



universität
wien

DISSERTATION

Titel der Dissertation

Gleichzeitigkeit in der Relativitätstheorie –
eine empirische Studie zu Lernprozessen
in der Sekundarstufe I

Verfasser

Mag. Herbert Wittmann

angestrebter akademischer Grad

Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 091 411

Dissertationsgebiet lt. Studienblatt: Physik

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Meinen Eltern

gewidmet, die mich immer unterstützt haben und mir eine Ausbildung zukommen haben lassen, die es mir ermöglichte, diese Arbeit zu schreiben.

Danksagung

Ich danke Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf für die großartige Betreuung bei der Erstellung dieser Arbeit. Er war mir durch seine ruhige und freundliche Art jederzeit eine große Hilfe und hat mir durch seine kompetenten und präzisen Hinweise immer den richtigen Weg gewiesen.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich allen SchülerInnen, die sich mir als InterviewpartnerInnen und „Versuchskaninchen“ zur Verfügung gestellt haben, die ich aber aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht namentlich nennen darf.

Weiters bedanke ich mich bei HR Dir. i. R. Dr. Gunther Petersch, Dir.ⁱⁿ Mag.^a Renate Siegl, Dir.ⁱⁿ Mag.^a Ursula Behoun und Mag.^a Susanne Neumann, ohne deren organisatorische Unterstützung die Arbeit in dieser Form nicht hätte entstehen können.

Ich danke Mag. Richard Klinghofer, dass er mich mit der nötigen technischen Ausstattung versorgt und mir beim Bändigen widerspenstiger Software geholfen hat. Außerdem bedanke ich mich bei Lukas Baronyai für den Aufbau diverser technischer Ausrüstungsgegenstände.

Des Weiteren danke ich Charles Anthony Oliveras, B. M., dass er mir geholfen hat, die Zusammenfassung ins Englische zu übersetzen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Der Stand der Forschung	3
2.1. Forschungsstand in der Physikdidaktik	3
2.1.1. Überblick über die Literatur	3
2.1.2. Zusammenfassung des Literaturüberblicks	13
2.2. Forschungsstand in der Lernpsychologie	14
2.2.1. Der Ansatz des Konzeptwechsels	14
2.2.2. Konstruktivistische Lerntheorien	17
2.3. Die Forschungsfrage	19
3. Forschungsmethode	21
3.1. Befragungen zu SchülerInnenvorstellungen	21
3.2. Teaching Experiment	24
4. SchülerInnenvorstellungen	27
4.1. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	27
4.1.1. Auswertung der Interviews zu Geschwindigkeitsaddi- on und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	30
4.1.2. Zusammenfassung	55
4.2. Gleichzeitigkeit	57
4.2.1. Auswertung der Interviews zur Gleichzeitigkeit	58
4.2.2. Zusammenfassung	81
4.3. Zeitdilatation	82
4.3.1. Auswertung der Interviews zur Zeitdilatation	85
4.3.2. Zusammenfassung	101
4.4. Längenkontraktion	102
4.4.1. Auswertung der Interviews zur Längenkontraktion	104
4.4.2. Zusammenfassung	123
4.5. Folgerungen für ein Unterrichtskonzept	124
5. Prototyp eines Unterrichtskonzepts	127
5.1. Die Wechsel der Konzepte	127

5.2.	Der Prototyp	128
5.2.1.	Einführendes Beispiel	128
5.2.2.	Die physikalischen Grundlagen	132
5.2.3.	Folgerungen aus den physikalischen Grundlagen	140
6.	Untersuchung der Wirksamkeit des Prototyps	147
6.1.	Erster Unterrichtsdurchgang	147
6.1.1.	Analyse des ersten Unterrichtsdurchgangs	147
6.1.2.	Revision nach dem ersten Unterrichtsdurchgang	170
6.2.	Zweiter Unterrichtsdurchgang	177
6.2.1.	Analyse des zweiten Unterrichtsdurchgangs	177
6.2.2.	Revision nach dem zweiten Unterrichtsdurchgang	206
6.3.	Dritter Unterrichtsdurchgang	214
6.3.1.	Analyse des dritten Unterrichtsdurchgangs	214
6.3.2.	Revision nach dem dritten Unterrichtsdurchgang	247
6.4.	Vierter Unterrichtsdurchgang	252
6.4.1.	Analyse des vierten Unterrichtsdurchgangs	252
6.4.2.	Revision nach dem vierten Unterrichtsdurchgang	285
6.5.	Fünfter Unterrichtsdurchgang	293
6.5.1.	Analyse des fünften Unterrichtsdurchgangs	293
6.5.2.	Revision nach dem fünften Unterrichtsdurchgang	329
6.6.	Querschnittanalyse des teaching experiment	335
6.6.1.	Einführendes Beispiel mit Lehrfilm <i>Gleichzeitigkeit</i>	335
6.6.2.	Inertialsysteme	337
6.6.3.	Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme	338
6.6.4.	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	341
6.6.5.	Lehrfilm <i>Gleichzeitigkeit</i>	345
6.6.6.	Die Lösung	348
6.6.7.	Beispiel	350
6.7.	Begriffsnetz in der Vorstellung der SchülerInnen	351
7.	Endversion des Unterrichtskonzepts	357
7.1.	Einführendes Beispiel	357
7.1.1.	Die galaktischen Spiele mögen beginnen	357
7.1.2.	Aufgabe für die SchülerInnen	359
7.1.3.	Lehrfilm <i>Gleichzeitigkeit</i>	359
7.1.4.	Aufgaben für die SchülerInnen	359
7.2.	Die physikalischen Grundlagen	360
7.2.1.	Inertialsysteme	360
7.2.2.	Aufgaben für die SchülerInnen	361

7.2.3.	Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme	361
7.2.4.	Aufgaben für die SchülerInnen	363
7.2.5.	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	364
7.2.6.	Aufgaben für die SchülerInnen	366
7.3.	Folgerungen aus den physikalischen Grundlagen	367
7.3.1.	Aufgaben für die SchülerInnen	367
7.3.2.	Die Lösung für das einführende Beispiel	367
7.3.3.	Aufgaben für die SchülerInnen	368
7.4.	Abschließendes Beispiel	369
7.4.1.	Feueralarm beim CERN	369
7.4.2.	Aufgaben für die SchülerInnen	369
8.	Interpretation	371
8.1.	Erprobung alternativer Erklärungsmodelle	371
8.1.1.	Relativitätsprinzip	371
8.1.2.	Berücksichtigung der Lichtlaufzeit	373
8.2.	Erprobung graphischer Ausdrucksmittel	373
8.3.	Weiterentwicklung des Unterrichtskonzepts	374
8.3.1.	Einbeziehung weiterer relativistischer Effekte	374
8.3.2.	Adaption für den Unterricht in einer Unterstufenklasse	375
8.3.3.	Adaption für den Unterricht in einer Oberstufenklasse	375
8.4.	Relativitätstheorie für die Unterstufe	379
9.	Zusammenfassung	381
10.	Kurzfassung	395
11.	Abstract	399
A.	Interviewleitfaden	405
A.1.	Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	405
A.2.	Gleichzeitigkeit	407
A.3.	Zeitdilatation	408
A.4.	Längenkontraktion	410
B.	Lebenslauf	413
C.	Publikationen	415
	Literaturverzeichnis	417

Abbildungsverzeichnis

4.1. Klassische Geschwindigkeitsaddition	27
4.2. Relativistische Geschwindigkeitsaddition	28
4.3. Relativistische Geschwindigkeitsaddition	29
4.4. Gleichzeitigkeit	57
4.5. Zeitdilatation	83
4.6. Zeitdilatation	83
4.7. Längenkontraktion	103
4.8. Längenkontraktion	103
5.1. Eröffnung der galaktischen Spiele	129
5.2. Bewegt sich Deep Space Nine?	134
5.3. Zwei äquivalente Situationen	136
5.4. Zwei äquivalente Situationen	142
6.1. Konvoi fliegt nach rechts.	167
6.2. Eröffnung der galaktischen Spiele	171
6.3. Moritz entfernt sich von Max.	174
6.4. Max kann das alles einholen und überholen.	175
6.5. Max und Licht	192
6.6. Max, Moritz und Licht	193
6.7. Konvoi fliegt nach links.	199
6.8. Lichtstrahl ist immer gleich schnell.	210
6.9. Feueralarm beim CERN	214
6.10. Max, Moritz und Radfaherin	229
6.11. Max, Moritz und Gewehrku­gel	229
6.12. Max, Moritz und Auto	230
6.13. Max, Moritz und Rakete	230
6.14. Max, Moritz und Lichtstrahl	232
6.15. Max, Moritz und Lichtstrahl	232
6.16. Konvoi fliegt nach rechts.	235
6.17. Max, Moritz und Radfaherin	268
6.18. Max, Moritz und Gewehrku­gel	269
6.19. Max, Moritz und Auto	270

6.20. Max, Moritz und Rakete	271
6.21. Max, Moritz und Lichtstrahl	271
6.22. Max, Moritz und Lichtstrahl	272
6.23. Konvoi fliegt nach links.	277
6.24. Konvoi fliegt mit 100 km/h.	278
6.25. Max, Moritz und RadfahrerIn	311
6.26. Max, Moritz und GewehrKugel	312
6.27. Max, Moritz und Auto	313
6.28. Max, Moritz und Rakete	314
6.29. Max, Moritz und Lichtstrahl	315
6.30. Max, Moritz und Lichtstrahl	316
6.31. Konvoi fliegt nach rechts.	317
6.32. Konvoi fliegt nach links.	319
6.33. Konvoi fliegt mit 100 km/h.	320
6.34. Begriffsnetz	355
7.1. Eröffnung der galaktischen Spiele	358
7.2. Bewegt sich Deep Space Nine?	362
7.3. Zwei äquivalente Situationen	363
7.4. Moritz entfernt sich von Max.	364
7.5. Max kann das alles einholen und überholen.	365
7.6. Lichtstrahl ist immer gleich schnell.	365
7.7. Zwei äquivalente Situationen	368
7.8. Feueralarm beim CERN	369
9.1. Begriffsnetz	391
A.1. Klassische Geschwindigkeitsaddition	405
A.2. Relativistische Geschwindigkeitsaddition	406
A.3. Relativistische Geschwindigkeitsaddition	406
A.4. Gleichzeitigkeit	407
A.5. Zeitdilatation	408
A.6. Zeitdilatation	409
A.7. Längenkontraktion	410
A.8. Längenkontraktion	411

Tabellenverzeichnis

3.1.	Dauer der Interviews in Minuten	22
3.2.	Anzahl der interviewten SchülerInnen zum Thema Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit . . .	23
3.3.	Anzahl der interviewten SchülerInnen zum Thema Gleichzeitigkeit	23
3.4.	Anzahl der interviewten SchülerInnen zu den Themen Zeitdilatation und Längenkontraktion	24
3.5.	Dauer der Unterrichtsdurchgänge in Stunden und Minuten . .	26

1. Einleitung

In meiner mehr als zehnjährigen Tätigkeit als Physiklehrer wurde ich von SchülerInnen zu kaum einem anderen Gebiet mit so großer Begeisterung befragt wie zur modernen Physik. Insbesondere Fragen zum Vergehen der Zeit, zur Raumkrümmung, zu schwarzen Löchern, zu Wurmlöchern und zum Beamen beschäftigen die SchülerInnen sehr – offenbar angeregt durch diverse Publikationen und Fernsehserien aus dem Bereich der Sciencefiction. Die SchülerInnen sind unter anderem am physikalischen Gehalt populärer Darstellungen moderner Physik und an anschaulichen Erklärungen unerwarteter, schwer vorstellbarer Phänomene sowie an den Grundprinzipien und den wesentlichen Aussagen moderner physikalischer Theorien interessiert. Diese hohe Motivation schafft eine gute Ausgangsbasis für den Unterricht der modernen Physik.

Leider habe ich trotz intensiver Suche kein Unterrichtsmaterial zur modernen Physik und keine populärwissenschaftlichen Darstellungen finden können, auf deren Basis die Fragestellungen der SchülerInnen für diese zufriedenstellend zu behandeln waren. Die einen Zugänge waren den SchülerInnen mathematisch zu sehr überfrachtet und in ihrer formalisierten Art sehr sperrig, sodass sie physikalisch Wesentliches nicht erkennen konnten. Die anderen Zugänge hatten die Tendenz, zu sehr in Geplauder zu zerfließen, sodass das physikalisch Wesentliche nicht zu erkennen war. Das führte bei den SchülerInnen zu einer gewissen Enttäuschung und bei mir zu Unzufriedenheit.

Darum habe ich mich entschlossen, im Zuge einer berufsbegleitenden, persönlichen Weiterqualifikation im Rahmen einer Dissertation Lernprozesse in einem Bereich der modernen Physik zu erforschen und adäquates Unterrichtsmaterial auf Basis einer empirischen, wissenschaftlichen Studie zu erstellen.

Da ich durch viele Diskussionen mit SchülerInnen den Eindruck gewonnen habe, dass diese vom nicht absoluten Vergehen der Zeit am meisten fasziniert sind, habe ich mich entschlossen, die Relativität der Gleichzeitigkeit zum Thema dieser Arbeit zu machen. Weil Fragen zum Vergehen der Zeit bereits bei SchülerInnen der Unterstufe (fünfte bis achte Schulstufe) auf großes Interesse stoßen, möchte ich in dieser Arbeit erforschen, ob es möglich ist, bereits ein für diese SchülerInnen geeignetes Unterrichtskonzept zur Relativität der Gleichzeitigkeit zu entwickeln.

Um einen Ausgangspunkt für diese Arbeit zu finden und den Forschungsstand

zu erheben, an dem ich anknüpfen kann, werden in Kapitel 2 die Erkenntnisse aus der Fachdidaktik und der Lernpsychologie zusammengetragen. Daraus entwickle ich die Forschungsfrage und leite erste Folgerungen für diese Arbeit und das angestrebte Unterrichtskonzept her.

In Kapitel 3 ist die verwendete Forschungsmethode dargelegt und das Forschungsdesign dokumentiert.

In Kapitel 4 werden das Vorwissen und die Vorstellungen von 13- und 14jährigen SchülerInnen zu Themenbereichen der speziellen Relativitätstheorie erhoben sowie die Bereitschaft dieser SchülerInnen getestet, relativistische Effekte zu akzeptieren, um eine empirische Basis für das angestrebte Unterrichtskonzept zu erhalten.

In Kapitel 5 erarbeite ich auf Basis der Interviewergebnisse sowie des Forschungsstandes in der Physikdidaktik und der Lernpsychologie den Prototyp eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit.

In Kapitel 6 wird in einem teaching experiment mit SchülerInnen der achten Schulstufe die Wirksamkeit des in Kapitel 5 entwickelten Prototyps eines Unterrichtskonzepts untersucht und die Akzeptanz von Erklärungsangeboten getestet.

In Kapitel 7 wird der in Kapitel 6 überarbeitete Prototyp als Endversion eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit zusammengefasst.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse dieser Arbeit in den Kontext der fachdidaktischen Forschung gestellt und die Relevanz dieser Ergebnisse für den praktischen Einsatz in der Schule diskutiert.

In Kapitel 9 werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

Kapitel 10 ist die Kurzfassung dieser Arbeit. Die englische Übersetzung der Kurzfassung findet sich in Kapitel 11.

2. Der Stand der Forschung

In diesem Kapitel gebe ich zunächst einen Überblick über den Stand der Forschung in der Physikdidaktik bezüglich der Relativitätstheorie und einen Überblick über den Stand der Forschung in der Lernpsychologie bezüglich des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Anschließend leite ich aus diesem Forschungsstand und dem in Kapitel 1 angedachten Vorhaben die Forschungsfrage her, mit der ich mich in dieser Arbeit auseinandersetzen möchte.

2.1. Forschungsstand in der Physikdidaktik

Bei der Sichtung der Fachliteratur stellte es sich heraus, dass es viele und umfangreiche Publikationen zu SchülerInnenvorstellungen gibt. Zum Thema Relativitätstheorie konnte ich trotz intensiver Recherche und ausführlicher Gespräche mit Experten nur wenige Veröffentlichungen finden.

2.1.1. Überblick über die Literatur

In [Hew82] wurde ein graduierter Tutor für den Physikunterricht von StudienanfängerInnen drei Mal interviewt. Im ersten Interview sollte herausgefunden werden, welche metaphysischen Vorstellungen der Tutor über die spezielle Relativitätstheorie hatte. Das zweite Interview wurde vier bis fünf Monate später geführt. Das Ziel dieser zweiten Befragung war es festzustellen, ob die Vorstellungen des Tutors stabil geblieben waren. Außerdem wurde eine direkte Intervention mit dem Ziel, diese Vorstellungen zu beeinflussen, durchgeführt. Das dritte Mal wurde der Tutor zehn Tage nach dem zweiten Interview befragt. Dabei wurde untersucht, ob es eine Änderung der Vorstellungen des Tutors aufgrund des zweiten Interviews gegeben hatte. Die Interviews wurden jeweils aufgezeichnet und anschließend analysiert.

Im ersten Interview legte der Tutor dar, wie er Aussagen der Theorie, die gegen die eigene Intuition verstoßen wie der verlangsamte Gang bewegter Uhren oder die Verkürzung bewegter Maßstäbe, sieht. Dann wurden dem Tutor zwei Aufgaben gestellt, die er laut denkend lösen sollte. Diese Aufgaben enthielten wesentliche Teile der Theorie wie die Funktionsweise der Lichtuhr und

deren Auswirkung auf das Konzept der Zeit sowie die Gleichzeitigkeit und die Synchronisierung voneinander entfernter Uhren. Daraufhin wurden dem Tutor schriftliche Erklärungen aus der Sichtweise zweier verschiedener Standpunkte vorgelegt. Anschließend wurde er gebeten, diese Standpunkte aus dem Gedächtnis zusammenzufassen. Während des ersten Interviews wurden keine Versuche unternommen, den Tutor zu unterrichten.

Im ersten Teil des zweiten Interviews wurden die wesentlichen Punkte des ersten Interviews wiederholt. Der Tutor wurde gebeten, diese zu diskutieren, damit festgestellt werden konnte, ob es in der Zwischenzeit eine Änderung in seinen metaphysischen Vorstellungen über die Theorie gegeben hatte. Im zweiten Teil des Interviews wurden dem Tutor einige Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie präsentiert und diese mit den Ergebnissen des ersten Interviews verglichen, um Unterschiede aufzuzeigen. Im Wesentlichen versuchte der Tutor, die Ergebnisse der speziellen Relativitätstheorie mit newtonschen Grundlagen in Einklang zu bringen. Deshalb wurde im Interview versucht zu zeigen, was man unter den einsteinschen Grundlagen verstehen sollte.

Zwischen dem zweiten und den dritten Interview hatte der Tutor zahlreiche Diskussionen mit den StudentInnen, die er unterrichtete. Außerdem traf er zwei Mal mit dem Interviewer zusammen, um Unklarheiten zu klären und Probleme, die sich im Unterricht ergeben hatten, zu diskutieren. Im dritten Interview wurden die wesentlichen Punkte, die der Tutor in den Interviews zuvor angesprochen hatte, wieder aufgegriffen. Er wurde gebeten zu erklären, wie er nun die Aussagen der speziellen Relativitätstheorie, insbesondere, dass bewegte Uhren langsamer gingen und bewegte Maßstäbe sich verkürzten, sehe.

Die Analyse des ersten Interviews und der entsprechenden Teile des zweiten Interviews zeigt, dass der Tutor anfänglich starke newtonsche Vorstellungen und eine klassische Sicht hatte, in der Objekte unveränderliche Eigenschaften wie Länge, Masse u. Ä. haben. Relativistische Effekte wurden als Verzerrung der Wahrnehmung und durch innere, dem Tutor nicht verständliche Mechanismen beschrieben. Durch diese Annahmen brachte der Tutor seine newtonschen Vorstellungen mit den relativistischen Effekten in Übereinstimmung.

Im Laufe der Intervention während des zweiten Interviews konzentrierte sich der Inhalt darauf, was die fundamentale Realität der Welt sein könnte. Während der Tutor alles aus der Sicht von Objekten und deren gegenseitigen Beziehungen beschrieb, wurde ihm der Standpunkt vorgeschlagen, dass die Ereignisse das Fundamentalere sind und wie sich aus diesen räumliche und zeitliche Abstände ergeben. Die Analyse des dritten Interviews zeigt, dass eine grundlegende Veränderung in der Art und Weise den Erklärungen des Tutors stattgefunden hatte. Diese hatten sich von der Betrachtung der Objekte und deren Wechselwirkungen, durch die die relativistischen Effekte verursacht werden,

weg entwickelt zur Erkenntnis, dass sich diese Effekte aus dem Messprozess und der Verwendung geeigneter Skalen ergeben.

Insgesamt zeigte sich, dass der Tutor anfänglich versuchte, die klassischen und relativistischen Konzepte durch zusätzliche Annahmen von Wahrnehmungsverzerrung und inneren, ihm nicht verständlichen Mechanismen in Einklang zu bringen. Der Konzeptwechsel von einer klassischen zu einer relativistischen Sicht wurde ausgelöst, indem der Tutor überzeugt wurde, dass diese Zusatzannahmen nicht nötig seien. Dadurch wurde eine Unzufriedenheit mit den klassischen Konzepten erzeugt, die deren Status verringerte. Das führte dazu, dass die Übereinstimmung von klassischen und relativistischen Vorstellungen zusammenbrach. Da die relativistischen Konzepte als eine verständliche, plausible und ergiebige Alternative angeboten wurden, konnte eine signifikante Änderung der metaphysischen Vorstellungen des Tutors über die spezielle Relativitätstheorie erzielt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die metaphysischen Vorstellungen der Lernenden wesentliche Bestandteile ihres Wissens sind und dass der Konzeptwechsel wesentlich erleichtert wird, wenn im Unterricht die Anschauungen der Lernenden explizit angesprochen werden.

In [Mac82] wurden Vorstellungen von SchülerInnen zweier Abiturklassen eines Gymnasiums, einer Abschlussklasse einer Realschule (10. Schuljahr) und einer Gruppe von LehramtsstudentInnen der ersten Semester zur Relativitätstheorie untersucht. Alle Gruppen wurden zum Thema „Spezielle Relativitätstheorie“ unterrichtet. Es wurde besonderer Wert auf die qualitative Stufe der Begriffsbildung gelegt, da keine besonderen mathematischen Hilfsmittel zur Verfügung standen.

Zur Ermittlung der Vorstellung der SchülerInnen wurden vor und nach dem Unterricht schriftliche Befragungen und Interviews durchgeführt. Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde besonderer Wert auf die Interviews gelegt, da diese auch im Verlauf der Unterrichtsphase durchgeführt wurden und es sich zeigte, dass diese über die Denkvorgänge und Lernschwierigkeiten der SchülerInnen besser Aufschluss gaben als andere Methoden.

Es stellte sich heraus, dass die ProbandInnen den Erdboden fast stets als bevorzugtes Bezugssystem betrachteten und eine tief verwurzelte Vorstellung vom absoluten Raum hatten. Die Relativbewegung zwischen Beobachter und Objekt wurde nicht als wesentliches Merkmal zur Beschreibung von Bewegungsvorgängen erkannt. Die Transformation der Geschwindigkeit bei Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen und deren Anwendungen war in der Regel nicht geläufig. Der Zustand der absoluten Ruhe wurde als gegeben angesehen und die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme nicht angenommen. Weiters wurden die Existenz einer absoluten Zeit, ein Einfluss der Bewegung auf die

Lichtausbreitung und ein Einfluss der Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger auf die Lichtgeschwindigkeit angenommen. Darüber hinaus wurde ein Widerspruch zwischen den Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Relativität der Gleichzeitigkeit vermutet. Ebenso wurde die Existenz der absoluten Länge eines Körpers vermutet.

In [VP87] wurden 24 graduierten PhysikstudentInnen Aufgaben zum Thema Entfernung und 30 StudentInnen mit ähnlichem Hintergrund Aufgaben zum Thema Zeit gestellt. Beide Aufgabenstellungen bestanden aus mehreren Fragen und hatten die Geschwindigkeit des Lichts zum Gegenstand. Ziel war es, Fehlkonzepte festzustellen, die möglicherweise in der Vorstellung der StudentInnen vorhanden waren. Es wurde analysiert, ob die Antworten zu den Aufgaben jeweils einem galileischen Standpunkt, einem relativistischen Standpunkt oder einem Standpunkt der spontanen Kinematik zugeordnet werden konnten.

Die Analyse zeigt, dass die Mehrzahl der Antworten zur Aufgabe zum Thema Entfernung mit der Vorstellung der spontanen Kinematik in Einklang stand. In den Antworten zum Thema Zeit ließen sich Hinweise auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung und einer absoluten Sicht auf die relativistischen Effekte finden. Außerdem wurden Abstand und Zeit oft als „echt“ und „scheinbar“ bezeichnet. Darüber hinaus gab es Antworten, die die Unterschiede zwischen verschiedenen Beobachtern durch relativistische Effekte, die auf eine absolute Bewegung angewendet wurden, erklärten. Die „echten“ Werte sind eindeutig, weil sie nicht vom Beobachter abhängen. Die anderen Werte sind anders wegen der Relativität, aber sie sind nur „scheinbar“. Die Antworten der StudentInnen wiesen auf keinen Zusammenhang zwischen den „echten“ Werten und deren Beobachtern hin, um die bevorzugten Beobachter identifizieren zu können.

Insgesamt erscheint es vielversprechend, als Anfangspunkt die Idee der absoluten Bewegung heranzuziehen. Das heißt, um die spezielle Relativitätstheorie zu unterrichten, sollte man weiter zurückgehen, um eine galileische Anschauung in der Vorstellung der SchülerInnen aufzubauen und sie von der Idee einer absoluten Bewegung zu befreien.

In [BDAG93] werden Gründe dargelegt, warum die spezielle Relativitätstheorie in der Schule unterrichtet werden sollte. Ein Punkt ist der kulturelle Wert der Theorie. Weiters wird durch den Unterricht die Möglichkeit eröffnet, grundlegende Konzepte ohne hoch entwickelten mathematischen Formalismus unter reger Einbeziehung der SchülerInnen zu erarbeiten. Dabei erfahren die SchülerInnen den Übergang von einer Theorie zu einer anderen. Darüber hinaus erkennen sie, wie physikalische Theorien im Gegensatz zum Hausverstand und zu alltäglichen Erfahrungen stehen können.

Ausgehend von der Hypothese, dass SchülerInnen an diesem Thema interessiert sind, wurde auf Basis der Darstellung in [TW92] ein Unterrichtskonzept

zur speziellen Relativitätstheorie ausgearbeitet, nach dem 23 SchülerInnen (16 bis 19 Jahre) einer italienischen Oberschule über zwei Jahre unterrichtet wurden, im ersten Jahr 22 Unterrichtsstunden zu je 50 Minuten, im zweiten Jahr 40 Unterrichtsstunden zu je 50 Minuten. Das Unterrichtsmaterial, das für die SchülerInnen erstellt wurde, umfasste einen Leitfaden zur speziellen Relativitätstheorie, Arbeitsblätter und eine Anleitung zur Benützung der zur Verfügung gestellten Software. Die Lehrerin und eine der Studienautorinnen unterrichteten die Klasse gemeinsam. Der Unterricht zielte auf eigenständiges Arbeiten und aktive Teilnahme der SchülerInnen. Es zeigte sich, dass es für die SchülerInnen wesentlich war, ihre Ideen in der Klasse zu diskutieren und Probleme aktiv zu lösen. Außerdem dürfte ein anfangs überraschender Effekt ein probates Mittel für die Einführung gewesen sein, weil dadurch den SchülerInnen die Notwendigkeit näher gebracht werden konnte, sich auf eine neue Theorie einzulassen.

Am Ende des ersten Jahres bewerteten 77% der SchülerInnen ihr Interesse an diesem Kurs mit der bestmöglichen Beurteilung auf einer vierteiligen Skala, der Rest mit der nächstniedrigeren Beurteilung. Am Ende des zweiten Jahres wurde mit Hilfe eines Fragebogens, der 18 Punkte umfasste, der Eindruck der SchülerInnen zum Unterricht abgefragt. 75% gaben an, großes Interesse an spezieller Relativitätstheorie zu haben und dass dieses Thema ihre Vorstellung von Realität tief beeinflusst hatte.

Während des Unterrichts erkannte die Lehrerin, wie wichtig es für die SchülerInnen war, Problemlösungsstrategien zu erarbeiten und ihre Ergebnisse und Ideen in der Klasse zu diskutieren. Die Lehrerin war überzeugt davon, dass die Erfahrung aus diesem Unterricht ihre Art zu lehren und den Stellenwert des Einsatzes von Übungsaufgaben erheblich ändern werde.

In [GS93] wurden 42 spanische Schulbücher untersucht, um zu sehen, wie moderne Physik auf Oberstufenniveau eingeführt und welches Bild von Wissenschaft dabei zugrunde gelegt wird. Dabei zeigte sich, dass zwischen 83% und 95% der Bücher weder den nicht-linearen Charakter in der Entwicklung der Physik noch die Schwierigkeiten, die die Krise der klassischen Physik auslösten, noch die tiefgehenden konzeptuellen Unterschiede zwischen der klassischen und modernen Physik thematisieren.

An 63 LehrerInnen der Oberstufe wurden Fragebögen ausgegeben, in denen nach Kriterien gefragt wurde, wie moderne Physik eingeführt werden sollte. Nur in 12% der eingegangenen Antworten gab es einen Bezug zur Notwendigkeit, mit den Schwierigkeiten zu beginnen, die in Zusammenhang mit der klassischen Physik stehen, oder den Unterschied zwischen den Paradigmen der klassischen und modernen Physik herauszustreichen.

Ein Fragebogen, der an 536 SchülerInnen im Alter von 16 bis 18 Jahren ausgegeben wurde, zeigte, dass zwischen 85% und 93% der SchülerInnen die

Krise in der Entwicklung der klassischen Physik nicht kennen und nicht in der Lage waren, ein einziges Problem, das mit dieser Krise oder dem Unterschied zwischen moderner und klassischer Physik in Zusammenhang steht, zu nennen. Zwischen 83% und 93% der SchülerInnen hatten tiefgehende Fehlvorstellungen über den Grenzwertcharakter der Lichtgeschwindigkeit, den Welle-Teilchen-Dualismus und ähnliches.

Die Schwierigkeiten beim Lernen physikalischer Konzepte, nicht nur der der modernen Physik, resultieren aus einem Unwissen über die tiefgreifenden konzeptuellen Umwälzungen, die durch neue physikalische Paradigmen verursacht werden. Sinnvolles Erlernen physikalischer Konzepte erfordert nicht nur einen Konzeptwechsel von den Alltagsvorstellungen zu wissenschaftlich akzeptierten Vorstellungen, sondern auch einen methodischen und epistemologischen Wechsel in der Art und Weise, wie an Aufgabenstellungen herangegangen wird. Um das zu erreichen, wurde ein Programm ausgearbeitet, das mit einem konstruktivistischen Ansatz, durch den die SchülerInnen mit Hilfe geeigneter Aktivitäten einen Konzeptwechsel ähnlich dem historischen Paradigmenwechsel durchlaufen, eine korrektere Vorstellung der Physik vermitteln sollte.

Von 180 SchülerInnen im Alter von 16 bis 18 Jahren, die nach diesem Programm in Versuchsgruppen eine Einführung in die moderne Physik erhielten, ignorierten nur zwischen 8% und 31% am Ende des Kurses die Existenz einer Krise der klassischen Physik und einige der Schwierigkeiten, die diese Krise verursachten, oder einen Unterschied zwischen der klassischen und der modernen Physik, während für andere Gruppen der Anteil zwischen 85% und 94% lag.

In [AV95] werden durch eine Zusammenschau der Literatur die Schwierigkeiten von SchülerInnen der Sekundarstufe und von College-StudentInnen beim Lernen der speziellen Relativitätstheorie analysiert.

In der Literatur lassen sich einerseits Belege finden, dass SchülerInnen der Oberstufe und StudienanfängerInnen beim ersten Kontakt mit der Theorie großes Interesse an der Materie zeigten. Sie waren in der Lage, Probleme und neue Ideen zu diskutieren und vorgelegte Aufgaben zu lösen. Es schien, als ob die spezielle Relativitätstheorie keine besonderen Lernschwierigkeiten verursacht hätte. Andererseits finden sich in der Literatur Hinweise, dass StudentInnen die relativistischen Effekte als scheinbare Effekte ansehen, die sich durch die Wahrnehmung ergeben. Auch ließ sich nachweisen, dass StudentInnen große Widerstände aufbauen, diese Theorie zu akzeptieren. Darüber hinaus konnten Belege gefunden werden, dass das Gelernte nicht stabil war. Postgraduierte StudentInnen zeigten, als sie einfache Situationen im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie analysieren sollten, eine Reihe von Unstimmigkeiten in ihren Konzepten.

Die widersprüchlichen Aussagen in der Literatur werden dadurch erklärt,

dass in den am besten strukturierten Lehrgängen anfänglich die experimentellen Ergebnisse aus der Geschichte der Theorie oder neuerer Beobachtungen betont werden. In weiterer Folge werden der historische Prozess, in dem sich die spezielle Relativitätstheorie in einem Paradigmenwechsel gegen die lorenztsche Elektronentheorie durchsetzte, und der Lernprozess, in dem sich die spezielle Relativitätstheorie in einem Konzeptwechsel gegen die klassischen Vorstellungen durchsetzt, gegenübergestellt.

Das Ziel des Schulunterrichts sollte danach sein, dass die SchülerInnen die Existenz und die wesentlichen Merkmale des Konzeptwechsels in der Geschichte der Naturwissenschaften begreifen und erkennen, dass dieser Wechsel ein Fortschreiten der modernen Technologie ermöglicht hat. Ein Konzeptwechsel in dem Sinne, dass SchülerInnen physikalische Phänomene systematisch neu betrachten, ist nicht zu erwarten.

In [VA98] werden die Ergebnisse aus [AV95] aufgegriffen und weitergeführt. Es wird betont, dass es das Bestreben des Unterrichts sein muss, den SchülerInnen die Unterschiede zwischen klassischer und moderner Physik bewusst zu machen. Ein breiteres Wissen über die technischen Anwendungen der Relativitätstheorie dürfte zur Stabilität des Gelernten beitragen.

In [PZ99] wurde eine Gruppe bestehend aus 6 StudentInnen des ersten Studienjahres und 15 StudentInnen des letzten Studienjahres auf das Verständnis des Relativitätsprinzips getestet. Zu diesem Zweck wurden klinische Interviews geführt, in denen typische Situationen anhand von Abbildungen oder einfachen Zusammenstellungen mit echten Geräten präsentiert wurden. Es wurden Situationen ausgewählt, in denen die Beherrschung und die Anwendung des Relativitätsprinzips getestet werden konnte. Die Situationen umfassten die Gebiete Mechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre, Magnetismus, Optik, Schall und auch biologische Vorkommnisse im menschlichen Körper.

Die Interviews begannen mit der Präsentation der Situation. Die StudentInnen sollten sich vorstellen, dass sich der Raum, in dem sie interviewt wurden, in einem Eisenbahnwaggon befinde, der stehe. Dann sollten sie sich vorstellen, der Zug würde mit geringer Geschwindigkeit (ca. 50 km/h) fahren. Anschließend sollten sie sich vorstellen, der Zug würde mit hoher Geschwindigkeit fahren (500 km/h bis knapp Lichtgeschwindigkeit). Die Fahrt des Zuges sollte jeweils mit konstanter Geschwindigkeit auf gleicher Höhe erfolgen. Die Phasen der Beschleunigung des Zuges waren nicht Gegenstand der Betrachtung. Die StudentInnen sollten erklären, ob sich bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten Änderungen in den jeweiligen Situationen ergeben, und ihre Antwort begründen. Die Interviews wurden auf Tonträger aufgezeichnet und für die Analyse transkribiert.

Die Analyse ergab, dass es nicht möglich war, in den Erklärungen der Stu-

dentInnen für die Nicht-Existenz einer Änderung ein Argument zu finden, das das Relativitätsprinzip benützt, obwohl sie es während des Studiums kennen gelernt hatten. In vielen Fällen bestritten die StudentInnen eine Änderung der Situation durch die Bewegung des Zuges. Durch die Analyse zeigte sich, dass die vorgestellten Situationen ihrem direkt verfügbaren Wissen, bestehend aus klassischer Mechanik und Hausverstand, keine Probleme bereiteten. Darum dürften die StudentInnen die Aufgaben mit Hilfe einfacherer konzeptueller Schemata beantwortet haben als dem Relativitätsprinzip.

In [SSV01] wurde im Rahmen einer fünf Jahre dauernden Studie, an der insgesamt rund 800 StudentInnen teilnahmen, das Verständnis des Zeitkonzepts der speziellen Relativitätstheorie bei Studierenden untersucht. Das wesentliche Ziel war es zu herauszufinden, zu welchem Ausmaß die StudentInnen fähig sind, nach dem Unterricht die grundlegenden Ideen der speziellen Relativitätstheorie auf einfache Situationen anzuwenden. Untersucht wurden die Konzepte zu Bezugssystemen, Ort und Zeitpunkt eines Ereignisses, „intelligenten Beobachtern“ (beziehen Signallaufzeiten ein, um den Zeitpunkt eines Ereignisses festzustellen) und gleichzeitigen Ereignissen.

Die Befragten waren PhysikstudentInnen unterschiedlicher Studienjahre sowie Nicht-PhysikstudentInnen. Die Untersuchungen wurden mittels Antworten der StudentInnen auf schriftlich formulierte Fragestellungen und Interviews mit einzelnen Studierenden durchgeführt. In einigen Kursen wurden die Fragestellungen vor dem Unterricht der relevanten Konzepte ausgegeben, in manchen Kursen danach. Die einstündigen Interviews, die auf Tonträger aufgezeichnet oder videographiert und transkribiert wurden, wurden mit Freiwilligen durchgeführt, von denen die meisten im ersten Studienjahr waren. In den Interviews konnte das Denken der StudentInnen tiefer erforscht werden, als es in kurzen, schriftlich formulierten Fragestellungen möglich ist.

Es stellte sich heraus, dass mehr als zwei Drittel der AnfängerInnen und ein Drittel der fortgeschrittenen StudentInnen nicht in der Lage waren, das Konzept des Bezugssystems zu verwenden um festzustellen, ob zwei Ereignisse gleichzeitig sind oder nicht. Für viele StudentInnen ergab sich die Relativität der Gleichzeitigkeit durch die Differenz der Laufzeit der Signale für unterschiedliche Beobachter. Damit brachten die StudentInnen Aussagen über die Relativität der Gleichzeitigkeit mit ihrem Konzept einer absoluten Gleichzeitigkeit in Einklang. Selbst fortgeschrittene StudentInnen verstanden nicht vollinhaltlich die Auswirkungen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Darüber hinaus hatten StudentInnen aller Jahrgänge signifikante Schwierigkeiten mit den Ideen, die die Grundlagen des Konzepts der Bezugssysteme bilden. Viele stellten sich ein Bezugssystem nicht als System von Beobachtern vor, die für ein gegebenes Ereignis denselben Zeitpunkt bestimmen.

In [SSV02] wurde untersucht, durch welche Maßnahmen das Verständnis des Zeitkonzepts in der speziellen Relativitätstheorie bei StudentInnen verbessert werden kann. Insgesamt nahmen an dieser Studie die Kurse von sechs InstruktorInnen mit ungefähr 350 StudentInnen aus 12 Bereichen teil. Es wurden Tutorials entwickelt, die zusätzlich zu den Vorlesungen und Lehrbüchern eingesetzt wurden. Der Schwerpunkt der Tutorials lag auf dem Aufbau von Konzepten, Entwicklung von Argumentationsfähigkeit und Übertragung von physikalischen Formalismen auf die echte Welt.

Um die Wirkungsweise der Tutorials zu untersuchen, wurde das Verständnis der StudentInnen zu Bezugssystemen und zur Relativität der Gleichzeitigkeit vor und nach dem Unterricht erhoben. Eine Gruppe von StudentInnen wurde ohne Verwendung der Tutorials unterrichtet, eine andere mit Verwendung der Tutorials.

Das Verständnis der StudentInnen zu Bezugssystemen wurde in Prä- und Posttests sowie in individuellen Demonstrations-Tiefeninterviews erhoben. Nach dem Unterricht ohne Verwendung der Tutorials konnten nur zwischen 20% und 30% der AnfängerInnen und rund 40% der fortgeschrittenen StudentInnen richtig antworten. Nach dem Unterricht mit Verwendung der Tutorials antworteten rund 85% der AnfängerInnen und der fortgeschrittenen StudentInnen richtig.

Das Verständnis der StudentInnen zur Relativität der Gleichzeitigkeit wurde in Prä- und Posttests sowie in individuellen Demonstrations-Tiefeninterviews erhoben. Nach dem Unterricht ohne Verwendung der Tutorials konnten nur weniger als 30% der StudentInnen richtig antworten. Nach dem Unterricht mit Verwendung der Tutorials antworteten 50% bis 55% der AnfängerInnen und der fortgeschrittenen StudentInnen richtig.

Die Fähigkeit der StudentInnen, Probleme qualitativ unter Verwendung der Relativität der Gleichzeitigkeit zu lösen, wurde in Tests und Interviews erhoben, die nach dem Unterricht durchgeführt wurden. Nach dem Unterricht ohne Verwendung der Tutorials konnten rund 45% der AnfängerInnen und 30% der fortgeschrittenen StudentInnen richtig antworten. Nach dem Unterricht mit Verwendung der Tutorials konnten rund 60% der AnfängerInnen und 70% der fortgeschrittenen StudentInnen richtig antworten.

Die Daten weisen darauf hin, dass viele StudentInnen, die spezielle Relativitätstheorie gelernt hatten, kein funktionales Verständnis entwickelt haben. Diese Schwierigkeiten konnten auf Verständnisprobleme elementarer Konzepte zurückgeführt werden. Nach den Einführungslehrveranstaltungen wussten viele StudentInnen nicht, was fundamentale Konzepte wie Ereignis, Gleichzeitigkeit und Bezugssystem operational bedeuten. In weiterer Folge stellte es sich als inadäquat heraus, die StudentInnen einem kognitiven Konflikt auszusetzen und das entstandene Paradoxon zu lösen. Die Konfrontation und die Lösung sollten

von den Lernenden vollzogen werden, damit verständiges Lernen stattfinden kann.

In [Sel11] wird in einer Querschnittstudie das Verständnis von LehramtsstudentInnen zu Zeit, Länge, Masse und Dichte sowie die Schwierigkeiten mit diesen Begriffen untersucht. An der Studie nahmen 90 StudienanfängerInnen, die die Einführung in die moderne Physik besucht hatten, und 95 fortgeschrittene StudentInnen, die weiterführende Lehrveranstaltungen zur modernen Physik besucht hatten, teil.

Die Daten wurden durch Fragebogen und Tiefeninterviews erhoben. Das Verständnis der StudentInnen zu zentralen Punkten der Relativitätstheorie und die Schwierigkeiten mit diesen wurden durch den Fragebogen erhoben. Um die Bereiche zu bestimmen, in denen die LehramtskandidatInnen Verständnisschwierigkeiten zur Relativitätstheorie hatten, wurden halbstrukturierten Interviews geführt, durch deren Hilfe die Antworten auf die Fragebögen und deren Begründungen analysiert wurden. An den Interviews nahmen je fünf StudentInnen aus jeder Gruppe teil.

Der Fragebogen wurde unter Aufsicht in 45 Minuten ausgefüllt und anschließend quantitativ nach den Kategorien „völlig verstanden“, „beschränkt/unvollständig verstanden“ und „nicht verstanden“ ausgewertet. Nach einem Monat wurden die Fragebögen erneut ausgewertet, um eine Übereinstimmung der beiden Auswertungen feststellen zu können. Es ergab sich eine Reliabilität von 0,95. Ebenso wurden die Daten, die in den Interviews erhoben wurden, nach einem Monat erneut ausgewertet und es ergab sich eine 90%ige Übereinstimmung zwischen den beiden Auswertungen.

Die Analyse der Daten zeigt, dass LehramtskandidatInnen aus unterschiedlichen Studiensemestern sogar nach einer Einführung in die spezielle Relativitätstheorie spezifische und beträchtliche Schwierigkeiten mit dieser Theorie hatten. Rund ein Viertel der StudentInnen verstanden die Zeitdilatation nicht richtig. Außerdem zeigten die StudentInnen Fehlkonzepte, wenn sie Eigenzeit und Eigenlänge bestimmten. Die StudentInnen hatten Schwierigkeiten, die Relativität des Bezugssystems zu erfassen. Detaillierte Interviews ergaben, dass das erdfeste System als absolut verstanden wurde. Vermutlich war der Grund für diese Fehleinschätzung nicht auf die Relativitätstheorie beschränkt, sondern stammte vom Versäumnis, das Wissen über die klassische Mechanik zu verinnerlichen. Einige der StudienanfängerInnen hatten im Gegensatz zu den Höhersemestrigen Fehlkonzepte über die Relativität der Gleichzeitigkeit. Die meisten der StudienanfängerInnen konnten die Längenkontraktion richtig anwenden, waren aber der Ansicht, die Verkürzung trete in allen Dimensionen auf. Die Vorstellungen bezüglich des Masse-Konzepts in der speziellen Relativitätstheorie waren in der Gruppe der fortgeschrittenen Gruppe gut. Im Gegensatz dazu hielten zwei

Drittel der StudienanfängerInnen die Masse für ein invariantes Konzept.

2.1.2. Zusammenfassung des Literaturüberblicks

Folgende Punkte der fachdidaktischen Literatur, deren Reihenfolge hier keinerlei Bedeutung hat, erscheinen mir unmittelbar für den Unterricht wesentlich:

- Die metaphysischen Vorstellungen der Lernenden dürften wesentliche Bestandteile ihres Wissens sein.
- Der Wechsel von klassischen zu relativistischen Konzepten wird wahrscheinlich erleichtert, wenn die Anschauungen der Lernenden explizit angesprochen werden.
- Viele Lernende sehen den Erdboden vermutlich als bevorzugtes Bezugssystem an.
- Lernende dürften eine tief verwurzelte Vorstellung vom absoluten Raum haben.
- Die physikalische Bedeutung der Relativbewegung zwischen Objekt und Beobachter wird offenbar kaum erkannt.
- Die Existenz einer absoluten Zeit dürfte von vielen Lernenden angenommen werden.
- Ein Einfluss der Bewegung auf die Lichtausbreitung wird wahrscheinlich vermutet.
- Eine Vorstellung von der Beeinflussung der Lichtgeschwindigkeit durch eine Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger kann vermutlich nachgewiesen werden.
- Vorstellungen einer absoluten Bewegung treten offenbar zutage.
- Vorstellungen einer absoluten Sicht auf die relativistischen Effekte dürften sich finden lassen.
- Die Transformation der Geschwindigkeit beim Übergang von einem System zu einem anderen ist in der Regel wahrscheinlich nicht geläufig.
- Eine physikalisch korrekte Vorstellung vom Bewegungsbegriff könnte das Erlernen der Relativitätstheorie erleichtern.

- Ein anfangs überraschender Effekt sollte ein probates Mittel für den Einstieg in die Relativitätstheorie sein.
- SchülerInnen zeigen ein Interesse an der Relativitätstheorie.
- Für viele SchülerInnen dürfte es wesentlich sein, ihre Ideen in der Klasse zu diskutieren und Probleme aktiv zu lösen.
- Durch konstruktivistische Ansätze dürfte sich eine korrektere Vorstellung von Physik vermitteln lassen.
- Viele SchülerInnen können kein Problem nennen, das mit dem Unterschied zwischen klassischer und relativistischer Physik in Zusammenhang steht.
- Lernende greifen in der Argumentation oft nicht auf das Relativitätsprinzip zurück.
- Viele Lernende dürften Schwierigkeiten mit dem Begriff des Bezugssystems haben.
- Mit der Rolle der Signallaufzeit und deren Handhabung haben viele Lernende offenbar Probleme.
- Fehlvorstellungen zur Relativität der Gleichzeitigkeit können offensichtlich nachgewiesen werden.
- Selbst bei fortgeschrittenen StudentInnen lassen sich mit ziemlicher Sicherheit konzeptuelle Fehlvorstellungen in Bezug auf die Relativitätstheorie nachweisen.

2.2. Forschungsstand in der Lernpsychologie

2.2.1. Der Ansatz des Konzeptwechsels

SchülerInnen kommen mit Präkonzepten in den naturwissenschaftlichen Unterricht, die nicht im Einklang mit dem Stand der Wissenschaft sind, [DT09]. Seit den 1970er Jahren wurden naturwissenschaftliche Lehr- und Lernprozesse unter dem Aspekt des Konzeptwechsels betrachtet. Konzepte sind dabei mentale Modelle des/der Lernenden von einem Objekt oder einem Ereignis, [TD08].

Die Vorstellungen, die SchülerInnen vom Wesen physikalischer Konzepte haben, nennt man ontologischen Vorstellungen, [DTW08]. Eine ontologische Vorstellung des elektrischen Stromes wäre das Konzept einer fließenden Substanz

im Leiter, eine andere ontologische Vorstellung die Wanderung von elektrischer Ladung, [SCJ95]. Ein Beispiel für verschiedene ontologische Vorstellungen von Wärme ist die Vorstellung von Wärme als strömende Substanz bzw. die Vorstellung von Wärme als sich ausbreitende kinetische Energie, [DTW08]. Ein weiteres Beispiel für unterschiedliche ontologische Vorstellungen liefert der Kraftbegriff. Eine davon ist, Kraft als eine Eigenschaft von Körpern zu betrachten. Eine andere ist, Kraft als einen Aspekt von Wechselwirkungen zwischen Körpern zu sehen, [Bac01]. Newtons absoluter Raum und absolute Zeit sind ontologische Vorstellungen von Raum und Zeit. Raum und Zeit als das Ergebnis verwendeter Inertialsysteme sind andere ontologische Vorstellungen von Raum und Zeit. Der Übergang von der klassischen Physik zur Relativitätstheorie erfordert einen Wechsel der ontologischen Vorstellungen von Raum und Zeit.

Beim klassischen Ansatz des Konzeptwechsels erzeugt die Lehrkraft bei den SchülerInnen dadurch eine Unzufriedenheit mit deren Präkonzepten, indem eine Situation angeboten wird, in der die Präkonzepte zu Widersprüchen führen. Danach bietet die Lehrkraft ein Konzept an, das verständlich, plausibel und ergiebig ist und den zuvor konstruierten Widerspruch erklärt. Verständlich bedeutet, dass die SchülerInnen verstehen müssen, was das Konzept bedeutet. Ein plausibles Konzept muss verständlich sein, die SchülerInnen müssen der Überzeugung sein, dass dieses Konzept die Welt tatsächlich beschreibt und es muss in Einklang mit anderen Konzepten der SchülerInnen stehen. Ein Konzept ist ergiebig, wenn es verständlich und plausibel ist und zur Problemlösung verwendet werden kann oder Dinge besser beschreibt als das alte Konzept, [TD08]. Die meisten Studien zeigen jedoch, dass die alten Konzepte in gewissen Situationen weiterhin dominant sind, [DTW08].

