nkung_-_Ein_QuantenrN__tsel_fA__r__jedermann.pdf. Abgerufen am: 03.01.2025
- [34] RIS. (2025, 11.Februar). Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 11.02.2025. Link: www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568. Abgerufen am: 11.02.2025.

- [35] Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., & Duit, R. (2018). Schülervorstellungen und Physikunterricht : Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis (1st ed. 2018.). Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer Spektrum.
- [36] Scherer, W. (2016). Mathematik der Quanteninformatik. Eine Einführung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [37] Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M. (2013). Erhöhen gestufte Lernhilfen die Effektivität von Lösungsbeispielen? Unterrichtswissenschaft, 4, 365–383. Link: <https://doi.org/10.3262/UW0804365>. Abgerufen am: 10.02.2025.
- [38] Schmüser, P. (2012). Theoretische Physik für Studierende des Lehramts. 1, Quantenmechanik. Springer Spektrum.
- [39] Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. Die Naturwissenschaften. Link: http://www.fisicafundamental.net/relicario/doc/SituationinderQuantenmechanik_Schrodinger.pdf. Abgerufen am: 31.12.2024.
- [40] Slama, S. (2020). Experimentalphysik kompakt für Naturwissenschaftler : Mechanik, Thermodynamik, Elektrodynamik, Optik & Quantenphysik (2nd ed. 2020). Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Spektrum.
- [41] Stegen, R. (2020). Wahrscheinlichkeit - Mathematische Theorie und Praktische Bedeutung : Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung Hinterfragt (First edition.). Springer Spektrum.
- [42] Technische Hochschule Mittelhessen. (o.D.). Magnetresonanztomographie (MRT). Link: <https://www.thm.de/mni/forschung/institute-gruppen/imps/imps-strahlungsinformation/radiologie/modalitaeten/magnetresonanztomographie-mrt.html>. Abgerufen am: 03.01.2025.
- [43] Technische Universität Braunschweig. (o.D.). milq. Quantenspiele. Link: <https://www.milq.info/spezialgebiete/quantenspiele/>. Abgerufen am: 29.12.2024
- [44] Technische Universität Braunschweig. (o.D.). 6. Messprozess. Eigenschaften von Elektronen und der quantenmechanische Messprozess. Link: www.milq.info/mehr/6-messprozess/. Abgerufen am: 06.November.2024.

- [45] Technische Universität Braunschweig. (o.D.). milq. Simulationsprogramme. Link: <https://www.milq.info/materialien/simulationsprogramme/>. Abgerufen am: 29.12.2024
- [46] Universität Freiburg. (2024). Kapitel 7. Link: https://physikdidaktik.uni-freiburg.de/wpcontent/uploads/2024/02/QM7_Bra-Ket.pdf. Abgerufen am: 12.01.2025.
- [47] Universität Wien. (10. Jänner. 2023). Chiffrierscheibe - Texte verschlüsseln. Link: https://mmf.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_mathematikmachtfreunde/Materialien/Experimentkaertchen/Knobeln_und_raetseln/D_Kryptographie.pdf. Abgerufen am: 27.12.2024.
- [48] Universität Wien. (21.02.2025). Anton Zeilinger, o. Univ.-Prof. Dr.. Link: <https://geschichte.univie.ac.at/de/personen/anton-zeilinger>. Abgerufen am: 05.03.2025.
- [49] Waldmann, S. (2017). Lineare Algebra 1 : Die Grundlagen für Studierende der Mathematik und Physik. Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Spektrum.
- [50] Weitz, E. (2021). Wahrscheinlichkeit. In Konkrete Mathematik (nicht nur) für Informatiker. Springer Berlin Heidelberg.
- [51] Werner, W. (2023). Hamiltonsche Mechanik und Quantenmechanik (1st ed. 2023). Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Vieweg.

Anhang

Anhang A: Überarbeitete Version des Stationenbetriebs

Dieser Anhang lässt sich unter folgendem Link finden:

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/15NahNzbcalyJ1ouN4aFg-ZYcEq9zKnHk>

Anhang B: Schüler:innenantworten aus der Erprobung

Dieser Anhang lässt sich unter folgendem Link finden:

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/15NahNzbcalyJ1ouN4aFg-ZYcEq9zKnHk>