Weitere Forschungen legen nahe, dass der Konzeptwechsel ein vielschichtiger Prozess ist, bei dem eine Reihe von Faktoren berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus hat sich der Begriff des Konzeptwechsels weiter entwickelt. Unter Konzeptwechsel versteht man heute nicht einfaches Ersetzen von vorunterrichtlichen Ansichten durch wissenschaftliche Ansichten, sondern es ist ein gradueller Prozess, durch den ursprüngliche konzeptuelle Strukturen, die sich aus der kindlichen Interpretation der Alltagserfahrung ergeben, kontinuierlich bereichert und restrukturiert werden. Durch den Konzeptwechsel soll die Möglichkeit eröffnet werden, unterschiedliche Perspektiven und Ansichten einzunehmen, [DT09].

Während die ersten Untersuchungen zum Konzeptwechsel sich auf die inhaltliche Ebene konzentrierten, lenkte man in weiterer Folge die Aufmerksamkeit auf Vorstellungen über die Natur der Naturwissenschaft und den Prozess der Wissensproduktion, [DT09]. Die Vorstellungen, die SchülerInnen vom Wesen des Wissens und vom Prozess der Wissensproduktion haben, nennt man epis-

temologische Vorstellungen. Eine epistemologische Vorstellung vom Wissen ist, es als Sammlung wahrer und unveränderlicher Fakten zu sehen. In einer anderen epistemologischen Vorstellung wird Wissen als dynamischer Prozess aufkommender und sich ändernder Ideen betrachtet. Unter konstruktivistischer Epistemologie versteht man einen Satz epistemologischer Vorstellungen, die mehr oder weniger vom Inhalt abhängen, konstruktivistisch sind und umfassen, dass wissenschaftliche Forschung eine Evaluation der Theorie im Licht neuer Fakten enthält und dass es unterschiedliche Erklärungsmodelle geben kann. Studien zeigen, dass epistemologische Vorstellungen den Konzeptwechsel beeinflussen. Es hat sich gezeigt, dass SchülerInnen, die eine konstruktivistische Epistemologie haben, eher dazu neigen, ein tiefes Verständnis der Physik zu erlangen, eher versuchen, das Gelernte zu verstehen, ihr Wissen zu reflektieren, neue Ideen zu integrieren und sich ihrer Vorstellungen und deren Änderungen bewusst zu werden. Auf der anderen Seite tendieren SchülerInnen mit einer weniger konstruktivistischen Epistemologie eher dazu, ein geringeres konzeptuelles physikalisches Wissen zu haben, auf Memorieren und Auswendiglernen zu setzen, auf Prüfungen hin zu lernen, sich nicht mit der Vernetzung von Ideen zu befassen und sich nicht über ihre Vorstellungen bewusst zu sein. Es besteht also die Möglichkeit, dass eine konstruktivistische Epistemologie das physikalische Verständnis fördert, [SV07].

Um zu verstehen, in welcher Weise epistemologische Vorstellungen einen Konzeptwechsel beeinflussen, ist es nötig, diesen nicht einfach nur als offenen rationalen Prozess zu betrachten. Es hat sich gezeigt, dass der Konflikt zwischen bereits Gelerntem und dem zu Lernenden eine Situation erzeugt, in der affektive und motivationale Variablen eine große Rolle spielen, [SV07]. Möglicherweise sind das Selbstvertrauen der SchülerInnen, das soziale Umfeld der Klasse, die individuellen Ziele, Absichten, Erwartungen und Bedürfnisse ebenso wichtig wie kognitive Strategien im Erlernen von Konzepten. Das würde bedeuten, dass LehrerInnen, die soziale und affektive Aspekte im Lernprozess vernachlässigen, möglicherweise einen Konzeptwechsel erschweren, [TD08].

Eine große Anzahl von Untersuchungen zum Konzeptwechsel geht von einer bestimmten Betrachtungsweise aus; von einer epistemologischen, einer ontologischen oder einer affektiven. Es gibt mittlerweile allerdings eine wachsende Zahl von multidimensionalen Betrachtungsweisen des Konzeptwechsels, die viel versprechend für das Lehren und Lernen von Naturwissenschaft erscheinen. Um die Komplexität des Lehr- und Lernprozesses adäquat abbilden zu können, müssen solche multidimensionalen Betrachtungsweisen des Konzeptwechsels entwickelt werden, die epistemologische, ontologische und affektive Bereiche berücksichtigen, [TD08].

Es ist schwierig, den Erfolg von konzeptwechselorientiertem Unterricht mit

dem eines anderen Ansatzes zu vergleichen. Die Untersuchung der Qualität von Unterricht hat gezeigt, dass eine einzelne Intervention gewöhnlich nicht per se zu einem bessern Ergebnis führt. Die Qualität des Unterrichts hängt von einem bestimmten Zusammenspiel verschiedener Lehrmethoden und -strategien ab. Daher ist zu erwarten, dass konzeptwechselorientierte Strategien nur dann wirksam werden, wenn sie in eine den Konzeptwechsel unterstützende Lernumgebung eingebettet sind. Nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungen gibt es reichliche Hinweise darauf, dass die Wirksamkeit von konzeptwechselorientierten Ansätzen höher ist als die traditioneller Ansätze, die von transmissiven Ansichten von Lehren und Lernen dominiert werden, [TD08].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es eine ausreichende Anzahl empirischer Befunde gibt, um im konzeptwechselorientierten Unterricht eine viel versprechende Perspektive zur Verbesserung des Physikunterrichts zu sehen. Dabei müssen multidimensionale Betrachtungsweisen, die epistemologische, ontologische und affektive Bereiche berücksichtigen, mit einbezogen werden. Um konzeptwechselorientierten Unterricht wirksam werden zu lassen, muss er in eine Lernumgebung eingebettet werden, die den Konzeptwechsel unterstützt und die sich nicht an transmissiven Ansichten von Lehren und Lernen orientiert.

2.2.2. Konstruktivistische Lerntheorien

Konstruktivistische Lerntheorien gehen davon aus, dass Wissen nicht einfach von den Lernenden übernommen werden kann, sondern von ihnen aktiv konstruiert werden muss, [BDJ⁺99]. Lehrende und Lernende sind dabei gleichermaßen sich entwickelnde Konstrukteure, [Rei08]. Dabei interpretieren sie Erfahrungen, die sie durch ihre Wahrnehmung machen, in Abhängigkeit von ihrem Vorwissen und ihren bestehenden mentalen Strukturen, [BDJ⁺99].

Da Denkkakte als geistige Rekonstruktionen von Handlungen aufgefasst werden, wird die Bedeutung von Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung eher gering eingeschätzt. Lernen muss von allen Beteiligten als ein aktiver Prozess angesehen werden, in dem nicht einfach „Fertigwissen“ übernommen werden kann, [BDJ⁺99]. Davon ausgehend, dass Wissen in Handlungen erworben wird, sollen die Lernenden in konstruktivistisch gestalteten Unterrichtsformen selbst erfahren, ausprobieren, untersuchen und experimentieren. Je mehr die Lernenden im Lernprozess selbst entscheiden können, umso selbstbestimmter wird ihre Tätigkeit. Diese Selbstbestimmung schafft die Voraussetzung für dauerhaftes Behalten. Darüber hinaus steigern Selbsttätigkeit und Selbstbestimmung Eigenverantwortlichkeit, Selbstvertrauen und Motivation. Weiters können umso bessere Leistungen erwartet werden, je mehr dem Prinzip der Methodenvielfalt entsprochen wird. [Rei08].

Beobachtungen zeigen, dass Lernen für sehr viele Lernende dann besonders effektiv im Sinne des Erinnerns und des Behaltens geschieht, wenn inneres Begehren, Anerkennung, hohe Selbsttätigkeit und Selbstbestimmung im Sinne der Realisierung eigener Bedürfnisse ineinander greifen, [Rei08].

Als stillschweigender Hintergrund vieler didaktischer Konzepte muss heute ein Konzept angesehen werden, das davon ausgeht, dass beim Lehren und Lernen folgende fünf Handlungsstufen vermittelt werden müssen, [Rei08]:

Emotionale Antwort: Die Lernenden erfahren Unerwartetes, [Rei08]. Dadurch wird bei ihnen eine kognitive Störung ausgelöst, die einen Lernanlass begründet. Damit steht diese Handlungsstufe in engem Zusammenhang zum Konzeptwechsel, [BDJ⁺99]. Aufgrund der unerwarteten Situation ist der Antrieb für das Lernen nicht nur kognitiv, sondern auch emotional begründet, was die Bereitschaft zum Lernen steigert, [Rei08].

Definition des Problems: Auf dieser Handlungsstufe müssen die Lernenden aktiv werden. Meist versuchen sie, das Unerwartete dadurch zu erklären, indem sie an früher Gelerntes anknüpfen. Dadurch wird das Problem eingeordnet, beschrieben und diskutiert, um es mit den bisherigen Erfahrungen in Verbindung zu bringen. Diesen Raum für Verknüpfungen müssen die Lernenden bekommen, damit sie sich hinreichend auf das Problem einlassen. Zu schnelle Antworten von Seiten der Lehrenden machen das Thema leicht uninteressant, [Rei08].

Hypothesenbildung: Nachdem die Lernenden erkannt haben, dass die Situation noch näher erkundet werden muss, bilden sie Hypothesen, die gesammelt werden, [Rei08].

Testen und Experimentieren: Auf dieser Handlungsstufe sollen die Lernenden die Hypothesen tatsächlich ausprobieren können. Je weniger handlungsbezogene Möglichkeiten den Lernenden geboten werden, desto stärker sinken das Lerninteresse, die Einsicht in den Sinn des Lerngegenstandes und die Behaltensleistung, [Rei08].

Anwendung: Das Wissen, das erworben wurde, bedarf anschließend der Anwendung, um zeigen zu können, was mit dem Lernergebnis erreicht werden kann. Je öfter solche Anwendungen genutzt werden, desto sicherer werden sie umgesetzt und wird das Gelernte behalten, [Rei08].

Da in der Handlungsstufe der emotionalen Antwort eine enge Verbindung zum Konzeptwechsel gegeben ist, bieten konstruktivistische Lerntheorien die Möglichkeit, diesen zu unterstützen.

2.3. Die Forschungsfrage

Die Auflistung in Punkt 2.1.2 sowie die Erkenntnisse der Lernpsychologie enthalten umfassende Anregungen dafür, wie ein Unterrichtskonzept zur Relativität der Gleichzeitigkeit gestaltet werden sollte und welche Aspekte berücksichtigt werden müssten. Die Punkte, an denen sich die Erstellung des Unterrichtskonzepts orientieren müsste, sind demnach folgende:

- Das Vorwissen und die Vorstellungen der Zielgruppe müssen erhoben werden, damit diese angesprochen werden können. Da die Relativität der Gleichzeitigkeit begrifflich die Bereiche Geschwindigkeitstransformation, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Gleichwertigkeit der Inertialsysteme sowie räumliche und zeitliche Abstände umfasst, müssen das Wissen und die Vorstellungen zu diesen Themen erhoben werden.
- Eine Grundlage für die Relativität der Gleichzeitigkeit ist das Relativitätsprinzip. Daher muss den SchülerInnen zunächst dieses als eigenständiges physikalisches Prinzip plausibel gemacht werden. Da zu erwarten ist, dass der Erdboden als bevorzugtes Bezugssystem betrachtet wird, sollte dieses Prinzip in einer Situation eingeführt werden, in der die Erde nicht vorkommt. Da auch die Vorstellung einer absoluten Bewegung zu erwarten ist, sollte den SchülerInnen in der gewählten Situation der Begriff einer absoluten Bewegung nicht sinnvoll erscheinen. Da für das Verständnis der Relativitätstheorie das Relativitätsprinzip wesentlich ist, sollten die SchülerInnen dieses in ihren Überlegungen bewusst einsetzen.
- Die SchülerInnen müssen im Unterricht aktiviert werden. Sie müssen das Wissen in eigenständiger Arbeit und in Diskussionen erwerben. Unterrichtsmaterial, das dieses anregt, ist zu entwickeln.
- Der Unterricht sollte mit einem Effekt beginnen, der für die SchülerInnen überraschend ist. Danach sollten sie ermutigt werden, selbst Erklärungsmodelle für diesen Effekt zu finden und diese zu diskutieren.
- Der Widerspruch zur Klassik sollte aufgezeigt werden. Durch die Thematisierung des Paradigmenwechsels von der klassischen Physik zur speziellen Relativitätstheorie bekommen die SchülerInnen einen Einblick in die Reichhaltigkeit der Entwicklung der Naturwissenschaften und erhalten die Möglichkeit, Wissen als dynamischen Prozess aufkommender und sich ändernder Ideen zu betrachten.

- Es ist zu untersuchen, welche Rolle die Effekte der Signallaufzeit in den Vorstellungen der SchülerInnen spielen und inwieweit sie „intelligente Beobachter“ ([SSV01], [SSV02]) akzeptieren, welche diese Effekte berücksichtigen.
- Da selbst PhysikstudentInnen Schwierigkeiten haben, grundlegende Konzepte der speziellen Relativitätstheorie zu formulieren, kann nicht erwartet werden, dass SchülerInnen nach dem Lernen der Relativitätstheorie einen vollständigen Konzeptwechsel durchleben, durch den sie physikalische Fragestellungen systematisch neu betrachten. Ziel kann es nur sein, die SchülerInnen in die Lage zu versetzen, die Relativität der Gleichzeitigkeit als logische Konsequenz allgemeiner physikalischer Grundprinzipien zu akzeptieren, den Übergang von einer Theorie zu einer anderen kennen zu lernen und zu erfahren, dass physikalische Theorien im Gegensatz zum Hausverstand und zur Alltagserfahrung stehen können.

Da ich oft auch von SchülerInnen der Unterstufe (fünfte bis achte Schulstufe) mit großem Interesse zum Vergehen der Zeit befragt wurde, möchte ich in dieser Arbeit erforschen, ob es möglich ist, aufbauend auf diesen Punkten ein Unterrichtskonzept zu entwickeln, das bereits SchülerInnen der Unterstufe in die Lage versetzt, die Relativität der Gleichzeitigkeit als logische Konsequenz allgemeiner physikalischer Grundprinzipien zu akzeptieren.

3. Forschungsmethode

3.1. Befragungen zu SchülerInnenvorstellungen

In Kapitel 4 werden das Vorwissen und die Vorstellungen von 13- und 14jährigen SchülerInnen zu Themenbereichen der speziellen Relativitätstheorie erhoben sowie die Bereitschaft dieser SchülerInnen getestet, relativistische Effekte zu akzeptieren. Dazu führte ich im Juni 2009 mit SchülerInnen einer Wiener AHS problemzentrierte Interviews zu den Themen Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Gleichzeitigkeit, Zeitdilatation sowie Längenkontraktion.

Interviews sind sozialwissenschaftliche Erhebungsverfahren, die auf sprachlicher Basis arbeiten, [May02]. Diese Interviews geben besseren Aufschluss über Denkvorgänge bei SchülerInnen als andere Methoden wie schriftliche Befragungen. Einerseits, weil SchülerInnen schriftlich gestellte Fragen nicht immer so verstehen, wie sie gemeint waren, andererseits weil SchülerInnen oft Schwierigkeiten haben, ihre Gedanken und Vorstellungen zu verschriftlichen. In einem Interview können die gegenseitigen Missverständnisse ausgeräumt und die Gedankengänge herausgearbeitet werden, die den SchülerInnenvorstellungen zugrunde liegen, [Mac82].

In einem problemzentrierten Interview werden bestimmte Aspekte anhand eines zuvor erstellten Interviewleitfadens angesprochen. Dieser ist kein starrer Fragenkatalog, sondern Fragen und Themen werden je nach Interviewsituation frei formuliert. Die Interviewten können ohne Antwortvorgaben frei antworten und formulieren, was ihnen in Bezug auf das Thema bedeutsam erscheint. Problemzentrierte Interviews stellen somit offene, halbstrukturierte qualitative Verfahren dar, [May02]. Ich las daher bei den Interviews die vorbereiteten Fragestellungen nicht vor, sondern formulierte frei und illustrierte die jeweilige Situation anhand von Abbildungen. Je nachdem, wie sich ein Interview entwickelte, wurden jeweils einzelne Aspekte vertieft bzw. weggelassen. Der gesamte Interviewleitfaden findet sich in Anhang A.

Die Interviews wurden auf Tonträger aufgezeichnet und in literarischer Umschrift transkribiert. Unter der literarischen Umschrift versteht man die schriftliche Wiedergabe des gesprochenen Wortes mit unserem gebräuchlichen Alphabet,

	Schulform ¹	Schulstufe	Von mir unterrichtet	Dauer				
				Interviewteile zu				Interviews insgesamt
				Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	Gleichzeitigkeit	Zeitdilatation	Längenkontraktion	
Schüler 1	RG	8	nein	14	—	—	—	14
Schüler 2	RG	8	nein	10	3	5	5	23
Schülerin 3	G	7	nein	10	5	7	8	30
Schüler 4	RG	7	ja	8	4	4	4	20
Schüler 5	RG	8	ja	7	4	4	4	19
Schülerin 6	G	8	ja	11	4	3	4	22
Schüler 7	G	8	ja	15	3	6	5	29
Schülerin 8	G	7	ja	10	3	4	2	19
Schülerin 9	G	7	ja	12	4	—	—	16
Schülerin 10	RG	7	ja	19	2	5	2	28
Schülerin 11	RG	8	ja	13	3	2	4	22

Tabelle 3.1.: Dauer der Interviews in Minuten

[May02]. Da die Interviews wortgetreu transkribiert sind, hält sich deren Wiedergabe nicht immer an die grammatikalischen und stilistischen Regeln der Schriftsprache. Falls eine Antwort aufgrund des Tonfalls nicht klar als Aussage oder Frage zu verstehen war, setzte ich an das Satzende einen Schlusspunkt und dahinter ein Fragezeichen (.?). Ich versah die Transkriptionen mit Anmerkungen, die als solche gekennzeichnet sind. Diese ergeben sich logisch aus dem Gespräch und sind somit redundant. Sie erleichtern lediglich die Lesbarkeit der Transkriptionen.

Die befragten SchülerInnen, die alle die Schule besuchen, in der ich unterrichtete, meldeten sich freiwillig zu den Interviews. Die Auswahl der SchülerInnen, von denen ich manche selbst in Physik unterrichtete und manche nicht, erfolgte zufällig, ich achtete lediglich auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen männ-

¹RG: Realgymnasium, G: Gymnasium

3.1. Befragungen zu SchülerInnenvorstellungen

	Gymnasium		Realgymnasium	
	♂	♀	♂	♀
3. Klasse (7. Schulstufe)	0	3	1	1
4. Klasse (8. Schulstufe)	1	1	3	1

Tabelle 3.2.: Anzahl der interviewten SchülerInnen zum Thema Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

	Gymnasium		Realgymnasium	
	♂	♀	♂	♀
3. Klasse (7. Schulstufe)	0	3	1	1
4. Klasse (8. Schulstufe)	1	1	2	1

Tabelle 3.3.: Anzahl der interviewten SchülerInnen zum Thema Gleichzeitigkeit

lich – weiblich, Gymnasium – Realgymnasium und zwischen den Schulstufen, um keine diesbezüglichen Tendenzen zu bekommen. Die SchülerInnen gaben ihr Einverständnis, dass die Gespräche, die von ihnen jederzeit abbrechen werden konnten, aufgezeichnet wurden. Bei den Interviews handelte es sich nicht um Leistungsfeststellungen und die Antworten hatten keinen Einfluss auf die Noten der SchülerInnen. Diese wussten das und sollten daher nicht, wie es ihnen aus Prüfungssituation vielleicht geläufig ist, versuchen, richtige Lösungen zu erraten, sondern unbefangen antworten.

Insgesamt befragte ich elf SchülerInnen, die ich im Weiteren nach der Reihenfolge der Interviews mit den Zahlen 1 bis 11 bezeichne. Die Interviews begannen mit dem Themenkreis Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Darauf folgte der Themenkreis Gleichzeitigkeit. Anschließend behandelte ich den Themenkreis Zeitdilatation, gefolgt vom Themenkreis Längenkontraktion.

Alle elf SchülerInnen befragte ich zum Themenkreis Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Schüler 1 beendete das Interview nach diesem Themenkreis. Schülerin 9 beendete das Interview nach dem Themenkreis Gleichzeitigkeit. Damit interviewte ich zehn SchülerInnen zum Themenkreis Gleichzeitigkeit und neun SchülerInnen zu dem Themenkreisen Zeitdilatation und Längenkontraktion. Die Dauer der Interviews auf Minuten gerundet und ergänzende Daten zu den einzelnen SchülerInnen finden sich in Tabelle 3.1 auf der vorherigen Seite.

Eine Aufschlüsselung der SchülerInnen, die ich zum Thema Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit befragte, nach Schulstufe, Schulform und Geschlecht findet sich in Tabelle 3.2.

	Gymnasium		Realgymnasium	
	♂	♀	♂	♀
3. Klasse (7. Schulstufe)	0	2	1	1
4. Klasse (8. Schulstufe)	1	1	2	1

Tabelle 3.4.: Anzahl der interviewten SchülerInnen zu den Themen Zeitdilatation und Längenkontraktion

Eine Aufschlüsselung der SchülerInnen, die ich zum Thema Gleichzeitigkeit befragte, nach Schulstufe, Schulform und Geschlecht findet sich in Tabelle 3.3 auf der vorherigen Seite.

Eine Aufschlüsselung der SchülerInnen, die ich zu den Themen Zeitdilatation und Längenkontraktion befragte, nach Schulstufe, Schulform und Geschlecht findet sich in Tabelle 3.4.

Die Interviews wurden zu verschiedenen Aspekten der Themenkreise Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Punkt 4.1), Gleichzeitigkeit (Punkt 4.2), Zeitdilatation (Punkt 4.3) und Längenkontraktion (Punkt 4.4) quantitativ ausgewertet. Beim Auswerten der Interviews ist es zum Teil klar, welchen Gedankengang die SchülerInnen verfolgen und was sie mit ihren Aussagen meinen. Diese Passagen sind leicht zu interpretieren. Schwieriger ist es, wenn die Aussagen der SchülerInnen beim ersten Durchlesen widersprüchlich oder unlogisch wirken und keinen Sinn zu ergeben scheinen. Da ich davon ausgehe, dass die SchülerInnen nicht einfach nur Unsinn reden, sondern aus ihrer Sicht schlüssig argumentieren, habe ich die Aussagen der SchülerInnen so interpretiert, dass die Interpretationen logisch konsistent sind, und versucht, den dahinter liegenden Gedankengang nachzuvollziehen. Die Haltbarkeit der gewählten Interpretationen ist jeweils anhand der Aussagen der SchülerInnen belegt.

3.2. Teaching Experiment

In Kapitel 5 erarbeite ich auf Basis der Interviewergebnisse sowie des Forschungsstandes in der Physikdidaktik und der Lernpsychologie den Prototyp eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit.

In Kapitel 6 wird in einem teaching experiment die Wirksamkeit des in Kapitel 5 entwickelten Prototyps eines Unterrichtskonzepts untersucht und die Akzeptanz von Erklärungsangeboten getestet.

Im Gegensatz zu Interviews, deren Ziel es ist, die Vorstellungen der SchülerInnen kennen zu lernen und deren kognitive Muster zu verstehen, ohne sie

zu verändern, versucht man im teaching experiment herauszufinden, wie sich Konzepte verändern und wie sie durch verschiedene Lehrmethoden beeinflusst werden. Daraus soll ein Modell für ihren Lernfortschritt der SchülerInnen über einen längeren Zeitraum erstellt werden. Zu diesem Zweck wird eine Gruppe von SchülerInnen unterrichtet und die Unterrichtssequenzen, in denen man versucht, die Denkweise der SchülerInnen zu verändern, werden aufgezeichnet. Durch die Analyse der Antworten, die die SchülerInnen geben, soll herausgefunden werden, welche Maßnahme bei den SchülerInnen den größten konzeptuellen Zuwachs bewirkt hat. Daraus werden Hypothesen über den Lernverlauf abgeleitet, die als Leitfaden für den nächsten Unterrichtsdurchgang dienen. Dieser fungiert als Test für die aufgestellten Hypothesen, [ECOR04].

Da es insbesondere nötig ist zu wissen, wie SchülerInnen auf Erklärungsangebote reagieren, muss ermittelt werden, wie weit SchülerInnen Erklärungen verstehen und wie sie wirken. Dazu wird im Gegensatz zu Interviews, in denen die Interviewten um eine Erklärung für ein Phänomen oder eine Frage gebeten werden, in Akzeptanzbefragungen den Interviewten eine Erklärung gegeben. Anschließend wird ermittelt, wie weit sie diese Erklärung verstanden haben und warum sie diese einleuchtend fanden oder ablehnten, [WW96].

Das teaching experiment fand im Zeitraum von Mai 2011 bis Dezember 2011 statt. Da ich dabei sowohl die SchülerInnen unterrichtete als auch anschließend die Aufzeichnungen auswertete, fungierte ich als Lehrer und Beobachter.

Das teaching experiment umfasste fünf Unterrichtsdurchgänge mit je einer Schülerin und einem Schüler der achten Schulstufe einer Wiener AHS, an der ich nicht unterrichtete. Ich kannte die SchülerInnen, die sich freiwillig meldeten, vor dem teaching experiment nicht. Ich bezeichne diese SchülerInnen im Weiteren mit den Zahlen 12 bis 21, um sie von den SchülerInnen, mit denen ich die Interviews führte, zu unterscheiden. Die Dauer der Unterrichtsdurchgänge auf Minuten gerundet sowie die Schulform, die die jeweiligen SchülerInnen besuchten, sind in Tabelle 3.5 auf der nächsten Seite aufgelistet.

Alle Unterrichtsdurchgänge wurden videographiert. Die ersten drei Unterrichtsdurchgänge wurden zur Gänze in literarischer Umschrift transkribiert. Bei den letzten beiden Unterrichtsdurchgängen wurden nur die markanten Passagen transkribiert, da ich diese aufgrund der mittlerweile erworbenen Erfahrung zweifelsfrei eruieren konnte.

Nach jedem Unterrichtsdurchgang beurteilte ich aufgrund der Ausführungen der SchülerInnen die Wirksamkeit des Unterrichts und die Akzeptanz der gegebenen Erklärungsangebote. Weiters identifizierte ich die Vorstellungen und Konzepte der SchülerInnen und analysierte, wie und durch welche Interventionen sich diese Vorstellungen und Konzepte im Verlauf des jeweiligen Unterrichtsdurchganges veränderten. Auf den gewonnenen Daten basierend

		Schulform ²	Dauer
1. Unterrichtsdurchgang	Schülerin 12	RG	1:01
	Schüler 13	RG	
2. Unterrichtsdurchgang	Schülerin 14	RG	1:18
	Schüler 15	RG	
3. Unterrichtsdurchgang	Schülerin 16	RG	1:19
	Schüler 17	RG	
4. Unterrichtsdurchgang	Schülerin 18	G	1:43
	Schüler 19	RG	
5. Unterrichtsdurchgang	Schülerin 20	RG	1:22
	Schüler 21	RG	

Tabelle 3.5.: Dauer der Unterrichtsdurchgänge in Stunden und Minuten

wurde das Unterrichtskonzept für den nächsten Unterrichtsdurchgang revidiert.

In Kapitel 7 wird der in Kapitel 6 überarbeitete Prototyp als Endversion eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit zusammengefasst.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse dieser Arbeit in den Kontext der fachdidaktischen Forschung gestellt und die Relevanz dieser Ergebnisse für den praktischen Einsatz in der Schule diskutiert.

In Kapitel 9 werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit in aller Kürze zusammengefasst.

²Siehe Fußnote 1 auf Seite 22

4. SchülerInnenvorstellungen

Ich führte im Juni 2009 mit SchülerInnen der siebenten und achten Schulstufe einer Wiener AHS problemzentrierte Interviews zu Themenbereichen der speziellen Relativitätstheorie, um die Vorstellungen und das Vorwissen dieser SchülerInnen zu Effekten der speziellen Relativitätstheorie zu erheben. Zusätzlich testete ich die Bereitschaft, relativistische Effekte zu akzeptieren. Eine detaillierte Beschreibung des Settings der Interviews findet sich in Kapitel 3.

Die Interviews wurden zu verschiedenen Aspekten der Themenkreise Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Punkt 4.1), Gleichzeitigkeit (Punkt 4.2), Zeitdilatation (Punkt 4.3) und Längenkontraktion (Punkt 4.4) quantitativ ausgewertet.

4.1. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Ich interviewte elf SchülerInnen zum Thema Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Die Aufschlüsselung dieser SchülerInnen nach Schulstufe und Geschlecht findet sich in Tabelle 3.2 auf Seite 23.

Als Leitlinie für die Interviews verwendete ich folgenden Fragenkatalog:

1. In Abbildung 4.1 siehst du einen Zug mit einem offenen Waggon. Ein

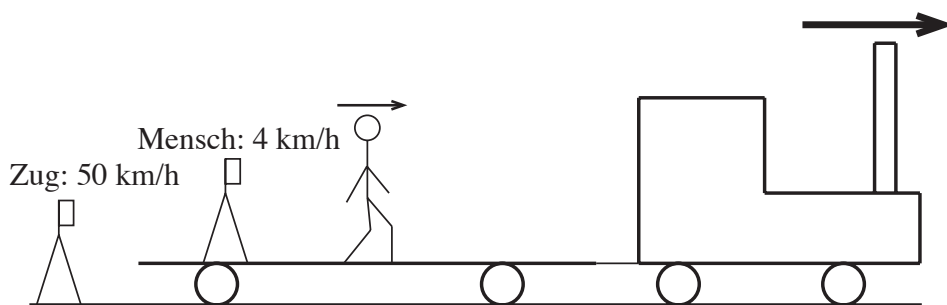


Abbildung 4.1.: Zu Frage 1

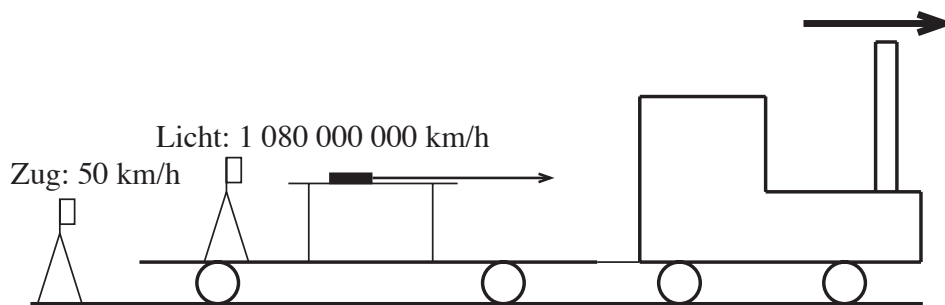


Abbildung 4.2.: Zu Frage 2

- Mensch geht auf diesem Waggon Richtung Lokomotive. Auf dem Boden und dem Waggon steht je ein Radar zur Geschwindigkeitsmessung. Das Radar auf dem Boden misst für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h. Das Radar auf dem Waggon misst für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h. Was misst das Radar auf dem Boden für die Geschwindigkeit des Menschen? Begründung! Welche Geschwindigkeit misst das Radar auf dem Boden für den Menschen, wenn dieser Richtung Zugende geht und das Radar auf dem Waggon 4 km/h misst?
- In Abbildung 4.2 steht auf dem Waggon ein Tisch, auf dem eine Taschenlampe liegt, die Richtung Lokomotive leuchtet. Das Radar auf dem Boden misst als Geschwindigkeit für den Zug 50 km/h. Das Radar auf dem Waggon misst für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h. Was misst das Radar auf dem Boden für die Geschwindigkeit des Lichts? Begründung! Welche Geschwindigkeit misst das Radar auf dem Boden für das Licht, wenn die Taschenlampe Richtung Zugende leuchtet und das Radar auf dem Waggon für die Geschwindigkeit des Lichts 1 080 000 000 km/h misst?
 - In Abbildung 4.3 auf der nächsten Seite steht der Tisch samt Taschenlampe auf dem Bahndamm. Das Radar auf dem Boden misst für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h und für die Geschwindigkeit des Lichts 1 080 000 000 km/h. Was misst das Radar auf dem Waggon für die Geschwindigkeit des Lichts, wenn die Taschenlampe in Fahrtrichtung des Zuges leuchtet? Begründung! Was misst das Radar auf dem Waggon für die Geschwindigkeit des Lichts, wenn die Taschenlampe gegen die Fahrtrichtung des Zuges leuchtet? Begründung!
 - In Abbildung 4.2 ändert sich der Abstand zwischen der Taschenlampe und dem Radar auf dem Waggon nicht. Der Abstand zwischen dem Radar auf

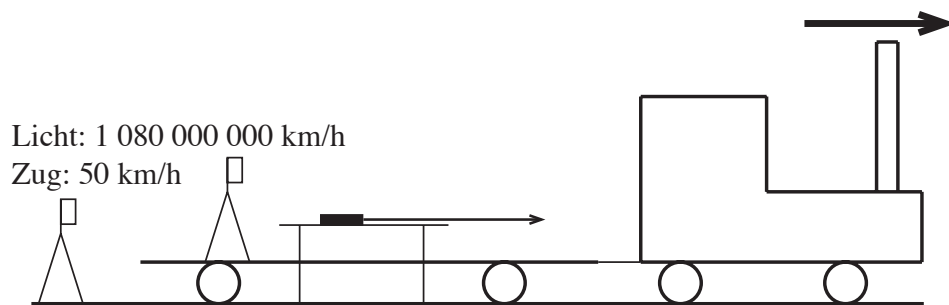


Abbildung 4.3.: Zu Frage 3 auf der vorherigen Seite

dem Boden und der Taschenlampe ändert sich ständig. In Abbildung 4.3 ändert sich der Abstand zwischen der Taschenlampe und dem Radar auf dem Boden nicht. Der Abstand zwischen der Taschenlampe und dem Radar auf dem Waggon ändert sich ständig. Nehmen wir an, die beiden Radargeräte und die Taschenlampe könnten nur sich selbst, einander und das ausgesandte Licht „sehen“ und nicht den Rest der Welt. Könnten dann die Taschenlampe und das Radar, dessen Abstand zur Taschenlampe sich nicht ändert, feststellen, ob sie sich beide auf dem Boden oder auf dem Waggon befinden? Begründung!

5. In Wirklichkeit misst man für die Geschwindigkeit des Lichts immer 1 080 000 000 km/h. Was sagst du dazu?
6. Wie können die Taschenlampe und das Radar, dessen Abstand zur Taschenlampe sich nicht ändert, nun feststellen, ob sie sich auf dem Zug oder auf dem Boden befinden? Begründung!

Mit der Frage 1 auf Seite 27 sollte das Verständnis der SchülerInnen für die klassische Geschwindigkeitsaddition erhoben werden. Um umständliche Formulierungen zu vermeiden, bezüglich welches Koordinatensystems eine Geschwindigkeit zu verstehen sei, verwendete ich Radargeräte. Diese sind den SchülerInnen aus dem Straßenverkehr als Geschwindigkeitsmesser bekannt.

Mit den Fragen 2 und 3 auf der vorherigen Seite sollten die Vorstellungen der SchülerInnen bezüglich der Lichtgeschwindigkeit in Verbindung mit der Geschwindigkeitsaddition erhoben werden. Die Geschwindigkeit des Lichts ist in km/h angegeben, um mit einer für SchülerInnen gewohnten Einheit zu operieren. Es ist mir durchaus bewusst, dass man die Geschwindigkeit von Licht nicht mit Radargeräten messen kann. Für die SchülerInnen ergeben sich damit aber keinerlei gedankliche Schwierigkeiten. Die Radargeräte stehen hier stellvertretend für experimentelle Vorrichtungen, mit denen man die Geschwindigkeit des Lichts

messen kann. Die durchgängige Verwendung von Radargeräten zur Geschwindigkeitsmessung soll die strukturelle Gleichheit der dargestellten Situationen hervorheben.

Mit der Frage 4 auf Seite 28 und der Frage 6 auf der vorherigen Seite sollte das Verständnis der SchülerInnen für das Relativitätsprinzip im Kontext der Geschwindigkeit des Lichts getestet werden.

Mit der Frage 5 auf der vorherigen Seite sollte erhoben werden, wie sehr die SchülerInnen bereit sind, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu akzeptieren.

4.1.1. Auswertung der Interviews zu Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

4.1.1.1. Die Messbarkeit des gefragten Werts

Sieben der elf interviewten SchülerInnen haben zunächst Bedenken, ob die Radargeräte die Geschwindigkeit des zu untersuchenden Objekts überhaupt messen können.

Schüler 1 begründet seine Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit eines auf dem Zug sitzenden Menschen 50 km/h, so:

- ¹**Schüler 1:** *Ja, weil der (Radar auf dem Boden; Anm.) für den Zug*
² *misst und der (Radar auf dem Waggon; Anm.) für den Menschen.*

Zitat 1

Schüler 1 antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht der nach vorne leuchtenden Taschenlampe auf dem Waggon messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Waggon für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h misst:

- ¹**Schüler 1:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Der misst doch das Licht*
² *gar nicht, oder?*

Zitat 2

Schüler 1 akzeptiert in weiterer Folge, dass das Radargerät darauf eingestellt werden kann, wessen Geschwindigkeit es messen soll.

Schüler 2 antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für den Richtung Lokomotive gehenden Menschen messe, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Waggon für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst:

- 1 **Schüler 2:** *Ja. Ich glaub nicht, dass der ... also das Radargerät (auf*
2 *dem Boden; Anm.) jetzt den Menschen wirklich wahrnimmt, weil*
3 *ähm ...*

Zitat 3

Schüler 2 akzeptiert in weiterer Folge, dass das Radar auf dem Boden darauf eingestellt werden kann, die Geschwindigkeit des Menschen zu messen, sieht aber Schwierigkeiten, wenn das Radar auf dem Zug die Geschwindigkeit des Lichts einer am Bahndamm liegenden, in Bewegungsrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messen soll:

- 1 **Schüler 2:** *Also, ich könnte es mir vorstellen, weil ... ähm ... wenn*
2 *jetzt ... wenn das Radar ... es ist ja aus einer anderen Per-*
3 *spektive als das Radar am Boden ... und ich glaub auch, dass*
4 *das Radar nur sehr kurz jetzt die Zahl zeigen wird, weil danach*
5 *nichts mehr ...*

Zitat 4

Schüler 2 akzeptiert in weiterer Folge den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung.

Schüler 4 ist der Ansicht, das Radar auf dem Boden könne die Geschwindigkeit des auf dem Zug gehenden Menschen nicht messen, und begründet das folgendermaßen:

- 1 **Schüler 4:** *Weil's wahrscheinlich so auf den Zug abgestimmt ist oder*
2 *so ...*

Zitat 5

Schüler 4 akzeptiert in weiterer Folge, dass das Radar auf dem Boden die Geschwindigkeit des Menschen messen kann.

4. SchülerInnenvorstellungen

Schülerin 6 glaubt zunächst, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 50 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 6:** [...] ... na, er sieht doch nur diesen Zug sich bewegen
2 oder? Der Radar?

Zitat 6

Schülerin 6 akzeptiert in weiterer Folge, dass das Radar auf dem Boden auch die Geschwindigkeit des Menschen messen kann.

Schülerin 8 macht sich Gedanken über den Messprozess. Sie erkundigt sich bei der Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für das Licht einer am Bahndamm liegenden, in Bewegungsrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messe:

- 1 **Schülerin 8:** Nein, wie viel Kilometer ist es (Radar auf dem Waggon
2 von der Taschenlampe; Anm.) davon entfernt? Das ist wurscht?

Zitat 7

Schülerin 9 ist zunächst der Ansicht, das Radar auf dem Boden könne die Geschwindigkeit des auf dem Zug gehenden Menschen nicht messen, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 9:** Na ja, nein, weil das Radargerät ... da ist ja noch ein
2 Radargerät, und das misst ja den Menschen.

Zitat 8

Sie antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für das Licht einer am Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messe, wenn das Radar auf dem Boden dafür 1 080 000 000 km/h und für den Zug 50 km/h misst:

¹**Schülerin 9:** *Ich glaube, das misst gar nicht fürs Licht.*

Zitat 9

Schülerin 9 akzeptiert in weiterer Folge, dass das Radargerät darauf eingestellt werden kann, wessen Geschwindigkeit es messen soll.

Schülerin 11 glaubt zunächst nicht, dass das Radar auf dem Boden die Geschwindigkeit eines auf dem Zug gehenden Menschen misst, kann aber nicht sagen, warum. Sie akzeptiert aber in weiterer Folge, dass das Radargerät darauf eingestellt werden kann, wessen Geschwindigkeit es messen soll.

4.1.1.2. SchülerInnenvorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition für Alltagsgeschwindigkeiten

Schüler 1 kann zunächst nicht sagen, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für den auf dem Zug in Richtung Lokomotive gehenden Menschen messe, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst. Schüler 1 würde es unlogisch finden, messe das Radar auf dem Boden für den Menschen eine Geschwindigkeit von mehr als 50 km/h, da ein Mensch nicht so schnell laufen kann. Über das Beispiel, was das Radar auf dem Boden für einen auf dem Zug setzenden Menschen messen würde, meint Schüler 1 nach längerer Diskussion, das Radar auf dem Zug messe für den gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h.

Auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für den auf dem Zug in Richtung Zugende gehenden Menschen messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, antwortet Schüler 1:

¹**Schüler 1:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... 4 km/h.*

Zitat 10

Nach einiger Diskussion lässt sich Schüler 1 als richtige Antwort 46 km/h entlocken.

Schüler 2 ist, nachdem er akzeptiert hat, dass das Radar auf dem Boden die Geschwindigkeit des Menschen messen kann (siehe Zitat 3 auf Seite 31), der Ansicht, es messe für die Geschwindigkeit des auf dem Zug in Richtung Lokomotive gehenden Menschen 54 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das folgendermaßen:

- 1 **Schüler 2:** *Weil, wenn der Mensch auf dem Waggon 4 km/h geht ...*
2 *[...] ... und der Zug 50 km/h fährt, dass der Mensch wahr-*
3 *scheinlich ein bisschen schneller ist. Da der auf dem Waggon ...*
4 *50 km/h ... und 4 km/h geht er. Tja, ich würd es halt so sagen.*

Zitat 11

Schüler 2 kann nicht sagen, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für den auf dem Zug in Richtung Zugende gehenden Menschen messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst. Vergleiche mit dem Fall, in dem der Mensch Richtung Lokomotive geht, helfen Schüler 2 auch nicht weiter. Er sagt:

- 1 **Schüler 2:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Das weiß ich nicht. Ich glaub*
2 *nicht, dass ich jetzt da irgendwie ...*

Zitat 12

Schülerin 3 beantwortet die Frage, ob sie sich vorstellen könne, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für den auf dem Zug in Richtung Lokomotive gehenden Menschen messe, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, so:

- 1 **Schülerin 3:** *(6 Sekunden Pause; Anm.) ... Na ja ... (9 Sekunden*
2 *Pause; Anm.) ... nicht ganz.*

Zitat 13

In weiterer Folge ist sie der Ansicht, das Radar auf dem Boden müsse für den Menschen eine kleinere Geschwindigkeit als 50 km/h messen, weil der Mensch nicht so schnell sein kann wie der Zug. Auch über den Umweg eines auf dem Zug sitzenden Menschen kann Schülerin 3 kein Ergebnis finden.

Sie ist der Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug Richtung Zugende gehenden Menschen dieselbe Geschwindigkeit wie für den Zug, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 3:** *Na ja, im Prinzip ... keine Ahnung ... ich wei..., ich*
2 *weiß nicht so genau, na, es ist ja egal, ob er sitzt oder steht,*
3 *weil ... weil er die ganze Zeit im Zug ist und der Zug fährt ja*
4 *und nicht der Mensch. Also, der Mensch fährt im Zug, aber ...*
5 *[...] ... aber der Zug macht ja die Geschwindigkeit und der*
6 *Mensch ist ja im Prinzip ja nur ein Teil davon.*

Zitat 14

Schüler 4 ist, nachdem er den Messprozess als Sammlung von Daten mit späterer Auswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 5 auf Seite 31), nach einer Diskussion der Meinung, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Richtung Lokomotive gehenden Menschen 54 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst.

Schüler 4 begründet seine Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Richtung Zugende gehenden Menschen 46 km/h, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das folgendermaßen:

- 1 **Schüler 4:** *Ja, weil er jetzt dann zurückgeht und die ... minus die*
2 *4 km/h.*

Zitat 15

4. SchülerInnenvorstellungen

Schüler 5 antwortet auf die Frage, ob er sich vorstellen könne, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für den auf dem Zug in Richtung Lokomotive gehenden Menschen messe, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst:

- 1 **Schüler 5:** *Ahm, warten Sie, ähm ... nein ... (5 Sekunden Pause;*
2 *Anm.) ... keine Ahnung.*

Zitat 16

Über das Beispiel, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für einen auf dem Zug sitzenden Menschen messen würde, findet er für den gehenden Menschen als Lösung 54 km/h. Schüler 5 findet es nun logisch, dass zu den 50 km/h die 4 km/h dazugezählt werden müssen, kann aber nicht erklären, warum.

Schülerin 6 ist, nachdem sie akzeptiert hat, dass das Radar auf dem Boden die Geschwindigkeit des Menschen messen kann (siehe Zitat 6 auf Seite 32), der Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug in Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 6:** *Und der Zug fährt 50 km/h. [...] Und der Mensch geht*
2 *4 km/h. [...] Also, und das zusammen 54.?*

Zitat 17

Sie ist der Meinung, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug in Richtung Zugende gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 6:** *Na ja, wenn er am Zug herumgeht und immer 4 km/h ...*
2 *[...] ... geht auch zurück, ist die Geschwindigkeit ja immer 54.*

Zitat 18

Schüler 7 ist der Meinung, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug in Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das so:

- 1 **Schüler 7:** *Na ja, weil der Zug selber hat 4 km/h, also ... [...] ...*
- 2 *also 50. Er selber schafft 50 Kilometer pro Stunde. [...] Und*
- 3 *der (Mensch; Anm.) schafft noch dazu vier Kilometer pro Stunde.*
- 4 *[...] Also sind das 54.*

Zitat 19

Schüler 7 ist der Meinung, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug in Richtung Zugende gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 46 km/h, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das folgendermaßen:

- 1 **Schüler 7:** *Weil er das, die 4 km/h halt zurückgeht und das wird*
- 2 *eben ... also dadurch wird er langsamer und kommt nicht so*
- 3 *schnell zum Ziel.*

Zitat 20

Schülerin 8 begründet ihre Meinung, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug in Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, so:

- 1 **Schülerin 8:** *Weil 50 plus 4.*

Zitat 21

Sie begründet ihre Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug in Richtung Zugende gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, folgendermaßen:

4. SchülerInnenvorstellungen

¹**Schülerin 8:** *Das Gleiche wie vorhin, nur diesmal müsste man's ab-*
² *ziehen.*

Zitat 22

Schülerin 9 kann zunächst nicht sagen, ob das Radar auf dem Boden irgendeinen Wert für die Geschwindigkeit des auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen anzeige, obwohl sie akzeptiert hat, dass man das Radar so einstellen kann, dass es die Geschwindigkeit des Menschen misst (siehe Zitat 8 auf Seite 32). Falls der Mensch auf dem Zug sitzt, zeige das Radar auf dem Boden keine Geschwindigkeit an, weil er sich dann nicht bewege. Schülerin 9 präzisiert dann:

¹**Schülerin 9:** *Na ja, wenn's für den Menschen extra misst, dann Null,*
² *weil er sich nicht bewegt, sondern nur im Zug sitzt. Und wenn*
³ *er für den Menschen und den Zug zusammen, dann 50.*

Zitat 23

Daraufhin überlegt sich Schülerin 9, dass das Radar auf dem Boden für den gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h misst, wenn es Mensch und Zug zusammen misst.

Schülerin 9 beantwortet die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für den auf dem Zug Richtung Zugende gehenden Menschen messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, so:

¹**Schülerin 9:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Das weiß ich nicht.*

Zitat 24

Schülerin 10 ist zunächst der Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 6 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, kann das aber nicht begründen. Nach einer Diskussion glaubt Schülerin 10, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit eines auf dem Zug sitzenden Menschen 50 km/h. Dann ist sie der Meinung, dieses Radar messe auch für die Geschwindigkeit des auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 50 km/h, und begründet das so:

¹**Schülerin 10:** *Auch wieder 50, weil er geht ja eigentlich nur nach*
² *vorne.*

Zitat 25

Nach einer sehr langen und intensiven Diskussion, in der die Geschwindigkeiten von auf und neben dem Zug gehenden Menschen verglichen werden, kommt Schülerin 10 zu dem Schluss, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h.

Schülerin 10 ist er Meinung, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug Richtung Zugende gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 46 km/h, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schülerin 10:** *Werden die 4 km/h abgezogen.*

Zitat 26

Schülerin 11 ist, nachdem sie akzeptiert hat, dass das Radar auf dem Boden die Geschwindigkeit des Menschen messen kann, der Meinung, es messe für den auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h, wenn es für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, und begründet das so:

4. SchülerInnenvorstellungen

- ¹**Schülerin 11:** *Na ja, weil der Mensch geht 4 km/h ... [...] ... und*
² *der Zug 50. [...] Ja, 54.*

Zitat 27

Schülerin 11 begründet ihre Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für den auf dem Zug Richtung Zugende gehenden Menschen eine Geschwindigkeit von 54 km/h, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h misst, folgendermaßen:

- ¹**Schülerin 11:** *Das ist ja trotzdem 4 km/h. [...] Na, er geht ja nicht*
² *anders, nur weil er halt andere Richtung geht. Ich weiß nicht.*

Zitat 28

Schülerin 11 gibt zu, dass das im Widerspruch zu dem Beispiel steht, in dem der Mensch in Richtung Lokomotive geht, kann diesen Widerspruch aber nicht auflösen und gibt zu, verwirrt zu sein.

4.1.1.3. SchülerInnenvorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition unter Einbeziehung der Lichtgeschwindigkeit

Schüler 1 antwortet, nachdem er akzeptiert hat, dass das Radar auf dem Boden darauf eingestellt werden kann, wessen Geschwindigkeit es messen soll (siehe Zitat 2 auf Seite 30), auf die Frage, welche Geschwindigkeit dieses Radar für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h misst, Folgendes:

- ¹**Schüler 1:** *Wahrscheinlich beides zusammen.*

Zitat 29

Auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h misst, antwortet Schüler 1:

4.1. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

- 1 **Schüler 1:** *Dann wir er ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... dann müsste*
2 *man wieder das von dem abziehen.*

Zitat 30

Schüler 1 begründet seine Ansicht, das Radar auf dem Zug messe für das Licht einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe denselben Wert wie das Radar auf dem Boden, folgendermaßen:

- 1 **Schüler 1:** *(4 Sekunden Pause; Anm.) ... Weiß ich nicht.*

Zitat 31

Schüler 2 begründet seine Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h mehr als das Radar auf dem Zug, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, so:

- 1 **Schüler 2:** *Ja, weil ... ähm ... ich könnt mir vorstellen, dass das*
2 *Radargerät jetzt den Zug und das Licht also addieren würde.*

Zitat 32

Die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h für das Licht misst, beantwortet Schüler 2 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 2:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich kann es mir nicht vor-*
2 *stellen, was es ...*

Zitat 33

4. SchülerInnenvorstellungen

Schüler 2 beantwortet, nachdem er die Messung als Datensammlung mit anschließender Auswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 4 auf Seite 31), die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für das Licht einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messe, wenn das Radar auf dem Boden dafür eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h und für den Zuge eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, so:

- 1 **Schüler 2:** (8 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja, 50 km/h mehr. Ich weiß
2 nicht, wieso. Ich glaub ... [...] Das ist geraten.

Zitat 34

Schülerin 3 antwortet auf die Frage, ob sie sich vorstellen könne, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h misst:

- 1 **Schülerin 3:** (6 Sekunde Pause; Anm.) ... Na ja, hm, ahm, ... (4 Se-
2 kunden Pause; Anm.) ... nicht wirklich. Also ich kann mir nicht
3 so viel darunter vorstellen.

Zitat 35

Sie beantwortet die Frage, ob sie sich vorstellen könne, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h misst, folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 3:** (7 Sekunden Pause; Anm.) ... N... nein, nein, ich kann's
2 wirklich nicht.

Zitat 36

Schüler 4 begründet seine Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h mehr als das Radar auf dem Zug, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, folgendermaßen:

¹**Schüler 4:** *Ja weil der wieder so vorgeht wie bei Abbildung 1 (Situati-*
²*on aus Abbildung 4.1 auf Seite 27; Anm.).*

Zitat 37

Schüler 4 beantwortet die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h misst, so:

¹**Schüler 4:** *Äh, 1 080 000 000 minus 50.*

Zitat 38

Schüler 4 beantwortet die Frage, ob er sagen könne, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für das Licht einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messe, wenn das Radar auf dem Boden dafür eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h und für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, folgendermaßen:

¹**Schüler 4:** *Nein.*

Zitat 39

Schüler 5 beantwortet die Frage, warum er der Meinung sei, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe denselben Wert wie das Radar auf dem Boden, wenn dieses für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, so:

4. SchülerInnenvorstellungen

- 1 **Schüler 5:** (2 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung. Das war jetzt
2 so logisch einfach das.

Zitat 40

Er kann nicht begründen, warum er das logische findet und bleibt auch nach dem Vergleich mit dem gehenden Menschen, bei dem beide Radargeräte einen unterschiedlichen Wert messen, bei seiner Ansicht.

Schüler 5 ist der Ansicht, das Radar auf dem Zug messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h mehr als das Radar auf dem Boden, wenn dieses für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst. Auf die Bitte nach einer Begründung antwortet Schüler 5:

- 1 **Schüler 5:** (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung.

Zitat 41

Schülerin 6 ist der Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h mehr als das Radar auf dem Zug, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, und begründet das folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 6:** Na ja, da ja der Zug fährt 50 km/h und das Licht dazu, ...
2 [...] ... ist halt ... (2 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... eine
3 Milliarde blabla ... [...] ... plus 50.

Zitat 42

Schülerin 6 antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h und das Radar auf dem Zug für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h misst:

- 1 **Schülerin 6:** Dasselbe wie wenn es in diese Richtung (Richtung Lok;
2 Anm.) geht.

Zitat 43

Schülerin 6 begründet diese Antwort damit, dass die Situation dieselbe sei wie beim Menschen, der auf dem Zug geht (siehe Zitat 18 auf Seite 36).

Schülerin 6 begründet ihre Meinung, das Radar auf dem Zug messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h weniger als das Radar auf dem Boden, wenn dieses für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, so:

- 1 **Schülerin 6:** *Weil sich das (Radar auf dem Zug; Anm.) ja auch 50 km/h*
2 *bewegt. [...] Und dann kommt's halt irgendwie weg bei dem*
3 *Licht.*

Zitat 44

Schülerin 6 ist der Ansicht, das Radar auf dem Zug messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Bahndamm liegenden und gegen die Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h weniger als das Radar auf dem Boden, wenn dieses für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, und erklärt das so:

- 1 **Schülerin 6:** *Na, ist wieder dasselbe, nur halt dass das Licht in die*
2 *andere Richtung geht.*

Zitat 45

Schülerin 6 ist offenbar der Ansicht, es müsse addiert werden, wenn sich die Lichtquelle bewegt, und es müsse subtrahiert werden, wenn sich das Radar bewegt, wobei Schülerin 6 die Bewegung auf die Erdoberfläche bezieht. Im weiteren Verlauf des Interviews gibt Schülerin 6 zu, dass ihre Antworten eher geraten waren (siehe Kommentar zu Zitat 73 auf Seite 54).

Schüler 7 ist der Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h mehr als das Radar auf dem Zug, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, und begründet das so:

- 1 **Schüler 7:** *Ähm, das Licht ist ja ... das kann sich ja genauso gut nach*
2 *vorn bewegen wie ein Mensch.*

Zitat 46

4. SchülerInnenvorstellungen

Schüler 7 begründet seine Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h weniger als das Radar auf dem Zug, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, folgendermaßen:

1 Schüler 7: *Weil das Licht fährt also zurück.*

Zitat 47

Schüler 7 hat Probleme zu sagen, welchen Wert das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe misst, wenn das Radar auf dem Boden dafür 1 080 000 000 km/h und für den Zug 50 km/h misst. Zunächst meint Schüler 7, das Radar auf dem Boden würde 50 km/h messen, korrigiert aber dann auf 1 080 000 050 km/h. Dann ist Schüler 7 der Ansicht, das Radar auf dem Zug würde dasselbe messen wie das Radar auf dem Boden, und kommt zu dem Schluss:

1 Schüler 7: *Ich weiß leider nicht.*

Zitat 48

Schüler 7 antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Bahndamm liegenden und gegen die Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messe, wenn das Radar auf dem Boden dafür 1 080 000 000 km/h und für den Zug 50 km/h misst, Folgendes:

1 Schüler 7: *Also, er wird jedenfalls, ähm ... (11 Sekunden Pause;*
2 *Anm.) ... also ich würd sagen, es wird trotzdem dazugerechnet,*
3 *weil es zählt ja die Geschwindigkeit und nicht unbedingt die*
4 *Richtung.*

Zitat 49

Schülerin 8 ist der Ansicht, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe denselben Wert wie das Radar auf dem Boden, wenn dieses Radar für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h misst, und begründet das folgendermaßen:

- ¹ **Schülerin 8:** *Weil's ... ich weiß nicht, aber das Licht wird ja nicht*
² *schneller. [...] Weil das Licht einfach nicht schneller wird.*

Zitat 50

Schülerin 8 antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h und das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des Licht 1 080 000 000 km/h misst:

- ¹ **Schülerin 8:** *Dasselbe. [...]*

Zitat 51

Auf Nachfrage bekräftigt sie mehrmals den Unterschied zwischen dieser Situation und der Situation, in der ein Mensch auf dem Zug geht.

Wenn die Taschenlampe auf dem Bahndamm liegt und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtet, ist Schülerin 8 der zunächst Ansicht, das Radar auf dem Zug messe für die Geschwindigkeit des Lichts dieser Taschenlampe einen geringeren Wert als das Radar auf dem Boden, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst. Auf Rückfrage korrigiert sich Schülerin 8 und meint, beide Radargeräte würden für die Geschwindigkeit des Lichts denselben Wert messen.

Nachdem sich Schülerin 8 davon überzeugt hat, dass das Radar auf dem Zug alle relevanten Messwerte zur Verfügung bekommt (siehe Zitat 7 auf Seite 32), antwortet Schülerin 8 auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für das Licht einer auf dem Bahndamm liegenden und gegen die Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messe, wenn das Radar auf dem Boden dafür 1 080 000 000 km/h und für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, folgendermaßen:

- ¹ **Schülerin 8:** *Ja dann bleibt's gleich.*

Zitat 52

4. SchülerInnenvorstellungen

Sie gibt im Laufe des Interviews zu, in einer Wissenschaftssendung schon von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gehört zu haben. Schülerin 8 habe das damals seltsam gefunden, aber nach einer Erklärung verstanden. An die Erklärung kann sich Schülerin 8 aber nicht mehr erinnern.

Schülerin 9 antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h und das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des Licht 1 080 000 000 km/h misst:

- 1 **Schülerin 9:** *Das Licht ... [...] ... plus die Geschwindigkeit vom*
2 *Zug.*

Zitat 53

Schülerin 9 beantwortet die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h und das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des Licht 1 080 000 000 km/h misst, so:

- 1 **Schülerin 9:** *Na wie vorhin, dass die Geschwindigkeit vom Licht da-*
2 *zugezählt wird zu der vom Zug.*

Zitat 54

Schülerin 9 ist, nachdem sie akzeptiert hat, dass das Radargerät darauf eingestellt werden kann, wessen Geschwindigkeit es messen soll (siehe Zitat 9 auf Seite 33), der Ansicht, das Radar auf dem Zug messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Bahndamm liegenden und in oder gegen die Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe 50 km/h mehr als das Radar auf dem Boden, wenn dieses für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, und begründet das folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 9:** *Ahm, na ja, weil's ja eigentlich egal ist, ob's nach vorn*
2 *oder nach hinten schaut. Wenn's immer die gleiche Geschwin-*
3 *digkeit ist, dann, ahm, wird ja dazugezählt.*

Zitat 55

Schülerin 10 antwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h und das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des Licht 1 080 000 000 km/h misst, Folgendes:

- 1 **Schülerin 10:** *Also, eine Million, nein, eine Million acht... achtzig-*
2 *tausend ... [...] ... also 80 000 000 plus 50.*

Zitat 56

Schülerin 10 beantwortet auf die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Boden für das Licht einer auf dem Zug liegenden und in Richtung Zugende leuchtenden Taschenlampe messe, wenn dieses Radar für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h und das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des Licht 1 080 000 000 km/h misst, so:

- 1 **Schülerin 10:** *Minus 50.*

Zitat 57

Schülerin 10 beantwortet die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für das Licht einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe messe, wenn das Radar am Boden dafür 1 080 000 000 km/h und für den Zug 50 km/h messe, folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 10:** *Ich denke, minus 50, weil der Radar, ... [...] ... der*
2 *da oben steht fürs Licht, steht ja oben ... [...] ... und das Licht*
3 *ja unten. [...] Das heißt, man muss es abziehen.*

Zitat 58

Schülerin 11 ist der Meinung beide Radargeräte mäßten für das Licht einer auf dem Zug liegenden und Richtung Lokomotive leuchtenden Taschenlampe dieselbe Geschwindigkeit, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, kann diese Ansicht aber nicht begründen. Sie bleibt bei dieser Ansicht, obwohl sie darauf angesprochen wird, dass ihrer Meinung nach die Radargeräte für einen auf dem Zug gehenden Menschen (siehe

Zitat 27 auf Seite 40) und für das Licht einer auf dem Bahndamm liegenden Taschenlampe (siehe Zitat 59) unterschiedliche Werte anzeigen.

Schülerin 11 begründet ihre Ansicht, das Radar auf dem Zug messe für die Geschwindigkeit des Lichts einer auf dem Bahndamm liegenden und in Fahrtrichtung des Zuges leuchtenden Taschenlampe um 50 km/h mehr als das Radar auf dem Boden, wenn dieses Radar für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, so:

¹**Schülerin 11:** *Weil die 50 km/h vom Zug auch dabei sind.*

Zitat 59

4.1.1.4. SchülerInnenvorstellungen zum Relativitätsprinzip im Kontext der Geschwindigkeit des Lichts

Schüler 1 begründet seine Ansicht, Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, könnten nicht feststellen, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden, folgendermaßen:

¹**Schüler 1:** *Ja, weil der Abstand immer gleich bleibt. [...] Ist ja*

² *wurscht, ob am Zug oder ...*

Zitat 60

Schüler 1 hält die beiden Situationen für gleichwertig, weil sich die Entfernung von Taschenlampe und Radar jeweils nicht ändert.

Schüler 2 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

¹**Schüler 2:** *(5 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich glaub nicht. [...] Ja,*

² *weil der ... wenn der ... ähm ... also wenn sich die Entfernung*

³ *nicht ändert ...*

Zitat 61

Schüler 2 hält die beiden Situationen für gleichwertig, weil sich die Entfernung von Taschenlampe und Radar jeweils nicht ändert.

Schülerin 3 kann keine schlüssige Aussage darüber machen, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden.

Schüler 4 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

¹**Schüler 4:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... *Ich glaub nicht.*

Zitat 62

Schüler 4 gibt zu, dass diese Antwort geraten war. Das zeigt, dass er für die gegebene Situation zumindest intuitiv eine gute Vorstellung vom Relativitätsprinzip hat.

Schüler 5 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

¹**Schüler 5:** (5 Sekunden Pause; Anm.) ... *Nein.*

Zitat 63

Schüler 5 gibt zu, dass diese Antwort geraten war. Das zeigt, dass er für die gegebene Situation zumindest intuitiv eine gute Vorstellung vom Relativitätsprinzip hat.

Schülerin 6 begründet ihre Ansicht, Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, könnten nicht feststellen, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden, folgendermaßen:

¹**Schülerin 6:** *Na ja, da bleibt ja die Geschwindigkeit ja immer gleich.*
² *Das heißt, es ist egal, ob das jetzt auf dem Zug steht, weil,*
³ *wenn der Zug jetzt n... stehen würde, ... [...] ... wär die*
⁴ *Geschwindigkeit vom Licht ja noch immer gleich.*

Zitat 64

4. SchülerInnenvorstellungen

Zitat 64 auf der vorherigen Seite ist nicht unbedingt ein Widerspruch zu den früheren Aussagen von Schülerin 6 (Zitate 42 und 43 auf Seite 44 sowie Zitate 44 und 45 auf Seite 45), da zu allen Aufgaben zur Geschwindigkeitsaddition die Geschwindigkeit des Lichts bezüglich eines zur Taschenlampe ruhenden Radars mit demselben Wert vorgegeben war.

Schüler 7 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 7:** ... ja, aber ich würd sagen, der (Apparat; Anm.), der hier
2 oben steht (auf dem Waggon; Anm.), misst um 50 km/h mehr (für
3 die Geschwindigkeit des Lichts; Anm.), weil der am Zug ist ...
4 [...] ... und der Zug fährt und der (Apparat; Anm.) da unten
5 (auf dem Boden; Anm.) eben, der misst nur das Licht.

Zitat 65

Schüler 7 kommt von selbst auf die Idee des Michelson-Morley-Versuchs, [Goe04]. Nachdem Schüler 6 eröffnet wurde, was die Radargeräte tatsächlich messen würden, antwortet er auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, nun feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 7:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (6 Sekunden Pause;
2 Anm.) ... na ja, also so jetzt, äh, nein.

Zitat 66

Schüler 7 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 8 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schülerin 8:** Sie können's nicht. [...] Ahm, weil die Kilometer pro
2 Stunde gleich bleiben würden und ... [...] Des Lichts.

Zitat 67

Schülerin 8 kommt von selbst auf die Idee des Michelson-Morley-Versuchs, [Goe04]. Schülerin 8 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schüler 9 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 9:** (2 Sekunden Pause; Anm.) ... Mh ... (5 Sekunden Pause;
2 Anm.) ... ich glaub nicht. [...] Na ja, weil sie sonst nichts
3 wahrnehmen.

Zitat 68

Schüler 9 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 10 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 10:** Das geht ja nicht.

Zitat 69

Schülerin 10 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 11 antwortet auf die Frage, ob Taschenlampe und Radar, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schülerin 11:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Nein.

Zitat 70

Schülerin 11 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

4.1.1.5. Reaktionen der SchülerInnen auf die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Am Ende des Interviews zur Geschwindigkeitsaddition wurde den SchülerInnen eröffnet, was die Radargeräte tatsächlich messen würden. Die SchülerInnen wurden um einen Kommentar zu diesem Sachverhalt gebeten.

Schüler 1 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Radargeräte für die Geschwindigkeit des Lichts dasselbe messen:

- ¹**Schüler 1:** *Ich hab keine Meinung dazu, weil ich hab das ... kann*
² *schon stimmen, ich weiß nicht.*

Zitat 71

Schüler 4 antwortet auf die Frage, ob er es seltsam finde, dass die beiden Radargeräte für die Geschwindigkeit des Lichts dasselbe messen:

- ¹**Schüler 4:** *Nein.*

Zitat 72

Schülerin 6 antwortet auf die Frage, ob sie es komisch finde, dass die beiden Radargeräte für die Geschwindigkeit des Lichts dasselbe messen:

- ¹**Schülerin 6:** *Nein.*

Zitat 73

Sie meint, es seien ihr eher ihre Antworten, die sie eigentlich nur geraten hat, komisch vorgekommen.

Schüler 7 gibt keinen Kommentar zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ab, sondern versucht, eine Erklärung zu finden.

Schülerin 9 kann mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gedanklich nicht viel anfangen.

Schülerin 10 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Radargeräte für die Geschwindigkeit des Lichts dasselbe messen:

- 1 **Schülerin 10:** *Das war jetzt eigentlich ur ... ich dachte, dass ich*
2 *richtig gelegen hab, weil's ... [...] ... kam f... kam für mich*
3 *total logisch vor. Dass das jetzt so war, da... dacht ich mir*
4 *wirklich nicht.*

Zitat 74

Schülerin 11 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Radargeräte für die Geschwindigkeit des Lichts dasselbe messen:

- 1 **Schülerin 11:** *Hätt ich nicht gedacht.*

Zitat 75

4.1.2. Zusammenfassung

Sieben der elf befragten SchülerInnen haben zunächst Bedenken, ein Radargerät könnte die Geschwindigkeit des Objekts, die das Radar messen sollte, nicht messen. Alle akzeptieren aber, dass die Radargeräte darauf eingestellt werden können, wessen Geschwindigkeit sie messen sollen.

Fünf der elf interviewten SchülerInnen finden spontan und ohne Hilfestellung die nach der klassischen Geschwindigkeitsaddition bezüglich des Erdbodens richtige Geschwindigkeit für den auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen. Weitere fünf SchülerInnen können diese Aufgabe mit Hilfestellungen im Laufe einer Diskussion gemäß der klassischen Geschwindigkeitsaddition korrekt lösen. Von den fünf, die diese Aufgabe ohne Hilfe richtig lösen, können nur zwei die richtige Antwort finden – und zwar ohne Hilfe –, wenn der Mensch Richtung Zugende geht. Von den fünf, die die Aufgabe mit dem Richtung Lokomotive gehenden Menschen erst nach Hilfestellung richtig lösen können, wurde vier die Aufgabe mit dem Richtung Zugende gehenden Menschen gestellt. Von diesen vier kann einer diese Aufgabe ohne Mithilfe richtig lösen und mit Unterstützung können es zwei davon.

Zwei der elf Befragten sind der Ansicht, die Geschwindigkeit des Zuges bezüglich der Erdoberfläche und die Geschwindigkeit des Menschen bezüglich

des Zuges müssten unabhängig von der Gehrichtung des Menschen addiert werden. Möglicherweise haben diese Schülerinnen das *Und* im Satz „Der Zug fährt mit 50 km/h *und* der Mensch geht mit 4 km/h“ in die Rechenoperation „+“ übersetzt, was kein physikalisches Verständnis widerspiegelt.

Wenn man davon ausgeht, dass jemand die klassische Geschwindigkeitsaddition samt der dahinter liegenden Physik nur dann verstanden hat, wenn er/sie die Geschwindigkeit bezüglich des Erdbodens des auf dem Zug gehenden Menschen unabhängig von seiner Gehrichtung finden kann, hatten höchstens zwei der elf befragten SchülerInnen bereits von dem Interview eine korrekte Vorstellung über die klassische Geschwindigkeitsaddition und die dahinter liegende Physik und höchstens drei weitere nehmen diese Vorstellung im Lauf des Interviews an.

Sieben der zehn SchülerInnen, die die nach der klassischen Geschwindigkeitsaddition bezüglich des Erdbodens richtige Geschwindigkeit für den auf dem Zug Richtung Lokomotive gehenden Menschen finden konnten, wenden auf das Licht die klassische Geschwindigkeitsaddition an, wenn die Taschenlampe Richtung Lokomotive leuchtet. Zwei dieser zehn SchülerInnen meinen, das Radar auf dem Boden messe für die Geschwindigkeit des Lichts denselben Wert wie das Radar auf dem Zug, wenn das Radar auf dem Boden für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h misst, können das aber nicht begründen. Eine dieser zehn SchülerInnen hatte bereits vor dem Interview von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gehört und wendet dieses Wissen an. Diese Schülerin hat die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit offenbar sehr schnell und gut akzeptiert.

Alle vier SchülerInnen, die die nach der klassischen Geschwindigkeitsaddition bezüglich des Erdbodens richtige Geschwindigkeit für den auf dem Zug gehenden Menschen unabhängig von dessen Gehrichtung finden und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht kennen, wenden die klassische Geschwindigkeitsaddition auch auf das Licht an.

Wenn die Taschenlampe auf dem Bahndamm liegt, beantworten die SchülerInnen die Frage, welche Geschwindigkeit das Radar auf dem Zug für die Geschwindigkeit des von der Taschenlampe ausgehenden Lichts messe, praktisch immer falsch. Auch das deutet darauf hin, dass die klassische Geschwindigkeitsaddition nicht gut verstanden wird.

Zehn der elf interviewten SchülerInnen haben in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip im Kontext der Geschwindigkeitsmessung, obwohl viele von ihnen mit den Aufgaben zur Geschwindigkeitsaddition Schwierigkeiten haben.

Zwei von sieben SchülerInnen, die zu einem Kommentar zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gebeten wurden, sind davon überrascht. Drei von den sieben nehmen die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit phlegmatisch zur Kenntnis. Die restlichen zwei geben keinen Kommentar dazu ab. KeineR lehnt die

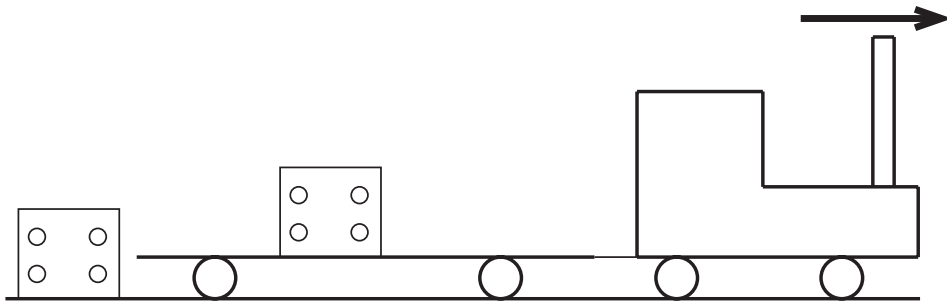


Abbildung 4.4.: Zu Frage 1

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit explizit ab. Für die meisten ist ein Bruch mit der klassischen Physik nicht erkennbar, wahrscheinlich, weil die klassische Geschwindigkeitsaddition nicht gut verstanden wird.

4.2. Gleichzeitigkeit

Von den elf SchülerInnen, die ich zum Thema Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit interviewte, befragte ich zehn zum Thema Relativität der Gleichzeitigkeit. Die Aufschlüsselung dieser SchülerInnen nach Schulstufe und Geschlecht findet sich in Tabelle 3.3 auf Seite 23.

Als Leitlinie für die Interviews verwendete ich folgenden Fragenkatalog:

1. In Abbildung 4.4 steht auf dem Boden und dem Waggon je ein Apparat, der messen kann, ob zwei Dinge gleichzeitig geschehen oder nicht. Der Zug fährt in der Nacht an einer Siedlung vorbei. In zwei Häusern, *A* und *B*, wird das Licht aufgedreht. Der Apparat, der auf dem Boden steht, misst, dass das Licht in beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde. Misst der Apparat, der auf dem Waggon steht ebenfalls, dass das Licht in den beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde, oder kann es sein, dass er misst, dass zuerst das Licht in Haus *A* aufgedreht wurde und später in Haus *B* bzw. zuerst in Haus *B* und später im Haus *A*? Begründung!
2. Würde es dir seltsam vorkommen, wenn der Apparat auf dem Waggon in Abbildung 4.4 messen würde, dass zuerst das Licht in Haus *A* aufgedreht wurde und später in Haus *B* bzw. zuerst in Haus *B* und später im Haus *A*? Begründung!
3. Während der Zug in Abbildung 4.4 an der Siedlung vorbei fährt, wird das Licht in zwei Häusern, *C* und *D*, aufgedreht. Der Apparat, der auf

dem Waggon steht, misst, dass das Licht in beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde. Misst der Apparat, der auf dem Boden steht ebenfalls, dass das Licht in den beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde, oder kann es sein, dass er misst, dass zuerst das Licht in Haus *C* aufgedreht wurde und später in Haus *D* bzw. zuerst in Haus *D* und später im Haus *C*? Begründung!

4. Würde es dir seltsam vorkommen, wenn der Apparat auf dem Boden in Abbildung 4.4 auf der vorherigen Seite messen würde, dass zuerst das Licht in Haus *C* aufgedreht wurde und später in Haus *D* bzw. zuerst in Haus *D* und später im Haus *C*? Begründung!

Mit der Frage 1 auf der vorherigen Seite sollten die SchülerInnenvorstellungen zur Gleichzeitigkeit erhoben werden. Anders als in vielen Darstellungen der Relativitätstheorie wird als BeobachterIn keine Person verwendet, die das Geschehen betrachtet, sondern die Messungen werden mit Messgeräten durchgeführt. Menschliche Sinnesorgane sind Täuschungen unterworfen und haben nur eine beschränkte Genauigkeit in der Wahrnehmung. SchülerInnen wissen das. Messgeräte können im Rahmen der Relativitätstheorie beliebig genau messen. Durch die Verwendung der Messgeräte erwartete ich, weniger eine Diskussion über die Wahrnehmung führen zu müssen und mich mehr auf die physikalischen Aussagen der Relativitätstheorie konzentrieren zu können.

Mit der Frage 2 auf der vorherigen Seite sollte die Akzeptanz der Relativität der Gleichzeitigkeit durch die SchülerInnen erhoben werden.

Die Fragen 3 auf der vorherigen Seite und 4 sind im Prinzip dieselben wie die Fragen 1 und 2 auf der vorherigen Seite, jedoch wurden die Messergebnisse des Apparats auf dem Zug vorgegeben. Mit diesen Fragen sollte erhoben werden, welche Unterschiede sich dadurch in den Vorstellungen der SchülerInnen ergeben.

Im Gespräch wurden die Begriffe Gerät und Apparat oftmals synonym verwendet. Es ist aber in jeder Situation klar, was gemeint ist.

4.2.1. Auswertung der Interviews zur Gleichzeitigkeit

4.2.1.1. Die Verwendung von Messgeräten

Sieben der zehn bezüglich Gleichzeitigkeit interviewten SchülerInnen akzeptieren die Messgeräte, ohne dies zu thematisieren. Insbesondere kommen keinerlei explizite Einwände, ein Messergebnis könne unscharf sein. Ein Schüler dürfte die Vorstellung haben, die Messgeräte könnten unscharf messen, thematisiert

das aber nicht explizit. Drei SchülerInnen thematisieren die Messgeräte von sich aus.

Schüler 2 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden (siehe Zitat 87 auf Seite 65). In der Begründung fällt folgende Aussage:

- 1 **Schüler 2:** *Weil, ähm, der Zug fährt ja sch... vorbei ... [...] ... und*
2 *es ist auch eine höhere Geschwindigkeit ... [...] ... und es ist*
3 *auch eher ein verschwommenes Bild, obwohl ... ja ...*

Zitat 76

Die Erklärung, bei den Messgeräten handle es sich um ideale Messgeräte, die ohne Unschärfe messen könnten, wird von Schüler 2 akzeptiert. In weiterer Folge beantwortet er die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden (siehe Zitat 88 auf Seite 66), ohne Überlegungen zur Messunschärfe anzustellen.

Schülerin 3 beantwortet die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, ohne Überlegungen zur Messunschärfe anzustellen (siehe Zitat 89 auf Seite 66). Im daraufhin angesprochenen umgekehrten Fall – wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden (siehe Zitat 90 auf Seite 67) – hat Schülerin 3 Bedenken. Auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, antwortet sie:

- 1 **Schülerin 3:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja, also, ich denke, hier*
2 *ist es wieder gleich, ... [...] ... oder ... ahm, der Apparat im*
3 *Zug misst das ein bisschen unterschiedlich, weil der eben mit*
4 *einer Geschwindigkeit vorbeifährt und dass er ... da hat er das*
5 *nicht so richtig irgend... im Visier oder hat das halt nicht so*
6 *richtig gesehen.*

Zitat 77

Obwohl der Messvorgang für den Apparat auf dem Zug in beiden Situationen derselbe ist, meint Schülerin 3, das Gerät verhalte sich in den beiden Fällen unterschiedlich. Das lässt sich aus der Angabe der Beispiele erklären. Wenn man nach dem Messergebnis des Apparats auf dem Boden fragt, ist das Messergebnis des Apparats auf dem Zug bereits vorgegeben. Ob dieses mit Unschärfe behaftet ist oder nicht, ist für Schülerin 3 irrelevant. Der Messvorgang muss gedanklich nicht nachvollzogen werden. Gefragt ist nur das Messergebnis des Apparats auf dem Boden, und für dieses gibt es keinen Grund, mit Unschärfe behaftet zu sein, da dieser Apparat und die Häuser zueinander ruhen. Nach dem Messergebnis des Apparats auf dem Zug gefragt, muss Schülerin 3 zunächst den Messvorgang dieses Apparats gedanklich konstruieren. Schülerin 3 weiß sicherlich aus eigener Erfahrung, dass man mit einem Blick aus einem fahrenden Zug die Umgebung unscharf sieht. Diese Erfahrung überträgt Schülerin 3 auf das Messgerät.

Sie lehnt in weiterer Folge die Existenz idealer Messgeräte nicht ab. Schülerin 3 ist dann der Ansicht, der Apparat auf dem Zug müsse dasselbe messen wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 3:** *Ah, weil sie wieder halt die gleiche Funktion haben und*
2 *weil sie eben so ... weil sie das genau sehen können.*

Zitat 78

Im Laufe des Interviews wird Schülerin 3 mit der Relativität der Gleichzeitigkeit konfrontiert und um eine Stellungnahme dazu ersucht. Schülerin 3 meint daraufhin zur Relativität der Gleichzeitigkeit:

- 1 **Schülerin 3:** *Nein, ich find das eigentlich relativ ... ich find das relativ*
2 *logisch, weil ... [...] ... der im Zug hat ja irgendwie so eine*
3 *andere ... andere Sicht zu dem ... [...] ... als wie der, der*
4 *am Boden steht und der ... [...] ... ja, dann kann man das ja*
5 *vielleicht nicht so genau sehen.*
6 *[...]*

- 7 **Wittmann:** *Aber vorher hast du grad gesagt, sozusagen, die zeigen*
8 *ja dasselbe an, weil sie gleich gebaut sind (siehe Zitat 89 auf*
9 *Seite 66 und Zitat 90 auf Seite 67; Anm.). Das musst du mir jetzt*
10 *erklären, wieso du das, sozusagen, eigentlich jetzt relativ schnell*
11 *deine Meinung geändert hast.*

- 12 **Schülerin 3:** *Na, also, ich denk, dass ich gesagt hab, dass sie gleich*
13 *sind, hab ich ja dann die zweite Möglichkeit gemeint, dass das*
14 *für den anderen Apparat ja nicht so richtig rüberkommt. [...]*

- 15 *Das hab ich damit gemeint. Das war nicht so gemeint, er sieht*
 16 *und dass er dann halt da nicht so richtig entscheiden kann.*

Zitat 79

Schülerin 3 akzeptiert zwar die Existenz eines idealen Messgeräts zu Messung der Gleichzeitigkeit, versteht aber offenbar etwas anderes darunter als gemeint war.

Wie bereits erwähnt, weiß Schülerin 3 sicherlich aus eigener Erfahrung, dass man mit einem Blick aus einem fahrenden Zug die Umgebung unscharf sieht. Wenn man sich aber konzentriert, kann man Einzelheiten trotzdem gut wahrnehmen. Diese Idee überträgt Schülerin 3 auf das Messgerät. Dafür spricht zunächst, dass sie nie erwähnt, der Apparat auf dem Boden messe unscharf. In Zitat 77 auf Seite 59 ist ersichtlich, dass Schülerin 3 einige Zeit abwägt und dann zu dem Schluss kommt, der Apparat auf dem Zug müsse unscharf messen. Das ideale Messgerät, das daraufhin im Interview thematisiert wird, kann Schülerin 3 nicht in ihre Ideenwelt integrieren. Schülerin 3 konstruiert sich daher gedanklich ein Messgerät, das in einem speziellen Fall (wenn es sich konzentriert) scharf messen kann, im allgemeinen Fall aber unscharf misst.

Dass der Apparat auf dem Zug scharf – nämlich dasselbe wie der auf dem Boden – misst, begründet Schülerin 3 in Zeile 2 von Zitat 78 auf der vorherigen Seite damit, „weil sie es genau sehen können“. Dieser Apparat wird in der speziellen Situation eingesetzt, die gerade zur Diskussion steht. Für Schülerin 3 ist damit ein spezieller Fall konstruiert, in der Apparat darauf getrimmt wurde, sich auf das Haus zu konzentrieren. Darum kann er scharf messen.

Die Frage zur Relativität der Gleichzeitigkeit als Einleitung zu Zitat 79 stellt einen allgemeinen Fall her. Der Apparat auf dem Zug konzentriert sich nicht auf bestimmte Ereignisse. Darum ist es für Schülerin 3 „logisch“ (Zeile 2 von Zitat 79), dass der Apparat auf dem Zug das „nicht so genau sehen [kann]“ (Zeile 5 von Zitat 79).

Auf einen vermeintlichen Widerspruch in ihren Aussagen hingewiesen (Zeile 7 bis Zeile 11 von Zitat 79) argumentiert Schülerin 3 mit zwei Möglichkeiten (Zeile 13 von Zitat 79), an die sie offenbar die ganze Zeit gedacht, diese aber nie angesprochen hat, nämlich die Möglichkeit für das Messgerät im speziellen Fall scharf und im allgemeinen Fall unscharf zu messen. Im gegenständlichen Fall hat Schülerin 3 die Möglichkeit im Sinn, in der „das für den anderen Apparat nicht so richtig rüberkommt“ (Zeilen 13 bis 14 von Zitat 79). In Zeile 15 bis Zeile 16 von Zitat 79 bekräftigt Schülerin 3 noch einmal, was *nicht* gemeint war: dass der Apparat sieht (scharf misst) und nicht richtig entscheiden kann

(über die Gleichzeitigkeit). Schülerin 3 meint das Gegenteil: dass der Apparat nicht sieht (unscharf misst) und deshalb nicht richtig entscheiden kann (über die Gleichzeitigkeit). Diese letzte Aussage von Schülerin 3 ist noch einmal ein klarer Hinweis darauf, dass sie ein Messgerät vor Augen hat, das je nach Situation scharf oder unscharf misst.

Schüler 5 thematisiert die Verwendung von Messgeräten nicht explizit. Er dürfte aber die Vorstellung haben, das Messgerät auf dem Zug könne nicht scharf messen (siehe die Analysen zu Zitat 93 auf Seite 68, Zitat 94 auf Seite 68 und Zitat 95 auf Seite 68).

Schülerin 9 kann mit der Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, nicht viel anfangen. Schülerin 9 sieht keinen Sinn der Aufgabenstellung (siehe Analyse zu Zitat 101 auf Seite 72). Schülerin 9 erwähnt aber nicht, dass ein Messergebnis unscharf sein könnte. Umgekehrt ist sie der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden (siehe Zitat 102 auf Seite 73), und begründet das so:

- ¹**Schülerin 9:** *Na ja, weil er ja am Boden steht. Ich weiß nicht, vielleicht*
² *kann er das dann besser messen, das Gerät.*

Zitat 80

Schülerin 9 lässt sich hier sicher von der Alltagserfahrung leiten, dass man die Umgebung mit einem Blick aus einem fahrenden Zug unscharf sieht. Dass Schülerin 9 bei der Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, keine Bedenken bezüglich der Unschärfe hat, liegt wahrscheinlich daran, dass Schülerin 9 nicht versteht, warum man die Messung vom Zug aus durchführt, wenn man durch die Messung auf dem Boden bereits festgestellt hat, dass Gleichzeitigkeit vorliegt. Da Schülerin 9 keinen Sinn in der Aufgabenstellung sieht, kann sie auch keinerlei Gedanken darüber anstellen. Anders ist es im umgekehrten Fall. Schülerin 9 ist der Ansicht, das Gerät auf dem Boden könne besser messen (Zitat 80). Das bedeutet, dass nach Ansicht von Schülerin 9 das Gerät auf dem Zug schlechter messe. Also macht es Sinn, das Ergebnis des Geräts auf dem Zug durch das Gerät auf dem Boden nachzumessen. Hier kann

Schülerin 9 gedanklich anknüpfen. In weiterer Folge akzeptiert sie die Existenz exakter Messgeräte.

4.2.1.2. Die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit

Fünf der zehn zur Relativität der Gleichzeitigkeit Interviewten thematisieren von sich aus Effekte der Lichtlaufzeit. Bei den anderen fünf ist das kein Thema in den Interviews zur Gleichzeitigkeit.

Schüler 4 antwortet auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

¹**Schüler 4:** *Der misst da, wo er als erster vorbeigefahren ist.*

Zitat 81

Nachdem ihm der Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung erklärt wurde, fragt Schüler 4 nach:

¹**Schüler 4:** *... unabhängig von wo die Lichter kommen? [...] ... und*
²*wie schnell, welches erstes da ist?*

Zitat 82

Schüler 4 wollte nach der Erklärung des Messprozesses durch Rückfragen am Beispiel des Apparats auf dem Boden sicherstellen, den Messprozess richtig verstanden zu haben (Zitat 82). Das deutet auf eine intensive gedankliche Auseinandersetzung mit diesem Thema hin. Schüler 4 akzeptiert die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung und thematisiert Effekte der Lichtlaufzeit im weiteren Verlauf des Themas Gleichzeitigkeit nicht mehr.

Schüler 5 antwortet auf die Frage, ob es sein könne, dass der Apparat auf dem Zug messe, das Licht in den Häusern sei nicht gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

4. SchülerInnenvorstellungen

- 1 **Schüler 5:** (2 Sekunden Pause; Anm.) ... *Ja wenn die Häuser nicht*
2 *nebeneinander stehen, dann schon. [...] Na weil, wenn das ...*
3 *wenn das eine Haus da steht und das andere da, und der fährt*
4 *so vorbei, sieht er das als Erster.*

Zitat 83

Schüler 5 akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung und thematisiert Effekte der Lichtlaufzeit im weiteren Verlauf des Themas Gleichzeitigkeit nicht mehr.

Schüler 7 antwortet auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schüler 7:** (4 Sekunden Pause; Anm.) ... *Also ich würd sagen, das*
2 *hängt vom Abstand von den Häusern ab, die wie sie vom Zug*
3 *entfernt sind. Also wenn zum Beispiel das rechte Haus jetzt*
4 *näher ist, dann wird er messen, dass da das Licht ... [...] ...*
5 *zuerst angeht.*

Zitat 84

Schüler 7 akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung und thematisiert Effekte der Lichtlaufzeit im weiteren Verlauf des Themas Gleichzeitigkeit nicht mehr.

Schülerin 10 antwortet auf die Frage, ob der Apparat auf dem Zug messen könne, das Licht in den Häusern sei nicht gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schülerin 10:** *Es kann ja s... so sein, ... [...] ... ich denke ich mir,*
2 *wenn das Haus da steht ... [...] ... und das andere da und er*
3 *fährt zuerst hier, sagt der, das hier wird zuerst ... halt an... das*
4 *Licht angedreht ... [...] ... und dann da. [...] Das heißt, für*
5 *ihn war das erste Haus schneller als das zweite.*

Zitat 85

Schülerin 10 akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung und thematisiert Effekte der Lichtlaufzeit im weiteren Verlauf des Themas Gleichzeitigkeit nicht mehr.

Schülerin 11 meint, der Apparat auf dem Zug messe, das Licht in den Häusern sei nicht gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, und begründet das so:

1 **Schülerin 11:** *Der am Zug fährt ja vorbei. [...] Er sieht ja zuerst das*
2 *eine Haus und dann das zweite Haus.*

Zitat 86

Schülerin 11 akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung und thematisiert Effekte der Lichtlaufzeit im weiteren Verlauf des Themas Gleichzeitigkeit nicht mehr.

4.2.1.3. SchülerInnenvorstellungen zur Gleichzeitigkeit

Schüler 2 antwortet auf die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

1 **Schüler 2:** *Ich glaub, da ist kein Unterschied. Ich glaub, die können*
2 *beide feststellen, dass sie ... dass es gleichzeitig ist.*
3 *... [Thematisierung der Unschärfe beim Messen (siehe Zitat 76 auf*
4 *Seite 59)] ...*
5 **Schüler 2:** *Ich würd sagen, auch gleichzeitig. [...] Ich find, das ist*
6 *also ... nur weil der Zug sich bewegt, wird, äh, nicht etwas*
7 *anderes messen.*

Zitat 87

Auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, antwortet Schüler 2:

1 **Schüler 2:** *Also, wieder, glaub ich, kein Unterschied.*

Zitat 88

Schüler 2 erklärt in den Zeilen 1 bis 2 von Zitat 87 auf der vorherigen Seite, „Ich glaub, die können beide feststellen, dass sie ... dass es gleichzeitig *ist*.“ Dann kommt er ein wenig ins Zweifeln, erklärt aber, nachdem er akzeptiert hat, dass das Messgerät nicht unscharf misst, „nur weil der Zug sich bewegt, wird, äh, nicht etwas anderes messen“ (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 87 auf der vorherigen Seite). Schüler 2 hat die Vorstellung, dass etwas gleichzeitig *ist*, unabhängig davon, was man misst. Für ihn ist Gleichzeitigkeit nicht über einen Messvorgang definiert, sondern über die Zeit an sich. Die Zitate 87 auf der vorherigen Seite und 88 ergeben, dass für Schüler 2 der Begriff der Gleichzeitigkeit absolut ist.

Schülerin 3 antwortet auf die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

1 **Schülerin 3:** *Er wird das Gleiche messen wie der Zug im Apparat.*

2 *[...] Nein, wie der Apparat im Zug, haha. [...] Weil sie ja die*

3 *Gleichen sind und weil sie ... weil sie ja ... das Gleiche – Wie*

4 *sagt man da? – gleiche Funktion haben.*

5 **Wittmann:** *Du hast gesagt: „Weil die die Gleichen sind.“ Was meinst*

6 *du damit? Das hab ich jetzt nicht verstanden.*

7 **Schülerin 3:** *Sie haben ... ja also dass mit – Was mein ich damit?*

8 *– dass sie halt die gleiche Funktion haben, also dass sie nicht*

9 *verschieden sind, sondern gleich sind.*

Zitat 89

Auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, antwortet Schülerin 3:

1 **Schülerin 3:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja, also, ich denke, hier*

2 *ist es wieder gleich, ...*

3 *... [Thematisierung der Unschärfe beim Messen (siehe Zitat 77 auf*

4 *Seite 59)] ...*

- 5 **Schülerin 3:** *Na, dann denk ich, dass sie gleich sind. [...] Ah, weil sie*
6 *wieder halt die gleiche Funktion haben und weil sie eben so ...*
7 *weil sie das genau sehen können.*

Zitat 90

Schülerin 3 meint, nachdem sie akzeptiert hat, dass das Messgerät nicht unscharf misst, die beiden Geräte würden jeweils dasselbe messen, weil „sie ja die Gleichen sind“ (Zeilen 2 bis 3 von Zitat 89 auf der vorherigen Seite) bzw. „die gleiche Funktion haben“ (Zeile 8 von Zitat 89 auf der vorherigen Seite und Zeile 6 von Zitat 90). Für Schülerin 3 ist der Gleichzeitigkeitsbegriff ein absoluter, der nicht vom Bewegungszustand des Messgerätes abhängt.

Schüler 4 antwortet, nachdem er den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung akzeptiert hat (siehe Zitate 81 und 82 auf Seite 63), auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schüler 4:** *Auch gleichzeitig. [...] Ja, weil er alles ... wenn er beide*
2 *gleichzeitig sehen kann ... das ...*

Zitat 91

Schüler 4 antwortet auf die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schüler 4:** *Dasselbe.?*
2 **Wittmann:** *War das eine Frage oder eine Antwort?*
3 **Schüler 4:** *Eine Antwort.*

Zitat 92

Schüler 4 ist, nachdem er den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung akzeptiert hat, der Meinung, die beiden Geräte mäßen jeweils dasselbe. In einem der Fälle begründet er das mit „weil er alles ... wenn er beide gleichzeitig sehen kann“ (Zitat 91). Das Wort „kann“ in dieser Aussage deutet darauf hin, dass Schüler 4 ein unterschiedliches Messergebnis der beiden Apparate einer Störung in der Datenerfassung zuschreiben würde. Das zeigt, dass für Schüler 4 der Gleichzeitigkeitsbegriff ein absoluter ist.

Schüler 5 antwortet, nachdem er den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 83 auf Seite 64), auf die Frage, ob es sein könne, dass der Apparat auf dem Zug messe, das Licht in den Häusern sei nicht gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet wurde:

¹**Schüler 5:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung.

Zitat 93

Schüler 5 ist der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schüler 5:** (2 Sekunden Pause; Anm.) ... Das ist logisch.

²**Wittmann:** [...] warum.

³**Schüler 5:** (2 Sekunden Pause; Anm.) ... Ha ... (4 Sekunden Pause;

⁴ Anm.) ... weiß ich nicht.

Zitat 94

Auf den Unterschied angesprochen, dass seiner Meinung nach das Gerät auf dem Boden messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn das Gerät auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, während das Gerät auf dem Zug Beliebiges messen könne, wenn das Gerät auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, meint Schüler 5:

¹**Schüler 5:** Na, der (Apparat; Anm.) misst ... der sieht das auf alle

² Fälle gleich an dem ...

³**Wittmann:** Am Boden?

⁴**Schüler 5:** Ja.

Zitat 95

Schüler 5 kann nicht sagen, ob der Apparat auf dem Zug messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Boden

misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden (Zitat 93 auf der vorherigen Seite). Auf Nachfrage gibt Schüler 5 an, das schließe ein, der Apparat auf dem Zug könne messen, das Licht in den beiden Häusern sei nicht gleichzeitig eingeschaltet worden.

Umgekehrt ist Schüler 5 sicher, der Apparat auf dem Boden messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden. Schüler 5 findet das „logisch“ (Zeile 1 von Zitat 94 auf der vorherigen Seite), kann es aber zunächst nicht begründen (Zeile 4 von Zitat 94 auf der vorherigen Seite). Auf Nachfragen gibt er aber einen Hinweis, was er denkt, ohne es verbalisieren zu können: „der *misst* ... der *sieht* das auf alle Fälle gleich [...]“ (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 95 auf der vorherigen Seite). Schüler 5 verwendet die Worte „messen“ und „sehen“ synonym für die Tätigkeit des Messgeräts. Dabei überträgt er wahrscheinlich die menschliche Wahrnehmung auf das Messgerät.

Schüler 5 weiß sicher aus eigener Erfahrung, dass bei einem Blick aus einem fahrenden Zug die Umgebung nur unscharf wahrgenommen werden kann. Also kann das Messgerät auf dem Zug nicht präzise herausfinden, ob das Licht in den Häusern gleichzeitig eingeschaltet worden sei oder nicht. Es ist demnach keine Aussage über den Gleichzeitigkeitsbegriff von Schüler 5, wenn dieser sagt, er wissen nicht, was das Gerät auf dem Zug messe, sondern eine Aussage über die vermutete Unschärfe des Geräts.

Wenn aber das Messgerät auf dem Zug doch irgendwie herausgefunden hat, dass das Licht in den Häusern gleichzeitig eingeschaltet wurde, gibt es für das Messgerät auf dem Boden keinen Grund, das nicht auch messen zu können. Wie das Messgerät auf dem Zug das Messergebnis erhalten hat, ist nicht mehr Thema, sondern in der Angabe enthalten. Darum hat Schüler 5 hier keine gedanklichen Probleme damit. Seine Ansicht, das Gerät auf dem Boden messe Gleichzeitigkeit, wenn das Gerät auf dem Zug Gleichzeitigkeit misst, spricht dafür, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff für Schüler 5 ein absoluter ist. Dafür spricht auch seine verwunderte Reaktion auf die Konfrontation mit der Relativität der Gleichzeitigkeit (siehe Zitat 111 auf Seite 78).

Schülerin 6 antwortet auf die Frage, ob der Apparat auf dem Zug messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig oder hintereinander eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schülerin 6:** [...] Ahm, er (Apparat auf dem Zug; Anm.) misst das-
- 2 selbe wie der (Apparat auf dem Boden; Anm.). [...] Na, weil
- 3 das Licht wird ja gleichzeitig aufgedreht. Weil wenn es zuerst in

4. SchülerInnenvorstellungen

- 4 *dem Haus und zuerst in dem, dann wär ja der (Apparat auf dem*
5 *Boden; Anm.) auch falsch.*

Zitat 96

Auf die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, antwortet Schülerin 6:

- 1 **Schülerin 6:** *Dass es gleichzeitig aufgedreht wurde. [...] weil's ja*
2 *gleichzeitig aufgedreht wurde.*

Zitat 97

Schülerin 6 formuliert statt eines Messergebnisses des Apparats auf dem Boden: „[...] das Licht wird [...] gleichzeitig aufgedreht.“ (Zeile 3 von Zitat 96) Ebenso formuliert sie statt eines Messergebnisses des Apparats auf dem Zug: „weil's [...] gleichzeitig aufgedreht wurde.“ (Zitat 97). Für sie sind die Messergebnisse der Apparate genauso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die sie kennt (siehe auch Zeile 1 von Zitat 112 auf Seite 79).

Warum jeweils das andere Gerät auch Gleichzeitigkeit messe, begründet Schülerin 6 mit „Na, weil das Licht wird ja gleichzeitig aufgedreht.“ (Zeilen 2 bis 3 von Zitat 96) bzw. „[...] weil's ja gleichzeitig aufgedreht wurde.“ (Zitat 97) und meint damit die Messergebnisse der jeweiligen Geräte. Der Gleichzeitigkeitsbegriff von Schülerin 6 ist absolut.

Schüler 7 antwortet, nachdem er den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 84 auf Seite 64), auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schüler 7:** *Na dann wird's gleichzeitig sein. [...] weil die das halt*
2 *gleichzeitig angemacht haben und wenn der (Apparat auf dem*
3 *Boden; Anm.) das da halt misst, dann ... ja ich hab keine andere*
4 *Erklärung als es wird ...*

Zitat 98

Auf die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, antwortet Schüler 7:

- 1 **Schüler 7:** (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Dasselbe wie der (Apparat;
2 Anm.) am Zug.

Zitat 99

Der Gleichzeitigkeitsbegriff von Schüler 7 ist absolut. Er kann keinen Grund finden, warum die beiden Geräte nicht dasselbe messen sollten. In Zeile 1 von Zitat 98 auf der vorherigen Seite formuliert Schüler 7 nicht, dass der Apparat Gleichzeitigkeit messe, sondern dass die Ereignisse gleichzeitig seien. Für ihn ist das Messergebnis des Apparats genauso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die er kennt.

Schülerin 8 antwortet auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schülerin 8:** Das Gleiche. [...] Wie gesagt, es ... es ist egal, ob es
2 jetzt fährt ... ob es sich jetzt bewegt oder nicht.

Zitat 100

Der Gleichzeitigkeitsbegriff von Schülerin 8 ist absolut. Sie ist der Ansicht, dass die Bewegung keinen Einfluss auf die Gleichzeitigkeit haben kann.

Schülerin 9 antwortet auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schülerin 9:** (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Das weiß ich nicht.
2 **Wittmann:** Kannst du dir gar nicht vorstellen?
3 **Schülerin 9:** Na ja, vorstellen schon. Ich mein, der Unterschied ist,
4 dass das eine Gerät, ähm, am Boden steht und ... [...] ... das
5 andere fährt mit dem Zug.
6 **Wittmann:** Ja, wo ist da der Unterschied?
7 **Schülerin 9:** Na, dass das eine fährt und das andere steht.

- 8 **Wittmann:** *Ja, aber was ... was macht das den Unterschied für die*
9 *Messung? Macht ... oder macht's einen Unterschied für die*
10 *Messung?*
- 11 **Schülerin 9:** *Das weiß ich nicht.*
- 12 **Wittmann:** *Mhm, ja. Angenommen, es macht keinen Unterschied für*
13 *die Messung.*
- 14 **Schülerin 9:** *Dann ist es gleich. Dann können sie es gleich wahrneh-*
15 *men.*
- 16 **Wittmann:** *Mhm, ja. Und wenn's ... wenn's einen Unterschied macht*
17 *für die Messung?*
- 18 **Schülerin 9:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Mh ... (5 Sekunden Pause;*
19 *Anm.) ... ich mein, ich glaub, dass es keinen Unterschied macht,*
20 *weil dann würd es ja gar keinen Sinn machen. Wenn das Gerät,*
21 *ähm, darauf einstellt, dass es messen soll, ob etwas gleichzei-*
22 *tig ... [...] ... passiert, dann, ähm, wird man's ja, wenn es so*
23 *ist, dass es, wenn es fährt, dass es dann nichts, ähm, messen*
24 *kann, würd man's ja nicht am Zug stellen, sondern eher auf den*
25 *Boden.*
- 26 **Wittmann:** *Nein, nein, sozusagen, aber man tut's halt einfach. Man*
27 *fragt jetzt nicht, ob das einen Sinn macht, sondern es interessiert*
28 *einen einfach. [...] Was machen die Dinger da? Was misst der?*
29 *Angenommen, es macht einen Unterschied. [...] Würden die*
30 *dann, glaubst du, dasselbe messen oder kann es sein, einmal der*
31 *hell, dann der Nächste?*
- 32 **Schülerin 9:** *Einmal der und dann der Nächste bei dem, der auf dem*
33 *Zug steht, ... [...] ... bei dem Gerät.*

Zitat 101

Schülerin 9 versteht den Versuchsaufbau (Zeilen 3 bis 5 von Zitat 101) und kann auch formal logisch korrekte Konklusion ziehen, wenn ihr eine Prämisse vorgegeben wird (Zeile 12 bis Zeile 15 von Zitat 101 und Zeile 29 bis Zeile 33 von Zitat 101), kann aber nicht sagen, was das Gerät auf dem Zug messe (Zeile 1 von Zitat 101). In Zeile 18 bis Zeile 25 von Zitat 101 verrät Schülerin 9, warum sie sich außer Stande sieht zu beantworten, was der Apparat auf dem Zug messe: Ein anderes Resultat des Messgeräts auf dem Zug als ebenfalls Gleichzeitigkeit interpretiert Schülerin 9 als Messfehler: „Wenn das Gerät, ähm, darauf einstellt, dass es messen soll, ob etwas gleichzeitig ... [...] ... passiert, dann, ähm, wird man's ja, wenn es so ist, dass es, wenn es fährt, dass es dann nichts, ähm,

messen kann, würd man's ja nicht am Zug stellen [...].“ (Zeile 20 bis Zeile 24 von Zitat 101 auf der vorherigen Seite). Die Aussage „dass es dann nichts messen kann“ umfasst offenbar die Vorstellung „dass es nicht Gleichzeitigkeit misst“. Ein anderes Resultat des Messgeräts auf dem Zug als Gleichzeitigkeit würde also für Schülerin 9 die Versuchsanordnung sinnlos machen, weil sonst „würd man's ja nicht am Zug stellen, sondern eher auf den Boden.“ (Zeile 24 bis Zeile 25 von Zitat 101 auf der vorherigen Seite). Das bedeutet aber auch, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff von Schülerin 9 ein absoluter ist. Im umgekehrten Fall, wenn also das Messgerät auf dem Zug auch Gleichzeitigkeit misst, bekommt man eine Aussage, die man ohnehin schon hat, weil Schülerin 9 von einem absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff ausgeht. Dieses Messergebnis stellt für Schülerin 9 keinen zusätzlichen Wert dar, darum ist auch in diesem Fall der Messvorgang für sie sinnlos. Insgesamt macht der gesamte Messvorgang von Zug aus für sie keinen Sinn. Darum kann sie gedanklich nicht anknüpfen und daher auch keine Voraussagen machen.

Schülerin 9 ist, nachdem sie die Existenz exakter Messgeräte akzeptiert hat (siehe Zitat 80 auf Seite 62), der Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 9:** *Na, dann ist es gleichzeitig. [...]* (2 Sekunden Pause;
 2 *Anm.) ... Na ja, wenn's für beide keinen Unterschied macht ...*
 3 *[...] ... ähm, sie sind ja auf dasselbe eingestellt ... [...]* ...
 4 *und wenn sie dasselbe Haus messen, dann werden sie's wahr-*
 5 *scheinlich gleich haben.*

Zitat 102

Schülerin 9 ist zunächst der Ansicht, das Gerät auf dem Boden könne besser messen als das auf dem Zug (siehe Zitat 80 auf Seite 62). Darum versteht Schülerin 9 die Messung vom Boden aus wahrscheinlich als Kontrolle für die Messung vom Zug aus. Das erscheint Schülerin 9 sinnvoll und dadurch kann sie die Situation gedanklich nachvollziehen und Voraussagen machen. Die Aussagen „Na, dann ist es gleichzeitig.“ (Zeile 1 von Zitat 102) und „[...] und wenn sie dasselbe Haus messen, dann werden sie's wahrscheinlich gleich haben.“ (Zeilen 4 bis 5 von Zitat 102) deuten ebenfalls darauf hin, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff von Schülerin 9 ein absoluter ist.

Anstelle eines Messergebnisses formuliert Schülerin 9: „[...] dann ist es gleichzeitig.“ (Zeile 1 von Zitat 102) Für sie ist das Messergebnis des Apparats genauso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die sie kennt.

Schülerin 10 antwortet, nachdem sie den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 85 auf Seite 64), auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schülerin 10:** *Also dann werden sie wahrscheinlich auch gleichzeitig*
2 *für ihn sein. [...] Weil er ja genau das Gleiche wahrnimmt als*
3 *wie er ... als wie er ... würd er am Boden stehen.*

Zitat 103

Auf die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, antwortet Schülerin 10:

- 1 **Schülerin 10:** *Auch, dass es gleichzeitig ist, ... [...] ... weil ... weil*
2 *er es ja genauso wahrnimmt wie der oben am Zug. [...] Weil*
3 *Sie mir erklärt haben, dass das ja nicht ... unabhängig, von wo*
4 *es liegt.*

Zitat 104

Der Gleichzeitigkeitsbegriff von Schülerin 10 ist offenbar ein absoluter. Dass der Apparat auf dem Zug dasselbe messe wie der Apparat auf dem Boden, begründet Schülerin 10 damit, „Weil er ja genau das Gleiche wahrnimmt als wie er ... als wie er ... würd er am Boden stehen.“ (Zeilen 2 bis 3 von Zitat 103) Im umgekehrten Fall argumentiert Schülerin 10 analog. Sie überträgt die Vorgangsweise des Messens eigenständig auf diese Situation: „Weil Sie mir erklärt haben, dass das ja nicht ... unabhängig, von wo es liegt.“ (Zeilen 2 bis 4 von Zitat 104). Das zeigt eine hohe Akzeptanz für den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung. Diese Akzeptanz zeigt sich noch einmal, wenn sich Schülerin 10 bei ihrem Kommentar zur Relativität der Gleichzeitigkeit auf die Irrelevanz der Lichtlaufzeit beruft (Zeile 1 bis Zeile 3 von Zitat 116 auf Seite 80).

In Zeile 2 von Zitat 103 formuliert Schülerin 10 nicht, dass der Apparat Gleichzeitigkeit messe, sondern dass die Ereignisse gleichzeitig „seien“. Für sie ist das Messergebnis des Apparats ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die sie kennt.

Schülerin 11 antwortet, nachdem sie den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 86 auf Seite 65), auf die Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Boden misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden:

- 1 **Schülerin 11:** (26 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja, dann weiß er auch,
2 dass es gleichzeitig war. [...] Ja, dass es gleichzeitig war. [...]
3 Na, weil er die Abstände misst.

Zitat 105

Auf die Frage, was der Apparat auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Zug misst, das Licht in den Häusern sei gleichzeitig eingeschaltet worden, antwortet Schülerin 11:

- 1 **Schülerin 11:** Auch, dass es gleichzeitig ist.

Zitat 106

Schülerin 11 braucht einige Zeit, um die Vorgänge beim Messen zu verinnerlichen (Zeile 1 von Zitat 105), kann sie dann aber korrekt anwenden. Das zeigt eine gute Akzeptanz für den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung. Die Aussagen „Ja, dass es gleichzeitig war.“ (Zeile 2 von Zitat 105) und „Auch, dass es gleichzeitig ist.“ (Zitat 106) zeigen, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff für Schülerin 11 ein absoluter ist.

4.2.1.4. Reaktionen der SchülerInnen auf die Relativität der Gleichzeitigkeit

Am Ende des Interviews zur Gleichzeitigkeit wurde den SchülerInnen eröffnet, was die Geräte tatsächlich messen würden. Die SchülerInnen wurden um einen Kommentar zu diesem Sachverhalt gebeten.

Schüler 2 antwortet auf die Frage, ob er verwundert wäre, würde der Apparat auf dem Zug Gleichzeitigkeit und der Apparat auf dem Boden nicht Gleichzeitigkeit für das Anschalten des Lichts messen:

- 1 **Schülerin 2:** Eigentlich nicht.
2 **Wittmann:** Nicht? Umgekehrt auch nicht? Sozusagen, der misst ...

3 **Schülerin 2:** *Auch nicht, nein. [...] Es kann sein.*

Zitat 107

Schülerin 2 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

1 **Schüler 2:** *Ich könnt mir schon vorstellen, dass das so stimmt. Also*
2 *es ... es stimmt ja auch.*

Zitat 108

Obwohl der Gleichzeitigkeitsbegriff von Schüler 2 ein absoluter ist (Zitat 87 auf Seite 65 und Zitat 88 auf Seite 66), gibt er an, ungleiche Messergebnisse der beiden Apparate würden ihn nicht wundern (Zeile 1 und Zeile 3 von Zitat 107). Ob Schüler 2 den Bruch mit dem klassischen Gleichzeitigkeitsbegriff phlegmatisch zur Kenntnis nimmt oder einfach nicht versteht, ist kaum zu sagen. Jedenfalls hat er nachträglich eine sehr pragmatische Erklärung für seine Antwort: „[...] es stimmt ja auch.“ (Zitat 108). Daher toleriert er die Relativität der Gleichzeitigkeit.

Schülerin 3 gibt an, dass sie die Relativität der Gleichzeitigkeit „logisch [...] find[et]“ (Zeile 2 von Zitat 79 auf Seite 61), obwohl sie den Gleichzeitigkeitsbegriff als absolut versteht (Zitat 89 auf Seite 66 und Zitat 90 auf Seite 67). Erklärbar ist das damit, dass Schülerin 3 eine eigene Vorstellung von einem exakten Messgerät entwickelt hat (siehe Analyse zu Zitat 79 auf Seite 61). Die Aussagen von Schülerin 3 zur Relativität der Gleichzeitigkeit beziehen sich nicht auf die Gleichzeitigkeit, sondern auf die besondere Disposition des Messgeräts.

Schüler 4 antwortet auf die Frage, ob er verwundert wäre, würden die Apparate Unterschiedliches für das Anschalten des Lichts messen:

1 **Schüler 4:** *Nein, ich kann's mir vorstellen.*
2 **Wittmann:** *Und wie kannst du dir das vorstellen?*
3 **Schüler 4:** *Dass es ... na ja, weiß ich nicht ... [...] (5 Sekunden*
4 *Pause; Anm.) ... ja ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... egal.*

Zitat 109

Schüler 4 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

- 1 **Schüler 4:** *Das klingt komisch.*
2 **Wittmann:** *Find'st komisch. Aber du hast ja mir vorher grad gesagt,*
3 *das würdest du auch nicht seltsam finden (siehe Zitat 109 auf*
4 *der vorherigen Seite; Anm.).*
5 *[...]*
6 **Schüler 4:** *Na, was soll ich da sagen? ... (2 Sekunden Pause; Anm.) ...*
7 *Hm ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... keine Ahnung.*

Zitat 110

Auf eine hypothetische Frage antwortend gibt Schüler 4 an, sich vorstellen zu können, die Gleichzeitigkeit sei ein relativer Begriff (Zeile 1 von Zitat 109 auf der vorherigen Seite), kann es aber nicht begründen (Zeile 3 von Zitat 109 auf der vorherigen Seite). Konkret mit der Tatsache der Relativität der Gleichzeitigkeit konfrontiert, findet Schüler 4 das „komisch“ (Zeile 1 von Zitat 110). Den Widerspruch zu seiner vorherigen Aussage kann Schüler 4 nicht erklären (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 110).

Möglicherweise hat Schüler 4 die Frage, ob es ihn wundern würde, zeigten die beiden Geräte Unterschiedliches an, nicht sehr ernst genommen, da er einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff hat (Zitate 91 und 92 auf Seite 67). Vorstellen kann man sich viel, vor allem wenn man die Vorstellung für irrelevant hält. Mit einer unerwarteten Realität konfrontiert sieht die Sache schon ganz anders aus. Das resignative Verhalten von Schüler 4 (Zeile 6 bis Zeile 7 von Zitat 110) zeigt, dass er realisiert hat, dass hier unerwartet etwas so Unvorstellbares eingetreten ist, dass er es nicht benennen kann. Darum kann er auch keine weitere Stellungnahme dazu abgeben.

Schüler 5 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

- 1 **Schüler 5:** *So?*
2 **Wittmann:** *Was sagst du dazu?*
3 **Schüler 5:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Glaub ich nicht so.*
4 **Wittmann:** *Doch. Das hat man ja ... das hat man so gemessen.*
5 **Schüler 5:** *Wirklich?*
6 **Wittmann:** *Ja. Was kommt dir daran komisch vor?*

4. SchülerInnenvorstellungen

- 7 **Schüler 5:** (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Das kann gar nicht sein.
8 **Wittmann:** Wieso?
9 **Schüler 5:** (2 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja, weil der (Apparat auf
10 dem Boden; Anm.) ja steht und der (Apparat auf dem Waggon;
11 Anm.) fährt.
12 **Wittmann:** Ja und warum kann dann nicht der sagen, das war gleich-
13 zeitig, und der, das war nicht gleichzeitig?
14 **Schüler 5:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ha, keine Ahnung ... (2 Se-
15 kunden Pause; Anm.) ... weiß nicht.
16 **Wittmann:** Aber in der einen Richtung hast du ja vorhin gesagt, wenn
17 der (Apparat auf dem Boden; Anm.) misst gleichzeitig, kann der
18 quasi alles messen am Waggon.
19 **Schüler 5:** Mhm.
20 **Wittmann:** Trotzdem kommt dir das jetzt komisch vor?
21 **Schüler 5:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Weiß nicht.

Zitat 111

Schüler 5 ist von der Relativität der Gleichzeitigkeit völlig überrascht, kann das gar nicht glauben und überhaupt nicht in seine Gedankenwelt einordnen (Zeile 1, Zeile 3, Zeile 5, Zeile 7 und Zeilen 14 bis 15 von Zitat 111). Vermeintliche Widersprüche in seinen Aussagen (Zeile 16 bis Zeile 18 von Zitat 111) kann Schüler 5 nicht erklären (Zeile 21 von Zitat 111). Das kommt wahrscheinlich daher, dass Schüler 5 in seinen Aussagen keinen Widerspruch sieht. Er dürfte das angesprochene unterschiedliche Verhalten der Messgeräte unausgesprochen auf eine Messunschärfe zurückführen (siehe Analyse zu Zitat 95 auf Seite 68).

Schülerin 6 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 6:** Warum? Es wurde ja gleichzeitig aufgedreht.
2 [...]
3 **Wittmann:** Kommt dir das komisch vor? Oder was sagst du dazu?
4 **Schülerin 6:** Ja, wenn es gleichzeitig aufgedreht wurde, wurde es doch
5 einfach gleichzeitig aufgedreht. Nicht zuerst das und dann das.
6 **Wittmann:** Na ja, das ist eben so, dass, was für den gleichzeitig ist, ist
7 für den nicht gleichzeitig.
8 **Schülerin 6:** Weil er fährt?
9 [...]

- 10 **Wittmann:** *Kommt dir das komisch vor?*
 11 **Schülerin 6:** *Nein, wenn Sie's mir erklären, nicht.*
 12 [...]
 13 **Wittmann:** *Aber vorher hast du ziemlich bestimmt gesagt, die müssen*
 14 *das Gleiche messen, weil es gleichzeitig ist.*
 15 **Schülerin 6:** *Na, ich lass mich leicht umstimmen.*
 16 [...]
 17 **Schülerin 6:** *Was Sie sagen, stimmt.*

Zitat 112

Schülerin 6 beharrt zunächst auf dem absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff (Zeile 1 und Zeile 4 von Zitat 112). Sie verlangt aber gleich nach einer Erklärung für das scheinbar Unerklärliche (Zeile 1 und Zeile 8 von Zitat 112) und hat großes Vertrauen in die Erklärungskraft der Physik (Zeile 10 bis Zeile 11 von Zitat 112). Dadurch ist Schülerin 6 bereit, die Relativität der Gleichzeitigkeit zu akzeptieren (Zeile 15 und Zeile 17 von Zitat 112).

In Zeile 1 von Zitat 112 formuliert Schülerin 6 nicht, dass der Apparat Gleichzeitigkeit messe, sondern dass die Ereignisse gleichzeitig seien. Für sie ist das Messergebnis des Apparats genauso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die sie kennt (siehe auch Zeile 3 von Zitat 96 auf Seite 69 und Zeile 1 von Zitat 97 auf Seite 70).

Schüler 7 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

- 1 **Schüler 7:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Pfff, ähm ... (7 Sekunden*
 2 *Pause; Anm.) ... ah, es kommt mir wieder komisch vor. Aber ich*
 3 *weiß nicht wieso ... [...] ... das eben so ist.*

Zitat 113

Schüler 7 findet die Relativität der Gleichzeitigkeit „komisch“ und kann sie sich nicht erklären. Er nimmt sie aber zur Kenntnis.

Schülerin 8 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

4. SchülerInnenvorstellungen

- 1 **Schülerin 8:** *Ich kenn mich jetzt nicht mehr aus. Ich würd es ... ich*
2 *versteh's wirklich nicht. Warum es jetzt so ist. [...] Seltsam,*
3 *sehr seltsam.*

Zitat 114

Schülerin 8 kann sich die Relativität der Gleichzeitigkeit überhaupt nicht erklären und findet sie sehr seltsam.

Schülerin 9 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 9:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Na, es interessiert mich*
2 *schon, warum es so ist. Aber ich versteh es ehrlich gesagt nicht.*

Zitat 115

Schülerin 9 versteht die Relativität der Gleichzeitigkeit nicht, ist aber an einer Erklärung interessiert.

Schülerin 10 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 10:** *Aber wieso? [...] Ich da... ja weil Sie haben mir ja*
2 *grade erklärt, dass es unabhängig ist davon, wo die Häuser*
3 *liegen. Deswegen ... [...] ... dachte ich mir, dass sie beide*
4 *gleichzeitig ... [...] (2 Sekunden Pause; Anm.) ... Und wieso*
5 *nicht?*
6 **Wittmann:** *Na ja, weil die das sozusagen ... und was gleichzeitig ist*
7 *was ist, das ist unterschiedlich für beide.*
8 **Schülerin 10:** *Ach so. [...] Es ist ur komp... also nicht kompliziert,*
9 *sondern man glaubt immer, dass man das Richtige sagt, ... [...]*
10 *... dafür ist dann eigentlich komplett umgekehrt kommt.*

Zitat 116

Schülerin 10 bringt zu Beginn des Interviews zur Gleichzeitigkeit die Lichtlaufzeit ins Gespräch und ist deshalb der Ansicht, die beiden Geräte müssen

Unterschiedliches (Zitat 85 auf Seite 64), lässt sich aber überzeugen, dass die Lichtlaufzeiten keine Rolle spielen. Umso verwunderter ist sie, dass die beiden Geräte nun doch Unterschiedliches messen und verlangt nach einer Erklärung (Zeile 1 von Zitat 116 auf der vorherigen Seite). Sie bringt noch einmal die Lichtlaufzeit ins Gespräch (Zeile 1 bis Zeile 3 von Zitat 116 auf der vorherigen Seite), die offenbar für Schülerin 10 der einzige Grund wäre, warum die Geräte Unterschiedliches messen sollten. Das zeigt, wie sehr ein absoluter Gleichzeitigkeitsbegriff in der Vorstellung von Schülerin 10 verankert ist. Dass der Gleichzeitigkeitsbegriff ein relativer ist, toleriert sie (Zeile 8 von Zitat 116 auf der vorherigen Seite), findet das aber kompliziert und immer so, wie sie es nicht erwartet hätte (Zeile 8 bis Zeile 10 von Zitat 116 auf der vorherigen Seite).

Schülerin 11 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, folgendermaßen:

¹**Schülerin 11:** *Ha, ha.*

²**Wittmann:** *Was sagst du dazu?*

³**Schülerin 11:** *(12 Sekunden Pause; Anm.) ... Ha ... (3 Sekunden Pau-*

⁴*se; Anm.) ... dass ich mich täuschen hab lassen.*

Zitat 117

Schülerin 11 ist sehr verwundert, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff ein relativer ist. Dass sie nach langem Nachdenken keinen inhaltlichen Kommentar dazu abgeben kann, zeigt, dass sie die Relativität der Gleichzeitigkeit so schnell nicht in ihre Begriffswelt integrieren kann.

4.2.2. Zusammenfassung

Sieben der zehn befragten SchülerInnen bringen die Verwendung von Messgeräten oder eine Unschärfe von Messergebnissen nicht zur Sprache. Einer dieser sieben dürfte die Vorstellung haben, die Geräte könnten unscharf messen, thematisiert das aber nicht explizit. Zwei der restlichen drei SchülerInnen akzeptieren nach einer entsprechenden Erklärung das Konzept der exakten Messgeräte. Eine Schülerin lehnt das Konzept zwar nicht explizit ab, missversteht es aber. Sie dürfte sie Vorstellung entwickeln, ein Messgerät könne nur dann scharf messen, wenn es sich auf das spezielle Geschehen „konzentriere“. Insgesamt wird die Verwendung exakter Messgeräte für die Ermittlung der Gleichzeitigkeit gut angenommen.

Fünf der zehn interviewten SchülerInnen thematisieren von sich aus Effekte der Lichtlaufzeit. Alle akzeptieren nach einer entsprechenden Erklärung den Messprozess als Sammlung von Daten und späterer Datenauswertung und operierten richtig mit diesem Begriff. Ein Schüler fragt nach, um sich zu vergewissern, das Wesen des Messprozesses richtig verstanden zu haben. Das Thema Lichtlaufzeit wird in weiterer Folge in den Interviews zur Gleichzeitigkeit von keinem/keiner der SchülerInnen angesprochen. Insgesamt wird der Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung gut akzeptiert.

Für alle zehn befragten SchülerInnen ist der Gleichzeitigkeitsbegriff ein absoluter. Dass sie zum Teil die Ansicht äußern, die Messgeräte mäßen Unterschiedliches, lässt sich auf technische Fragen bezüglich der Messgeräte oder des Messvorganges zurückführen. Eine Schülerin kann auf eine Fragestellung zu ihrer Vorstellung zur Gleichzeitigkeit keine Antwort geben, da sie in der Fragestellung keinen Sinn erkennt.

Vier der zehn SchülerInnen formulieren anstelle eines Messresultats bezüglich der Gleichzeitigkeit die Aussage, die Vorkommnisse seien gleichzeitig geschehen. Statt einer Aussage über Ereignisse formulieren die SchülerInnen Eigenschaften der Ereignisse selbst. Für die SchülerInnen ist das Messergebnis der Apparate ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die den SchülerInnen bekannt sind.

Eine der zehn befragten SchülerInnen gibt keinen Kommentar zur Relativität der Gleichzeitigkeit ab, sondern die Aussagen dieser Schülerin beziehen sich auf den Messprozess. Zwei weitere der zehn befragten SchülerInnen verlangen nach einer Erklärung für die Relativität der Gleichzeitigkeit. Zwei weitere der zehn befragten SchülerInnen geben, an bereit zu sein, die Relativität der Gleichzeitigkeit als Tatsache zu tolerieren. Eine weitere der zehn befragten SchülerInnen ist interessiert an der Relativität der Gleichzeitigkeit. Insgesamt geben damit fünf der zehn interviewten SchülerInnen an, der Relativität der Gleichzeitigkeit offen gegenüberzustehen. Die anderen fünf SchülerInnen geben nicht an, eine Beschäftigung mit der Relativität der Gleichzeitigkeit prinzipiell abzulehnen.

4.3. Zeitdilatation

Von den zehn SchülerInnen, die ich zum Thema Relativität der Gleichzeitigkeit interviewte, befragte ich neun zum Thema Zeitdilatation. Die Aufschlüsselung dieser SchülerInnen nach Schulstufe und Geschlecht findet sich in Tabelle 3.4 auf Seite 24.

Als Leitlinie für die Interviews verwendete ich folgenden Fragenkatalog:

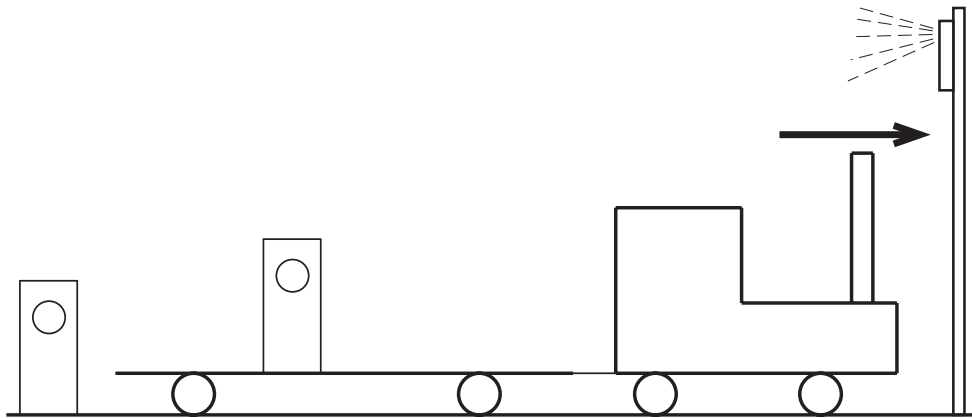


Abbildung 4.5.: Zu Frage 1

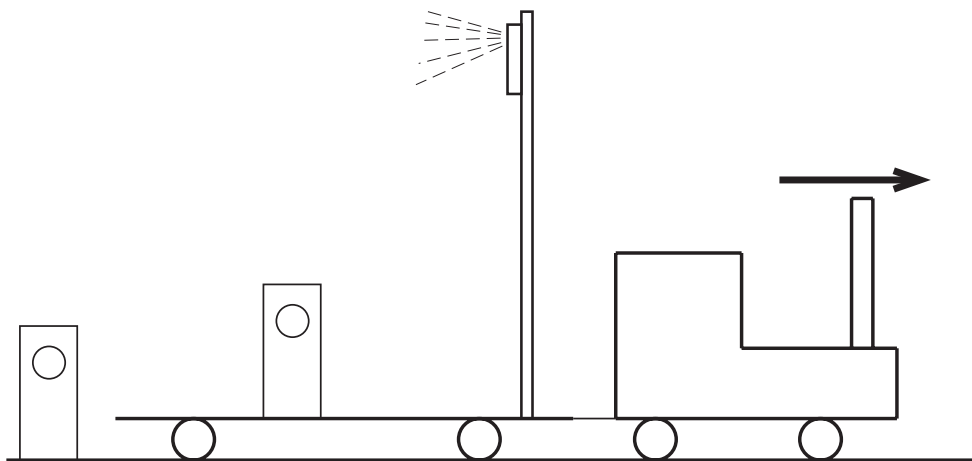


Abbildung 4.6.: Zu Frage 2

1. In Abbildung 4.5 siehst du eine blinkende Signallampe, die am Bahndamm steht. Auf dem Boden und dem Waggon steht je ein Apparat, der die Zeit misst, die zwischen zwei Mal Aufblinken der Signallampe vergeht. Der Apparat auf dem Boden misst, dass zwischen zwei Mal Aufblinken der Signallampe eine Zeit von drei Sekunden vergeht. Misst der Apparat auf dem Waggon zwischen zwei Mal Aufblinken ebenfalls drei Sekunden oder kann es sein, dass er eine kürzere bzw. längere Zeitspanne misst? Begründung!
2. In Abbildung 4.6 wurde die Signallampe auf den Waggon montiert. Der Apparat auf dem Waggon misst, dass zwischen zwei Mal Aufblinken der Signallampe eine Zeit von drei Sekunden vergeht. Misst der Apparat

4. SchülerInnenvorstellungen

auf dem Boden zwischen zwei Mal Aufblinken ebenfalls drei Sekunden oder kann es sein, dass er eine kürzere bzw. längere Zeitspanne misst? Begründung!

3. In Abbildung 4.5 auf der vorherigen Seite ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und der Signallampe nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und dem Apparat auf dem Boden bzw. der Signallampe ändert sich ständig. In Abbildung 4.6 auf der vorherigen Seite ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und der Signallampe nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und dem Apparat auf dem Waggon bzw. der Signallampe ändert sich ständig. Nehmen wir an, die beiden Apparate und die Signallampe könnten nur sich selbst und einander „sehen“ und nicht den Rest der Welt. Könnten dann die Signallampe und der Apparat, dessen Abstand zur Signallampe sich nicht ändert, feststellen, ob sie sich beide auf dem Boden oder auf dem Waggon befinden? Begründung!
4. In Wirklichkeit misst der Apparat, dessen Abstand zur Signallampe sich ändert, zwischen zwei Mal Aufblinken ein kleines bisschen mehr Zeit vergeht als drei Sekunden. Was sagst du dazu?

Mit der Frage 1 auf der vorherigen Seite sollten die SchülerInnenvorstellungen zur Zeitdilatation erhoben werden. Anders als in vielen Darstellungen der Relativitätstheorie wird als BeobachterIn keine Person verwendet, die das Geschehen betrachtet, sondern die Messungen werden mit Messgeräten durchgeführt. Menschliche Sinnesorgane sind Täuschungen unterworfen und haben nur eine beschränkte Genauigkeit in der Wahrnehmung. SchülerInnen wissen das. Messgeräte können im Rahmen der Relativitätstheorie beliebig genau messen. Durch die Verwendung der Messgeräte erwartete ich, weniger eine Diskussion über die Wahrnehmung führen zu müssen und mich mehr auf die physikalischen Aussagen der Relativitätstheorie konzentrieren zu können.

Die Frage 2 auf der vorherigen Seite ist im Prinzip dieselbe wie die Frage 1 auf der vorherigen Seite, jedoch wurden die Messergebnisse des Apparats auf dem Zug vorgegeben. Mit dieser Frage sollte erhoben werden, welche Unterschiede sich dadurch in den Vorstellungen der SchülerInnen ergeben.

Mit der Frage 3 sollte das Verständnis der SchülerInnen für das Relativitätsprinzip im Kontext der Zeitmessung getestet werden.

Mit der Frage 4 sollte erhoben werden, wie sehr die SchülerInnen bereit sind, die Zeitdilatation zu akzeptieren.

Im Gespräch wurden die Begriffe Gerät und Apparat oftmals synonym verwendet. Es ist aber in jeder Situation klar, was gemeint ist.

4.3.1. Auswertung der Interviews zur Zeitdilatation

4.3.1.1. Die Verwendung von Messgeräten

Sieben der neun bezüglich der Zeitdilatation befragten SchülerInnen akzeptieren die Messgeräte, ohne dies zu thematisieren. Insbesondere kommen keinerlei explizite Einwände, ein Messergebnis könne unscharf sein. Zwei SchülerInnen thematisieren die Messgeräte von sich aus.

Schülerin 3 ist zunächst der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden weniger als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 3:** *Weil er mit einer schnelleren Geschwindigkeit da vorbei-*
- 2 *fährt und ... er wird das ja nicht so genau sehen.*

Zitat 118

Schülerin 3 akzeptiert danach die Existenz idealer Messgeräte. Deshalb sind unscharfe Messergebnisse in weiterer Folge während des Interviews zur Zeitdilatation kein Thema mehr. Schülerin 3 hat aber noch Bedenken, das Messgerät auf dem Boden könne nicht den kompletten Versuchsablauf erfassen:

- 1 **Schülerin 3:** *Na, ich hab mir gedacht, weil ... dass der Zug genau*
- 2 *vorbeigefahren ist und dann sieht der das nicht so, äh, so lange.*

Zitat 119

Schülerin 3 akzeptiert daraufhin, dass das Messgerät alle relevanten Daten zur Verfügung bekommt. Deshalb ist die Datenerfassung in weiterer Folge während des Interviews zur Zeitdilatation kein Thema mehr.

Schüler 7 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden einen geringeren Wert als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schüler 7:** *Weil er (Apparat auf dem Zug; Anm.) ja also schneller*
- 2 *sich bewegt praktisch als der (Apparat; Anm.) am Boden, weil*
- 3 *sich der überhaupt nicht bewegt und eben vielleicht irgendwas*
- 4 *irgendwie mit der Geschwindigkeit zusammen, ob der das richtig*
- 5 *misst oder so.*

Zitat 120

Schüler 7 geht in weiterer Folge von der Existenz exakter Messgeräte aus. Dies zeigt sich daran, dass im weiteren Verlauf des Interviews zur Zeitdilatation technische Probleme des Messgeräts kein Thema mehr sind. Seine Vorstellung, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden einen geringeren Wert als der Apparat auf dem Boden, behält er aber trotzdem im Gedächtnis (siehe Analyse zu Zitat 137 auf Seite 92).

4.3.1.2. Die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit

Vier der neun zur Zeitdilatation befragten SchülerInnen thematisieren von sich aus mögliche Effekte der Lichtlaufzeit bei der Messung. Fünf SchülerInnen bringen dieses Thema nicht zur Sprache.

Schüler 4 begründet seine zunächst geäußerte Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug mehr als der Apparat auf dem Zug, so:

¹ **Schüler 4:** *Ja, dann ... dann dauert es ja länger, bis es das (Apparat*
² *am Boden; Anm.) jetzt sieht, oder?*

Zitat 121

Schüler 4 akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung. Schüler 4 akzeptiert das so gut, dass er später damit ein Resultat begründet (siehe Zitat 132 auf Seite 90).

Im umgekehrten Fall – wenn die Messergebnisse des Apparats auf dem Boden vorgegeben sind – spricht Schüler 4 Probleme mit der Lichtlaufzeit nicht an. Vielleicht kommt das daher, dass ihm die Situation, blinkende Lampen vom Zug oder vom Auto aus zu betrachten, geläufig ist und er somit aus Erfahrung weiß, dass er keine Veränderung der Blinkfrequenz im Gegensatz dazu beobachtet, wenn er bezüglich der Blinklampe ruht. Viel seltener beobachtet man vom Boden aus fahrende Blinklampen. Daher muss Schüler 4 den Versuchsvorgang erst gedanklich konstruieren und kommt damit auf die Idee, die Lichtlaufzeit könnte eine Rolle spielen.

Schülerin 6 begründet ihre zunächst geäußerte Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden einen anderen Wert als der Apparat auf dem Boden, folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 6:** *Weil der fährt ja darauf ... der fährt ja entgegen und*
 2 *dann ... [...] ... verkürzt sich das, also ...*

Zitat 122

Sie akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung. Schülerin 6 akzeptiert das so gut, dass sie im Laufe des Interviews damit argumentiert (siehe Zitat 135 auf Seite 91 und Zitat 136 auf Seite 91).

Schüler 7 begründet seine Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug einen größeren Wert als der Apparat auf dem Zug, folgendermaßen:

- 1 **Schüler 7:** *[...] Weil, wenn dieses Licht dann schon weiter weg ist,*
 2 *dann braucht das vielleicht wie der Schall auch eine Zeit, bis*
 3 *das bei dem (Apparat auf dem Boden; Anm.) ankommt.*

Zitat 123

Schüler 7 akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung.

Im umgekehrten Fall – wenn das Messergebnis des Apparats auf dem Boden vorgegeben ist – äußert Schüler 7 keine Bedenken zur Lichtlaufzeit. Möglicherweise erscheinen ihm dort Probleme bei der Messung gravierender (siehe Zitat 120 auf Seite 85), die er aber mittlerweile begrifflich beseitigt hat.

Schülerin 8 ist zunächst der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden weniger als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 8:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Weil er schneller zum ...*
 2 *äh ... zur ... zum Blinker hinfährt.*

Zitat 124

Wenn der Zug sich wieder von der Blinklampe entfernt, ist Schülerin 8 zunächst der Meinung, die Blinklampe auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden mehr als der Apparat auf dem Boden, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schülerin 8:** *Weil er dann weiter weg fährt.*

Zitat 125

Sie akzeptiert in weiterer Folge die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung. Sie akzeptiert das so gut, dass sie später damit ein Resultat begründet (siehe Zitat 138 auf Seite 92), bei der Konfrontation mit der Zeitdilatation damit argumentiert („ich dachte es bleibt gleich, weil [...] es wird ja abgezogen. Es wird ja berechnet, wie weit er weg ist.“; Zeile 8 bis Zeile 9 von Zitat 161 auf Seite 100) und bei der Frage, welchen Wert der Apparat auf dem Boden für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug dafür drei Sekunden misst, rückfragt:

¹**Schülerin 8:** *[...] berechnet der das jetzt auch mit?*

Zitat 126

4.3.1.3. SchülerInnenvorstellungen zum Zeitbegriff

Schüler 2 ist der Meinung, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden einen geringeren Wert als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

¹**Schüler 2:** *Weil ... (2 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, das, ich glaub*
² *ja auch durch die Bewegung ...*

Zitat 127

Schüler 2 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug einen geringeren Wert als der Apparat auf dem Zug, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schüler 2:** *... sie (die Signallampe; Anm.) ist ... bewegt sich ja, und*
² *wenn sie jetzt, ähm, schneller ist, dass das ... ähm ... anders*
³ *wahrnimmt.*

Zitat 128

Der zeitliche Abstand zweier Blinksignale ist für Schüler 2 keine alleinige Eigenschaft der Signale selbst. Ob er mit seinen Aussagen das tatsächliche Vergehen der Zeit meint, lässt sich nicht sagen. Dass der Apparat, dessen Abstand zur Blinklampe sich ändert, einen geringeren Wert misst als der andere Apparat, gilt nach Meinung von Schüler 2 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

Schülerin 3 ist, nachdem sie die Existenz idealer Messgeräte (siehe Zitat 118 auf Seite 85) und die Möglichkeit, dass das Messgerät über alle relevanten Daten verfügt (siehe Zitat 119 auf Seite 85), akzeptiert hat, der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schülerin 3:** ... da haben sie ja die gleiche Vorstellung.

Zitat 129

Schülerin 3 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug denselben Wert wie der Apparat auf dem Zug, und begründet das so:

¹**Schülerin 3:** Weil da haben sie ja wieder die gleiche Vorstellung. Und
² die Ampel eben macht das ja regelmäßig, das Blinken, ... [...]
³ ... und da sehen sie das gleich und nicht unterschiedlich.

Zitat 130

Der Zeitbegriff von Schülerin 3 ist offenbar ein absoluter. Dass beide Apparate denselben Wert messen, gilt nach Meinung von Schüler 3 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

Schüler 4 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schüler 4:** Ja, weil er ... weil er dasselbe sieht wie der (Apparat am
² Boden; Anm.), dass es zwei Mal blinkt.

Zitat 131

4. SchülerInnenvorstellungen

Schüler 4 ist, nachdem er die Messgeräte als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 121 auf Seite 86), der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug denselben Wert wie der Apparat auf dem Zug, und begründet das so:

¹**Schüler 4:** *Ja, weil es eben mit einberechnet alles.*

Zitat 132

Effekte der Lichtlaufzeit sind für Schüler 4 der einzige Grund, warum die beiden Apparate Unterschiedliches messen könnten. Der Zeitbegriff von Schüler 4 ist offensichtlich ein absoluter. Dass beide Apparate denselben Wert messen, gilt nach Meinung von Schüler 4 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

Schüler 5 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schüler 5:** *Weil sich das ja nicht ändert. [...] Das Blinken.*

Zitat 133

Er ist der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug denselben Wert wie die Blinklampe auf dem Zug, und begründet das so:

¹**Schüler 5:** *Weil sich das wieder nicht ändert.*

Zitat 134

Der zeitliche Abstand zweier Blinksignale ist für Schüler 5 eine Eigenschaft der Signale selbst. Er hat einen absoluten Zeitbegriff. Dass beide Apparate denselben Wert messen, gilt nach Meinung von Schüler 5 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

Schülerin 6 ist, nachdem sie die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 122 auf Seite 87), der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

¹**Schülerin 6:** *Na weil er das einrechnet.*

Zitat 135

Schülerin 6 ist durch das Interview bereits misstrauisch geworden und ist nicht sicher, welchen Wert der Apparat auf dem Boden für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug dafür drei Sekunden misst. Ohne das Interview hätte sie aber gesagt, beide Apparate mäßen dasselbe, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schülerin 6:** *Na ja, wenn sie das mit einbeziehen, ... [...] ... dass*
² *der wegfährt.*

Zitat 136

Zumindest bis zu diesem Interview waren Effekte der Lichtlaufzeit für Schülerin 6 der einzige Grund, warum die beiden Apparate Unterschiedliches messen könnten. Sie hatte zumindest bis zu diesem Interview einen absoluten Zeitbegriff, ist aber offenbar bereit, diesen zu überdenken. Dass beide Apparate denselben Wert messen, gilt nach Meinung von Schülerin 6 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

Schüler 7 begründet seine Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden einen geringeren Wert als der Apparat auf dem Boden, mit einem Messfehler aufgrund der Geschwindigkeit (siehe Zitat 120 auf Seite 85).

Schüler 7 antwortet auf die Frage, welchen Wert der Apparat auf dem Boden für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug dafür einen Wert von drei Sekunden misst, nachdem er die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 123 auf Seite 87):

- 1 **Schüler 7:** (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (6 Sekunden Pause;
2 Anm.) ... hm, na ja ... hm, na ja, also ich würd sagen, wenn
3 man ... wenn er beim vorigen Beispiel mehr ... also weniger
4 gemessen hat (siehe Zitat 120 auf Seite 85, Anm.), dann wird er
5 jetzt mehr messen so ... [...] ... aus dem Bauch heraus, weil
6 ich hab keine gescheite Erklärung.

Zitat 137

Obwohl Schüler 7 der Meinung ist, die beiden Apparate mäßen jeweils unterschiedliche Werte für die Blinkfrequenz der Lampe, dürfte Schüler 7 doch einen absoluten Zeitbegriff haben. Dafür spricht seine Reaktion auf die Tatsache der Zeitdilatation (siehe Zitat 160 auf Seite 100). Seine Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden einen geringeren Wert als der Apparat auf dem Boden begründet er mit Messungenauigkeiten („ob der das richtig misst“; Zeile 4 bis Zeile 5 von Zitat 120 auf Seite 85). Diese Ansicht als falsche Prämisse genommen ergibt gemeinsam mit einem nicht unlogischen Schluss („wenn er beim vorigen Beispiel [...] weniger gemessen hat, dann wird er jetzt mehr messen“; Zeile 3 bis Zeile 5 von Zitat 137), dass der Apparat auf dem Boden für den zeitlichen Abstand zweier Blinksignale der Lampe auf dem Zug einen größeren Wert misst als der Apparat auf dem Zug. Die unterschiedlichen Messergebnisse der Apparate sagen nichts über den Zeitbegriff von Schüler 7 aus, sondern ergeben sich aus der Vorstellung ungenauer Messergebnisse.

Schülerin 8 ist, nachdem sie die Messinstrumente als Datensammler und den Messprozess als nachträgliche Datenauswertung akzeptiert hat (siehe Zitat 124 auf Seite 87 und Zitat 125 auf Seite 88), der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 8:** Weil er's einberechnet.

Zitat 138

Sie ist der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug denselben Wert wie der Apparat auf dem Zug, und begründet das folgendermaßen:

1 **Schülerin 8:** *Weil sich genauso auch nicht verändert.*

Zitat 139

Effekte der Lichtlaufzeit sind für Schülerin 8 der einzige Grund, warum die beiden Apparate Unterschiedliches messen könnten. Der zeitliche Abstand zweier Blinksignale ist für Schülerin 8 eine Eigenschaft der Signale selbst. Sie hat einen absoluten Zeitbegriff. Dass beide Apparate denselben Wert messen, gilt nach Meinung von Schülerin 8 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

Schülerin 10 ist durch das Interview bereits vorsichtig geworden und ist nicht sicher, welchen Wert der Apparat auf dem Zug für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Boden dafür drei Sekunden misst. Ohne das vorangegangene Interview hätte sie geantwortet:

1 **Schülerin 10:** *Ich würde trotzdem wieder sagen, dass sie's unter-*
2 *schie... , also dass sie's, ähm, unterschiedlich messen, weil der*
3 *(Apparat auf dem Waggon; Anm.) ja auch fährt.*

Zitat 140

Auf den Einwand, der Apparat auf dem Zug beziehe den sich ändernden Abstand zur Blinklampe auf dem Boden mit ein, antwortet Schülerin 10:

1 **Schülerin 10:** *Aber eigentlich ist ja ... bleibt das ja immer gleich ...*
2 *[...] ... dies... die Warnblinkleuchte. [...] Das heißt, sie müs-*
3 *sen eigentlich das Gleiche ... die gleichen Sekunden anzeigen*
4 *haben wie es leuchtet, weil das Licht verändert sich ja nicht.*

Zitat 141

Schülerin 10 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug dasselbe wie der Apparat auf dem Zug, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 10:** ... weil das Licht verändert sich ja nicht. Das, äh, nur
2 weil der am Boden steht. [...] Nur weil der am Boden steht,
3 verändert sich ja das Licht im ... in den Blinkabständen ja
4 nicht.

Zitat 142

Aus Zitat 140 auf der vorherigen Seite könnte man schließen, Schülerin 10 halte es für möglich, dass die Blinkfrequenz der Signallampe von ihrer Relativbewegung zum Messgerät abhängt. Nach dem Einwand, der Apparat auf dem Zug beziehe den sich ändernden Abstand zur Blinklampe mit ein, ist Schülerin 10 der Ansicht, beide Apparate müssten dasselbe (Zitat 141 auf der vorherigen Seite). Dafür, dass sie sich mit ihrer ersten Aussage (Zitat 140 auf der vorherigen Seite) nur auf einen messtechnischen Effekt bezieht und einen absoluten Zeitbegriff hat, spricht Zitat 142 und ihre Reaktion auf die Tatsache der Zeitdilatation (Zitat 162 auf Seite 101). Dass beide Apparate denselben Wert messen, gilt nach Meinung von Schülerin 10 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

Schülerin 11 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 11:** Der sieht ja genau das gl... also das ist ja genau das
2 Gleiche.

Zitat 143

Sie ist der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe für den zeitlichen Abstand zweier Signale der Blinklampe auf dem Zug dasselbe wie der Apparat auf dem Zug, und erklärt das folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 11:** Ist wieder das Gleiche wie vorher.

Zitat 144

Der Zeitbegriff von Schülerin 11 ist offenbar ein absoluter. Dass beide Apparate denselben Wert messen, gilt nach Meinung von Schülerin 11 unabhängig davon, ob die Blinklampe auf dem Boden oder dem Zug steht.

4.3.1.4. SchülerInnenvorstellungen zum Relativitätsprinzip im Kontext der Zeitmessung

Schüler 2 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 2:** Also, ich glaube nicht, dass die ... ähm ... feststellen
- 2 können, ob sie am Bahndamm stehen oder am ... am Waggon
- 3 stehen. [...] Weil sie und ... weil sie ... weil ... ähm ... sich
- 4 kein ... ähm ... ähm, also sie bewegen sich ja nicht. Und der
- 5 Abstand wird ... ändert sich nicht, auch ... auch am Waggon
- 6 oder am Bahndamm, also wird sich nicht verändern.

Zitat 145

Schüler 2 interpretiert die relative Ruhe von Messgerät und Blinklampe („der Abstand [...] ändert sich nicht“; Zeile 4 bis Zeile 5 von Zitat 145) als „sie bewegen sich ja nicht“ (Zeile 4 von Zitat 145). Schüler 2 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 3 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schülerin 3:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Also ich denk schon, dass
- 2 sie ... sehen können, dass sie ... am Boden stehen.

Zitat 146

Auf wiederholte Nachfrage kann Schülerin 3 nicht erklären, wie Apparat und Blinklampe, die auf dem Boden stehen, das im Gegensatz zu Apparat und Blinklampe, die sich auf dem Zug befinden, bewerkstelligen könnten. Schlussendlich meint sie nur:

- 1 **Schülerin 3:** (8 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm! O.k. ... (7 Sekunden
- 2 Pause; Anm.) ... na, da kann ich mir jetzt nicht so viel vorstellen.

Zitat 147

Schülerin 3 hat in der gegebenen Situation keine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

4. SchülerInnenvorstellungen

Schüler 4 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

¹**Schüler 4:** *Nein!*

Zitat 148

Er begründet seine Antwort nicht, dürfte aber in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip haben, denn er übersetzt die Relativgeschwindigkeit nicht in eine absolute Geschwindigkeit.

Schüler 5 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

¹**Schüler 5:** *Nein.*

Zitat 149

Er kann seine Antwort nicht begründen, dürfte aber in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip haben, denn er interpretiert die Relativgeschwindigkeit nicht als eine absolute Geschwindigkeit.

Schülerin 6 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

¹**Schülerin 6:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Nein.*

Zitat 150

Sie kann ihre Antwort nicht begründen, dürfte aber in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip haben, denn Schülerin 6 deutet die Relativgeschwindigkeit nicht als eine absolute Geschwindigkeit.

Schüler 7 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 7:** (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm, ja, weil eben das, ähm,
 2 also wenn meine Theorie da ... [...] ... vorher (siehe Zitat 137
 3 auf Seite 92; Anm.) stimmen könnte, also ... pfff ... weil eben
 4 das mit dem (zeitlichen; Anm.) Abstand von den Blinkern ...
 5 [...] ... zusammenhängt ... [...] ... ein Zusammenhang sein.
 6 [...] Aber ja, wenn das nicht stimmt, dann stimmt das jetzt
 7 natürlich auch nicht.

Zitat 151

Nachdem Schüler 7 eröffnet wurde, was die beiden Apparate tatsächlich messen würden, antwortet er auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 7:** Hm, na ja, wenn sie beide mehr messen, dann glaub ich
 2 nicht. [...] Mh ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... dann können
 3 sie's, hm, nicht feststellen, aber ja ... [...] ... vielleicht, ich
 4 weiß es nicht.

Zitat 152

Schüler 7 ist zunächst, auf eine falsche Theorie gestützt, der Ansicht, Apparat und Blinklampe, deren Abstand sich nicht ändert, könnten feststellen, ob sie sich auf dem Zug oder dem Boden befänden (Zitat 151). Er räumt aber ein, dass diese Ansicht mit seiner Theorie fällt (Zeile 6 bis Zeile 7 von Zitat 151). Nachdem sie sich als falsch herausgestellt hat, ist Schüler 7 bereit, seine Ansicht zu revidieren (Zitat 152), ist sich aber nicht sicher (Zeile 3 bis Zeile 4 von Zitat 152). Der einzige Anhaltspunkt für Schüler 7 festzustellen, wo sich Apparat und Blinklampe, deren Abstand sich nicht ändert, befinden, ist die gemessene Blinkfrequenz. Schüler 7 deutet die Relativgeschwindigkeiten nicht als absolute Geschwindigkeiten. Er ist offenbar bereit, das Relativitätsprinzip in der gegebenen Situation zu akzeptieren.

4. SchülerInnenvorstellungen

Schülerin 8 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schülerin 8:** (2 Sekunden Pause; Anm.) ... Nein. [...] Weil's die Welt
- 2 herum nicht sehen. [...] Weil sie ... weil sich der Abstand
- 3 sowieso nicht ändert.

Zitat 153

Für Schülerin 8 wäre die einzige Möglichkeit für Apparat und Blinklampe, deren Abstand sich nicht ändert, festzustellen, wo sie sich befinden, ein Blick in die Welt. Schülerin 8 interpretiert die Relativgeschwindigkeiten nicht als absolute Geschwindigkeiten. Sie hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 10 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schülerin 10:** Das können sie nicht, weil sie ja auch nichts sehen.

Zitat 154

Nach Meinung von Schülerin 10 könnten Blinklampe und Apparat, deren Abstand sich nicht ändert, nur durch einen Blick in die Umgebung feststellen, wo sie sich befinden. Schülerin 10 deutet die Relativgeschwindigkeiten nicht als absolute Geschwindigkeiten. Sie hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 11 antwortet auf die Frage, ob Blinklampe und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schülerin 11:** Nein. [...] Weil sie ja nichts anderes messen, wenn sie
- 2 oben oder unten stehen.

Zitat 155

Für Schülerin 11 besteht kein Unterschied zwischen der Physik auf dem Boden und der Physik auf dem Zug. Schülerin 11 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

4.3.1.5. Reaktionen der SchülerInnen auf die Zeitdilatation

Am Ende des Interviews zur Zeitdilatation wurde den SchülerInnen eröffnet, was die Geräte tatsächlich messen würden. Die SchülerInnen wurden um einen Kommentar zu diesem Sachverhalt gebeten.

Schülerin 3 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 3:** *Ha! Das versteh ich nicht ganz, ... [...] ... weshalb das*
2 *so ist. [...] Ja, weil sie ja eigentlich immer das Gleiche sehen.*
3 *[...] Warum sollen die dann was Unterschiedliches messen?*
4 *[...] Das ist ja irgendwie nicht ganz ... ha! ... verständlich.*

Zitat 156

Schülerin 3 findet die Zeitdilatation unverständlich (Zeile 1 und Zeile 4 von Zitat 156), verlangt aber nach einer Erklärung (Zeile 3 von Zitat 156).

Schüler 4 beantwortet die Frage, wieso er nicht verwundert wäre, würden der Apparat auf dem Zug und der Apparat auf dem Boden für dieselbe Blinklampe unterschiedliche Blinkfrequenzen messen, folgendermaßen:

- 1 **Schüler 4:** *Einfach so.*

Zitat 157

Schüler 4 kann offenbar mit dem Sachverhalt nicht viel anfangen. Er lehnt die Zeitdilatation aber nicht explizit ab.

Schüler 5 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schüler 5:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Warum? [...] (2 Sekunden*
2 *Pause; Anm.) ... Ur kompliziert.*

Zitat 158

Schüler 5 findet die Zeitdilatation kompliziert, verlangt aber nach einer Erklärung.

4. SchülerInnenvorstellungen

Schülerin 6 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 6:** *Warum? [...] ... misst der (Apparat auf dem Boden;*
- 2 *Anm.) mehr. [...] Weil er sich hinbewegt? [...] ich lass es jetzt*
- 3 *mal auf mich wirken.*

Zitat 159

Schülerin 6 verlangt nach einer Begründung für die Zeitdilatation und versucht selbst, eine Erklärung zu finden. Sie braucht aber ein wenig Zeit, um darüber nachzudenken.

Schüler 7 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schüler 7:** *... ja, es kommt mir logischerweise komisch vor.*

Zitat 160

Schüler 7 findet die Zeitdilatation komisch, lehnt sie aber nicht explizit ab und kann mit ihr ansatzweise korrekt argumentieren (siehe Zitat 152 auf Seite 97).

Schülerin 8 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 8:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Das hätte ich jetzt nicht*
- 2 *geglaubt.*
- 3 **Wittmann:** *Nein, wieso?*
- 4 **Schülerin 8:** *Weil's ja zum Licht hinfährt.*
- 5 **Wittmann:** *Auch wenn er wegfährt, misst er mehr. Das ist egal. [...]*
- 6 **Schülerin 8:** *(2 Sekunden Pause, Anm.) ... Ich ... (2 Sekunden Pause,*
- 7 *Anm.) ... ich hätte das jetzt wirklich nicht geglaubt. Wieso?*
- 8 *Weil ... ich dachte es bleibt gleich, weil ... [...] ... es wird*
- 9 *ja abgezogen. Es wird ja berechnet, wie weit er weg ist. [...]*
- 10 *Vielleicht weil er höher steht?*

Zitat 161

Schülerin 8 ist von der Zeitdilatation so überrascht (Zeile 1 bis Zeile 2 und Zeile 7 von Zitat 161 auf der vorherigen Seite), dass sie mit der Einrechnung der Lichtlaufzeit argumentiert (Zeile 8 bis Zeile 9 von Zitat 161 auf der vorherigen Seite), nach einer Begründung verlangt (Zeile 7 von Zitat 161 auf der vorherigen Seite) und selbst versucht, Erklärungen zu finden (Zeile 10 von Zitat 161 auf der vorherigen Seite).

Schülerin 10 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 10:** *Und wieso? [...] Es ist voll ... nicht kompliziert, nur*
2 *man denkt sich das gar nicht, weil ... [...] ... man denkt, dass*
3 *man immer richtig liegt, obwohl es dann genau das Gegenteil*
4 *ist.*

Zitat 162

Für Schülerin 10 ist die Zeitdilatation unerwartet, verlangt aber nach einer Erklärung (Zeile 1 von Zitat 162).

Schülerin 11 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Sabine:** *(5 Sekunden Pause; Anm.) ... Hab ich nicht geglaubt, haha.*
2 *[...] Ich weiß nicht. Ich dachte, das ist logisch, dass ...*

Zitat 163

Sie hat die Zeitdilatation nicht erwartet und findet sie unlogisch. Schülerin 11 lehnt die Zeitdilatation aber nicht explizit ab.

4.3.2. Zusammenfassung

Sieben der neun zur Zeitdilatation interviewten SchülerInnen thematisieren die Verwendung von Messgeräten nicht. Insbesondere kommen keinerlei Einwände, ein Messgerät könnte ein unscharfes Messergebnis liefern. Zwei der SchülerInnen äußern zunächst Bedenken, die Messgeräte könnten aufgrund der Relativgeschwindigkeit zur Signallampe unscharfe Messergebnisse produzieren

oder nicht den gesamten Messprozess erfassen. Insgesamt wird aber die Existenz idealer Messgeräte gut akzeptiert, jedoch samt den Konsequenzen nicht immer sofort verinnerlicht. Ebenfalls gut angenommen werden die Messgeräte als Datensammler, die den gesamten Versuchsablauf dokumentieren, und der Messprozess als nachträgliche Datenauswertung.

Vier der neun zur Zeitdilatation interviewten SchülerInnen thematisieren von sich aus Effekte der Lichtlaufzeit. Alle akzeptieren aber in weiterer Folge den Messprozess als Sammlung von Daten und späterer Datenauswertung.

Acht der neun zur Zeitdilatation interviewten SchülerInnen haben einen absoluten Zeitbegriff. Zunächst anders lautende Aussagen lassen sich auf Effekte der Lichtlaufzeit oder auf technische Probleme beim Messprozess zurückführen. Für einen Schüler ist der zeitliche Abstand zweier Signale der Blinklampe keine alleinige Eigenschaft der Signale. Ob er damit das tatsächliche Vergehen der Zeit meint, lässt sich nicht sagen. Eine Schülerin ist offenbar bereits durch dieses Interview bereit, ihren absoluten Zeitbegriff zu überdenken.

Sieben der neun zur Zeitdilatation interviewten SchülerInnen haben in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung Relativitätsprinzip im Kontext der Zeitmessung. Eine Schülerin kann mit der Fragestellung zum Relativitätsprinzip nichts anfangen. Sie dürfte in der gegebenen Situation keine brauchbare Vorstellung davon haben. Ein Schüler dürfte, nachdem er zunächst eine falsche Vorstellung vom Relativitätsprinzip geäußert hat, bereit sein, dieses in der gegebenen Situation zu akzeptieren. Alle SchülerInnen sind der Ansicht, die beiden Situationen (Blinklampe auf dem Boden, Blinklampe auf dem Zug) seien symmetrisch bezüglich Versetzung der Blinklampe. Auch das spricht für eine gute Vorstellung vom Relativitätsprinzip in der gegebenen Situation.

Keiner der acht mit der Zeitdilatation konfrontierten SchülerInnen lehnt diese explizit ab. Einer kann damit offensichtlich nichts anfangen und daher auch keine Aussage darüber machen. Sechs geben an, die Zeitdilatation sei für sie seltsam, unerwartet oder kompliziert. Fünf fragen nach einer Begründung. Zwei davon versuchen sogar, selbst eine Erklärung zu finden.

4.4. Längenkontraktion

Die neun SchülerInnen, die ich zum Thema Zeitdilatation interviewte, befragte ich auch zum Thema Längenkontraktion. Die Aufschlüsselung dieser SchülerInnen nach Schulstufe und Geschlecht findet sich in Tabelle 3.4 auf Seite 24.

Als Leitlinie für die Interviews verwendete ich folgenden Fragenkatalog:

1. In Abbildung 4.7 auf der nächsten Seite befindet sich am Bahndamm ein Holzbalken, der waagrecht auf zwei Stehern liegt. Auf dem Boden und

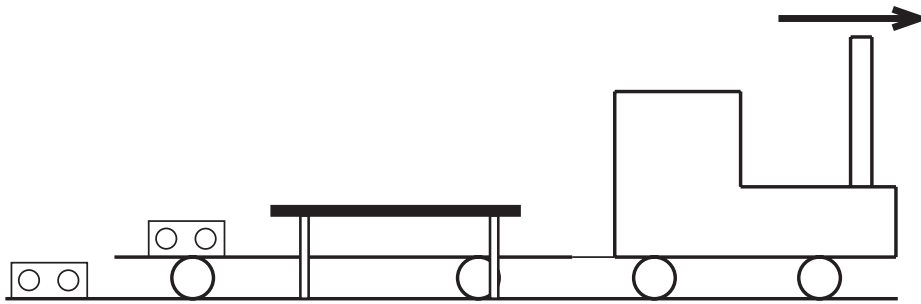


Abbildung 4.7.: Zu Frage 1 auf der vorherigen Seite

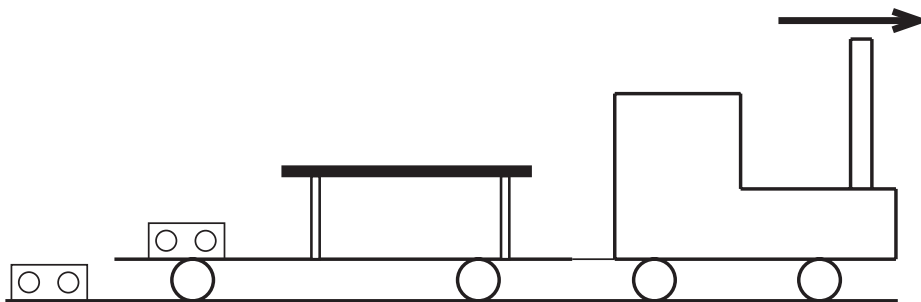


Abbildung 4.8.: Zu Frage 2

dem Waggon steht je ein Apparat, der die Länge von Gegenständen messen kann. Der Apparat auf dem Boden misst für den Holzbalken eine Länge von fünf Metern. Misst der Apparat auf dem Waggon für den Holzbalken ebenfalls eine Länge von fünf Metern oder kann es vorkommen, dass eine kleinere bzw. größere Länge gemessen wird? Begründung!

2. In Abbildung 4.8 wurde der Holzbalken samt Stehern auf den Waggon montiert. Der Apparat auf dem Waggon misst für den Holzbalken eine Länge von fünf Metern. Misst der Apparat auf dem Boden für den Holzbalken ebenfalls eine Länge von fünf Metern oder kann es vorkommen, dass eine kleinere bzw. größere Länge gemessen wird? Begründung!
3. In Abbildung 4.7 ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und dem Holzbalken nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und dem Apparat auf dem Boden bzw. dem Holzbalken ändert sich ständig. In Abbildung 4.8 ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und dem Holzbalken nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und dem Apparat auf dem Waggon bzw. dem Holzbalken ändert sich ständig. Nehmen wir an, die beiden

Apparate und der Holzbalken könnten nur sich selbst und einander „sehen“ und nicht den Rest der Welt. Könnten dann der Holzbalken und der Apparat, dessen Abstand zum Holzbalken sich nicht ändert, feststellen, ob sie sich beide auf dem Boden oder auf dem Waggon befinden? Könnte der Apparat, dessen Abstand zum Holzbalken sich ständig ändert, feststellen, ob er sich auf dem Boden oder auf dem Waggon befindet? Begründung!

4. In Wirklichkeit misst der Apparat, dessen Abstand zum Holzbalken sich ändert, für die Länge dieses Balkens ein kleines bisschen weniger als fünf Meter. Was sagst du dazu?

Mit der Frage 1 auf Seite 102 sollten die SchülerInnenvorstellungen zur Längenkontraktion erhoben werden. Anders als in vielen Darstellungen der Relativitätstheorie wird als BeobachterIn keine Person verwendet, die das Geschehen betrachtet, sondern die Messungen werden mit Messgeräten durchgeführt. Menschliche Sinnesorgane sind Täuschungen unterworfen und haben nur eine beschränkte Genauigkeit in der Wahrnehmung. SchülerInnen wissen das. Messgeräte können im Rahmen der Relativitätstheorie beliebig genau messen. Durch die Verwendung der Messgeräte erwartete ich, weniger eine Diskussion über die Wahrnehmung führen zu müssen und mich mehr auf die physikalischen Aussagen der Relativitätstheorie konzentrieren zu können.

Die Frage 2 auf der vorherigen Seite ist im Prinzip dieselbe wie die Frage 1 auf Seite 102, jedoch wurden die Messergebnisse des Apparats auf dem Zug vorgegeben. Mit dieser Frage sollte erhoben werden, welche Unterschiede sich dadurch in den Vorstellungen der SchülerInnen ergeben.

Mit der Frage 3 auf der vorherigen Seite sollte das Verständnis der SchülerInnen für das Relativitätsprinzip im Kontext der Längenmessung getestet werden.

Mit der Frage 4 sollte die Akzeptanz der Längenkontraktion durch die SchülerInnen erhoben werden.

Im Gespräch wurden die Begriffe Gerät und Apparat oftmals synonym verwendet. Es ist aber in jeder Situation klar, was gemeint ist.

4.4.1. Auswertung der Interviews zur Längenkontraktion

4.4.1.1. Die Verwendung von Messgeräten

Eine der neun bezüglich der Längenkontraktion interviewten SchülerInnen akzeptiert die Messgeräte, ohne dies zu thematisieren. Insbesondere kommen keinerlei explizite Einwände, ein Messergebnis könne unscharf sein. Acht SchülerInnen thematisieren die Messgeräte von sich aus.

Schüler 2 ist zunächst der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den Holzbalken auf dem Boden eine kürzere Länge als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schüler 2:** *Also ich glaub, der misst eine kürzere ... also der sagt,*
2 *ähm ... er würd meinen, dass das kürzer ist. [...]* Weil, wenn
3 *er nämlich mit einer Geschwindigkeit vorbeikommt, ist eine*
4 *kürzere Zeit, dass man diesen Gegenstand ... also sieht, und ja,*
5 *es kommt bei mir auch alles kürzer vor.*

Zitat 164

Auf Nachfrage räumt er ein:

- 1 **Schüler 2:** *Ich würd ... glaub ... also ich glaub, das ist eine optische*
2 *Täuschung.*

Zitat 165

Er lehnt daraufhin die Existenz exakter Messgeräte nicht ab, kann sie aber nicht sofort verinnerlichen, denn auf die nochmalige Frage, was der Apparat auf dem Zug messe, fährt er fort:

- 1 **Schüler 2:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich glaub eine kürzere, weil*
2 *in der kürzeren Zeit, die er zur Verfügung hat, diesen Gegenstand*
3 *zu sehen ...*

Zitat 166

In weiterer Folge akzeptiert Schüler 2 die Existenz exakter Messgeräte und wendet deren Arbeitsweise auch richtig an (siehe Zeile 2 bis Zeile 5 von Zitat 180 auf Seite 110). Trotzdem dürfte er nachher wieder in die Vorstellung zurückfallen, der Apparat auf dem Zug würde unscharf messen (siehe Analyse zu Zitat 204 auf Seite 119).

Schülerin 3 ist zunächst der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den Holzbalken auf dem Boden eine kürzere Länge als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 3:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Weil er (Apparat auf dem
2 Waggon; Anm.) eben schneller vorbeifährt und es ... da kann
3 er vielleicht nicht so ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... so die
4 Länge sehen also ...

Zitat 167

Schülerin 3 akzeptiert daraufhin die Existenz exakter Messgeräte, kann sie aber nicht verinnerlichen. Nun ist sie der Meinung, der Apparat auf dem Zug messe für den Holzbalken auf dem Boden eine größere Länge als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schülerin 3:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Weil, also ... er fährt
2 vorbei ... [...] ... und dann sieht er den und dann denkt er,
3 also, meint halt, dass er – Wie soll ich das sagen? – dass er
4 also ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Nein, ich kann das nicht
5 erklären.

Zitat 168

Schülerin 3 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe für die Länge des Balkens auf dem Waggon dasselbe wie der Apparat auf dem Waggon. Den Unterschied zum umgekehrten Fall – wenn das Messergebnis des Apparats auf dem Boden für den Balken auf dem Boden vorgegeben ist – begründet sie so:

- 1 **Schülerin 3:** Na ja, nein, ich hab gedacht, dass er dann wieder nur, ...
2 dass nicht so richtig sehen kann ...

Zitat 169

Schülerin 3 verfällt immer wieder in die Vorstellung, der Apparat auf dem Zug produziere ein unscharfes Messergebnis. Andererseits weiß sie, dass der Apparat das nicht tut. Diesen Widerspruch kann sie nicht auflösen, was die in den Zeilen 4 bis 5 von Zitat 168 direkt sagt: „Nein, ich kann das nicht erklären.“ Sie lehnt daraufhin die Existenz idealer Messgeräte nicht ab, fällt aber später wieder in die Vorstellung unscharfer Messergebnisse zurück (siehe Zeile 5 bis Zeile 6 von Zitat 205 auf Seite 119).

Schüler 4 ist zunächst der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den Holzbalken auf dem Boden eine kürzere Länge als der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schüler 4:** [...] weil wenn der da vorbeifährt, kann jetzt ... kann er
2 nicht sofort alles berechnen.

Zitat 170

Schüler 4 hat den Messprozess als Datensammlung mit anschließender Auswertung bereits akzeptiert, hat aber noch Bedenken bezüglich der technischen Umsetzung. Er akzeptiert in weiterer Folge, dass die Auswertung nicht sofort erfolgen muss. Das zeigt sich, indem er seine nunmehrige Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den Holzbalken auf dem Boden dieselbe Länge wie der Apparat auf dem Boden (siehe Zitat 182 auf Seite 111), folgendermaßen begründet:

- 1 **Schüler 4:** Ja, weil er s... wenn er sozusagen ein Foto macht und das
2 irgendwie einspeichert und ausmisst ...

Zitat 171

Schüler 4 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Boden messe für die Länge des Balkens auf dem Waggon dasselbe wie der Apparat auf dem Waggon (siehe Zitat 183 auf Seite 111), und begründet das so:

- 1 **Schüler 4:** Ja, weil das auch so ... also auch berechnet alles.

Zitat 172

Zitat 172 zeigt eine hohe Akzeptanz des Messprozesses als Datensammlung mit anschließender Auswertung.

Schüler 4 akzeptiert zwar die Existenz idealer Messgeräte, wirklich verinnerlicht hat er diese Idee aber nicht. Er fällt immer wieder in seine alte Vorstellung zurück. Die Tatsache der Längenkontraktion kommentiert Schüler 4 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 4:** Weil er schnell fertig gemessen ...

Zitat 173

Dass er sich die Längenkontraktion vorstellen könne, begründet Schüler 4 ebenfalls mit der Vorstellung eines unscharfen Messergebnisses (siehe Zeile 3 von Zitat 207 auf Seite 120).

4. SchülerInnenvorstellungen

Schüler 5 ist zunächst der Ansicht, das Gerät auf dem Zug messe für den Holzbalken auf dem Boden eine geringere Länge als das Gerät auf dem Boden. Seine Begründung lautet:

¹**Schüler 5:** *Na weil man ... weil man's nicht genau sieht.*

Zitat 174

Schüler 5 akzeptiert in weiterer Folge die Existenz exakter Messgeräte.

Schülerin 6 fragt nach, nachdem ihr der Versuchsaufbau zur Längenmessung erklärt wurde:

¹**Schülerin 6:** *Der Zug bewegt sich?*

²**Wittmann:** *Ja, wieder mit 50 km/h nach rechts.*

³**Schülerin 6:** *(2 Sekunden Pause; Anm.) ... Und der ... das Messgerät*

⁴ *weiß das?*

Zitat 175

Die Aussage in Zeile 3 bis Zeile 4 von Zitat 175 zeigt eine intensive gedankliche Auseinandersetzung mit der Arbeitsweise der idealen Messgeräte, die von Schülerin 6 akzeptiert werden.

Schüler 7 ist zunächst der Meinung, der Apparat auf dem Waggon messe für den Balken auf dem Boden eine geringere Länge als der Apparat auf dem Boden. Er begründet das so:

¹**Schüler 7:** *... und der (Apparat auf dem Waggon; Anm.) hat deswegen*

² *praktisch nicht so viel Zeit, die richtige Länge jetzt da zu messen.*

Zitat 176

Schüler 7 akzeptiert in weiterer Folge die Existenz idealer Messgeräte.

Schülerin 10 begründet ihre Ansicht, beide Apparate mäßen für die Länge des Balkens auf dem Boden denselben Wert, folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 10:** *Das heißt, er (Apparat auf dem Waggon; Anm.) nimmt*
2 *das ... er ... er (Apparat auf dem Waggon; Anm.) müsste es,*
3 *wenn er (Apparat auf dem Waggon; Anm.) genau dort sein würde,*
4 *wo er ... wo er (Holzbalken; Anm.) sich grad befindet, ... [...]*
5 *... dann würden sie den gleichen Abstand messen.*
6 **Wittmann:** *Ja und würd ... da (weiter weg vom Holzbalken; Anm.)*
7 *nicht?*
8 **Schülerin 10:** *Nein, weil sie (Apparat auf dem Waggon und Holzbal-*
9 *ken; Anm.) ja nicht genau gleich stehen.*
10 **Wittmann:** *Das macht ja nichts. Was ist, wenn ich den da rüber stell?*
11 *Misst der was anderes, wenn ich den da rüber stell?*
12 **Schülerin 10:** *Das könnte schon sein, weil die Strecke halt kürzer und*
13 *länger ist.*

Zitat 177

Zunächst setzt Schülerin 10 voraus, dass die Messung genau dann stattfindet, wenn sich der Holzbalken und das Messgerät auf dem Zug an derselben Stelle befinden (Zeilen 1 bis 5 von Zitat 177). Auf Nachfrage räumt sie ein, dass bei einer anderen räumlichen Konstellation das Messergebnis anders ausfallen könnte (Zeilen 6 bis 13 von Zitat 177). Interessant ist, dass Schülerin 10 nicht die Geschwindigkeit des Zuges als Ursache für einen möglichen anderen Messwert nennt, sondern den Abstand des Balkens vom Messgerät. Sie akzeptiert aber in weiterer Folge, dass das Messgerät alle relevanten Daten zur Verfügung hat und diese nachträglich auswertet.

Schülerin 11 vermutet, das Messgerät auf dem Zug messe für die Länge des Balkens auf dem Boden einen kleineren Wert als das Messgerät auf dem Boden, und begründet das folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 11:** *Na ja, wenn der Zug fährt, das Gerät sieht ja nie alles*
2 *von dem Balken.*

Zitat 178

Schülerin 11 akzeptiert aber in weiterer Folge, dass das Messgerät alle relevanten Daten zur Verfügung hat und diese nachträglich auswertet.

4.4.1.2. SchülerInnenvorstellungen zum Längenbegriff

Schüler 2 antwortet, nachdem er die Existenz exakter Messgeräte akzeptiert hat (siehe Zitate 164, 165 und 166 auf Seite 105), auf die Frage, welche Länge der Apparat auf dem Zug für den Balken auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Boden eine Länge von fünf Metern misst:

1 Schüler 2: *O. k., dann würd ich sagen, sie sehen das Gleiche.*

Zitat 179

Schüler 2 schafft es aber nicht, diese Antwort zu begründen, offenbar ist sie ihm zu selbstverständlich. Auf die Frage, welche Länge der Apparat auf dem Boden für den Balken auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug eine Länge von fünf Metern misst, antwortet Schüler 2:

1 Schüler 2: *(10 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich würd wieder sagen*
2 *wegen der Geschwindigkeit wär's kürzer. Aber wenn das so*
3 *ein Gerät ist, dass das die Geschwindigkeit also ... dass die*
4 *Geschwindigkeit keine Probleme ist, dann würd ich auch sagen,*
5 *dass sie das Gleiche messen.*

Zitat 180

Schüler 2 würde unterschiedliche Messergebnisse für die Länge des Balkens auf dem Zug Problemen bei der Messung zuschreiben (Zeile 4 von Zitat 180) zuschreiben. Insgesamt ist der Längenbegriff von Schüler 2 ein absoluter.

Schülerin 3 schafft es nicht sich vorzustellen, der Apparat auf dem Zug könne ein exaktes Ergebnis für die Länge des Balkens auf dem Boden ermitteln (siehe Zitate 167, 168 und 169 auf Seite 106). Darum kann sie auch keine eindeutige Antwort geben, was dieser Apparat messen werde. Umgekehrt ist sie der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe für den Balken auf dem Zug dieselbe Länge wie der Apparat auf dem Zug, und begründet das folgendermaßen:

1 Schülerin 3: *Weil sie das Gleiche wieder sehen.*

Zitat 181

Schülerin 3 weiß sicherlich aus eigener Erfahrung, dass die Umgebung bei einem Blick aus einem fahrenden Zug unscharf aussieht. Diese Vorstellung überträgt sie auf das Messgerät auf dem Zug und kann daher keine klaren Aussagen über dessen Messergebnisse machen. Bei der Betrachtung fahrender Züge vom Boden aus hat Schülerin 3 offenbar andere Erfahrungen. Wenn man sich dabei auf ein Detail auf dem Zug konzentriert, kann man es trotz Bewegung des Zuges scharf sehen. Nach der Vorstellung von Schülerin 3 konzentriert sich das Messgerät auf dem Boden auf den Balken auf dem Zug und schafft es daher, ein scharfes Messergebnis zu produzieren. Da es für Schülerin 3 nun keinen Grund mehr gibt, warum das Messgerät auf dem Boden etwas anderes messen sollte als das Messgerät auf dem Zug (Zitat 181 auf der vorherigen Seite), ist ihr Längenbegriff ein absoluter.

Schüler 4 antwortet, nachdem er akzeptiert hat, dass die Datenauswertung nicht sofort erfolgen muss (siehe Zitat 170 auf Seite 107), auf die Frage, welchen Wert der Apparat auf dem Zug für die Länge des Balkens auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Boden eine Länge von fünf Metern misst:

¹**Schüler 4:** *Gleich.*

Zitat 182

Er begründet diese Antwort mit dem idealen Messprozess (siehe Zitat 171 auf Seite 107).

Auf die Frage, welchen Wert der Apparat Boden für die Länge des Balkens auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug eine Länge von fünf Metern misst, antwortet Schüler 4:

¹**Schüler 4:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm, auch fünf Meter.*

Zitat 183

Er begründet auch diese Antwort mit dem idealen Messprozess (Zitat 172 auf Seite 107).

Da Schüler 4 unterschiedliche Messergebnisse auf einen fehlerhaften Messprozess zurückführen würde, ist der Längenbegriff von Schüler 4 ein absoluter.

Schüler 5 ist, nachdem er die Existenz exakter Messgeräte akzeptiert hat (siehe Zitat 174 auf Seite 108), der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für die Länge des Balkens auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

¹**Schüler 5:** *Ja, weil's die gleiche Breit... ist.*

Zitat 184

Ebenso ist Schüler 5 der Meinung, der Apparat auf dem Boden messe für den Balken auf dem Zug dieselbe Länge wie der Apparat auf dem Zug, und begründet das folgendermaßen:

¹**Schüler 5:** *Na weil's wieder das Gleiche ist.*

Zitat 185

Der Längenbegriff von Schüler 5 ist offenbar ein absoluter.

Anstelle eines Messergebnisses formuliert Schüler 5: „Ja, weil's die gleiche Breit... ist.“ (Zitat 184) und „Na weil's wieder das Gleiche ist.“ (Zitat 185). Für ihn ist das Messergebnis des Apparats ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die er kennt.

Schülerin 6 ist durch das Interview bereits vorgewarnt. Deswegen ist sie der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den Balken auf dem Boden eine etwas andere Länge als der Apparat auf dem Boden. Ohne das Interview hätte sie die Frage nach dem Messergebnis des Apparats auf dem Zug beantwortet mit:

¹**Schülerin 6:** *Dann würd ich sagen, es ist genau gleich.*

Zitat 186

Ebenso meint Schülerin 6, der Apparat auf dem Boden messe für die Länge des Balkens auf dem Zug eine etwas größere Länge als der Apparat auf dem Zug. Ohne das Interview hätte sie die Frage nach dem Messergebnis des Apparats auf dem Boden beantwortet mit:

¹**Schülerin 6:** *Dann hätt ich, es ist genau gleich.*

Zitat 187

Zumindest bis zu dem Interview hatte Schülerin 6 einen absoluten Längenbegriff.

Schüler 7 ist, nachdem er die Existenz exakter Messgeräte akzeptiert hat (siehe Zitat 176 auf Seite 108), der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für die Länge des Balkens auf dem Boden denselben Wert wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das so:

- 1 **Schüler 7:** *Na ja, wenn der das eh erkennt und auf einem Zug ist oder*
2 *nicht und dann wird der das, würd ich einmal sagen, eh richtig*
3 *erkennen, wie lang ... [...] ... das ... der Tisch (Holzbalken*
4 *mit Gestell; Anm.) ist.*

Zitat 188

Auf die Frage, welche Länge der Apparat auf dem Boden für den Balken auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug eine Länge von fünf Metern misst, antwortet Schüler 7:

- 1 **Schüler 7:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Na, ja, o.k. Also meine*
2 *Theorie stimmt höchstwahrscheinlich eh nicht, aber wenn ich*
3 *eben bei dem ... [...] ... ersten Beispiel sage, dass er dasselbe*
4 *misst, dann muss er beim zweiten auch dasselbe messen.*

Zitat 189

Anstelle eines Messergebnisses formuliert Schüler 7: „[...] richtig erkennen, wie lang [...] der Tisch (Holzbalken mit Gestell; Anm.) ist.“ (Zeile 2 bis Zeile 4 von Zitat 188). Für ihn ist das Messergebnis des Apparats ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die er kennt.

Auch Schüler 7 ist durch das Interview bereits vorsichtig geworden. Das zeigt sich daran, dass er an seiner Theorie der absoluten Länge von Gegenständen zweifelt (Zeile 1 bis Zeile 2 von Zitat 189). Zumindest bis zu dem Interview hatte Schüler 7 einen absoluten Längenbegriff.

Schülerin 8 ist der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den Balken auf dem Boden dieselbe Länge wie der Apparat auf dem Boden, und begründet das interessanterweise mit der Entfernung des Balkens vom Messgerät und nicht mit dessen Geschwindigkeit bezüglich des Balkens:

- 1 **Schülerin 8:** *Es ist doch egal, wie weit er weg ist, der Holzbalken.*

Zitat 190

4. SchülerInnenvorstellungen

Ihre Meinung, der Apparat auf dem Boden messe für die Länge des Balkens auf dem Zug denselben Wert wie der Apparat auf dem Zug, begründet Schülerin 8 so:

¹**Schülerin 8:** *Weil's ... weil der Holzbalken wieder gleich bleibt.*

Zitat 191

Sie ist jedoch durch das Interview vorsichtig geworden und äußert in weiterer Folge Zweifel an ihrer Ansicht, beide Messgeräte würden jeweils dasselbe messen. Ohne das Interview hätte sie aber diese Zweifel nicht gehabt. Zumindest bis zu diesem Interview war der Längenbegriff von Schülerin 8 ein absoluter.

Schülerin 10 ist durch das Interview auch bereits vorgewarnt. Deswegen ist sie der Ansicht, der Apparat auf dem Zug messe für den Balken auf dem Boden eine etwas andere Länge als der Apparat auf dem Boden. Ohne das Interview hätte sie auf die Frage, welchen Wert der Apparat auf dem Zug für die Länge des Balkens auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Boden eine Länge von fünf Metern misst, geantwortet, nachdem sie akzeptiert hat, dass das Messgerät alle relevanten Daten zur Verfügung hat und diese nachträglich auswertet (siehe Zitat 177 auf Seite 109):

¹**Schülerin 10:** *Ich hätte, ehrlich gesagt, ich hätte wieder gesagt, dass*
² *sie gleich messen.*

Zitat 192

Auf die Frage, welche Länge der Apparat auf dem Boden für den Balken auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug eine Länge von fünf Metern misst, antwortet Schülerin 10:

¹**Schülerin 10:** *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich hätte wieder gesagt,*
² *dass sie gleich viel messen ... [...] ... weil es kann sich ja, wie*
³ *Sie gesagt haben, dass ... die Strecken ... [...] ... dass das*
⁴ *überhaupt keine Rolle spielt, ...*

Zitat 193

In weiterer Folge glaubt Schülerin 10 aufgrund des Interviews aber nicht, dass ihre Ansicht, die sie in Zitat 193 äußert, richtig ist. Zumindest bis zu dem Interview hatte Schüler 10 einen absoluten Längenbegriff.

Schülerin 11 antwortet, nachdem sie akzeptiert hat, dass das Messgerät alle relevanten Daten zur Verfügung hat und diese nachträglich auswertet (siehe Zitat 178 auf Seite 109), auf die Frage, welchen Wert der Apparat auf dem Zug für die Länge des Balkens auf dem Boden messe, wenn der Apparat auf dem Boden eine Länge von fünf Metern misst:

¹**Schülerin 11:** *(15 Sekunden Pause; Anm.) ... Sieht auch fünf Meter.*

Zitat 194

Auf die Frage, welchen Wert der Apparat auf dem Boden für die Länge des Balkens auf dem Zug messe, wenn der Apparat auf dem Zug eine Länge von fünf Metern misst, antwortet Schülerin 11:

¹**Schülerin 11:** *Fünf Meter.*

Zitat 195

Sie räumt ein, beide Ergebnisse nur geschätzt zu haben und nicht erklären zu können. Dass beide Apparate jeweils dieselbe Länge messen, ist ihr offenbar intuitiv so klar, dass sie keine Begründung dafür findet. Das spricht dafür, dass Schülerin 11 einen absoluten Längenbegriff hat.

4.4.1.3. SchülerInnenvorstellungen zum Relativitätsprinzip im Kontext der Längenmessung

Schüler 2 antwortet auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

¹**Schüler 2:** *Nein, können auch wieder nicht.*

²**Wittmann:** *Ja. Gut, wieso nicht?*

³**Schüler 2:** *Ja, weil, ähm, wieder ... also die bewegen sich ja nicht*

⁴ *und der ... die, die, die Entfernung bleibt gleich.*

Zitat 196

Schüler 2 interpretiert die relative Ruhe von Messgerät und Balken („die Entfernung bleibt gleich“) als „die bewegen sich ja nicht“ (Zeile 3 bis Zeile 4 von Zitat 196). Schüler 2 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

4. SchülerInnenvorstellungen

Schüler 5 antwortet auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 5:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Nein. Das ist ja das Gleiche
2 wie vorher.

Zitat 197

Schüler 5 kann auf Nachfrage nicht sagen, was er mit seiner Erklärung meint, oder seine Gedanken verbalisieren. Er dürfte aber in der gegebenen Situation intuitiv eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip haben.

Schülerin 6 antwortet auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schülerin 6:** Nein, haben keine Chance.
2 **Wittmann:** Wieso nicht?
3 **Schülerin 6:** Weil sie immer denselben ... dasselbe messen, immer
4 fünf Meter.

Zitat 198

Schülerin 6 sieht als einzigen Anhaltspunkt für das Messgerät festzustellen, wo es sich befinde, die Länge der Balken (Zeile 3 bis Zeile 4 von Zitat 198). Sie übersetzt die Relativbewegung nicht in eine absolute Bewegung. Das zeigt, dass Schülerin 6 in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip hat.

Schüler 7 antwortet auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

- 1 **Schüler 7:** Ähm, würd ich sagen, können sie das nicht feststellen, ob
2 sie am Zug sind, ... [...] ... wenn sie beide dasselbe messen.
3 **Wittmann:** Ja, wieso?

4 **Schüler 7:** *Na ja, weil ich muss jetzt da von meiner Theorie ausgehen,*
 5 *eben wenn sie beide dasselbe messen, ... [...] ... also es sind*
 6 *die ... praktisch ist das dann egal, ob sie am Zug sind oder*
 7 *nicht, und deswegen würden sie dann eben das nicht erkennen*
 8 *können.*

Zitat 199

Schüler 7 sieht als einzigen Anhaltspunkt für das Messgerät festzustellen, wo es sich befinde, die Länge der Balken (Zeile 2 von Zitat 199). Da beide Messgeräte nach der Meinung von Schüler 7 für den Balken jeweils dieselbe Länge messen, können sie nicht feststellen, wo sie sich befinden. Er übersetzt die Relativbewegung nicht in eine absolute Bewegung.

Nachdem Schüler 7 eröffnet wurde, was die Messgeräte tatsächlich messen würden, antwortet er auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, nun feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

1 **Schüler 7:** *... [...] also ich würd sagen trotzdem nein, weil der am*
 2 *Boden weiß ja zum Beispiel nicht, ob seines jetzt falsch ist.*

Zitat 200

Auch wenn beide Messgeräte nicht dasselbe messen („falsch“; Zeile 2 von Zitat 200), können sie nicht feststellen, ob sie auf dem Boden oder dem Zug stehen. Wieder sieht Schüler 7 als einzigen Anhaltspunkt für das Messgerät festzustellen, wo es sich befinde, die Länge der Balken. Das zeigt, dass Schüler 7 in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip hat.

Schülerin 8 antwortet auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

1 **Schülerin 8:** *Sie können sich nicht vorstellen ...*
 2 *[...]*
 3 **Wittmann:** *... meinst du, wer jetzt am Boden ist und wer nicht?*
 4 **Schülerin 8:** *Genau.*
 5 **Wittmann:** *Ja, wieso?*

4. SchülerInnenvorstellungen

6**Schülerin 8:** *Weil sich der Abstand wieder nicht ändert zwischen dem*
7 *Holzbalken und dem Apparat.*

Zitat 201

Schülerin 8 ist der Ansicht, dass die relative Ruhe zwischen dem Apparat und dem Balken („der Abstand [...] nicht ändert“; Zeile 6 von Zitat 201) in beiden Situationen – auf dem Zug und auf dem Boden – gleichwertig ist. Schülerin 8 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 10 antwortet auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

1**Schülerin 10:** *Nein, weil das (den Rest der Welt; Anm.) sehen sie ja*
2 *nicht.*

Zitat 202

Schülerin 10 ist der Ansicht, Messgerät und Balken könnten nur in Relation zur restlichen Welt feststellen, ob sie sich auf dem Zug oder dem Boden befänden. Schülerin 10 hat in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Schülerin 11 antwortet auf die Frage, ob Balken und Messgerät, deren Abstand sich nicht ändert, feststellen könnten, ob sie sich auf dem Boden oder dem Zug befänden:

1**Schülerin 11:** *Nein.*
2**Wittmann:** *Wieso nicht?*
3**Schülerin 11:** *(4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja, weil's ja immer das*
4 *Gleiche messen.*

Zitat 203

Schülerin 11 sieht als einzigen Anhaltspunkt für das Messgerät festzustellen, wo es sich befinde, die Länge der Balken (Zeile 3 bis Zeile 4 von Zitat 203). Sie übersetzt die Relativbewegung nicht in eine absolute Bewegung. Daraus folgt, dass Schülerin 11 in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip hat.

4.4.1.4. Reaktionen der SchülerInnen auf die Längenkontraktion

Am Ende des Interviews zur Längenkontraktion wurde den SchülerInnen eröffnet, was die Geräte tatsächlich messen würden. Die SchülerInnen wurden um einen Kommentar zu diesem Sachverhalt gebeten.

Schüler 2 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schüler 2:** *Ich würd sagen ... ja also mir kommt das genau so vor. Und*
2 *ich glaub ni... ja ... ich weiß nicht wieso, aber ich ... irgendwie*
3 *hab ich also ich hab 's mir irgendwie also schon gedacht, dass*
4 *es so ist.*

Zitat 204

Er gibt an, sich das die ganze Zeit gedacht zu haben, aber nicht sicher gewesen zu sein. Die Aussage „ja also mir kommt das genau so vor“ (Zeile 1 von Zitat 204) deutet darauf hin, dass er einen visuellen Effekt im Sinn hat. Dafür spricht auch Zitat 165 auf Seite 105 und die Tatsache, dass er die Existenz idealer Messgeräte nicht gut in seine Gedankenwelt einbauen kann (siehe Einleitung zu Zitat 166 auf Seite 105).

Schülerin 3 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 3:** *Also das ... das ... kann ich mir eher vorstellen, wenn*
2 *der Apparat am Zug ist und vorbeifährt, als wie wenn der Appa-*
3 *rat am Boden ist.*
4 **Wittmann:** *Ja, wieso?*
5 **Schülerin 3:** *Weil man, wie gesagt, im Zug eben die andere Vorstellung*
6 *hat ... [...] ... und dann und das nicht so, ähm, nicht so, so*
7 *länger sieht und da ...*

Zitat 205

Dass Schülerin 3 sich das „eher vorstellen [kann], wenn der Apparat am Zug ist und vorbeifährt“ (Zeile 1 bis Zeile 2 von Zitat 205) spricht dafür, dass sie sich einen visuellen Effekt oder eine unscharfe Messung vorstellt. Dafür spricht auch,

4. SchülerInnenvorstellungen

dass sie von „Vorstellung“ (Zeile 5 auf der vorherigen Seite von Zitat 205) und „nicht so [...] länger sieht“ (Zeile 6 bis Zeile 7 von Zitat 205 auf der vorherigen Seite) spricht. Auf den Einwand, die Messgeräte würden exakt messen, kann sie die unterschiedlichen Messergebnisse nicht erklären.

Schüler 4 antwortet auf die Frage, ob er verwundert wäre, würde der Apparat auf dem Zug und der Apparat auf dem Boden für den jeweiligen Balken unterschiedliche Längen messen:

1 Schüler 4: *(3 Sekunden Pause; Anm.) ... Nein.*

Zitat 206

Er kann aber seine Ansicht nicht begründen. In weiterer Folge kommentiert er die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

1 Schüler 4: *Na ja, kann ich mir vorstellen.*

2 Wittmann: *Kannst du dir vorstellen. Wie das?*

3 Schüler 4: *Ja, weil, wenn es unscharf nur ist ...*

Zitat 207

Schüler 4 hat offenbar die Vorstellung von einem unscharfen Messergebnis (Zeile 3 von Zitat 207). Auf den Einwand, die Messgeräte würden exakt messen, kann er die unterschiedlichen Messergebnisse nicht erklären.

Schüler 5 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen, nachdem er die Existenz exakter Messgeräte akzeptiert hat (siehe Zitat 174 auf Seite 108):

1 Schüler 5 *Warum?*

2 *[...]*

3 Wittmann: *Kommt dir das komisch vor oder ...*

4 Schüler 5: *Schon.*

5 Wittmann: *Ja, warum?*

6 Schüler 5: *Weil das nicht gehen kann.*

7 Wittmann: *Aha, warum kann das nicht gehen?*

8 **Schüler 5:** (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Na, es ... es ist immer der
9 gleiche Tisch (Holzbalken mit Aufbau; Anm.) und die gleichen
10 Apparate. [...] Es ändert sich ja nicht.

Zitat 208

Schüler 5 findet die Längenkontraktion seltsam (Zeile 4 und Zeile 6 von Zitat 208). Er begründet seine Ansicht sogar (Zeile 8 bis Zeile 10 von Zitat 208), ist aber an einer Erklärung interessiert (Zeile 1 von Zitat 208).

Schülerin 6 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

1 **Schülerin 6:** O. k.

Zitat 209

Schülerin 6 toleriert phlegmatisch die Längenkontraktion.

Schüler 7 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

1 **Schüler 7:** (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Na ja, gut, also ... [...]
2 ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Dass ja, also ... ich, ja, also,
3 es kommt mir komisch vor. Aber es ist jetzt natürlich da schon
4 ein Zusammenhang mit diesen ganzen Beispielen, dass ... [...]
5 ... sich das immer verändert und die das praktisch, ja ...

Zitat 210

Schüler 7 findet die Längenkontraktion komisch (Zeile 3 von Zitat 210), er sieht aber einen Zusammenhang zu den anderen Beispielen, bei denen sich auch manche Größen unerwartet geändert haben (Zeile 4 bis Zeile 5 von Zitat 210) und nimmt das zur Kenntnis.

4. SchülerInnenvorstellungen

Schülerin 8 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 8:** *Ich find es wieder komisch, aber nach den ganzen Bei-*
2 *spielen ... [...] ... langsam ist ganz normal jetzt.*

Zitat 211

Nachdem Schülerin 8 in diesem Interview schon mit einigen unerwarteten Fakten konfrontiert wurde, findet sie die Längenkontraktion komisch, ist aber offen dafür und akzeptiert sie.

Schülerin 10 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 10:** *Es ist wieder für mich halt voll anders. Also ich hätt*
2 *das überhaupt nicht so eingeschätzt wie ... wie es eigentlich*
3 *wirklich ist dann.*

Zitat 212

Schülerin 10 hat die Längenkontraktion nicht erwartet, lehnt sie aber nicht explizit ab, nachdem die in diesem Interview schon mit einigen unerwarteten Fakten konfrontiert wurde.

Schülerin 11 kommentiert die Tatsache, dass die beiden Apparate Unterschiedliches messen:

- 1 **Schülerin 11:** *Hab ich mir eh schon gedacht.*

Zitat 213

Sie begründet das mit den unerwarteten Effekten, die sie im Laufe dieses Interviews kennen gelernt hat. Sie ist offenbar bereit, nach einiger Beschäftigung mit der Materie die Längenkontraktion zu akzeptieren.

4.4.2. Zusammenfassung

Acht der neuen der zur Längenkontraktion befragten SchülerInnen thematisieren das Messgerät bzw. den Messprozess. Vier der neun interviewten SchülerInnen sind der Ansicht, das Messgerät auf dem Zug könne die Länge des Balkens auf dem Boden nicht hinreichend genau messen. Alle akzeptieren zwar die Existenz exakter Messgeräte, können das aber nicht sofort verinnerlichen und verfallen im Laufe des Interviews immer wieder in die Vorstellung zurück, die Geräte müßen unscharf. Drei der neun interviewten SchülerInnen thematisieren den Messprozess. Zwei wenden ein, der Apparat könne die Länge des Balkens nicht *sofort* berechnen bzw. messen. Eine Schülerin ist der Ansicht, der Abstand des Balkens vom Messgerät sei wesentlich. Alle akzeptieren in weiterer Folge den Messprozess als Sammlung aller relevanten Daten mit anschließender Auswertung.

Für alle der neun interviewten SchülerInnen ist der Längenbegriff ein absoluter. Zunächst andere Ansichten bezüglich der Länge von Gegenständen lassen sich auf technische Fragen bezüglich der Messgeräte bzw. des Messprozesses zurückführen. Vier der neun sind aber im Zuge des Interviews vorsichtig geworden und glauben, dass hier ein unerwarteter Effekt auftritt. Bis zu dem Interview hatten sie jedoch einen absoluten Längenbegriff. Zwei SchülerInnen formulieren anstelle eines Messresultats für die Balkenlänge Aussagen über den Balken selbst. Für diese SchülerInnen sind die Messergebnisse der Apparate ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die die SchülerInnen kennen.

Alle der sieben zum Relativitätsprinzip im Kontext der Längenmessung befragten SchülerInnen haben in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung von diesem. KeineR formuliert die Relativgeschwindigkeit von Messgerät und Balken in eine absolute Geschwindigkeit um.

KeineR der Interviewten lehnt die Existenz der Längenkontraktion explizit ab. Drei geben an, sich diese vorstellen zu können. Sie dürften das allerdings auf einen ungenauen Messprozess zurückführen. Einer ist erstaunt und verlangt nach einer Erklärung für den Effekt. Eine toleriert die Längenkontraktion phlegmatisch als physikalische Tatsache. Vier finden den Effekt seltsam, haben ihn aber im Zuge des Interviews bereits erwartet. Das zeigt, dass sie zu einer Revision ihres Längenbegriffs bereit sind.

Effekte der Lichtlaufzeit werden von keinem/keiner der SchülerInnen thematisiert.

4.5. Folgerungen für ein Unterrichtskonzept zur Relativität der Gleichzeitigkeit

In den Interviews zeigt es sich, dass SchülerInnen Interesse an den Effekten der speziellen Relativitätstheorie haben und sind bereit, ihre Alltagsvorstellungen über die Natur zu revidieren. Darum macht es Sinn, ein Unterrichtskonzept zu entwickeln, das den SchülerInnen die Möglichkeit bietet, die Relativität der Gleichzeitigkeit als ein Beispiel für einen grundlegenden Effekt der speziellen Relativitätstheorie kennen zu lernen. Aufgrund der erhobenen SchülerInnenvorstellungen ergibt sich, dass sich dieses Unterrichtskonzept an den folgenden Punkten orientieren sollte:

- Die SchülerInnen müssen zunächst erkennen, dass Sinn macht, ein und dasselbe Naturgeschehen in verschiedenen Bezugssystemen zu beschreiben. Dies könnte mit Hilfe eines einführenden Beispiels erfolgen, dessen Ausfall im Widerspruch zur klassischen Physik bzw. zum Konzept der absoluten Gleichzeitigkeit steht, das bei allen zu diesem Thema interviewten SchülerInnen nachzuweisen war.
- Da das Relativitätsprinzip in den jeweils dargebotenen Situationen gut akzeptiert wird, sollte es möglich sein, dieses den SchülerInnen als allgemeines physikalisches Prinzip nahezubringen.
- Das Unterrichtskonzept kann nicht mit der klassischen Geschwindigkeitsaddition beginnen, da diese wahrscheinlich nicht gut verstanden wird.
- Das Geschehen sollte von idealen Messgeräten aufgezeichnet werden. Diese werden von SchülerInnen in den Interviews gut akzeptiert. Die Verwendung von Messgeräten hat den Vorteil, dass man sich Diskussionen über die Unvollkommenheit der menschlichen Wahrnehmung und die Psychologie der Sinnestäuschungen erspart. Diese Themen sollte man bei einem Einstieg in die Relativitätstheorie meiden, da sonst der falsche Eindruck entstehen könnte, die relativistischen Effekte kämen aufgrund der menschlichen Wahrnehmung zustande.
- Die SchülerInnen verstehen, was es bedeutet, die Lichtlaufzeit in den Messprozess mit einzubeziehen und welche Bedeutung das für die Messergebnisse hat. Daher sollte es möglich sein, im Unterrichtskonzept „intelligente Beobachter“ ([SSV01], [SSV02]) zu verwenden, welche die Effekte der Lichtlaufzeit berücksichtigen.

- Der Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung wird von den SchülerInnen in den Interviews gut akzeptiert. Daher sollte der Messprozess auf diese Art eingeführt werden. Dadurch sollen sich die SchülerInnen von der Vorstellung lösen, die Messung sei ein Vorgang, den man unmittelbar betrachten kann und von dem man sofort einen persönlichen Eindruck hat. Damit wird den SchülerInnen eine weitere Möglichkeit geboten, zwischen Messung und menschlicher Wahrnehmung zu unterscheiden.
- KeineR lehnt die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit explizit ab. Eine Schülerin hatte davon bereits vor dem Interview gehört und es offenbar schnell und gut akzeptiert. Daher kann man erwarten, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gut akzeptiert wird.
- Praktisch alle SchülerInnen bringen das Konzept absoluter zeitlicher Abstände und absoluter räumlicher Ausdehnungen mit. Die meisten Interviewten erkennen aber in der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit keinen Widerspruch zu diesen Präkonzepten, wahrscheinlich, weil die klassische Geschwindigkeitsaddition, die im Widerspruch zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steht, nicht gut verstanden wird. Um den Konzeptwechsel von der klassischen zur relativistischen Mechanik zu unterstützen, muss also der Widerspruch zur klassischen Physik auf eine andere Art als mit Hilfe der Geschwindigkeitsaddition präsentiert werden, sodass die SchülerInnen einen Widerspruch erkennen und damit bei ihnen eine Unzufriedenheit mit ihren Konzepten ausgelöst wird.
- Einige SchülerInnen fragen nach dem Grund für die relativistischen Effekte. Es besteht also ein Interesse an einer logischen Erklärung für diese Effekte. Die Relativität der Gleichzeitigkeit sollte als logische Konsequenz des Relativitätsprinzips und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit präsentiert werden.
- Die SchülerInnen halten die Messergebnisse für ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die die SchülerInnen kennen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit auf die gleiche Akzeptanz stößt wie andere gemessene Effekte, die den SchülerInnen geläufig sind.

5. Prototyp eines Unterrichtskonzepts

In diesem Kapitel erarbeite ich auf Basis der Interviewergebnisse aus Punkt 4.5, den Folgerungen aus den fachdidaktischen Erkenntnissen aus Punkt 2.3, des Ansatzes des Konzeptwechsels im naturwissenschaftlichen Unterricht sowie konstruktivistischer Lerntheorien den Prototyp eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit. Die Wirksamkeit dieses Prototyps wird in Kapitel 6 erprobt.

5.1. Die Wechsel der Konzepte

Aus der fachdidaktischen Literatur aus Punkt 2.1 geht hervor, dass bei vielen SchülerInnen das Konzept einer absoluten Geschwindigkeit bzw. einer absoluten Bewegung zu finden ist. Beim Lernen der Mechanik, sei es der klassischen oder der relativistischen, muss sich ein Wechsel von diesem Konzept einem physikalisch korrekten Konzept von Bewegung und Geschwindigkeit vollziehen.

Die Gesetze der klassischen Mechanik sind invariant unter Galilei-Transformationen, die Gesetze der relativistischen Mechanik invariant unter Lorentz-Transformationen, [HR93]. Das bedeutet, dass beim Übergang von der klassischen zur relativistischen Mechanik ein Wechsel vom Konzept der Absolutheit zeitlicher Abstände und räumlicher Ausdehnungen zum Konzept der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit stattfindet. Aus den Interviews aus Kapitel 4 geht hervor, dass praktisch alle SchülerInnen das Konzept absoluter zeitlicher Abstände und absoluter räumlicher Ausdehnungen mitbringen. Die meisten Interviewten erkennen aber in der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit keinen Widerspruch zu diesen Präkonzepten.

Da Studien zeigen, dass der Ansatz des Konzeptwechsels das Potenzial hat, den Unterricht merklich zu verbessern, [TD08], muss das Unterrichtskonzept so gestaltet werden, dass den SchülerInnen der Wechsel der Konzepte augenscheinlich wird. Dadurch sollen kognitive Konflikte ausgelöst und damit der Konzeptwechsel unterstützt werden.

5.2. Der Prototyp

5.2.1. Einführendes Beispiel

Als Einführung bekommen die SchülerInnen den Text aus Punkt 5.2.1.1 (inklusive Abbildung 5.1 auf der nächsten Seite) gemeinsam mit Aufgabe 1 auf der nächsten Seite als Arbeitsblatt mit dem Titel „Die galaktischen Spiele mögen beginnen“ ausgehändigt. Die SchülerInnen sollen diesen Text lesen und verstehen und im Anschluss die Aufgabe bearbeiten. Danach wird sie gemeinsam mit noch offen gebliebenen Fragen diskutiert. Anschließend werden die SchülerInnen mit der Relativität der Gleichzeitigkeit konfrontiert (Punkt 5.2.1.3).

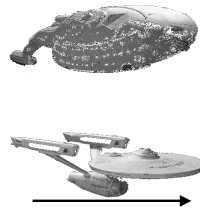
5.2.1.1. Die galaktischen Spiele mögen beginnen

Es will natürlich niemand zugeben, aber die Auswahl der Austragungsorte für die alle fünf Jahre stattfindenden galaktischen Spiele ist nicht nur eine sportlich-organisatorische, sondern auch eine politische Entscheidung. Die Wahl, die diesmal anstand, war insofern brisant, als dass die beiden Bewerber-Planeten, Aldubian und Garcus, ihre jahrzehntelangen Spannungen erst unlängst beigelegt hatten. Nach Meinung der meisten KommentatorInnen hat sich das galaktische Sportkomitee sehr diplomatisch aus der Affäre gezogen: Die Spiele werden dieses Mal von beiden Planeten gemeinsam durchgeführt. Damit sich niemand zurückgesetzt fühlt, starten die Spiele auf beiden Planeten gleichzeitig mit jeweils einer pompösen Eröffnungszeremonie.

Eine Gruppe namhafter PhysikerInnen und TechnikerInnen wurde ausgewählt, um eine Methode zu entwickeln, die einen gleichzeitigen Beginn der beiden Eröffnungsfeiern gewährleistet. Da es sich bei Aldubian und Garcus zufällig um zwei Planeten handelt, deren Abstand sich nie ändert, wird folgende Lösung gefunden: Das Raumschiff USS Voyager unter der erfahrenen Kapitänin Kathryn Janeway wird sich genau in der Mitte zwischen Aldubian und Garcus platzieren (oberes Raumschiff in Abbildung 5.1 auf der nächsten Seite). Von der Voyager wird ein Lichtsignal ausgesendet, das sich in alle Richtungen ausbreitet. Kommt das Licht bei den Planeten an, löst es einen Mechanismus aus, der die jeweilige Zeremonie startet. Alle Vorgänge werden auf der Voyager genau aufgezeichnet und analysiert. Zur Freude der gesamten Mannschaft hat der Vorgang geklappt: Die Spiele begannen auf beiden Planeten gleichzeitig.

Zufällig kommt die USS Enterprise unter dem Kommando von Kapitän James T. Kirk vorbei, die mit halber Lichtgeschwindigkeit zu einer Mission auf Alpha 3 unterwegs ist (unteres Raumschiff in Abbildung 5.1 auf der nächsten Seite). Aus Interesse lässt auch Kirk den Startvorgang der galaktischen Spiele

Aldubian



Garcus

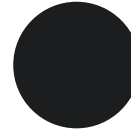


Abbildung 5.1.: Eröffnung der galaktischen Spiele^{3,4}

aufzeichnen und analysieren. Zum Erstaunen seiner Mannschaft stellt er fest, dass die Spiele auf Garcus früher gestartet wurden als auf Aldubian. Kirk teilt Janeway seine Analyse mit. Er ersucht sie, ihre Daten noch einmal zu prüfen. Er werde das mit seinen ebenfalls tun. Doch die neuerliche Prüfung bringt keine Änderung: Janeway behauptet, die Spiele hätten gleichzeitig begonnen. Kirk behauptet hingegen, die Spiele hätten zuerst auf Garcus und dann auf Aldubian begonnen.

5.2.1.2. Aufgabe für die SchülerInnen

1. Wie lassen sich die unterschiedlichen Standpunkte von Kirk und Janeway erklären?

Da der Gleichzeitigkeitsbegriff der SchülerInnen in den Interviews aus Kapitel 4 ein absoluter ist, erwarte ich, dass die SchülerInnen nicht auf die Idee kommen, beide könnten Recht haben. Aufgrund der Interviews halte ich folgende Antworten für erwartbar:

Messfehler: Da beliebig genau messende Geräte von den SchülerInnen in den Interviews gut akzeptiert wurden, nehme ich an, dass diese Begründung als Ursache für die unterschiedlichen Standpunkte ausgeschlossen werden kann.

Effekte der Lichtlaufzeit: Da der Messprozess von den SchülerInnen in den Interviews als Sammlung von Daten und späterer Auswertung gut akzep-

³Die Größenverhältnisse der Raumschiffe und Planeten sind nicht maßstabsgetreu wiedergegeben.

⁴Quelle Enterprise: http://www.newyorkblog.hochparterre.ch/files/images/2006/10/mob184_1160071777.jpg [Stand: 15. November 2010], Quelle Voyager: http://c2.api.ning.com/files/mU5NZEnaV3YaVzP5sUEqXUih2gdY07S6sBtINfWzXWId5lppusknLnmhMCaApvC74WXThU6uvA*Odb9769K4V*RJbphxMqVY/star_trek.jpg [Stand: 15. November 2010]

tiert wurde, nehme ich an, dass diese Begründung als Ursache für die unterschiedlichen Standpunkte ausgeschlossen werden kann.

Möglicherweise ist auch mit folgendem Erklärungsversuch zu rechnen:

Bewegung der Planeten: Da sich die beiden Planeten zueinander nicht bewegen und die Gleichwertigkeit von Inertialsystemen von den SchülerInnen in den Interviews in der jeweils dargestellten Situation gut akzeptiert wurde, gehe ich davon aus, dass diese Begründung als Ursache für die unterschiedlichen Standpunkte ausgeschlossen werden kann.

5.2.1.3. Die Gleichzeitigkeit ist relativ

Im Anschluss an die Diskussion über die möglichen Ursachen der unterschiedlichen Standpunkte von Janeway und Kirk wird den SchülerInnen in einer kurzen Sequenz Frontalunterricht eröffnet, dass beide Recht hätten. Auf der Voyager misst man, dass die Zeremonien gleichzeitig beginnen, auf der Enterprise nicht. Die Messergebnisse sind unterschiedlich, weil sich die Voyager bezüglich der Planeten nicht bewegt, die Enterprise aber schon. Würde sich die Enterprise bezüglich der Planeten auch nicht bewegen, würde man auf ihr auch messen, dass die Zeremonien gleichzeitig beginnen.

Würde sich die Enterprise mit einer Geschwindigkeit, die im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit sehr klein ist, an den Planeten und der Voyager vorbei bewegen, würde man auf ihr messen, dass die Zeremonie auf Garcus nur äußerst geringfügig früher beginnt als die auf Aldubian. Ohne Präzisionsmessung wird der Unterschied zwischen dem Beginn der Zeremonien auf der Enterprise nur erfassbar, wenn sie sich an den Planeten und der Voyager mit einer Geschwindigkeit vorbei bewegt, die in die Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit kommt.

Darum kommt es auch im Alltag nicht vor, dass für jemanden zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden und für jemand anderen nicht. Wir bewegen uns zueinander mit Geschwindigkeiten, die so gering sind im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit, dass für uns im Alltag der Gleichzeitigkeitsbegriff absolut ist. Hätten wir aber so empfindliche Messgeräte wie auf der Voyager oder der Enterprise, könnten wir mit ihnen einen winzigen Unterschied messen.

Das Ziel ist es nun, die SchülerInnen herausfinden zu lassen, warum man auf der Voyager und der Enterprise Unterschiedliches misst.

5.2.1.4. Didaktischer Hintergrund

Ich stellte das einführende Beispiel sowie die gewählte Unterrichtsmethoden nach folgenden Kriterien zusammen:

- Da der Gleichzeitigkeitsbegriff der SchülerInnen in den Interviews aus Kapitel 4 ein absoluter ist, vermute ich, dass die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise für die SchülerInnen unerwartet sind, was bei ihnen eine kognitive Störung auslösen sollte. Dadurch treten sie in die Handlungsstufe der emotionalen Antwort ein, was eine Bereitschaft zum Lernen der physikalischen Grundlagen, durch die die Relativität der Gleichzeitigkeit erklärt werden kann, eröffnet. Durch die ausgelöste Unzufriedenheit mit den Präkonzepten sollte der Wechsel zu relativistischen Konzepten erleichtert werden.
- Durch Aufgabe 1 auf Seite 129 sollen die SchülerInnen aktiviert werden. Sie werden aufgefordert, das Unerwartete zu erklären und treten damit in die Handlungsstufe der Definition des Problems ein. Zunächst müssen sie das Problem einordnen und anschließend Hypothesen bilden, wodurch sie sich auf die Handlungsebene der Hypothesenbildung begeben. Die Hypothesen werden gesammelt und anschließend diskutiert, womit die SchülerInnen auf der Handlungsstufe des Testens und Experimentierens angekommen sind.
- Das einführende Beispiel basiert nicht auf der Geschwindigkeitsaddition, da diese in den Interviews nicht gut verstanden wurde.
- Die SchülerInnen können anhand der unerwarteten Lösung des Beispiels erkennen, dass Sinn macht, ein und dasselbe Naturgeschehen in verschiedenen Bezugssystemen zu beschreiben.
- Die Technologie der Sternenflotte hat ideale Messgeräte geschaffen, die das Naturgeschehen exakt aufzeichnen. Diese wurden von den SchülerInnen in den Interviews gut akzeptiert.
- Der Messprozess wird als Sammlung von Daten mit anschließender Analyse beschrieben, was von den SchülerInnen in den Interviews gut akzeptiert wurde. Dadurch wird den SchülerInnen die Möglichkeit geboten, sich von der Vorstellung zu lösen, die Messung sei einen Vorgang, den man unmittelbar betrachten kann und von dem man sofort einen persönlichen Eindruck hat.
- Der Messprozess wird von „intelligenten Beobachtern“ durchgeführt, die die Lichtlaufzeit berücksichtigen. Die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit wurde in den Interviews gut verstanden und akzeptiert.

- Es ist aufgrund der Interviews zu erwarten, dass die SchülerInnen die Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise als ebenso glaubwürdig ansehen wie andere Messergebnisse, die die SchülerInnen kennen. Daher sollten sie die Relativität der Gleichzeitigkeit in gleicher Weise akzeptieren wie andere messbare Effekte.
- Die Relativität der Gleichzeitigkeit bei Alltagsgeschwindigkeiten wird als vernachlässigbar klein dargestellt. In der klassischen Mechanik, in der Geschwindigkeiten auftreten, die sehr klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit sind, gilt die Gleichzeitigkeit als absolut. Ob man die Gleichzeitigkeit als relativ oder absolut ansieht, hängt vom betrachteten Inhalt ab. Diese Thematisierung unterstützt bei den SchülerInnen die Herausbildung einer konstruktivistischen Epistemologie, was möglicherweise zu einem tieferen Verständnis der Physik führen kann.
- Wissenserwerb aus Text ist in unseren Kulturkreis die wohl wichtigste und vielleicht auch anspruchsvollste Art des Lernens, [Ste08]. Die Bedeutung des Erlernens dieser Fähigkeit geht weit über ein Unterrichtsfach hinaus. Durch den Einsatz von Texten im Unterricht wird diese wichtige Kompetenz geschult.

5.2.2. Die physikalischen Grundlagen

Das Relativitätsprinzip von Einstein [Fli03] enthält die physikalischen Grundlagen, aus denen die Relativität der Gleichzeitigkeit hergeleitet werden kann. Es besagt:

- Alle Inertialsysteme sind gleichwertig. Das heißt, dass die grundlegenden Naturgesetze in allen Inertialsystemen dieselbe Form haben. Operational bedeutet das, dass durch Messung eine „Bewegung“ eines Inertialsystems nicht feststellbar ist. (Relativitätsprinzip)
- Licht pflanzt sich in jedem Inertialsystem mit derselben Geschwindigkeit fort.

Der Begriff des Inertialsystems wird in der Fachliteratur nicht einheitlich definiert. In [Fli03], [HR93], [MO98], [Sar96], [Sch94] und [Tre97] werden Inertialsysteme als Bezugssysteme definiert, in denen der Trägheitssatz gilt. In [Gol85] wird ein Bezugssystem, das im Zentrum der Sonne fixiert ist, Inertialsystem genannt. In [SU92] und [TW00] werden frei fallende Bezugssysteme Inertialsysteme genannt. Diese unterschiedlichen Definitionen laufen alle darauf

hinaus, dass sich die Geschwindigkeit, die ein Körper bezüglich eines Inertialsystems hat, nicht „von selbst“ ändert.

Aus den Interviews aus Kapitel 4 ergibt sich, dass ein hoher Anteil der befragten SchülerInnen der Ansicht ist, die jeweiligen Messgeräte könnten in der gegebenen Situation nicht feststellen, ob sie sich auf dem Boden oder dem Waggon befänden. Aus dieser Vorstellung heraus entwickle ich den Begriff des Inertialsystems, wobei ich stillschweigend von der Näherung ausgehe, dass ein mit der Erdoberfläche fix verbundenes Bezugssystem ein Inertialsystem ist. Zur sprachlichen Vereinfachung identifiziere ich die Bezugssysteme mit den Objekten, mit denen sie fix verbunden sind. Beispielsweise formuliere ich statt des Satzes „Ein Bezugssystem, das fix mit dem Shuttle verbunden ist, ist ein Inertialsystem.“ den Satz: „Das Shuttle ist ein Inertialsystem.“

Zum Thema der Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit bekommen die SchülerInnen den Text aus Punkt 5.2.2.1 (inklusive Abbildungen 5.2 auf der nächsten Seite und 5.3 auf Seite 136) gemeinsam mit den Aufgaben aus Punkt 5.2.2.2 als Arbeitsblatt mit dem Titel „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ ausgehändigt. Die SchülerInnen sollen den Text lesen und verstehen und im Anschluss die Aufgaben bearbeiten. Danach werden sie gemeinsam mit noch offen gebliebenen Fragen diskutiert.

Anschließend erhalten die SchülerInnen zum Thema der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit den Text aus Punkt 5.2.2.3 gemeinsam mit den Aufgaben aus Punkt 5.2.2.4 als Arbeitsblatt mit dem Titel „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“. Die SchülerInnen sollen den Text lesen und verstehen und im Anschluss die Aufgaben bearbeiten. Danach werden sie gemeinsam mit noch offen gebliebenen Fragen diskutiert.

5.2.2.1. Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit

Die Erdoberfläche und ein Zug, der erschütterungsfrei mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus fährt⁵, haben etwas gemeinsam. Wir können in diesem Zug genauso bequem auf einem Sessel sitzen wie auf einem Sessel, der auf der Erdoberfläche steht. Wir spüren nicht, dass der Zug fährt. Bremsst der Zug, so gilt das nicht mehr. Wir spüren, dass der Zug bremst. Ebenso spüren wir, wenn der Zug schneller wird oder durch eine Kurve fährt.

Spüren wir das Fahren eines Zuges, der sich erschütterungsfrei mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus bewegt, deshalb nicht, weil wir für das Spüren der Geradeaus-Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit keine Sinnesorgane haben,

⁵Diese Formulierung ist zwar ein Pleonasmus, ich verwende sie trotzdem zur größeren Klarheit, falls es den SchülerInnen nicht ständig bewusst ist, dass es sich bei der Geschwindigkeit um eine vektorielle Größe handelt.

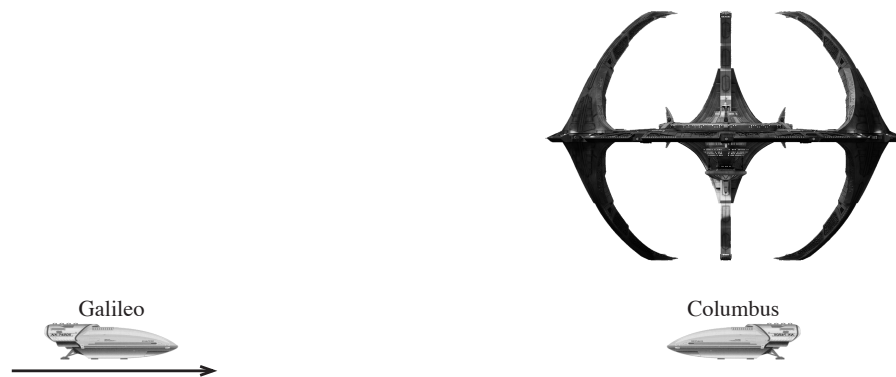


Abbildung 5.2.: Bewegt sich Deep Space Nine?⁶

oder kann man es überhaupt nicht feststellen, dass der Zug fährt? Um das herauszufinden, kann man folgendes Experiment machen.

In zwei Eisenbahnwaggons werden dieselben Physiklaboratorien eingebaut. Bei beiden Waggons werden die Fenster verklebt, sodass man nicht nach außen sehen kann. In beide Waggons wird jeweils eine Gruppe von PhysikerInnen eingeschlossen. Ein Waggon bleibt ruhig auf der Erdoberfläche stehen, der andere wird an einem Zug angehängt, der erschütterungsfrei geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Die PhysikerInnen erfahren nicht, in welchem der Waggons sie sich befinden. Sie bekommen die Aufgabe, mit Hilfe von Versuchen festzustellen, ob ihr Labor auf der Erdoberfläche steht oder an den Zug angehängt wurde. Egal, welche Experimente die PhysikerInnen durchführen, es ist ihnen nicht möglich, das herauszufinden. Alle Versuche laufen in beiden Laboratorien gleich ab. Insbesondere kann man in beiden Waggons genauso bequem auf einem Sessel sitzen wie auf einem Sessel, der auf der Erdoberfläche steht. In der Physik formuliert man das so: Beide Waggons sind als Bezugssysteme gleichwertig. Bezugssysteme, in denen alles so abläuft, wie es in einem Laboratorium ablaufen würde, das auf dem Erdboden steht, nennt man in der Physik Inertialsysteme.

Beide Laboratorien in unserem Beispiel sind Inertialsysteme. Man kann nicht entscheiden, in welchem man sich befindet. Man kann nicht sagen, ob man auf der Erde ruht oder nicht. Beide Inertialsysteme sind völlig gleichwertig.

Du wirst vielleicht denken, wenn man aus den Waggons hinausschaut, kann man trotzdem sehen, welcher sich bewegt oder nicht. Aber bewegt sich der

⁶Quelle Deep Space Nine: http://www.startrekdesktopwallpaper.com/new_wallpaper/Star_Trek_Deep_Space_Nine_Space_Station_freecomputerdesktopwallpaper_1920.shtml [Stand: 5. Mai 2011], Quelle Shuttles: http://www.scenicreflections.com/download/486932/Star_Trek_-_Defiant_Shuttle_Craft_Wallpaper/ [Stand: 5. Mai 2011]

Waggon, der auf der Erde steht, wirklich nicht? Du hast sicher schon gehört, dass sich die Erde um ihre Achse dreht und sich auf ihrer Bahn um die Sonne bewegt. Wenn wir weit weg von der Erde sind und keine Sterne sehen, an denen wir uns orientieren könnten, kann man dann entscheiden, ob sich ein Inertialsystem bewegt oder nicht? Wir klären das anhand eines Vermessungsversuchs von Deep Space Nine.

Kosmische Nebel sind aufgezogen, sodass man von Deep Space Nine aus keine Sterne mehr sehen kann. Die Shuttles Galileo und Columbus wurden ausgesandt, um zu vermessen, ob sich die Raumstation bewegt oder nicht. Während die Galileo noch unterwegs ist, ist die Columbus bereits bei Deep Space Nine eingetroffen und hält konstanten Abstand zu ihr (Abbildung 5.2 auf der vorherigen Seite). Daraufhin funkt die Mannschaft der Columbus zur Galileo: „Wir sind bereits angekommen und bewegen uns nicht neben Deep Space Nine. Also bewegt sich auch Deep Space Nine nicht. Die Mission ist erfüllt. Ihr könnt umkehren.“

Die Mannschaft der Galileo antwortet: „Wir sehen euch bereits. Ihr seid im Irrtum. Ihr bewegt euch auf uns zu, und somit bewegt sich auch Deep Space Nine.“

Die Mannschaft der Columbus stimmt nicht zu: „Bei uns können alle ruhig auf ihren Sesseln sitzen; wie auf der Erde. Alle Versuche laufen wie in einem Laboratorium ab, das auf der Erde steht. Die Columbus ist ein Inertialsystem. Wir ruhen. Also ruht Deep Space Nine.“

Die Antwort von der Galileo kommt prompt: „Bei uns können auch alle ruhig auf ihren Sesseln sitzen; wie auf der Erde. Alle Versuche laufen auch bei uns wie in einem Laboratorium ab, das auf der Erde steht. Also ist die Galileo ein Inertialsystem. Wir ruhen, ihr bewegt euch auf uns zu, also auch Deep Space Nine.“

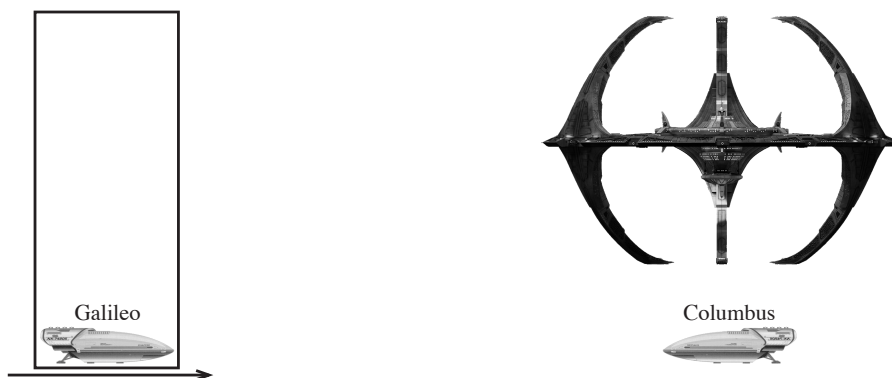
Nach einem langen Hin und Her können sich die beiden Mannschaften zwar darauf einigen, dass beide Shuttles Inertialsysteme sind. Welches ruht, bleibt aber strittig.

In der Physik hat man herausgefunden, dass man nicht sagen kann, ob ein Inertialsystem ruht oder nicht. Die Frage selbst hat keinen Sinn. Bewegung kann es immer nur in Bezug auf etwas anderes geben. Die Galileo bewegt sich bezüglich der Columbus und Deep Space Nine. Die Columbus ruht bezüglich Deep Space Nine. Deep Space Nine ruht bezüglich der Columbus. Deep Space Nine und die Columbus bewegen sich bezüglich der Galileo. Es ist physikalisch völlig gleichwertig, von welchem Inertialsystem aus man eine Situation beschreibt. Alle Inertialsysteme sind völlig gleichwertig. Deep Space Nine bewegt sich bezüglich der Galileo und ruht bezüglich der Columbus. Bewegung oder Ruhe *an sich* gibt es nicht und ist daher auch nicht feststellbar. Die Frage danach ist

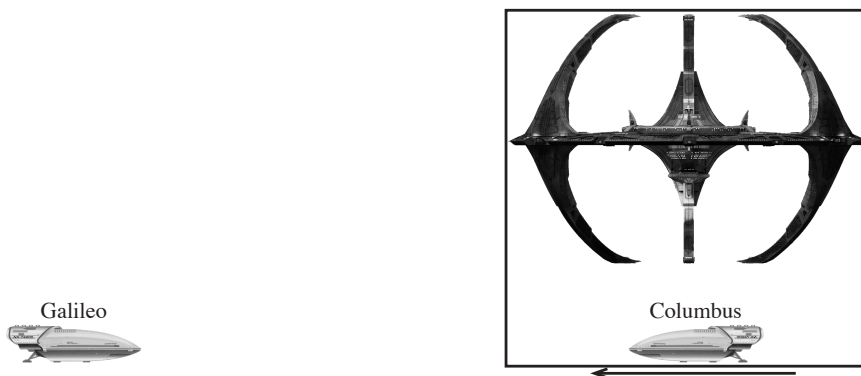
5. Prototyp eines Unterrichtskonzepts

physikalisch sinnlos.

Die Ansichten der Mannschaften der Galileo und der Columbus sind absolut gleichwertig (Abbildung 5.3). Man kann entweder Deep Space Nine und die Columbus als ruhend und die Galileo als sich nach rechts bewegend betrachten (Abbildung 5.3a) oder die Galileo als ruhend und Deep Space Nine und die Columbus als sich nach links bewegend betrachten (Abbildung 5.3b). Diese beiden Ansichten sind nicht unterscheidbar. In der Physik nennt man das die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme.



(a) Galileo bewegt sich nach rechts, Deep Space Nine und Columbus ruhen.



(b) Galileo ruht, Deep Space Nine und Columbus bewegen sich nach links.

Abbildung 5.3.: Zwei äquivalente Situationen⁷

⁷Siehe Fußnote 6 auf Seite 134

5.2.2.2. Aufgaben⁸ für die SchülerInnen

2. Erkläre, woran man merkt, dass ein Flugzeug, das mit konstanter Geschwindigkeit erschütterungsfrei geradeaus fliegt, ein Inertialsystem ist.
3. Erkläre, woran man merkt, dass ein bremsender Zug kein Inertialsystem ist.
4. Erkläre, woran man merkt, dass ein Ringelspiel, das sich dreht, kein Inertialsystem ist.
5. Finde ein weiteres Beispiel für ein Inertialsystem und erkläre, warum es eines ist.
6. Finde ein weiteres Beispiel für ein Bezugssystem, das kein Inertialsystem ist, und erkläre, warum es keines ist.
7. Erkläre anhand eines selbst gewählten Beispiels, was man unter der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme versteht.

5.2.2.3. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Person *A* steht auf der Straße. Person *B* geht geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit von Person *A* weg. Person *A* kann Person *B* folgen. Von Person *A* aus gesehen ist Person *B* dann langsamer. Person *A* kann so schnell gehen, dass sie Person *B* einholt und überholt.

Nun fährt eine Radfahlerin geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit von Person *A* weg. Person *A* kann der Radfahlerin folgen. Von Person *A* aus gesehen ist die Radfahlerin dann langsamer. Kann Person *A* schnell genug laufen, kann sie die Radfahlerin einholen und überholen. Ist Person *A* nicht schnell genug, kann sie ebenfalls ein Fahrrad oder auch ein Auto nehmen, um die Radfahlerin einzuholen. Jedenfalls ist es für Person *A* möglich, die Radfahlerin einzuholen und zu überholen.

Auch Autos, fliegende Gewehrketten oder Raketen sind von Person *A* aus gesehen langsamer, wenn sie ihnen nachläuft. Wenn Person *A* ein genügend schnelles Fahrzeug hat, ist es ihr sogar möglich, diese einzuholen und zu überholen. Für einen beliebigen Gegenstand gilt: Wenn Person *A* diesem Gegenstand nachläuft, ist dieser Gegenstand von Person *A* aus gesehen langsamer. Wenn Person *A* ein genügend schnelles Fahrzeug hat, kann sie den Gegenstand einholen und überholen.

⁸Die Aufgaben sind durchgehend nummeriert, um sie besser referenzieren zu können.

Licht ist anders. Das hat man am Beginn des 20. Jahrhunderts herausgefunden. Wenn Person *A* einem Lichtstrahl nachläuft, ist dieser von Person *A* aus gesehen nicht langsamer. Auch wenn Person *A* die schnellstmögliche Rakete nimmt, ist der Lichtstrahl von Person *A* aus gesehen nicht langsamer. Daher kann Person *A* den Lichtstrahl auch nicht einholen oder überholen.

Geht Person *A* auf der Straße in die entgegengesetzte Richtung zur Person *B*, ist sie von Person *A* aus gesehen schneller. Geht Person *A* auf der Straße in die entgegengesetzte Richtung zur Radfahlerin, ist sie von Person *A* aus gesehen schneller. Auch Autos, fliegende Gewehrketten oder Raketen sind von Person *A* aus gesehen schneller, wenn sie in die entgegengesetzte Richtung gehen als sich diese Dinge bewegen. Für einen beliebigen Gegenstand gilt: Wenn Person *A* in die entgegengesetzte Richtung geht als sich dieser Gegenstand bewegt, ist dieser von Person *A* aus gesehen schneller.

Licht ist anders: Geht Person *A* in die entgegengesetzte Richtung zur Richtung eines Lichtstrahls, ist von Person *A* aus gesehen der Lichtstrahl nicht schneller. Auch wenn Person *A* die schnellstmögliche Rakete nimmt, ist der Lichtstrahl von Person *A* aus gesehen nicht schneller, [EP].

Es gilt allgemein: Licht ist immer gleich schnell.

5.2.2.4. Aufgaben⁹ für die SchülerInnen

8. Eine Super-Rakete fliegt mit 99% der Lichtgeschwindigkeit einem Lichtstrahl nach, der vor ihr in die gleiche Richtung wie sie fliegt. Wie schnell ist der Lichtstrahl von der Rakete aus gesehen? Begründung!
9. Eine Super-Rakete fliegt mit 99% der Lichtgeschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung zur Richtung eines Lichtstrahls. Wie schnell ist der Lichtstrahl von der Rakete aus gesehen? Begründung!

5.2.2.5. Didaktischer Hintergrund

Bei der Darstellung des Relativitätsprinzips von Einstein und der gewählten Unterrichtsmethoden ließ ich mich von folgenden Überlegungen leiten:

- Da ich aufgrund der Interviews aus Kapitel 4 erwarte, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit bei den SchülerInnen eine kognitive Störung auslöst, gehe ich davon aus, dass sie bereit sind, die Grundlagen, mit denen das Unerwartete erklärt werden kann, zu lernen.

⁹Siehe Fußnote 8 auf der vorherigen Seite

- Der Beginn der Darstellung der Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit ist auf den Situationen aus den Interviews aufgebaut, in denen ein Großteil der SchülerInnen meinte, die Messgeräte könnten in der jeweiligen Situation nicht feststellen, ob sie sich auf dem Boden oder dem Waggon befänden. Damit sollen die SchülerInnen unterstützt werden, diese physikalische Grundlage zu akzeptieren und in ihre Vorwissensstrukturen zu integrieren.
- Ich gehe davon aus, dass den SchülerInnen bekannt ist, dass sich die Erde um ihre Achse dreht und sich auf ihrer Bahn um die Sonne bewegt. An dieses Vorwissen schließe ich an, um die Frage nach „Ruhe“ bzw. „Bewegung“ zu thematisieren.
- Die allgemeine Darstellung der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme spielt in einer Situation, in der die Erde nicht vorkommt. Dadurch haben die SchülerInnen nicht die Möglichkeit, sich an der Erde als bevorzugt betrachtetem Bezugssystem zu orientieren. Da in der gewählten Situation auch keine anderen Bezugssysteme sichtbar sind, gehe ich davon aus, dass die SchülerInnen in dieser Situation keinen Sinn in den Begriffen von absoluter Bewegung bzw. absoluter Geschwindigkeit sehen und damit der Wechsel zu einem physikalisch korrekten Bewegungs- bzw. Geschwindigkeitsbegriff unterstützt wird.
- Danach wird das physikalische System „Deep Space Nine“ von zwei verschiedenen Inertialsystemen aus betrachtet, was der Interpretation der Lorentz-Transformation als passiver Transformation entspricht. Die zwei Betrachtungsweisen hier und die Betrachtungsweisen in Punkt 5.2.3.3, mit denen die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Enterprise und der Voyager erklärt werden, sind einander sehr ähnlich. Damit soll den SchülerInnen für diese Erklärung eine gedankliche Anschlussmöglichkeit geschaffen werden.
- In den Aufgaben 2 bis 6 auf Seite 137 müssen die SchülerInnen den Begriff des Inertialsystems anwenden. In Aufgabe 7 auf Seite 137 müssen sie die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme auf ein selbst gewähltes Beispiel anwenden. Diese Handlungsebene dient dazu, den SchülerInnen zu zeigen, was mit dem Gelernten erreicht werden kann, und das Gelernte besser zu behalten.
- Ich erwarte, dass bei den SchülerInnen anhand der gewählten Darstellung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eine kognitive Störung ausgelöst

wird, die die Bereitschaft zu lernen steigert. Durch die ausgelöste Unzufriedenheit mit den Präkonzepten sollte der Konzeptwechsel unterstützt werden.

- Die Formulierungen „... ist von Person A aus gesehen langsamer ...“ und „... ist von Person A aus gesehen schneller ...“ umgeht die Notwendigkeit, beim Wert der Geschwindigkeit ein Bezugssystem angeben zu müssen.
- Die gewählte Darstellung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit fußt nicht auf der Geschwindigkeitsaddition, die von den SchülerInnen in den Interviews nicht gut verstanden wurde.
- Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steht im Widerspruch zur klassischen Physik. Die SchülerInnen lernen damit, dass sich das physikalische Wissen ändern kann. Diese Erkenntnis unterstützt bei den Lernenden die Herausbildung einer konstruktivistischen Epistemologie, was bei ihnen möglicherweise eher das Bemühen fördert, neue Ideen zu integrieren.
- In den Aufgaben aus Punkt 5.2.2.4 müssen die SchülerInnen die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit anwenden. Diese Handlungsebene dient dazu, den SchülerInnen zu zeigen, was mit dem Gelernten erreicht werden kann. Außerdem dient sie dazu, das Gelernte besser zu behalten.
- Wissenserwerb aus Text ist in unseren Kulturkreis die wohl wichtigste und vielleicht auch anspruchsvollste Art des Lernens, [Ste08]. Die Bedeutung des Erlernens dieser Fähigkeit geht weit über ein Unterrichtsfach hinaus. Durch den Einsatz von Texten im Unterricht wird diese wichtige Kompetenz geschult.

5.2.3. Folgerungen aus den physikalischen Grundlagen

Die SchülerInnen sollen lernen, wie man aus dem Relativitätsprinzip von Einstein die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise im einführenden Beispiel folgern kann. Dazu bekommen die SchülerInnen zunächst einen Lehrfilm (Punkt 5.2.3.1) zu sehen. Im Anschluss daran bekommen sie die Aufgaben aus Punkt 5.2.3.2, den Text aus Punkt 5.2.3.3 (inklusive Abbildung 5.4 auf Seite 142) und die Aufgaben aus Punkt 5.2.3.4 als Arbeitsblatt mit dem Titel „Die Lösung“ ausgehändigt. Zunächst sollen die Aufgaben aus Punkt 5.2.3.2 bearbeitet werden. Danach werden diese gemeinsam mit noch offen gebliebenen Fragen diskutiert. Anschließend sollen die SchülerInnen den Text aus Punkt 5.2.3.3 lesen und verstehen und die Aufgaben aus Punkt 5.2.3.4

bearbeiten. Daraufhin werden sie gemeinsam mit noch offen gebliebenen Fragen diskutiert.

5.2.3.1. Gleichzeitigkeit in verschiedenen Bezugssystemen

Zunächst wird den SchülerInnen der Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] vorgeführt. An der Realisierung dieses Lehrfilmes war ich selbst maßgeblich beteiligt. Als für die didaktische Beratung Zuständiger begleitete ich intensiv den Entstehungsprozess des Filmes. Darüber hinaus erstellte ich als Begleitmaterial für den Film Begleittexte, Unterrichtsvorschläge und Arbeitsblätter mit Lösungen, die neben dem Film auf der DVD [Ein05] zu finden sind.

In diesem Lehrfilm wird die Relativität der Gleichzeitigkeit in einer etwas anderen Situation als in der des einführenden Beispiels in Punkt 5.2.1.1 aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gefolgert. In diesem Film wird ein Raumschiff von zwei Shuttles in gleichem Abstand eskortiert. Ein Shuttle fliegt hinter dem Raumschiff, eines davor. Der Abstand zwischen dem Raumschiff und den Shuttles ist zeitlich konstant. Das Raumschiff sendet von einem Punkt Lichtsignale nach vorne und hinten aus. Für einen Astronauten, der bezüglich des Konvois ruht, kommen die Lichtsignale bei den Shuttles gleichzeitig an. Von der Erde aus betrachtet, an der sich der Konvoi von links nach rechts vorbei bewegt, kommt das linke Shuttle dem Lichtsignal entgegen und das rechte Shuttle fliegt dem Lichtsignal davon. Aufgrund der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit kommt von der Erde aus gesehen das Lichtsignal beim linken Shuttle früher an als beim rechten. Da dieser Film auf die Relativität der Gleichzeitigkeit fokussiert, werden Effekte der Längenkontraktion und der Zeitdilatation unterdrückt.

5.2.3.2. Aufgaben¹⁰ für die SchülerInnen

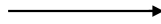
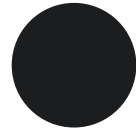
10. Welches vorher besprochene Prinzip ist in diesem Film wesentlich für die Relativität der Gleichzeitigkeit?
11. Beschreibt die Situation in einem Inertialsystem, in dem der Konvoi von rechts nach links fliegt. Kommt das Licht in diesem Inertialsystem bei den Shuttles gleichzeitig an? Wenn nein, wo kommt es früher an? Begründet euren Standpunkt.
12. Wieso kommen von der Erde aus beobachtet die beiden Lichtsignale nahezu gleichzeitig bei den Shuttles an, wenn der Konvoi mit einer Geschwindigkeit an der Erde vorbeifliegt, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist?

¹⁰Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

Aldubian

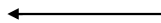


Garcus

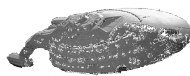
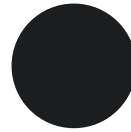


(a) Enterprise bewegt sich mit halber Lichtgeschwindigkeit nach rechts

Aldubian



Garcus



(b) Voyager, Aldubian und Garcus bewegen sich mit halber Lichtgeschwindigkeit nach links

Abbildung 5.4.: Zwei äquivalente Situationen¹¹

5.2.3.3. Die Lösung für das einführende Beispiel

Nach dem Relativitätsprinzip gibt es keinen physikalischen Unterschied zwischen den beiden Situationen aus Abbildung 5.4. Man kann entweder die Enterprise als nach rechts an Aldubian, der Voyager und Garcus vorbeifliegend (Abbildung 5.4a) oder Aldubian, die Voyager und Garcus als nach links an der Enterprise vorbeifliegend betrachten (Abbildung 5.4b). Das bedeutet, dass auf der Enterprise dieselben Effekte gemessen werden, egal, ob man die Situation mit Hilfe von Abbildung 5.4a oder Abbildung 5.4b beschreibt.

5.2.3.4. Aufgaben¹² für die SchülerInnen

13. Nach welchem Prinzip sind die Situationen aus Abbildung 5.4a und Abbildung 5.4b gleichwertig?
14. Vergleiche die Darstellung aus Abbildung 5.4b mit der Lösung, die ihr für Aufgabe 11 auf der vorherigen Seite gefunden habt. Die Enterprise

¹¹Siehe Fußnoten 3 und 4 auf Seite 129

¹²Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

ruht auf dem Bildschirm. Sie beobachtet die Vorgänge genauso wie wir, wenn wir vor dem Bildschirm sitzen. In welcher Reihenfolge sieht die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten ankommen?

15. Die Situationen aus den Abbildungen 5.4a und 5.4b auf der vorherigen Seite sind nicht unterscheidbar. In welcher Reihenfolge kommen nach Aufgabe 14 auf der vorherigen Seite für die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten an, wenn man sie als an den Planeten und der Voyager vorbeifliegend betrachtet?

5.2.3.5. Didaktischer Hintergrund

Die Art der Herleitung der unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise im einführenden Beispiel aus dem Relativitätsprinzip von Einstein und die verwendeten Unterrichtsmethoden wählte ich nach folgenden Kriterien aus:

- Den SchülerInnen wird in Aussicht gestellt, dass sie nun erfahren, wie sie mit dem soeben Gelernten den unerwarteten Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit erklären können. Das soll die Motivation der SchülerInnen steigern und ihre Lernbereitschaft erhöhen.
- Im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] wird die Relativität der Gleichzeitigkeit in bewegten Bildern visualisiert. Damit kommt eine weitere Lehrmethode zur Anwendung, wodurch bessere Lernleistungen zu erwarten sind.
- Das einführende Beispiel wird mit Hilfe des Relativitätsprinzips von Einstein erklärt. Dazu müssen wie SchülerInnen die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme auf neue Situationen anwenden. Dadurch können die SchülerInnen an früher Gelerntes anknüpfen. Um das zu unterstützen, ähnelt die Situation, auf die sie das Relativitätsprinzip von Einstein anwenden sollen, der Fragestellung nach „Ruhe“ oder „Bewegung“ von Deep Space Nine in Punkt 5.2.2.1. Insbesondere sind die Abbildungen 5.3 auf Seite 136 und 5.4 auf der vorherigen Seite analog gestaltet. Mit dieser Anwendung des Relativitätsprinzips von Einstein bekommen die SchülerInnen gezeigt, was damit erreicht werden kann, und es erhöht sich die Sicherheit, mit der es behalten wird.
- Durch die Aufgabe 10 auf Seite 141 sollen die SchülerInnen aktiviert werden. Sie sollen das Unerwartete mit dem soeben Gelernten erklären.

Dazu müssen sie dieses mit dem Inhalt des Lehrfilmes in Verbindung bringen und die gestellte Aufgabe einordnen, beschreiben und diskutieren. Die SchülerInnen sollen Hypothesen bilden und diese gedanklich testen.

- In Aufgabe 11 auf Seite 141 müssen die SchülerInnen das erworbene Wissen auf eine neue Situation anwenden. Auf dieser Handlungsebene erfahren die SchülerInnen, was mit dem Lernergebnis erreicht werden kann, und wird das bessere Behalten des Gelernten unterstützt. Darüber hinaus wird die Lösung dieser Aufgabe für die Lösung der Aufgabe 14 auf Seite 142 benötigt.
- In Aufgabe 12 auf Seite 141 müssen die SchülerInnen das Gelernte unter einem anderen Blickwinkel anwenden. Um diese Aufgabe lösen zu können, müssen die SchülerInnen verstanden haben, welche Rolle die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in der Erklärung für die Relativität der Gleichzeitigkeit spielt. Darüber hinaus klärt sich mit dieser Frage, wieso die Relativität der Gleichzeitigkeit im Alltag nicht auffällt. Hier wird nochmals thematisiert, dass es vom Inhalt abhängt, ob man die Gleichzeitigkeit als relativ oder absolut betrachten kann. Das unterstützt bei den SchülerInnen die Herausbildung einer konstruktivistischen Epistemologie, was möglicherweise zu einem tieferen Verständnis der Physik führt und die Lernenden unter Umständen eher in die Lage versetzt, ihr Wissen zu reflektieren.
- Durch Aufgabe 13 auf Seite 142 sollen die SchülerInnen aktiviert werden. Sie müssen diese Aufgabe mit dem zuvor Gelernten in Verbindung bringen, einordnen, beschreiben und diskutieren, Hypothesen bilden und diese gedanklich testen.
- In Aufgabe 14 auf Seite 142 müssen die SchülerInnen zuvor Gelerntes auf eine neue Situation anwenden. Auch hier müssen sie das Problem zunächst einordnen, beschreiben und diskutieren, Hypothesen bilden und diese gedanklich testen.
- In Aufgabe 15 auf der vorherigen Seite müssen die SchülerInnen zuvor Gelerntes auf die Situation des einführenden Beispiels in Punkt 5.2.1.1 anwenden. Die SchülerInnen sollen in dieser Aufgabe anhand des Gelernten die anfangs aufgeworfene Fragestellung selbst lösen. Dazu müssen sie das Problem aber zunächst einordnen, beschreiben und diskutieren, Hypothesen bilden und diese gedanklich testen.

- Wissenserwerb aus Text ist in unseren Kulturkreis die wohl wichtigste und vielleicht auch anspruchsvollste Art des Lernens, [Ste08]. Die Bedeutung des Erlernens dieser Fähigkeit geht weit über ein Unterrichtsfach hinaus. Durch den Einsatz von Texten im Unterricht wird diese wichtige Kompetenz geschult.

6. Untersuchung der Wirksamkeit des Prototyps

In diesem Kapitel wird die Wirksamkeit des in Kapitel 5 erstellten Prototyps eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit in einem teaching experiment untersucht. Dieses fand im Zeitraum vom Mai 2011 bis Dezember 2011 statt und bestand aus fünf Unterrichtsdurchgängen. Bei jedem Unterrichtsdurchgang unterrichtete ich eine Schülerin und einen Schüler der achten Schulstufe einer Wiener AHS, an der ich nicht tätig bin, gemeinsam. Die SchülerInnen, die ich vor dem teaching experiment nicht kannte, meldeten sich freiwillig. Um hervorzuheben, dass keineR der SchülerInnen, die am teaching experiment teilnahmen, eineR der 11 Interviewten aus Kapitel 4 ist, werden die TeilnehmerInnen am teaching experiment im Folgenden beginnend mit der Zahl 12 nummeriert. Eine detaillierte Beschreibung des Settings des teaching experiment findet sich in Kapitel 3. Die Dauer der einzelnen Unterrichtsdurchgänge ist in Tabelle 3.5 auf Seite 26 ersichtlich.

6.1. Erster Unterrichtsdurchgang

Im ersten Unterrichtsdurchgang wird der in Kapitel 5 erstellte Prototyp eines Unterrichtskonzepts einer Erprobung unterzogen.

6.1.1. Analyse des ersten Unterrichtsdurchgangs

6.1.1.1. Einführendes Beispiel

Um eine Rückmeldung zum Text aus Punkt 5.2.1.1 gebeten antworten Schülerin 12 und Schüler 13 folgendermaßen:

¹**Schüler 13:** *Na ja ...*

²**Schülerin 12:** *Ich mein, ich versteh's, aber ... [...] Ich versteh den*

³ *Text. Für mich ist es leicht verständlich. Aber gut ... [...] Ich*

⁴ *mein, ich find die Sätze ein bisschen lang.*

⁵**Schüler 13:** *Die könnte ein bisschen kürzer sein.*

6 **Schülerin 12:** *Ja.*

7 *[...]*

8 **Schüler 13:** *Na ja, ich versteh den Text schon, aber kommt drauf an*

9 *für was. Ist das eher für jüngere oder für ... [...] Sonst passt's*

10 *eh, find ich.*

Zitat 214

Der Text wird als verständlich (Zeilen 2 und 8 von Zitat 214) qualifiziert, wenn auch die Sätze ein wenig zu lang erscheinen (Zeilen 4 und 5 von Zitat 214). Was er mit der Frage nach dem Zielpublikum (Zeile 9 von Zitat 214) meint, erklärt Schüler 13 im Verlauf des Unterrichtsdurchgangs:

1 **Schüler 13:** *Ich hab mir gedacht, das ist irgendein Kinderbuch, wie*

2 *irgend so was wie Raumschiff Enterprise.*

Zitat 215

Der Text wirkt offenbar zu kindlich (Zitat 215).

Als Lösung für Aufgabe 1 auf Seite 129 schlagen Schülerin 12 und Schüler 13 Folgendes vor:

1 **Schüler 13:** *Vielleicht, dass die eine andere Zeit messen.*

2 **Schülerin 12:** *Zeitverschiebung?*

3 **Schüler 13:** *Ja.*

4 **Wittmann:** *Ah, du meinst, weil die weit weg sind?*

5 **Schüler 13:** *Ja.*

Zitat 216

Schülerin 12 und Schüler 13 akzeptieren aber in weiterer Folge, dass Effekte der Lichtlaufzeit herausgerechnet werden können (Zeilen 4 bis 5 von Zitat 216) und somit nicht die Ursache der unterschiedlichen Messergebnisse sind. Implizit wird damit auch der Messvorgang als Sammeln von Daten mit nachträglicher Auswertung akzeptiert.

Bei der Suche nach einer Antwort auf Aufgabe 1 auf Seite 129 stößt Schülerin 12 auf ein gedankliches Problem, das wahrscheinlich durch die Formulierung des Textes verursacht wird:

- 1 **Schülerin 12:** (26 Sekunden Pause; Anm.) ... Wie wird dieser Licht-
2 strahl ausgesendet?
3 **Wittmann:** Ja, das wird, ... du kannst dir das vorstellen, so wie man ...
4 man wirft einen Stein ins Wasser und geht das von allen Seiten
5 weg. [...] Hast du eine Idee, wie man das gescheiter formulieren
6 kann? [...] Also gemeint ist, man dreht eine Glühbirne auf und
7 das Licht sieht man dann von allen Seiten.
8 **Schülerin 12:** Ja, ja. [...] ich mein, Lichtsignal find ich eh nicht so
9 schlecht, [...]

Zitat 217

Mit Lichtsignal ist die Wellenfront einer Kugelwelle gemeint, was auf dem Arbeitsblatt nicht so formuliert werden kann. Schülerin 12 versteht unter Lichtsignal aber einen Lichtstrahl (Zeile 1 von Zitat 217) und kann damit in diesem Zusammenhang nichts anfangen. Sie versteht die Erklärung mit Hilfe der Kreiswelle im Wasser (Zeilen 4 bis 8 von Zitat 217), kann aber leider keine für sie verständlichere Formulierung des Textes für das Arbeitsblatt finden (Zeile 8 bis Zeile 9 von Zitat 217).

Danach schlägt Schülerin 12 folgenden Lösungsansatz für Aufgabe 1 auf Seite 129 vor:

- 1 **Schülerin 12:** Also ich glaub auch, dass die auf jeden Fall behaupten
2 würden, dass die das gleichzeitig messen. Egal, ob es so war
3 oder nicht.
4 **Wittmann:** Nein, die messen das, was war.
5 **Schülerin 12:** Ja.
6 **Wittmann:** Die machen keine Messfehler.
7 **Schülerin 12:** Ich weiß.

Zitat 218

Schülerin 12 versucht, das Problem zu leugnen (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 218), was dafür spricht, dass sie keine Erklärung finden kann. Schülerin 12 akzeptiert aber in weiterer Folge, dass die Messergebnisse ebenso glaubwürdig sind wie andere, geläufigere Messergebnisse (Zeile 5 von Zitat 218) und die Messgeräte exakt messen können (Zeile 7 von Zitat 218).

Daraufhin hat Schüler 13 folgende Idee für die Lösung von Aufgabe 1 auf Seite 129 :

- 1 **Schüler 13:** Ach so, weil die dahin messen, diese Seite hin (deutet
2 in Flugrichtung der Enterprise in Abbildung 5.1 auf Seite 129;
3 Anm.), und da (deutet auf Aldubian in Abbildung 5.1 auf Sei-
4 te 129; Anm.) ist dann das Problem.

Zitat 219

Schüler 13 nimmt an, dass die Geschwindigkeit zu einem Problem (Zeile 4 von Zitat 219) für die Messung führt. Er akzeptiert aber in weiterer Folge, dass die Messgeräte die Geschwindigkeit berücksichtigen und bei der Datenauswertung einbeziehen können.

Schlussendlich fragt Schülerin 12, während sie über eine Lösung von Aufgabe 1 auf Seite 129 nachdenkt:

- 1 **Schülerin 12:** Und es ist auch nicht irgendwie eine Störung?

Zitat 220

Für Schülerin 12 kann nur noch ein technischer Defekt die Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse der Enterprise und der Voyager sein (Zitat 220).

Unmittelbar auf die Erklärung, wodurch die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zustande kommen und dass die Relativität der Gleichzeitigkeit bei Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind, vernachlässigbar klein ist, meint Schülerin 12:

- 1 **Schülerin 12:** Ach so, das liegt daran, je schneller der (zeigt auf Enter-
2 prise in Abbildung 5.1 auf Seite 129; Anm.) fliegt, desto größer
3 ist der Unterschied zwischen den beiden (zeigt auf Aldubian und
4 Garcus in Abbildung 5.1 auf Seite 129; Anm.). [...] Nachdem
5 der (zeigt auf Voyager in Abbildung 5.1 auf Seite 129; Anm.)
6 steht, merkt er's nicht. [...] O.k. Könnt es aber, wenn er (zeigt
7 auf Enterprise in Abbildung 5.1 auf Seite 129; Anm.) sich in die
8 Richtung (deutet nach links; Anm.) bewegen würde, der (zeigt
9 auf Aldubian in Abbildung 5.1 auf Seite 129; Anm.) und dann
10 der (zeigt auf Garcus in Abbildung 5.1 auf Seite 129; Anm.)
11 sein?

Zitat 221

Schülerin 12 erfasst den qualitativen Zusammenhang zwischen der Relativgeschwindigkeit und der Größe des Effekts (Zeilen 1 bis 6 von Zitat 221 auf der vorherigen Seite). Sie kann sogar eine richtige Hypothese über die Abhängigkeit des Effekts von der Richtung der Relativgeschwindigkeit formulieren (Zeilen 6 bis 11 von Zitat 221 auf der vorherigen Seite).

Dass die Enterprise und die Voyager Unterschiedliches messen, was mit der klassischen Physik nicht erklärbar ist, kommentieren Schülerin 12 und Schüler 13 so:

1 **Schülerin 12:** *Ich wär nicht drauf gekommen.*

2 **Schüler 13:** *Na, ich auch nicht.*

3 **Wittmann:** *Warum?*

4 **Schüler 13:** *Weil wir davon noch nie was gehört haben.*

Zitat 222

Für Schülerin 12 und Schüler 13 ist die Relativität der Gleichzeitigkeit überraschend (Zeile 1 und Zeile 2 von Zitat 222). Schüler 13 ist der Ansicht, dass sich dieser Effekt mit seinem bisherigen physikalischen Wissen nicht herleiten lässt (Zeile 4 von Zitat 222).

Um einen Kommentar zur Relativität der Gleichzeitigkeit gebeten sagt Schülerin 12:

1 **Schülerin 12:** *Wenn du's sagst, ist es logisch. Also, aber ich wär da*
2 *nicht draufgekommen.*

Zitat 223

Auf Nachfrage spezifiziert Schülerin 12 im weiteren Verlauf des Unterrichtsdurchgangs, was sie unter „logisch“ (Zitat 223) versteht:

1 **Schülerin 12:** *Na, ich versteh's.*

2 **Wittmann:** *Ah, du verstehst, was gemeint ist.*

3 **Schülerin 12:** *Ja. [...] Das ist, wenn ich sag, ich versteh's, sag ich,*

4 *für mich ist es logisch. [...] Für mich.*

Zitat 224

Schülerin 12 versteht, was die Relativität der Gleichzeitigkeit besagt und akzeptiert sie (Zeile 3 bis 4 von Zitat 224 auf der vorherigen Seite). Schülerin 12 betont aber noch einmal, dass der Effekt für sie überraschend ist (Zitat 223 auf der vorherigen Seite).

Nachdem sie im Laufe des Unterrichtsdurchgangs den Film *Gleichzeitigkeit* [Gle05] sahen, geben die SchülerInnen folgende Rückmeldung zum einführenden Beispiel:

- 1 **Schüler 13:** *Also ich würd einmal vom Anfang, wenn man ein neues*
2 *Thema anfangt, ... [...] ... würd ich zuerst einmal den Film*
3 *zeigen oder irgendeine Frage stellen, damit man denkt. Damit*
4 *die Schüler irgendwie angesprochen sind und irgendwie sich*
5 *dafür interessieren [...]*
6 **Wittmann:** *... das war im Prinzip die Intention damit (zeigt auf das*
7 *Arbeitsblatt „Die galaktischen Spiele mögen beginnen“ aus*
8 *Punkt 5.2.1; Anm.). [...] Was die Absicht war, ist, dass das*
9 *einmal überraschend ist, dass der (zeigt auf Voyager in Abbil-*
10 *dung 5.1 auf Seite 129; Anm.) sagt gleichzeitig und der (zeigt*
11 *auf Enterprise in Abbildung 5.1 auf Seite 129; Anm.) sagt, das*
12 *ist nicht gleichzeitig. [...] Kommt das nicht raus? Kommt das*
13 *nicht raus?*
14 **Schülerin 12:** *Nein.*
15 *[...]*
16 **Schüler 13:** *Nein.*

Zitat 225

Schüler 13 verlangt für den Einstieg in ein neues Thema einen Impuls, der die SchülerInnen anspricht (Zeile 4 von Zitat 225). Das einführende Beispiel erfüllt diesen Zweck nicht (Zeilen 14 und 16 von Zitat 225). Um das unerwartete Ergebnis des einführenden Beispiels besser zur Geltung kommen zu lassen, schlagen Schülerin 12 und Schüler 13 folgende Vorgangsweise vor:

- 1 **Schülerin 12:** *Vielleicht ... vielleicht machen Sie das mündlich durch,*
2 *ohne irgendwelche Blätter dazu auszuteilen. Das einfach münd-*
3 *lich ...*
4 **Schüler 13:** *So auf der Tafel.*
5 **Schülerin 12:** *... dann die verschiedenen ... ja oder auf der Tafel*
6 *aufzeichnen und dann die verschiedenen Antworten (zu Aufga-*
7 *be 1 auf Seite 129; Anm.) halt diskutieren und so und dann den*
8 *Film zeigen.*

- 9 **Schüler 13:** Ja.
10 **Schülerin 12:** Ja, den Film zeigen sozusagen als Antwort auf diese
11 Frage (Aufgabe 1 auf Seite 129; Anm.) da.
12 **Wittmann:** Also das quasi zu entwickeln.
13 **Schüler 13:** Ja.
14 **Schülerin 12:** Ja. [...] und dann nicht die Antwort sagen, sondern
15 einfach nur den Film zeigen. Weil da merken sie's eh.

Zitat 226

Die SchülerInnen regen an, das einführende Beispiel im Frontalunterricht zu entwickeln, um den überraschenden Effekt besser herauskommen zu lassen. Durch die frontale Präsentation könnten auch die kindliche Wirkung des Textes (siehe Zitat 215 auf Seite 148) und das Problem wegfallen, wie die Ausbreitung des Lichtsignals von der Voyager beschrieben werden soll (siehe Zitat 217 auf Seite 149). Der Film soll direkt als Antwort auf Aufgabe 1 auf Seite 129 gezeigt werden (Ziele 2 von Zitat 225 auf der vorherigen Seite und Zeile 10 von Zitat 226), Punkt 5.2.1.3 soll entfallen (Zeilen 14 bis 15 von Zitat 226). Näheres zum Einsatz des Filmes siehe Zitat 253 auf Seite 168.

6.1.1.2. Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit

Um eine Rückmeldung zum Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ gebeten antworten Schülerin 12 und Schüler 13 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 13:** Ja, schon klar.
2 **Schülerin 12:** Für mich auf jeden Fall auch. [...] Und die Sätze sind
3 da auch kürzer als da (deutet auf das Arbeitsblatt „Die galakti-
4 schen Spiele mögen beginnen“; Anm.). Das ist ... [...] Besser,
5 ja.

Zitat 227

Schülerin 12 und Schüler 13 finden das Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ verständlich (Zitat 227).

Schülerin 12 und Schüler 13 geben zu Aufgabe 2 auf Seite 137 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 12:** Na ja, wenn man draußen steht und sieht, ob sich's
2 bewegt.

- 3 **Schüler 13:** *Wahrscheinlich beim Starten und beim ... Ding. Oder*
4 *zählt das nicht?*
5 **Wittmann:** *Das zählt nicht. Also mit konstanter Geschwindigkeit.*
6 **Schüler 13:** *Nur, wenn man rausschaut.*
7 **Wittmann:** *Man schaut nicht raus. Wie kann ich merken, ... sozusagen*
8 *also ich sitz drinnen, es ist ... es sind die Klappen (bei den*
9 *Fenstern; Anm.) herunter.*
10 **Schülerin 12:** *Feststellen kann ich's nicht.*
11 **Wittmann:** *Dass es ein Inertialsystem ist? Wie kann ich das feststel-*
12 *len? ... Es ist nicht die Frage, ob sich's bewegt, sondern ob's*
13 *ein Inertialsystem ist.*
14 **Schüler 13:** *Ach so.*

Zitat 228

Schülerin 12 und Schüler 13 versuchen zu erklären, ob man eine Bewegung des Flugzeuges bezüglich der Erde feststellen kann oder nicht (Zeilen 1, 3, 6 und 10 von Zitat 228), obwohl das gar nicht gefragt war. Es kommt hier zu einer Verwechslung zwischen dem Begriff des Inertialsystems und der Eigenschaft aller Inertialsysteme, gleichwertig zu sein. Nach einer entsprechenden Intervention versteht Schüler 13 diesen Irrtum (Zeile 14 von Zitat 228). Diese Verwechslung soll vermieden werden, indem auf dem Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ eine klarere Trennung zwischen der Darstellung der Inertialsysteme und der Darstellung der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme vorgenommen wird.

Daraufhin beantworten Schülerin 12 und Schüler 13 Aufgabe 2 auf Seite 137 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 13:** *Wenn man nichts merkt.*
2 **Wittmann:** *Wenn man nichts merkt. Was meinst du mit „nichts merkt“?*
3 **Schüler 13:** *Na ja, wenn man nicht glaubt oder weiß, dass es sich*
4 *bewegt ...*
5 **Wittmann:** *Genau. [...] Beim Zug merkt man's immer ein bisschen.*
6 **Schülerin 12:** *Weil es rumpelt.*

Zitat 229

Schülerin 12 und Schüler 13 haben das Wesen des Inertialsystems bzw. eines Bezugssystems, das kein Inertialsystem ist, im Prinzip verstanden (Zeilen 1, 3 und 6 von Zitat 229).

Anschließend merken Schülerin 12 und Schüler 13 Folgendes an:

- 1 **Schüler 13:** *Das hat aber nur etwas, wenn man in Körper drin ist, zu*
2 *tun, oder? Wenn man draußen hocken würde, würd man's schon*
3 *merken.*
4 **Schülerin 12:** *Durch den Fahrtwind.*

Zitat 230

Die Vorstellung, die Eigenschaft, ein Inertialsystem zu sein, bzw. die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme habe etwas mit dem Inneren eines Objekts zu tun und nicht mit der Eigenschaft von Koordinatensystemen, wird möglicherweise durch die Einführung mit Hilfe fahrender und stehender Züge stimuliert. Dieser Fehlvorstellung kann aber leicht begegnet werden:

- 1 **Wittmann:** *Ja, aber du könntest zum Beispiel vorstellen, ich nehm ein*
2 *Flugzeug ... irgendein Flugzeug (zeichnet ein Flugzeug; Anm.),*
3 *das ist ein Inertialsystem. Und da setz ich jetzt draußen einen hin*
4 *(zeichnet außen an das Flugzeug einen Passagier; Anm.). Und*
5 *das Ganze tu ich in ein großes Transportflugzeug hinein (zeich-*
6 *net um Flugzeug und Passagier ein großes Transportflugzeug;*
7 *Anm.). Und die (beide Flugzeuge; Anm.) fliegen mit gleicher*
8 *Geschwindigkeit. Also der (Transportflugzeug; Anm.) nimmt die*
9 *Atmosphäre da drinnen mit, damit's den (Passagier außen auf*
10 *dem Flugzeug; Anm.) nicht runterweht. Weißt du, was ich mein?*
11 **Schüler 13:** *Mhm.*
12 **Wittmann:** *Merkt der dann draußen (Passagier; Anm.) was oder nicht?*
13 *Für den ... da geht kein Wind.*
14 **Schülerin 12:** *Nein, merkt er nicht.*
15 **Schüler 13:** *(schüttelt den Kopf; Anm.)*

Zitat 231

Schülerin 12 und Schüler 13 verstehen, dass die Bewegung fliegender Flugzeuge außen nur durch die Relativbewegung zur Atmosphäre festgestellt werden kann (Zeilen 14 und 15 von Zitat 231).

Schülerin 12 und Schüler 13 geben zu Aufgabe 3 auf Seite 137 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 13:** *Wegen der Geschwindigkeit.*

2Schülerin 12: *Weil die Geschwindigkeit sich verändert, und das merkt
3 man.*

Zitat 232

Schüler 13 löst Aufgabe 4 auf Seite 137 folgendermaßen:

1Schüler 13: *Weil man das ist wie eine Zentrifuge und ... man wird
2 nach außen gedrückt.*

Zitat 233

Schülerin 12 und Schüler 13 können den Begriff des Inertialsystems in verschiedenen Situationen richtig anwenden und mit ihm argumentieren (Zitate 232 und 233).

Zu Aufgabe 5 auf Seite 137 geben Schülerin 12 und Schüler 13 folgende Antwort:

1Schüler 13: *Auto.*
2Wittmann: *Auto, wenn ... da fehlt jetzt noch irgendwas.*
3Schüler 13: *Wenn nicht beschleunigt oder gebremst wird.*
4Wittmann: *Genau. Woran merkt man's?*
5Schülerin 12: *Na ja, wenn man drin sitzt und nichts macht ... die
6 Geschwindigkeit ... also man merkt nichts, kein Ruckeln.*
7Schüler 13: *Ja, da ruckelt's schon. Also da merkt man schon was.*

Zitat 234

Schüler 13 findet selbst ein richtiges Beispiel für ein Inertialsystem (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 234) und erkennt die Grenzen der Idealisierung bei der Modellbildung (Zeile 7 von Zitat 234). Schülerin 12 kann den Begriff des Inertialsystems richtig anwenden und mit ihm argumentieren (Zeilen 5 bis 6 von Zitat 234).

Zu Aufgabe 6 auf Seite 137 findet Schülerin 12 folgendes Beispiel:

1Schülerin 12: *Schaukel.*
2Wittmann: *Schaukel. Ja, warum?*
3Schülerin 12: *Na ja, die schwingt hin und her. Die hält nur kurz an
4 und beschleunigt dann wieder.*

Zitat 235

Schülerin 12 findet selbst ein richtiges Beispiel für ein Bezugssystem, welches kein Inertialsystem ist (Zeile 1 von Zitat 235 auf der vorherigen Seite), kann den Begriff des Inertialsystems richtig anwenden und mit ihm argumentieren (Zeilen 3 bis 4 von Zitat 235 auf der vorherigen Seite).

Zu Aufgabe 6 auf Seite 137 findet Schüler 13 ein weiteres Beispiel:

1 **Schüler 13:** Na, beim Bungeejumping.

2 **Wittmann:** Na ja, wann, wann? Wenn man ...

3 **Schüler 13:** ... wenn man fliegt.

4 **Schülerin 12:** Nein, wenn man abgefangen wird. [...] Und dann

5 merkst du's.

Zitat 236

Schüler 13 sieht selbst den Zusammenhang mit (frei) fallenden Bezugssystemen (Zeile 1 von Zitat 236). Schülerin 12 kann dem Gedanken folgen und einen Fehler (Zeile 3 von Zitat 236) ausbessern (Zeile 4 von Zitat 236).

Aufgabe 7 auf Seite 137 beantworten Schülerin 12 und Schüler 13 folgendermaßen:

1 **Schülerin 12:** Die Gleichwertigkeit ... [...] Es macht ... es sind
2 beide Inertialsysteme da drin (deutet auf Columbus in Abbil-
3 dung 5.3a auf Seite 136; Anm.) und da drin (deutet auf Galileo
4 in Abbildung 5.3a auf Seite 136; Anm.) ... [...] ... und sie be-
5 wegen sich aufeinander zu (bewegt beide Hände aufeinander zu;
6 Anm.) und man merkt nicht, welches der beiden steht. Egal, ob
7 der (deutet auf Galileo in Abbildung 5.3a auf Seite 136; Anm.)
8 sich auf das (deutet auf Columbus und Deep Space Nine in Ab-
9 bildung 5.3a auf Seite 136; Anm.) zubewegt oder ob sich das
10 (deutet auf Columbus und Deep Space Nine in Abbildung 5.3b
11 auf Seite 136) auf den (deutet auf Galileo in Abbildung 5.3b auf
12 Seite 136; Anm.) zubewegt. Man merkt es nicht. [...] Dass es
13 genau gleich ist.

14 **Wittmann:** Merkt man's nur nicht oder ist es auch nicht?

15 **Schülerin 12:** Na, ja ...

16 [...]

17 **Schüler 13:** Na da bewegt sich eh alles immer. [...] Es bewegt sich
18 auf jeden Fall irgendwohin.

19 **Schülerin 12:** Mhm.

Zitat 237

Schülerin 12 kann die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme anhand der dargestellten Situation erklären (Zeilen 1 bis 13 von Zitat 237 auf der vorherigen Seite). Schüler 13 beschreibt, wie er sich vorstellt, warum man im Weltall nicht von einer absoluten Ruhe sprechen kann (Zeile 17 bis 18 von Zitat 237 auf der vorherigen Seite): Im Weltall bewegt sich alles irgendwohin. Da ist keine Orientierung möglich. Schülerin 12 stimmt ihm zu (Zeile 19 von Zitat 237 auf der vorherigen Seite).

Um eine Rückmeldung zur gesamten Unterrichtssequenz zu den Inertialsystemen und deren Gleichwertigkeit gebeten antwortet Schüler 13:

1 Schüler 13: *Das war leichter zu verstehen. [...] Ich hab's verstanden.*

Zitat 238

Schüler 13 ist der Meinung, den Begriff der Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit verstanden zu haben (Zitat 238).

6.1.1.3. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Unmittelbar nachdem sie mit dem Lesen des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ begonnen hat, meint Schülerin 12:

1 Schülerin 12: *Ich würd gleich sagen, den Personen Namen zu geben.*

2 *Dieses Person A und Person B ist ur verwirrend.*

Zitat 239

Im weiteren Verlauf des Unterrichtsdurchganges kommt Schülerin 12 noch einmal auf die Personenbezeichnungen zurück:

1 Schülerin 12: *Es ist ein bisschen verwirrend, wenn plötzlich A geht*

2 *weg, und dann B und das ist dann ...*

3 Wittmann: *Wär da irgendwie eine Skizze hilfreich? Irgendwie so*

4 *was, ...*

5 Schüler 13: *Ja.*

Zitat 240

Schülerin 12 findet namenlose Personen verwirrend (Zeile 2 von Zitat 239 auf der vorherigen Seite und Zeile 1 von Zitat 240 auf der vorherigen Seite). Schüler 13 fände außerdem Zeichnungen zur Veranschaulichung hilfreich (Zeile 5 von Zitat 240 auf der vorherigen Seite).

Das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ kommentieren Schülerin 12 und Schüler 13 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 13:** Also ich find, dass es ... dass es auf der einen Seite eh
2 auch gut ist, dass man es da unten wieder wiederholt, aber
3 auch irgendwie dass man, dass es dann zu viel ist. [...] Ja,
4 weil, ich glaub, es sind vier Absätze, und die genau das Gleiche
5 sagen. Und das wird langweilig. [...] Vielleicht könnt man das
6 überhaupt einheitlich machen. [...] Und dieses zusammenfassen
7 und da ein bisschen was streichen.
- 8 **Schülerin 12:** Ja, also das Erste, das ausführlich ist, ist eh nicht so
9 schlecht. Aber das Zweite dafür, dass man das halt zusammen-
10 fasst.
- 11 **Wittmann:** Was, was ist das Zweite? Welches Zweite?
- 12 **Schülerin 12:** Na ja, wenn das Zweite, das mit dem Entgegengesetzten.
13 [...] Das kann man kürzen, ja.
14 [...]
- 15 **Schüler 13:** [...] Aber mich stört halt, dass es so viel zu viel ist. [...]
16 Also dass es immer das Gleiche wiederholt wird, nur mit anderen
17 Gegenständen. [...] Weil da im letzten Absatz ist eigentlich eh
18 fast alles zusammengefasst.

Zitat 241

Den SchülerInnen ist das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ zu redundant (Zeilen 2 bis 4 und Zeilen 15 bis 18 von Zitat 241). Sie empfehlen, das Prinzip an einem Beispiel deutlich zu machen (Zeile 8 von Zitat 241) und dann zu kürzen (Zeilen 7 und 13 von Zitat 241) und zusammenzufassen (Zeilen 5 bis 6 und Zeile 9 von Zitat 241).

Zum Inhalt des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ befragt meinen Schülerin 12 und Schüler 13:

- 1 **Schülerin 12:** Ich hab's verstanden. Also ich fand's leicht verständlich.
2 [...] Das ist ... ja. Das ist nicht kompliziert, der Text. Das find
3 ich gut.
4 [...]

5**Schüler 13:** *Ich versteh's auch gut. Das ist auch nicht so schwierig*
6 *gemacht.*

Zitat 242

Schülerin 12 und Schüler 13 halten das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ für verständlich (Zitat 242).

Die Frage nach dem wesentlichen Inhalt des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ beantworten Schülerin 12 und Schüler 13 so:

1**Schüler 13:** *Na, dass umso schneller man geht und die andere Person*
2 *langsamer . . . , wenn man sie überholt, dass man das Gefühl*
3 *hat, dass sie langsamer ist. [. . .] Wenn man immer näher an sie*
4 *rannkommt, denkt man, dass sie . . .*

5**Wittmann:** *Genau, wie ist das mit dem Licht?*

6**Schülerin 12:** *Ist nicht so.*

7 *[. . .]*

8**Wittmann:** *[. . .] Du kannst mit 99% dem Licht hinterherfahren. Von*
9 *dir aus gesehen, wie schnell ist das Licht? [. . .] Ich hab vor mir*
10 *einen Lichtstrahl und ich messe, wie schnell der ist. Dann krieg*
11 *ich die Lichtgeschwindigkeit raus. [. . .] Dann renn ich ihm nach*
12 *so schnell ich kann und mess wieder, während ich dem nachlauf.*
13 *Was krieg ich dann raus?*

14**Schülerin 12:** *Na, dass man wirklich langsamer ist.*

15**Wittmann:** *Nein, für den Lichtstrahl. Was mess ich für den Lichtstrahl?*

16 *Weniger oder mehr oder dasselbe?*

17**Schülerin 12:** *Dasselbe.*

18 *[. . .]*

19**Wittmann:** *Wie kommt das für euch?*

20**Schüler 13:** *Leicht verständlich.*

Zitat 243

Schüler 13 geht bei der Beantwortung der Frage nicht auf das Licht ein. Für ihn sind die unterschiedlichen Beträge der Geschwindigkeit von Personen in verschiedenen Bezugssystemen das am meisten Auffallende (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 243). Schülerin 12 gibt zwar die korrekte Antwort für das Licht (Zeile 6 von Zitat 243), weicht aber einer Antwort auf eine Frage mit einer konkreten Zahl aus, indem sie angibt, dass man selber langsamer als das Licht ist (Zeile 14 von

Zitat 243 auf der vorherigen Seite). Vor wenige Alternativen gestellt (Zeilen 15 bis 16 von Zitat 243 auf der vorherigen Seite) gibt Schülerin 12 die richtige Antwort (Zeile 17 von Zitat 243 auf der vorherigen Seite). Auffallend ist, dass Schüler 13 die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als leicht verständlich (Zeile 20 von Zitat 243 auf der vorherigen Seite) qualifiziert und beide SchülerInnen zunächst keine Begründung für diese Konstanz verlangen.

Auf die Frage, ob die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für sie überraschend oder logisch ist, antworten Schülerin 12 und Schüler 13:

1 **Schülerin 12:** *Na, wenn man's ...*

2 **Schüler 13:** *Logisch.*

3 **Schülerin 12:** *Na, wenn man ...*

4 **Wittmann:** *Bitte?*

5 **Schüler 13:** *Logisch.*

6 **Wittmann:** *Logisch? Wieso?*

7 **Schülerin 12:** *Ahm.*

8 **Schüler 13:** *Na ja, weils eben logisch ist, wenn man irgendwas folgt*
9 *und man schneller als es ist, dass es der Eindruck, dass der*
10 *langsamer ist.*

11 **Wittmann:** *Aber beim Licht ist es nicht.*

12 **Schüler 13:** *Beim Licht ist, weil es das schnellste ist.*

13 *[...]*

14 **Schülerin 12:** *Gibt's da irgendeinen Grund, eine Begründung, warum*
15 *das so ist?*

Zitat 244

Schüler 13 gibt an, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für logisch (Zeilen 2 und 5 von Zitat 244) zu halten, begründet das aber mit den unterschiedlichen Beträgen der Geschwindigkeiten von Gegenständen in verschiedenen Bezugssystemen (Zeilen 8 bis 10 von Zitat 244). Er geht bei der Beantwortung nicht auf das Licht ein. Für ihn sind die unterschiedlichen Beträge der Geschwindigkeit von Alltagsgegenständen in verschiedenen Bezugssystemen offenbar immer noch der wesentliche Punkt des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“. Auf das Licht angesprochen (Zeile 11 von Zitat 244) zitiert Schüler 13 ein Faktum, das er nicht aus dem Unterrichtsdurchgang kennt. Schüler 13 erläutert aber nicht näher, was er damit meint. Vielleicht ist es eine ausweichende Antwort, vielleicht meint er aber, es sei das „Vorrecht“ von Licht, für alle gleich schnell zu sein, weil es die schnellstmögliche Geschwindigkeit hat. Ich werde den letzten Erklärungsversuch in den weiteren Unterrichtsdurchgängen erproben. Nun fragt

Schülerin 12 nach einem Grund für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Zeile 14 von Zitat 244 auf der vorherigen Seite). Offenbar ist es ihr jetzt zum ersten Mal gelungen, einen Widerspruch zwischen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und den unterschiedlichen Beträgen der Geschwindigkeiten von Alltagsgegenständen in verschiedenen Bezugssystemen zu erkennen.

Auf die Frage nach dem Grund für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit stelle ich Schülerin 12 die Gegenfrage, warum elektrischer Strom ein Magnetfeld hervorruft. Diese Tatsache war Schülerin 12 aus dem Physikunterricht bereits bekannt. Sie antwortet folgendermaßen:

1 Schülerin 12: *Ist so.*

Zitat 245

Schülerin 12 und Schüler 13 können daraufhin akzeptieren, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ebenso ein physikalisches Grundprinzip ist wie die Tatsache, dass elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt. Ich werde diesen Vergleich in weiteren Unterrichtsdurchgängen erproben.

6.1.1.4. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Unmittelbar nachdem sie den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] gesehen haben, sagen Schülerin 12 und Schüler 13:

1 Schüler 13: *Also ich würd den Film sofort zeigen, wenn ich ...*

2 Schülerin 12: *Ja.*

3 Schüler 13: *... das erklären will.*

4 Wittmann: *Ja? Ist das verständlich?*

5 Schüler 13: *Viel verständlicher als das andere.*

6 Schülerin 12: *Ich versteh's besser als das mit den Personen, die auf-*
7 *einander zugehen und auseinander weg. Ich find, das versteht*
8 *man dann gut. Besonders auch, wenn man die Grafiken hat, die,*
9 *wo man das sieht.*

Zitat 246

Schülerin 12 und Schüler 13 finden den Film verständlich (Zeilen 5 und 6 von Zitat 246). Für Schülerin 12 ist die Visualisierung hilfreich (Zeilen 8 bis 9 von Zitat 246). Außerdem regen Schülerin 12 und Schüler 13 an, den Film

unmittelbar nach dem einführenden Beispiel zu zeigen (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 246 auf der vorherigen Seite). Näheres zum Einsatz des Filmes siehe Zitat 253 auf Seite 168.

Aufgabe 10 auf Seite 141 beantworten Schülerin 12 und Schüler 13 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 13:** *Was für einen Zuschauerpunkt man hat, von wo man*
2 *zuschaut.*
3 **Schülerin 12:** *Ja. [...] Inertialsystem, die Gleichheit, oder?*
4 **Wittmann:** *Ja, wieso?*
5 **Schülerin 12:** *Na ja, weil man wie das auch mit den Raumschiffen ist.*
6 *Kommt drauf an, auf welchem Standpunkt man ist. Die einen*
7 *sagen, nein, er bewegt sich auf uns zu. Der andere sagt, nein,*
8 *die bewegen sich auf mich zu. [...] Das mit den Raumschiffen,*
9 *und mit Galileo und Columbus.*
10 **Wittmann:** *Ja genau. Und das zweite Prinzip ist auch noch da.*
11 **Schüler 13:** *Na, die Zuschauerperspektive.*
12 **Wittmann:** *Nein.*
13 **Schüler 13:** *Was für eine Distanz ... keine Ahnung.*
14 **Wittmann:** *Dass Licht gleich schnell ist. [...]*
15 **Schülerin 12:** *Mhm.*
16 **Wittmann:** *Ist das logisch?*
17 **Schüler 13:** *Ja.*
18 **Schülerin 12:** *Ja.*

Zitat 247

Schülerin 12 und Schüler 13 erkennen die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme als grundlegendes Prinzip für die Relativität der Gleichzeitigkeit (Zeilen 1 bis 8 von Zitat 247). Schülerin 12 stellt eine Verbindung zwischen dem Film und dem Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ her (Zeile 9 von Zitat 247). Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird als grundlegendes Prinzip für die Relativität der Gleichzeitigkeit nicht erkannt (Zeilen 10 bis 13 von Zitat 247). Das kann ein Hinweis darauf sein, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit selbst nicht verstanden wurde. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird in weiterer Folge als grundlegendes Prinzip für die Relativität der Gleichzeitigkeit akzeptiert (Zeilen 17 und 18 von Zitat 247), allerdings ziemlich emotionslos und ohne nachzufragen. Auch das kann ein Hinweis darauf sein, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht verstanden wurde, sodass deren Bedeutung nicht erkannt werden konnte.

Zu Aufgabe 11 auf Seite 141 fragt Schülerin 12:

- 1 **Schülerin 12:** [...] Ist das, wenn man auf der Erde steht oder wo
2 anders?
3 **Wittmann:** Moment, Moment. ... Ja, ja, auf der Erde, ja.
4 **Schülerin 12:** Dann sollte man das auch dazuschreiben.

Zitat 248

Aufgabe 11 auf Seite 141 muss klarer formuliert werden. Diese Aufgabe beantworten Schülerin 12 und Schüler 13 so:

- 1 **Schüler 13:** Dann würde die Strecke links, also zu dem anderen Raum-
2 schiff länger sein.
3 **Wittmann:** Ja, wo kommt's zuerst an?
4 **Schüler 13:** Hm.
5 **Schülerin 12:** Na, ja, beim vorderen, wenn's so ... also ... wenn's
6 die andere Richtung fliegt ...
7 **Schüler 13:** Beim hinteren.
8 **Schülerin 12:** ... dann beim hinteren wieder.
9 **Wittmann:** Beim rechten oder beim linken?
10 **Schüler 13:** Rechten.
11 [...]
12 **Schülerin 12:** Ja.
13 **Wittmann:** Ist das klar?
14 **Schülerin 12:** Ja.
15 **Schüler 13:** Ja.

Zitat 249

Schülerin 12 und Schüler 13 haben die Argumentation im Film offenbar gut verstanden, weil sie diese richtig auf eine neue Situation anwenden können (Zeilen 1 bis 10 von Zitat 249). Schülerin 12 und Schüler 13 finden den Sachverhalt verständlich (Zeilen 14 und 15 von Zitat 249).

Zu Aufgabe 12 auf Seite 141 merkt Schülerin 12 an:

- 1 **Schülerin 12:** [...] die Frage unten stellen, nicht wieso das so ist,
2 sondern zuerst halt was passiert, wenn der vielleicht langsam
3 ist.

Zitat 250

Aufgabe 12 auf Seite 141 soll so formuliert werden, dass nicht vorweggenommen wird, dass der Zeitunterschied sehr klein ist. Zu dieser Aufgabe geben Schülerin 12 und Schüler 13 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 12:** [...], weil die Erde ja nicht so schnell ist. Die ist nicht
2 so schnell, wie die Raumschiffe sich bewegen. [...] Und deshalb,
3 wenn die sich genau gleich schnell bewegen würde, würd's nicht
4 auffallen. [...] Wenn der Unt. ... desto kleiner der Unterschied
5 zwischen den beiden Geschwindigkeiten, desto wenig ... desto ...
6 fällt der Unterschied nicht auf.

Zitat 251

Schülerin 12 argumentiert qualitativ: Wäre der Konvoi genauso schnell wie die Erde, würde man auf der Erde dasselbe messen wie vom Konvoi aus (Zeilen 2 bis 4 von Zitat 251). Je geringer die Geschwindigkeitsdifferenz ist, desto geringer ist der Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit (Zeilen 4 bis 6 von Zitat 251). Schüler 13 geht in seiner Antwort auf die Argumentation im Film ein:

- 1 **Schüler 13:** Na ja, umso schneller man fliegt, umso mehr muss das
2 Licht versuchen, an den anderen ... an das andere Raumschiff
3 zu kommen. Irgendwie ...
4 **Wittmann:** Meinst du die Strecken sozusagen ... der Abstand bleibt
5 gleich von diesen Raumschiffen.
6 **Schüler 13:** Ja.
7 **Wittmann:** Also, was weiß ich ... da haben wir das ... ich zeichne
8 da ein Kastl, da haben wir das mittlere, das hintere und das
9 vordere (zeichnet Raumschiff (a), Shuttle (b) und Shuttle (c) in
10 Abbildung 6.1 auf Seite 167; Anm.). Und einmal fliegt das Ganze
11 sehr schnell (zeichnet Pfeil (d) in Abbildung 6.1 auf Seite 167;
12 Anm.), das Ganze sehr schnell. Und einmal nur relativ langsam
13 (zeichnet Pfeil (e) in Abbildung 6.1 auf Seite 167; Anm.). Aber
14 die Abstände (zeichnet Abstand (f) zwischen Raumschiff (a)
15 und Shuttle (c) sowie Abstand (g) zwischen Raumschiff (a) und
16 Shuttle (b) in Abbildung 6.1 auf Seite 167; Anm.) bleiben gleich
17 groß. Was meinst du?
18 [...]
19 **Schüler 13:** Ich mein das so zirka, dass, wenn das so (zeigt in Rich-
20 tung der Pfeile (d) und (e) in Abbildung 6.1 auf Seite 167; Anm.)
21 fliegt ... [...] ... es fliegt so langsam, dann ist nicht so, wenn

22 *das Licht (zeichnet Lichtstrahl (h) vom Raumschiff (a) in Flug-*
23 *richtung weg in Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite; Anm.),*
24 *das versucht da hinzukommen (zeichnet Shuttle (i)¹³ in Abbil-*
25 *dung 6.1 auf der nächsten Seite; Anm.), und da halt da (zeich-*
26 *net Lichtstrahl (j) vom Raumschiff (a) gegen die Flugrichtung*
27 *weg in Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite; Anm.) fährt das*
28 *schon in die Richtung (zeichnet Pfeile (k) und Shuttle (l)¹⁴ in*
29 *Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite; Anm.), und nimmt das*
30 *Licht praktisch auf, ja (deutet von Shuttle (l) weg in Richtung*
31 *der Pfeile (k) in Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite; Anm.).*
32 *Licht nicht mehr da nach hinten fahren muss (zeigt einlang des*
33 *Lichtstrahls (j) in Richtung Shuttle (l) in Abbildung 6.1 auf der*
34 *nächsten Seite; Anm.).*

35 **Schülerin 12:** *Es kommt dem Licht entgegen.*

36 **Schüler 13:** *Und da, wo das jetzt irgendwie so einholen muss (zeichnet*
37 *Lichtstrahl (h) vom Raumschiff (a) in Richtung Shuttle (i) nach*
38 *in Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite; Anm.), fahren, also*
39 *es bewegt sich dahin (zeigt auf Shuttle (i) in Abbildung 6.1 auf*
40 *der nächsten Seite; Anm.), und jetzt bewegt sich auch also jetzt*
41 *schneller*

42 **Wittmann:** *Licht, Licht, gleich schnell.*

43 **Schüler 13:** *Na, ich mein, diese Kastl.*

44 **Wittmann:** *Na ja, das sind die Shuttles. In dem Fall werden sie sich*
45 *nur langsam bewegen.*

46 **Schüler 13:** *Ja dann, dann fliegt das nicht so schnell (deutet auf die*
47 *Shuttle (b) und (i) in Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite; Anm.),*
48 *und nimm auch nicht so eine weite Strecke (deutet auf die unter-*
49 *schiedlichen Positionen der Shuttle (b) und (i) in Abbildung 6.1*
50 *auf der nächsten Seite; Anm.) ...*

Zitat 252

Schüler 13 und Schülerin 12 verstehen, dass das hintere Shuttle (l) in Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite dem Licht entgegen kommt und es dadurch einen

¹³Shuttle (i) ist Shuttle (b) zu einem späteren Zeitpunkt. Dass Shuttle (i) zu weit links positioniert ist, ist wahrscheinlich nur eine Ungenauigkeit in der Skizze, da Schüler 13 in weiterer Folge völlig korrekt argumentiert.

¹⁴Shuttle (l) ist Shuttle (c) zu einem späteren Zeitpunkt. Dass Shuttle (l) zu weit links positioniert ist, ist wahrscheinlich nur eine Ungenauigkeit in der Skizze, da Schüler 13 in weiterer Folge völlig korrekt argumentiert.

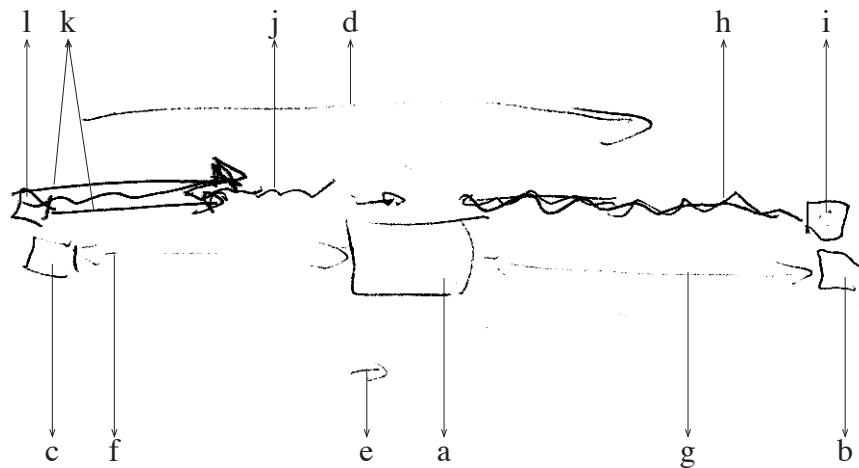


Abbildung 6.1.: Zu Zitat 252 auf der vorherigen Seite

kürzeren Weg zurücklegt als in einem Bezugssystem, in dem der Konvoi ruht (Zeilen 25 bis 35 von Zitat 252 auf der vorherigen Seite). Ebenso versteht Schüler 13, dass der Lichtstrahl (h) das vordere Shuttle (i) einholen muss (Zeilen 21 bis 25 und Zeilen 36 bis 38 von Zitat 252 auf der vorherigen Seite). Schüler 13 hat erkannt, dass die Größe des Effekts der Relativität der Gleichzeitigkeit von den unterschiedlichen Positionen der Shuttle (b) und (i) und diese wieder von der Geschwindigkeit des Konvois abhängt (Zeilen 46 bis 50 von Zitat 252 auf der vorherigen Seite).

Im Laufe des Unterrichtsdurchganges ergibt sich eine längere Diskussion, ob der Film wie zunächst von den SchülerInnen verlangt unmittelbar nach dem einführenden Beispiel (Zeilen 7 bis 10 von Zitat 226 auf Seite 153 und Zeilen 1 bis 3 von Zitat 246 auf Seite 162) eingesetzt werden soll oder nicht. Schülerin 12 und Schüler 13 fassen diese Diskussion über die Abfolge der einzelnen Unterrichtssequenzen folgendermaßen zusammen:

1 **Schülerin 12:** Das (deutet auf das Arbeitsblatt „Die galaktischen Spiele mögen beginnen“; Anm.) so als Anfang, dann da so die Antwort, dann den Film und dann erst ...

4 **Wittmann:** Dann erst die Blätter (deutet auf die Arbeitsblätter „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ und „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“; Anm.) sozusagen ...

7 **Schülerin 12:** Ja.

8 **Wittmann:** ... mit dem. Und dann eventuell vielleicht noch einmal den Film, dass man's dann mit dem (deutet auf das Arbeitsblatt „Die Lösung“; Anm.) weiterarbeiten kann da.

11 **Schülerin 12:** *Ja, Film zwei Mal zeigen.*

12 **Wittmann:** *Also Film quasi als Impuls, dann die Blätter, Film und*
13 *dann die Lösung. Ist das ...*

14 **Schüler 13:** *Ja.*

15 **Schülerin 12:** *Ja.*

Zitat 253

Die SchülerInnen schlagen als Reihenfolge für die einzelnen Unterrichtssequenzen vor:

- Die galaktischen Spiele mögen beginnen (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 253)
- Zu Aufgabe 1 auf Seite 129 Antworten (Zeile 2 von Zitat 253) diskutieren (Zeile 7 von Zitat 226 auf Seite 153).
- Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] (Zeile 3 von Zitat 253)
- Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit, Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Zeilen 3 bis 7 von Zitat 253)
- Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] (Zeile 9 von Zitat 253)
- Die Lösung (Zeilen 12 bis 15 von Zitat 253)

6.1.1.5. Die Lösung

Zu Aufgabe 13 auf Seite 142 geben Schülerin 12 und Schüler 13 folgende Antwort:

1 **Schülerin 12:** *Das ist die Inertial... die Gleichwertigkeit der Inertial-*
2 *systeme.*

3 **Wittmann:** *Ja. Ist das klar, dass das so sein muss?*

4 **Schülerin 12:** *Ja.*

5 **Schüler 13:** *Ja.*

Zitat 254

Die SchülerInnen verstehen, wie man die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme anwenden kann (Zitat 254).

Zu Aufgabe 14 auf Seite 142 meinen Schülerin 12 und Schüler 13:

1 **Schülerin 12:** *Ahm, ich versteh die Frage nicht. Vergleicht die Dar-*
2 *stellung ...*

3 **Schüler 13:** *Ahm, was für ein Bildschirm überhaupt?*

Zitat 255

In der darauf folgenden Diskussion wird gemeinsam mit den SchülerInnen die Aufgabe in eine verständliche Form gebracht.

Zu Aufgabe 15 auf Seite 143 geben Schülerin 12 und Schüler 13 folgende Rückmeldung:

1 **Schüler 13:** *Die ist schon besser formuliert.*

2 **Schülerin 12:** *Mhm.*

Zitat 256

Aufgabe 15 auf Seite 143 ist verständlich formuliert (Zitat 256). Die SchülerInnen beantworten sie folgendermaßen:

1 **Schülerin 12:** *Also, wenn sie (deutet auf Enterprise in Abbildung 5.4a*
2 *auf Seite 142; Anm.) jetzt in die Richtung fliegt (deutet in Abbil-*
3 *dung 5.4a auf Seite 142 nach rechts; Anm.), dann kommen sie*
4 *(Licht; Anm.) zuerst dort (Schülerin 12 und Schüler 13 deuten*
5 *nahezu zeitgleich auf Garcus in Abbildung 5.4a auf Seite 142;*
6 *Anm.) hin.*

7 **Wittmann:** *Ja, ist das klar, warum?*

8 **Schülerin 12:** *Ja, weil sie (Enterprise; Anm.) sich wegbewegt (deutet*
9 *in Abbildung 5.4 auf Seite 142 nach rechts; Anm.), also glaubt*
10 *diese (deutet auf Enterprise in Abbildung 5.4a auf Seite 142) ...*
11 *dass, die (deutet auf Voyager und Planeten in Abbildung 5.4a*
12 *auf Seite 142; Anm.) in die Richtung (deutet in Abbildung 5.4a*
13 *auf Seite 142 nach links; Anm.) fliegen, also ...*

Zitat 257

Die SchülerInnen können das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme zur Lösung anwenden (Zeilen 8 bis 13 von Zitat 257). Ebenso können sie die Darstellung aus dem Film für die Lösung verwenden (Zeilen 1 bis 6 von Zitat 257).

Die Frage, ob das Arbeitsblatt „Die Lösung“ ausgenommen Aufgabe 14 auf Seite 142 verständlich sei, beantworten Schülerin 12 und Schüler 13 so:

¹**Schüler 13:** *Ja, schon.*

²**Schülerin 12:** *Ja.*

Zitat 258

Abgesehen von Aufgabe 14 auf Seite 142 ist das Arbeitsblatt „Die Lösung“ für die SchülerInnen verständlich (Zitat 258).

6.1.1.6. Abschließende Rückmeldung

Um eine Rückmeldung zum gesamten Unterrichtsdurchgang gebeten sagen Schülerin 12 und Schüler 13:

¹**Schüler 13:** *War schon interessant.*

²**Schülerin 12:** *Also, ich find's gut.*

Zitat 259

Die SchülerInnen finden den Unterrichtsdurchgang interessant und gut (Zitat 259). Es ist also sinnvoll zu versuchen, dieses Thema für diese Altersstufe zugänglich zu machen.

6.1.2. Revision nach dem ersten Unterrichtsdurchgang

Auf Basis der Analyse des ersten Unterrichtsdurchgangs unterziehe ich den Prototyp eines Unterrichtskonzepts einer Revision. Das überarbeitete Unterrichtskonzept wird in einem weiteren Unterrichtsdurchgang erprobt.

6.1.2.1. Einführendes Beispiel

Die Intention des einführenden Beispiels, einen unerwarteten Effekt überraschend zu präsentieren, kommt nicht zur Geltung. Darüber hinaus wirkt der Text aus Punkt 5.2.1.1 zu kindlich. Der Inhalt des einführenden Beispiels ist für die SchülerInnen im Großen und Ganzen verständlich. Als Erklärung für die unterschiedlichen Messergebnisse der Voyager und der Enterprise bieten die SchülerInnen Effekte der Lichtlaufzeit, Probleme beim Messen durch die Geschwindigkeit, was im Einklang mit den gewonnen Aussagen aus den Interviews aus Kapitel 4 steht, oder eine Störung an. Die SchülerInnen akzeptieren die Existenz exakter Messgeräte und den Messprozess als Sammeln von Daten

Aldubian

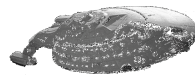


Garcus

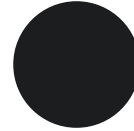


(a) Aldubian und Garcus

Aldubian

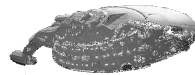


Garcus

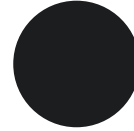


(b) Aldubian, Garcus und Voyager

Aldubian



Garcus



(c) Aldubian, Garcus, Voyager und Enterprise

Abbildung 6.2.: Eröffnung der galaktischen Spiele¹⁵

mit anschließender Auswertung. Die Relativität der Gleichzeitigkeit ist für die SchülerInnen überraschend. Auch dieses deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Interviews. Die SchülerInnen akzeptieren den Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit und können selber einen qualitativen Zusammenhang zwischen der Relativgeschwindigkeit und der Größe des Effekts herstellen. Die SchülerInnen halten die Messergebnisse für ebenso glaubwürdig wie andere, geläufigere Messergebnisse, was ebenfalls in Einklang mit den Ergebnissen der Interviews steht. Daher dürften die SchülerInnen die gemessenen Effekte für „real“ und nicht für eine Täuschung halten.

Im zweiten Unterrichtsdurchgang wird der Inhalt von Punkt 5.2.1.1 in einer Sequenz Frontalunterricht mit Hilfe der Abbildung 6.2 präsentiert. Abbildung 6.2a

¹⁵Siehe Fußnoten 3 und 4 auf Seite 129

auf der vorherigen Seite bekommen die SchülerInnen bei Beginn der Präsentation vorgelegt, Abbildung 6.2b auf der vorherigen Seite mit dem dritten Satz des zweiten Absatzes aus Punkt 5.2.1.1 und Abbildung 6.2c auf der vorherigen Seite mit Beginn des dritten Absatzes aus Punkt 5.2.1.1. Im zweiten Absatz des Textes aus Punkt 5.2.1.1 wird der vierte Satz durch folgende Passage ersetzt: *An der Voyager ist außen eine Lichtquelle angebracht (Eine Lichtquelle wird außen an die Voyager gezeichnet in Abbildung 6.2b auf der vorherigen Seite.), die man sich wie eine riesige Glühbirne vorstellen kann. Diese wird kurz zum Aufleuchten gebracht. Dadurch sendet sie in alle Richtungen Lichtstrahlen aus (Es werden radial Lichtstrahlen von der Lichtquelle weg gezeichnet in Abbildung 6.2b auf der vorherigen Seite). Einer dieser Lichtstrahlen trifft auf Aldubian und einer auf Garcus (Es wird je ein Lichtstrahl von der Lichtquelle zu Aldubian und einer zu Garcus gezeichnet in Abbildung 6.2b auf der vorherigen Seite).*

Anschließend werden die SchülerInnen gebeten, sich Lösungen für Aufgabe 1 auf Seite 129 zu überlegen. Die Lösungen werden gesammelt und diskutiert. Da ich die Änderungsvorschläge der SchülerInnen, den Film unmittelbar nach dem einführenden Beispiel zu zeigen und den Punkt 5.2.1.3 wegzulassen, unabhängig voneinander testen möchte, wird den SchülerInnen in einer Sequenz Frontalunterricht der Inhalt von Punkt 5.2.1.3 vorgetragen und anschließend der Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] gezeigt (Näheres zum Einsatz des Filmes siehe Punkt 6.1.2.4). Das Weglassen von Punkt 5.2.1.3 werde ich erst im dritten Unterrichtsdurchgang testen.

Durch den Frontalunterricht wird zwar in diesem Abschnitt das Lernen aus Text nicht geschult, dafür soll die Intention des einführenden Beispiels klarer zu Tage treten, die kindliche Wirkung des Textes entfallen und das Problem behoben werden, die Ausbreitung des Lichtsignals, das die Voyager aussendet, zu beschreiben.

6.1.2.2. Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit

Die SchülerInnen finden das Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ verständlich. Der Begriff des Inertialsystems wird ausgehend vom Beispiel stehender und fahrender Züge gut angenommen. Die SchülerInnen können ihn in verschiedenen Situationen richtig anwenden und mit ihm argumentieren, sehen die Grenzen der Idealisierungen bei der Modellbildung und erkennen selbst einen Zusammenhang zu frei fallenden Bezugssystemen.

Die gewählte Darstellung bei der Einführung der Inertialsysteme stimuliert möglicherweise die falsche Vorstellung, der Begriff des Inertialsystems habe etwas mit dem Inneren bewegter Gegenstände zu tun. Trotzdem bleibe ich dabei, ein Inertialsystem mit dem Gegenstand zu identifizieren, mit dem es fix ver-

bunden ist; zum einen, weil dadurch komplizierte sprachliche Formulierungen vermieden werden, zum anderen, weil dadurch nicht abstrakt Koordinatensysteme eingeführt werden müssen. Sollte diese Fehlvorstellung entstehen, kann ihr leicht begegnet werden. Ich werde sie im Unterrichtsversuch von mir aus dann thematisieren, wenn sie auch von den SchülerInnen in den weiteren Unterrichtsdurchgängen entwickelt wird.

Die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme wird in der dargestellten Situation gut verstanden. Das deckt sich mit den Erkenntnissen, die aus den Interviews aus Kapitel 4 gewonnen wurden. Die Erklärung anhand einer Geschichte, die im Weltall weitab von der Erde spielt, dürfte den Lernprozess unterstützen, da die SchülerInnen die Vorstellung haben, dass sich im Weltall alles bewegt. Dadurch lassen sich keine „ruhenden“ Referenzpunkte ausmachen.

Um auf dem Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ eine klarere Trennung zwischen der Darstellung der Inertialsysteme und der Darstellung der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme zu erreichen, werden im nächsten Unterrichtsdurchgang auf diesem Arbeitsblatt die Aufgaben 2 bis 6 auf Seite 137 zwischen den vierten und fünften Absatz platziert. In diesem Zusammenhang wird der erste Satz des fünften Absatzes umformuliert zu: *Du wirst vielleicht denken, wenn man aus den Waggonen, in denen sich die Laboratorien befinden, hinausschaut, kann man trotzdem sehen, welcher sich bewegt oder nicht.* Der letzte Satz des fünften Absatzes wird umformuliert zu: *Um das zu klären, betrachten wir einen Vermessungsversuch von Deep Space Nine.* Ich möchte diese Änderung und die Verwendung der Aussage, wonach sich im Weltall alles irgendwohin bewegt, unabhängig testen. Darum wird diese Aussage erst im dritten Unterrichtsdurchgang als Erklärungsversuch erprobt. Das Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ wird durch Aufgabe 7 auf Seite 137 beendet.

6.1.2.3. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Statt der Bezeichnungen „Person A“ und „Person B“ werden im zweiten Unterrichtsdurchgang auf dem Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ Namen verwendet. Gendergerecht wären hier ein Frauen- und ein Männername erforderlich. Auf dem Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ wird jedoch beschrieben, dass die eine Person der anderen folgt. Insbesondere in der Altersgruppe der 14-jährigen kann dadurch der Gedanke stimuliert werden, es handle sich dabei um eine romantisch bedingte Verfolgung, was vom Thema ablenken und den Lernprozess stören würde. Die Verwendung zweier Frauen- oder Männernamen löst das Problem nicht prinzipiell. Darum habe ich mich entschlossen, die Namen eines sehr bekannten Paares zu verwenden, das im



Abbildung 6.3.: Moritz entfernt sich von Max.

allgemeinen Sprachgebrauch in keinem romantischen Kontext verwendet wird: Max und Moritz. Dafür ist die Rad fahrende Person in Abbildung 6.4a auf der nächsten Seite eine Radfahrerin. Ich nehme an, dass aus dem Kontext, in dem diese Abbildung steht, nicht der Gedanke aufkommt, Max hätte Avancen bezüglich der Radfahrerin, wenn er ihr folgt.

Dass Gegenstände in verschiedenen Bezugssystemen unterschiedliche Geschwindigkeiten haben, wird aufgrund der gewählten Darstellung gut verstanden. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird wahrscheinlich nicht gut verstanden. Der Widerspruch zwischen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der klassischen Physik tritt nicht klar genug zu Tage. Darüber hinaus muss der Text des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ komprimiert und mit erläuternden Grafiken versehen werden. Das Arbeitsblatt wird daher für den zweiten Unterrichtsdurchgang neu gefasst. Der Text des Arbeitsblattes wird folgendermaßen formuliert und mit den Abbildungen 6.3 und 6.4 auf der nächsten Seite illustriert:

Max steht auf der Straße. Moritz geht geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit von Max weg (Abbildung 6.3). Max kann Moritz folgen. Von Max aus gesehen ist Moritz dann langsamer. Max kann so schnell gehen, dass er Moritz einholt und überholt.

Auch eine Radfahrerin (Abbildung 6.4a auf der nächsten Seite), ein Auto (Abbildung 6.4b auf der nächsten Seite), eine fliegende Gewehrkegel (Abbildung 6.4c auf der nächsten Seite) oder eine Rakete (Abbildung 6.4d auf der nächsten Seite) ist von Max aus gesehen langsamer, wenn er ihnen nachläuft. Wenn Max ein genügend schnelles Fahrzeug hat, ist es ihm sogar möglich, diese einzuholen und zu überholen. Für einen beliebigen Gegenstand gilt: Wenn Max diesem Gegenstand nachläuft, ist dieser Gegenstand von Max aus gesehen langsamer. Wenn Max ein genügend schnelles Fahrzeug hat, kann er den Gegenstand einholen und überholen.

Licht ist anders. Das hat man am Beginn des 20. Jahrhunderts herausgefunden. Wenn Max einem Lichtstrahl nachläuft, ist dieser von Max aus gesehen nicht

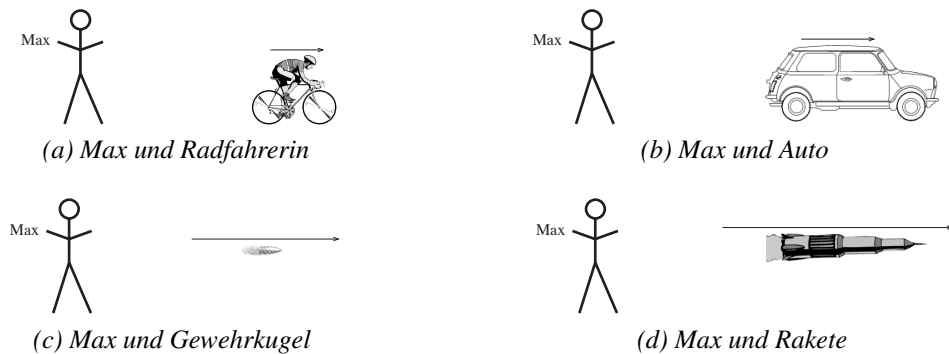


Abbildung 6.4.: Max kann das alles einholen und überholen.¹⁶

langsamer. Auch wenn er die schnellstmögliche Rakete nimmt, ist der Lichtstrahl von Max aus gesehen nicht langsamer. Daher kann Max den Lichtstrahl auch nicht einholen oder überholen.

Geht Max auf der Straße in die entgegengesetzte Richtung zu Moritz, zur Radfahrerin, zum Auto, zur fliegenden Gewehr-kugel oder zur Rakete, so sind diese vom Max aus gesehen schneller. Für einen beliebigen Gegenstand gilt: Wenn Max in die entgegengesetzte Richtung geht als sich dieser Gegenstand bewegt, ist dieser von Max aus gesehen schneller.

Licht ist anders: Geht Max in die entgegengesetzte Richtung zur Richtung eines Lichtstrahls, ist dieser von Max aus gesehen nicht schneller. Auch wenn Max die schnellstmögliche Rakete nimmt, ist der Lichtstrahl von Max aus gesehen nicht schneller.

Es gilt allgemein: Licht ist immer gleich schnell.

Da der Inhalt der Aufgabe 8 auf Seite 138 zum Teil schon im Gespräch mit Schülerin 12 und Schüler 13 vorweggenommen (Zeile 8 von Zitat 243 auf Seite 160) und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht gut verstanden wurde, wurde auf die Aufgaben 8 und 9 auf Seite 138 nicht näher eingegangen. Dadurch konnten diese Aufgaben nicht erprobt werden. Sie bilden zur Erprobung den Abschluss des neu gefassten Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“.

Die SchülerInnen akzeptieren, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ebenso ein physikalisches Grundprinzip ist wie die Erzeugung eines Magnet-

¹⁶Quelle Radfahrerin: <http://www.ksv-roeschitz.at/ksvsektionen.htm> [Stand: 23. Mai 2011], Quelle Auto: <http://www.kinder-malvorlagen.com/zum-ausmalen/vorlagen-transport-autos-fahrzeuge.php> [Stand: 23. Mai 2011], Quelle Kugel: <http://www.fotosearch.de/illustrationen/fürchten-fliegendes.html> [Stand: 23. Mai 2011], Quelle Rakete: <http://astroinfo.astrologix.de/politik/juneur/juneur.htm> [Stand: 23. Mai 2011]

feldes durch elektrischen Strom. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang zusätzlich erproben, wie der Erklärungsversuch, Licht hätte das „Vorrecht“, für alle gleich schnell zu sein, weil es die schnellstmögliche Geschwindigkeit hat, auf die SchülerInnen wirkt.

6.1.2.4. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die SchülerInnen halten den Film für verständlich. Sie können die Argumentation des Filmes in verschiedenen Situationen anwenden. Beim zweiten Unterrichtsdurchgang werde ich den Film nach der Behandlung von Aufgabe 1 auf Seite 129 und nach den Unterrichtssequenzen zu den physikalischen Grundlagen zeigen. Um die Wirkung dieser Änderung besser einschätzen zu können, werde ich nach Aufgabe 1 auf Seite 129 wie im ersten Durchgang gemäß Punkt 5.2.1.3 fortfahren, und noch nicht, wie von Schülerin 12 vorgeschlagen, den Film zunächst ohne Erklärung als Antwort auf Aufgabe 1 auf Seite 129 zu zeigen (Zeilen 14 bis 15 von Zitat 226 auf Seite 153). Diese Änderung werde ich erst im dritten Unterrichtsdurchgang erproben.

Es wird kaum erkannt, welche Rolle die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit spielt. Ich werde beobachten, ob durch die neue Fassung des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ diese Rolle besser zu Tage tritt.

Aufgabe 11 auf Seite 141 wird zu folgender Aufgabe¹⁷ umformuliert:

16. *Beschreibt die Situation, wenn der Konvoi von rechts nach links an der Erde vorbei fliegt. Kommt das Licht von der Erde aus gesehen bei den Shuttles gleichzeitig an? Wenn nein, wo kommt es früher an? Begründet euren Standpunkt.*

Auf Anregung von Schülerin 12 wird Aufgabe 12 auf Seite 141 zu folgender Aufgabe¹⁸ umformuliert:

17. *Was kann man über den Zeitunterschied sagen, mit dem die Lichtsignale von der Erde aus betrachtet bei den Shuttles ankommen, wenn der Konvoi mit einer Geschwindigkeit an der Erde vorbeifliegt, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist? Begründung!*

Um besser einen Bezug zum Alltag herstellen zu können, wird nach Aufgabe 17 folgende Aufgabe¹⁹ eingefügt:

¹⁷Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

¹⁸Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

¹⁹Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

18. *Wieso kommt es im Alltag nicht vor, dass zwei Ereignisse für einen gleichzeitig stattfinden und für den anderen nicht?*

6.1.2.5. Die Lösung

Bis auf Aufgabe 14 auf Seite 142 ist das Arbeitsblatt „Die Lösung“ verständlich. Diese Aufgabe wird für den nächsten Unterrichtsdurchgang zu folgender Aufgabe²⁰ umformuliert:

19. *Vergleicht die Darstellung aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 mit der Situation, wenn im Film der Konvoi von rechts nach links fliegen würde (vergleiche Aufgabe 16 auf der vorherigen Seite). In welcher Reihenfolge sieht die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten ankommen?*

Die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise im einführenden Beispiel können von den SchülerInnen erklärt werden, indem sie das Prinzip der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme anwenden. Die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erwähnen die SchülerInnen nicht. Ich werde beobachten, ob durch die Neufassung der Darstellung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit die Rolle dieses Prinzips besser erkannt wird.

6.2. Zweiter Unterrichtsdurchgang

Im zweiten Unterrichtsdurchgang wird das nach dem ersten Unterrichtsdurchgang revidierte Unterrichtskonzept einer Erprobung unterzogen. Um zu untersuchen, ob durch die Verwendung der Arbeitsblätter wesentliche Verständnisschwierigkeiten verborgen bleiben, führte ich den ganzen zweiten Unterrichtsdurchgang im Frontalunterricht durch. Dabei trug ich den erklärenden Text der Arbeitsblätter sowie die Aufgabentexte frontal vor.

6.2.1. Analyse des zweiten Unterrichtsdurchgangs

6.2.1.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die Ausbreitung des Lichtsignals von der Voyager beschreibe ich mit Hilfe der Abbildung 6.2b auf Seite 171 so:

- 1 **Wittmann:** [...] Die (zeigt auf Voyager in Abbildung 6.2b auf Seite 171; Anm.) stellen sich genau in der Mitte (zwischen den

²⁰Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

- 3 *Planeten; Anm.) auf. Und die (Voyager; Anm.) haben da so*
4 *eine Lichtquelle angebracht (zeichnet eine Lichtquelle an Voya-*
5 *ger in Abbildung 6.2b auf Seite 171; Anm.), so eine ... wie*
6 *eine Glühbirne, so eine große, die einmal kurz aufleuchtet ...*
7 *[...] ... und wenn die aufleuchtet, da geht ja das Licht in alle*
8 *Richtungen (zeichnet Lichtstrahlen radial von der Lichtquelle*
9 *weg in Abbildung 6.2b auf Seite 171; Anm.). Könnt ihr euch das*
10 *vorstellen?*
11 **Schülerin 14:** *(nickt; Anm.)*
12 **Schüler 15:** *(nickt; Anm.)*

Zitat 260

Die SchülerInnen verstehen durch die Darstellung, wie das Lichtsignal von der Voyager ausgesendet wird (Zeilen 11 und 12 von Zitat 260). Sie verstehen in weiterer Folge, dass einer dieser Lichtstrahlen auf Aldubian trifft und einer auf Garcus.

Aufgabe 1 auf Seite 129 beantwortet Schülerin 14 so:

- 1 **Schülerin 14:** *Ich hab keine Ahnung.*

Zitat 261

Schülerin 14 hat keine Idee, wie sie Aufgabe 1 auf Seite 129 lösen könnte (Zitat 261).

Schüler 15 versucht, Aufgabe 1 auf Seite 129 folgendermaßen zu lösen:

- 1 **Schüler 15:** *Vielleicht ist das so, dass da (deutet auf Abbildung 6.2c*
2 *auf Seite 171; Anm.) irgendwie ... was dazwischen da ... ir-*
3 *gendwie was dazwischen war, dass es ziemlich schnell vorbei*
4 *gekommen ist, so ist das Licht von dem (deutet auf Enterprise*
5 *in Abbildung 6.2c auf Seite 171; Anm.) ein bisschen später erst*
6 *aufgezeichnet worden also da.*

Zitat 262

Schüler 15 mutmaßt, ein störendes Medium (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 262) könnte den Lichtstrahl beeinflusst haben (Zeilen 4 bis 6 von Zitat 262), akzeptiert aber, dass ein solches Medium von den Sensoren der Raumschiffe detektiert worden wäre.

Schüler 15 hat eine weitere Idee:

- 1 **Schüler 15:** *Vielleicht ist das so, dadurch, dass die (deutet auf Enter-*
2 *prise und in Flugrichtung Garcus in Abbildung 6.2c auf Sei-*
3 *te 171; Anm.) da daher kommen, messen sie da (deutet auf*
4 *Aldubian in Abbildung 6.2c auf Seite 171; Anm.) erst später;*
5 *weil da das Licht länger zurück braucht. Weil die mit der halben*
6 *Lichtgeschwindigkeit kommen.*

Zitat 263

Schüler 15 meint, Effekte der Lichtlaufzeit könnten die unterschiedlichen Messergebnisse der Voyager und der Enterprise erklären (Zitat 263). Er akzeptiert aber in weiterer Folge, dass diese Effekte einberechnet worden wären. Damit akzeptiert er implizit den Messvorgang als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung.

Um einen Kommentar zu den unterschiedlichen Messergebnissen der Voyager und der Enterprise gebeten sagt Schülerin 14:

- 1 **Schülerin 14:** *Ja, warum weiß der das? Das ist ... weil, die müssen*
2 *ja irgendwie anders messen.*
3 **Wittmann:** *Ja, die messen mit den gleichen Methoden.*
4 **Schülerin 14:** *Ja, aber wieso sollte da was anderes rauskommen?*

Zitat 264

Schülerin 14 ist der Meinung, unterschiedliche Messmethoden hätten die unterschiedlichen Messergebnisse verursacht (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 264). Sie versteht nicht, wieso gleiche Messmethoden hier unterschiedliche Messergebnisse produzieren (Zeile 4 von Zitat 264). Die überraschende Wirkung der Geschichte des einführenden Beispiels kommt besser heraus als beim ersten Unterrichtsdurchgang.

Bei der Erklärung, wodurch die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zustande kommen, übersehe ich, die Rolle der großen Geschwindigkeit hervorzuheben, die die Enterprise bezüglich der Voyager und den Planeten hat. Das hat wahrscheinlich eine interessante Auswirkung aus den Lernprozess. Meine Erklärung und die unmittelbaren Kommentare von Schülerin 14 und Schüler 15 lauteten folgendermaßen:

- 1 **Wittmann:** *[...] Na, sozusagen die Lösung ist die: Das ist wirklich*
2 *so. Das, was für einen gleichzeitig ist, muss es für den anderen*
3 *nicht sein. Das ist wirklich so ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ...*
4 *Du (Schülerin 14; Anm.) machst so große Augen. Sag was.*

- 5 **Schülerin 14:** *Na, ich weiß nicht. Das ist irgendwie ... die Lösung ist*
6 *so einfach. Man denkt immer so kompliziert und dann ...*
7 **Wittmann:** *Ist das einfach?*
8 **Schüler 15:** *Nein.*
9 **Schülerin 14:** *Jetzt, wo man die Lösung kennt, ist es schon, ja.*
10 **Schüler 15:** *Ja, aber davor ...*
11 **Schülerin 14:** *Denkt man sich, warum bin ich nicht draufgekommen,*
12 *aber ...*

Zitat 265

Möglicherweise haben meine Ausführungen (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 265), die die Rolle der Geschwindigkeit nicht enthalten, bei den SchülerInnen den Eindruck erweckt, die Relativität der Gleichzeitigkeit sei ein Alltagseffekt, der ihnen bislang nicht aufgefallen sei. Das würde erklären, warum Schülerin 14 die Lösung, auf die sie nicht gekommen ist (Zeile 11 von Zitat 265), als einfach (Zeilen 6 und 9 von Zitat 265) bezeichnet. Ein bisher unauffälliger Alltagseffekt wäre als Erklärung tatsächlich einfacher als die von den SchülerInnen zuvor erarbeiteten Erklärungsversuche. Schüler 15 dürfte Schwierigkeiten haben, sich die Umstände vorzustellen, unter denen die Relativität der Gleichzeitigkeit bemerkbar wird (siehe auch Zeilen 11 bis 12 von Zitat 266 auf der nächsten Seite). Darum empfindet er die Lösung nicht einfach (Zeile 8 von Zitat 265).

Anschließend demonstriere ich mit dem gleichzeitigen bzw. nicht gleichzeitigen Schnippen mit den Fingern der linken und der rechten Hand, was die Relativität der Gleichzeitigkeit bedeutet. Meine Frage, ob dieses Phänomen nur in dieser Geschichte oder auch im wirklichen Leben vorkommt, beantworten Schülerin 14 und Schüler 15 so:

- 1 **Schülerin 14:** *Ich glaub schon.*
2 **Wittmann:** *Was?*
3 **Schülerin 14:** *Ja, dass es für den einen gleichzeitig ist und für den*
4 *anderen nicht.*
5 **Wittmann:** *Was sagst du?*
6 **Schüler 15:** *Kann schon sein ... ja ...*
7 **Wittmann:** *Einer sagt, beides war um fünf Uhr. Der eine sagt, eines*
8 *war um fünf vor fünf, das andere war fünf nach fünf.*
9 **Schülerin 14:** *Ich glaub, das gibt's.*
10 **Wittmann:** *Aha. Was sagst du?*

- 11 **Schüler 15:** *Das kann's schon geben, aber ich hab keine Ahnung, wie*
12 *das funktionieren soll.*

Zitat 266

Schülerin 14 und Schüler 15 halten die Relativität der Gleichzeitigkeit für einen Effekt, sich im Alltag bemerkbar machen kann (Zeilen 1, 4, 6, 9 und 11 von Zitat 266). Schüler 15 hat offenbar Schwierigkeiten, sich die Umstände vorzustellen (Zeilen 11 bis 12 von Zitat 266), in denen das geschehen kann. Möglicherweise glaubt er, durch die verschwommenen Bilder bei Formel 1-Rennen könnte man die Relativität der Gleichzeitigkeit erkennen (siehe dazu Zitat 304 auf Seite 200).

Um eine Zusammenfassung des physikalisch wesentlichen Inhalts des einführenden Beispiels gebeten sagen Schülerin 14 und Schüler 15:

- 1 **Schülerin 14:** *Na ja, für den einen ist ... finden zwei ... zwei ...*
2 *Dinger ... wie heißt das ...*
3 **Schüler 15:** *... Aktionen zur selben Zeit statt ...*
4 **Schülerin 14:** *... ja genau, zur selben Zeit statt und für einen anderen*
5 *nicht. [...] Weil er das anders aufnimmt oder ...*

Zitat 267

Die SchülerInnen beschreiben die Relativität der Gleichzeitigkeit (Zeilen 1 bis 5 von Zitat 267), wobei Schülerin 14 offenbar immer noch Mess- oder Wahrnehmungsfehler für die Ursache des Effekts hält (Zeile 5 von Zitat 267). Das spricht dafür, dass den SchülerInnen die Rolle der hohen Geschwindigkeit der Enterprise nicht bewusst ist, und sie die Relativität der Gleichzeitigkeit für einen bis jetzt nicht thematisierten Alltagseffekt halten.

Anschließend wollte ich eine Rückmeldung zum einführenden Beispiel:

- 1 **Schüler 15:** *Und wie hat das jetzt eigentlich mit der ... wie ist das*
2 *jetzt zustande gekommen, dass das ... durch die Positionen ...*
3 *durch die Geschwindigkeit ...*
4 *[...]*
5 **Wittmann:** *Sonst noch irgendetwas? War die Geschichte irgendwie zu*
6 *kindisch, zu kindlich, zu blödsinnig?*
7 **Schüler 15:** *Nein.*
8 **Wittmann:** *Akzeptabel?*

9 **Schülerin 14:** Akzeptabel.

10 **Wittmann:** Gut. Wie könnte man es besser machen?

11 **Schülerin 14:** Vielleicht ein bisschen einfacher darstellen. [...] Viel-

12 leicht ein bisschen Geschichte weglassen, sondern irgendwie

13 gleich zum Punkt kommen.

Zitat 268

Schüler 15 will wissen, unter welchen Umständen die Relativität der Gleichzeitigkeit auftreten kann (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 268). Sein Interesse wurde offenbar geweckt, was ein Fortschritt gegenüber dem ersten Unterrichtsdurchgang ist. Die Rolle der Geschwindigkeit dürfte ihm nicht klar geworden sein (Zeile 2 von Zitat 268). Bei der Erklärung, wodurch die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zustande kommen, muss unbedingt die Rolle der Geschwindigkeit, wie sie in Punkt 5.2.1.3 beschrieben ist, hervorgehoben werden. Sonst könnte die Fehlvorstellung entstehen, die Relativität der Gleichzeitigkeit sei ein bisher nicht beachteter Alltagseffekt.

Die kindliche Wirkung der Geschichte des einführenden Beispiels ist verloren gegangen (Zeilen 7 und 9 von Zitat 268). Die Geschichte wird aber als zu lang und deshalb als zu schwierig empfunden. Es sollte gleich zum wesentlichen Punkt gekommen werden (Zeilen 11 bis 13 von Zitat 268).

Auf Nachfrage geben die SchülerInnen an, Raumschiff Enterprise zu kennen, nicht aber Raumschiff Voyager. Sie können aber keine anderen Weltraumserien nennen, die SchülerInnen in ihrem Alter kennen könnten.

Während ich den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] im Anschluss an das einführende Beispiel zeige, gibt Schüler 15 einen nicht verständlichen Kommentar ab. Was er damit meinte, erklärt Schüler 15 im Anschluss an den Film:

1 **Schüler 15:** Ja, dass es beim hinteren zuerst ankommt. Das hab ...

2 so was in der ähnlichen Art hab ich mir schon gedacht, weil

3 das Raumschiff kommt ja entgegen. Dadurch hat das Licht eine

4 kürzere ... Distanz hinzulegen.

Zitat 269

Schüler 15 hat einen wesentlichen Punkt des Filmes sofort erkannt (Zitat 269).

Um einen Kommentar zum Film gebeten sagen Schülerin 14 und Schüler 15:

1 **Schülerin 14:** Es ist eigentlich gut erklärt.

2 [...]

3 **Schülerin 14:** *Also, ich hab's verstanden, glaub ich.*

Zitat 270

Die SchülerInnen finden den Film verständlich (Zitat 270). Die Frage, was sie mit Hilfe des Films verstanden hätten, beantworten Schülerin 14 und Schüler 15 so:

1 **Schülerin 14:** *Na ja, dass wenn man ... von der Erde sieht man's*
2 *anders als wenn man im Weltall ist.*

3 **Wittmann:** *Ja, warum?*

4 [...]

5 **Schüler 15:** *Es gibt zwei Systeme. System A und System B. System*
6 *A ... die beiden Lichtstrahlen werden gleichzeitig losgeschickt,*
7 *reisen mit Lichtgeschwindigkeit. In System A ist ein Beobachter,*
8 *der das glei. ... sieht. Die beiden Lichtstrahlen kommen gleich-*
9 *zeitig an. Von System B aus beobachtet auch jemand glei. ... das*
10 *gleiche Geschehen. Doch hinten kommt ... kommt der Strahl*
11 *zuerst an als vorn.*

12 **Wittmann:** *Warum?*

13 **Schüler 15:** *Weil hinten muss der Strahl eine kürzere Distanz hinlegen,*
14 *weil die ... weil das Schiff, halt das Objekt ...*

15 **Schülerin 14:** *... das fliegt dem entgegen.*

16 **Schüler 15:** *Genau, entgegen.*

17 **Wittmann:** *Ja, also der eine sagt, das ist gleichzeitig, der andere sagt,*
18 *nein, es ist nicht gleichzeitig. Welcher hat jetzt Recht?*

19 **Schülerin 14:** *Beide.*

Zitat 271

Ohne dass vorher auf die physikalischen Grundlagen eingegangen wurde, können die SchülerInnen den Inhalt des Filmes im Großen und Ganzen wiedergeben (Zeilen 5 bis 11 sowie 13 bis 16 von Zitat 271). Sie akzeptieren auch, dass beide Systeme physikalisch gleichwertig sind (Zeile 19 von Zitat 271). Die von mir spontan geäußerte Frage, wer bezüglich Gleichzeitigkeit bzw. Nicht-Gleichzeitigkeit Recht habe (Zeile 18 von Zitat 271), werde ich im nächsten Unterrichtsdurchgang weiter erproben.

Ob die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bereits bekannt sei, beantwortet Schüler 15 folgendermaßen:

- ¹**Schüler 15:** Konstanz? Ich weiß nur die Geschwindigkeit.
²**Wittmann:** Ja, aber von Konstanz hast du noch nichts gehört?
³**Schüler 15:** (schüttelt den Kopf; Anm.)

Zitat 272

Obwohl Schüler 15 noch nichts von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gehört hat (Zitat 272), kann er wesentliche Gedankengänge des Filmes erfassen (Zeilen 5 bis 11 sowie 13 bis 16 von Zitat 271 auf der vorherigen Seite).

Den Übergang nach dem Zeigen des Filmes zu den physikalischen Grundlagen gestalte ich mit folgenden Worten:

- ¹**Wittmann:** [...] O.k, ahm, sozusagen, für die Schule muss man natürlich die Erklärung ein bisschen tiefer machen. Das will ich jetzt
² machen. Aber im Wesentlichen habt ihr das durchaus verstanden.
³ Jetzt wollen wir das ein bisschen mit mehr Erklärung machen
⁴ und schauen, was ihr dann dazu sagt. O.k.?
⁵
⁶**Schülerin 14:** Mhm.

Zitat 273

Schülerin 14 scheint motiviert zu sein, eine tiefer gehende Erklärung für die Relativität der Gleichzeitigkeit zu lernen (Zeile 6 von Zitat 273).

6.2.1.2. Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit

Nach der Sequenz, in der ich die Inertialsysteme unterrichtete, antwortet Schüler 15 auf Aufgabe 2 auf Seite 137 so:

- ¹**Schüler 15:** Dass nichts ... dass nichts messbar ist, keine Geschwin-
² digkeit oder irgendwie ... irgendein Ruckeln merkt ... messbar
³ ist.

Zitat 274

Schüler 15 hat das Wesen des Inertialsystems verstanden (Zitat 274).

Zu Aufgabe 3 auf Seite 137 geben Schülerin 14 und Schüler 15 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 15:** *Man kann messen, mit welcher Geschwindigkeit er fährt*
2 *oder halt ... man kann messen, dass er sich bewegt oder ... ob*
3 *er ...*
4 **Wittmann:** *Ob er sich bewegt?*
5 **Schüler 15:** *... ob er ... ob er die Geschwindigkeit erhöht oder ...*
6 **Wittmann:** *Ja, was spürt man da?*
7 **Schüler 15:** *Durch die ... ah ... durch die Trägheit wird ... wird man*
8 *entweder nach hinten ... bei einem extremen Beispiel, der Zug*
9 *gibt ... hat einen Raketenantrieb ...*
10 *[...]*
11 **Schülerin 14:** *Dann wird man nach hinten gedrückt.*
12 *[...]*
13 **Schüler 15:** *... dann wird man nach hinten gedrückt durch den ...*
14 *durch die Trägheit eben.*

Zitat 275

Schülerin 14 und Schüler 15 verstehen, wie man erkennen kann, dass ein Bezugssystem kein Inertialsystem ist (Zeilen 7 bis 9, 11 und 13 bis 14 von Zitat 275). Aufgabe 4 auf Seite 137 löst Schüler 15 so:

- 1 **Schüler 15:** *Man kann messen mit ... da es kein ... ah ... da es*
2 *ständig die Richtung ändert. Weil es ein Kreis ist.*
3 **Wittmann:** *Ja, ja, was spürt man da? Bist du schon einmal Ringelspiel*
4 *gefahren?*
5 **Schüler 15:** *Ah, die Zentrifugalkraft.*

Zitat 276

Schüler 15 kann den Begriff des Inertialsystems auf ein rotierendes Bezugssystem anwenden (Zitat 276).

Aufgabe 5 auf Seite 137 beantworten Schülerin 14 und Schüler 15 folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 14:** *Das heißt, so ein Zug zum Beispiel.*
2 **Wittmann:** *Da muss man was dazu sagen. Weil, wenn er bremst,*
3 *dann ...*
4 **Schülerin 14:** *Ja, o. k. Ich weiß nichts. Hilf mir.*
5 **Schüler 15:** *Ein U-Boot, das entlang fährt.*

6Wittmann: *Ja, da musst du aber was dazu sagen.*

7Schüler 15: *Es fährt konstant, mit einem Tempo geradeaus.*

Zitat 277

Die SchülerInnen vergessen, die Bewegung zu beschreiben, die ein Bezugssystem haben muss, um ein Inertialsystem zu sein (Zeilen 1 und 5 von Zitat 277). Auf einen entsprechenden Einwand (Zeile 2 von Zitat 277) ist Schülerin 14 so verwirrt, dass sie nicht weiter weiß (Zeile 4 von Zitat 277). Schüler 15 kann mit einem entsprechenden Hinweis (Zeile 6 von Zitat 277) etwas anfangen (Zeile 7 von Zitat 277).

Zu Aufgabe 6 auf Seite 137 gibt Schüler 15 folgende Antwort:

1Schüler 15: *Eine Achterbahn.*

2Wittmann: *Ja. Wieso ist es das nicht? Achter... da muss man was*
3 *dazu sagen.*

4Schüler 15: *Da durch die Kurven und die Neigung nach oben und*
5 *unten und dadurch auch die Trägheit ist Bewegung spürbar.*

Zitat 278

Schüler 15 meint wahrscheinlich das Richtige (Zeile 1 von Zitat 278), weil man meist fährt, wenn man sich auf einer Achterbahn befindet. Er vergisst aber, die Bewegung zu beschreiben. Auf einen entsprechenden Einwand (Zeile 2 von Zitat 278) kann Schüler 15 aber richtig antworten (Zeile 5 von Zitat 278).

Um eine Zusammenfassung zum Thema Inertialsysteme gebeten sagen Schülerin 14 und Schüler 15:

1Schüler 15: *Na gut, also, ein Inertialsystem sind Orte, die sich bewe-*
2 *gen oder nicht bewegen, aber man kann keine Geschwindigkeit*
3 *messen anhand der Trägheit. Entweder sie stehen einfach still*
4 *oder sie bewegen sich konstant mit einer Geschwindigkeit gera-*
5 *deaus.*

6Wittmann: *O. k., gut. Gibt es sonst noch von eurer Seite irgendwelche*
7 *Anmerkungen zu dem Kapitel Inertialsysteme?*

8Schülerin 14: *(schüttelt den Kopf; Anm.)*

9Schüler 15: *(schüttelt den Kopf; Anm.)*

10Wittmann: *War das jetzt verständlich?*

11Schüler 15: *Ja.*

12 **Wittmann:** *Kompliziert? Schwer? Leicht?*

13 **Schülerin 14:** *Verständlich.*

14 *[...]*

15 **Schüler 15:** *Leicht.*

Zitat 279

Was ein Inertialsystem ist, kann Schüler 15 in eigenen Worten erklären. Es ist ihm mittlerweile bewusst, dass die Art der Bewegung des Bezugssystems beschrieben werden muss (Zeilen 1 bis 5 von Zitat 279). Für die SchülerInnen ist der Begriff des Inertialsystems ausreichend behandelt (Zeilen 8 und 9 von Zitat 279). Sie erachten ihn als verständlich (Zeile 13 von Zitat 279) und leicht (Zeile 15 von Zitat 279) dargestellt.

Nach der Präsentation des Inhalts des neunten Absatzes des Textes aus Punkt 5.2.2.1 formuliere ich spontan:

1 **Wittmann:** *[...] Wer hat Recht?*

2 **Schülerin 14:** *Beide.*

3 **Wittmann:** *Beide. Wieso?*

4 **Schülerin 14:** *Ich weiß es nicht.*

5 **Wittmann:** *Aber du sagst vom Gefühl her beide.*

6 **Schülerin 14:** *Ja.*

7 **Wittmann:** *Was sagst du?*

8 **Schüler 15:** *Es sind wirklich beide, glaub ich zumindest, aber dadurch,*
9 *dass Sterne in der Nähe sind ...*

10 *[...]*

11 **Wittmann:** *[...] Ahm, weil du gesagt hast, die Sterne, ahm, wenn man*
12 *die Sterne sieht, kann man dann sagen, ob man ruht oder nicht?*

13 **Schüler 15:** *Nein, weil die sich ... die Sterne auch bewegen.*

14 **Wittmann:** *Genau. Kann ich dann überhaupt sagen, ob was ruht oder*
15 *nicht?*

16 **Schüler 15:** *Nein.*

Zitat 280

Schülerin 14 und Schüler 15 betrachten gefühlsmäßig die Columbus und die Galileo als gleichwertige Inertialsysteme (Zeilen 2 und 8 von Zitat 280). Das deckt sich mit den Ergebnissen aus den Interviews aus Kapitel 4, wonach die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme gut akzeptiert wird. Schüler 15 mutmaßt

zunächst, dass möglicherweise durch nahe Sterne zwischen Ruhe und Bewegung unterschieden werden könnte (Zeile 9 von Zitat 280 auf der vorherigen Seite). Auf Nachfrage verwirft er aber diese Idee mit der Begründung, auch die Sterne würden sich bewegen (Zeile 13 von Zitat 280 auf der vorherigen Seite), und folgert daraus, dass man nicht sagen kann, ob etwas ruht oder nicht (Zeile 16 von Zitat 280 auf der vorherigen Seite). Das ist eine ähnliche Begründung, wie sie Schüler 13 in den Zeilen 17 bis 18 von Zitat 237 auf Seite 157 äußert. Ich werde diesen Gedankengang in die Darstellung der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme einbauen. Die von mir spontan geäußerte Frage, wer bezüglich des Ruhen der Galileo bzw. der Columbus Recht habe (Zeile 1 von Zitat 280 auf der vorherigen Seite), werde ich in die Aufgabenstellungen zur Gleichwertigkeit der Inertialsysteme einbauen.

Nach der Präsentation der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme antworteten Schülerin 14 und Schüler 15, nachdem ich wissen wollte, ob es dazu noch eine Frage gebe:

1 **Schülerin 14:** *(schüttelt den Kopf; Anm.)*

2 **Schüler 15:** *Nein.*

Zitat 281

Die SchülerInnen halten die Darstellung der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme offenbar für verständlich (Zitat 281).

Um eine Zusammenfassung der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme gebeten sagt Schülerin 14:

1 **Schülerin 14:** *Ja, man kann ... also beide haben Recht. Weil man ...*

2 *man kann nicht erkennen, ob ... ob jetzt der ruht oder der. Es*

3 *ist beides. Also der sagt, der ruht. Und wenn ich fahr dorthin,*

4 *dann ist es richtig. Und wenn der ruht und die fahren da rüber,*

5 *ist es auch richtig.*

Zitat 282

Schülerin 14 hat das Prinzip der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme in der dargestellten Situation verstanden (Zitat 282).

Aufgabe 7 auf Seite 137 beantwortet Schüler 15 folgendermaßen:

1 **Schüler 15:** *Dass man nicht messen kann, welches grad ruht oder*

2 *sich bewegt. Es ist einfach ... es ist egal. Beide sind ... ruhen*

3 *zueinander oder bewegen sich zueinander.*

- 4 **Wittmann:** *Mhm, und aus ... sagen wir ... was ... was ist, wenn ich*
5 *sozusagen, einer schaut die Welt an, die andere schaut die Welt*
6 *an, welches Bild ist jetzt das richtigere?*
7 **Schüler 15:** *Es gibt kein richtiges Bild. Es gibt nur zwei ... ah, ah ...*
8 *zwei Blickpunkte ... [...] ... und von denen wird jeweils gese-*
9 *hen.*
10 **Wittmann:** *Richtig. Und ist der eine besser oder schlechter oder sind*
11 *die ...*
12 **Schüler 15:** *Die sind gleich.*

Zitat 283

Schüler 15 hat erkannt, dass die Beschreibungen der Welt mit Hilfe zweier verschiedener Inertialsysteme physikalisch gleichwertig sind (Zeilen 7 bis 9 und 12 von Zitat 283), obwohl dieser Punkt wird auf dem Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ zu wenig thematisiert ist. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang das Verständnis zu diesem Punkt erneut testen.

Um eine Rückmeldung zur Unterrichtssequenz zur Gleichwertigkeit der Inertialsysteme gebeten sagt Schülerin 14:

- 1 **Schülerin 14:** *Verständlich.*

Zitat 284

Schülerin 14 findet die Darstellung der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme verständlich (Zitat 284).

Neben dem Raumschiff Voyager kennen die SchülerInnen auch Deep Space Nine nicht. Die Frage, ob es störend sei, diese zu verwenden, beantworten Schülerin 14 und Schüler 15 so:

- 1 **Schülerin 14:** *Nein.*
2 **Schüler 15:** *Ist nicht schlimm.*
3 **Wittmann:** *Ist das akzeptabel?*
4 **Schülerin 14:** *Ja.*

Zitat 285

Die Verwendung von Raumschiff Voyager und Deep Space Nine stellt für die SchülerInnen kein Problem dar (Zitat 285).

6.2.1.3. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Nachdem anhand von Abbildung 6.3 auf Seite 174 erklärt wurde, dass von Max aus gesehen Moritz langsamer ist, wenn Max Moritz folgt, fragt Schülerin 14:

1 **Schülerin 14:** Na, warum?

2 **Schüler 15:** Na, weil, schau ... dadurch, dass er sich bewegt, das
3 ist genauso wie wenn du ... hast du schon einmal auf einer
4 Autobahn aus dem Fenster geschaut und dann gesehen wie ...

5 **Schülerin 14:** Nein.

6 **Schüler 15:** ... das Auto ... überholen ...

7 **Schülerin 14:** Nein.

8 **Schüler 15:** Das ist genau das Gleiche. Die bewegen sich nicht viel,
9 bewegen sich nicht so schnell, nicht so viel schneller.

10 **Schülerin 14:** Aha.

11 **Schüler 15:** Geht so (zeigt mit den Händen den Überholvorgang;
12 Anm.). Jedoch, wenn du stehst und der fährt da vorbei, ist das irr-
13 sinnig schnell. Dadurch, dass du an Geschwindigkeit zunimmst,
14 ah, hat ... verliert das and. ..., ah, kannst du das andere län-
15 ger im gleichen Win... im gleichen Moment im Auge halten,
16 jedenfalls kannst du ... erscheint's dir langsamer. Je schneller
17 du bist, desto langsamer erscheint der. Ah, das bewegte Objekt
18 oder stehende ...

19 **Schülerin 14:** Ach so, o. k.

Zitat 286

Schüler 15 kann das Prinzip, wonach die Geschwindigkeit eines Gegenstandes vom Bezugssystem abhängt, an einem selbst gefundenen Beispiel aus dem Alltag so lange erklären (Zeilen 2 bis 4, 6, 8 bis 9 und 11 bis 18 von Zitat 286), bis Schülerin 14 dieses Prinzip versteht (Zeile 19 von Zitat 286).

Auf die Frage, ob es klar sei, dass Max, wenn er schnell genug geht, Moritz ein- und überholen kann, antworten Schülerin 14 und Schüler 15:

1 **Schülerin 14:** Ja.

2 **Schüler 15:** Ja.

Zitat 287

Dass man andere FußgängerInnen ein- und überholen kann, macht den SchülerInnen keine gedanklichen Probleme (Zitat 287 auf der vorherigen Seite).

Die Frage, ob die Radfahrerin aus Abbildung 6.4a auf Seite 175 von Max aus gesehen langsamer ist, wenn er ihr nachläuft, beantwortet Schüler 15, der diese Abbildung vorgelegt bekommt, folgendermaßen:

- 1 **Schüler 15:** *O. k. langsamer?*
- 2 **Wittmann:** *Ja.*
- 3 **Schüler 15:** *Es muss nicht heißen, dass es langsam ist.*
- 4 **Wittmann:** *Nein, nein.*
- 5 **Schüler 15:** *Aber langsamer?*
- 6 **Wittmann:** *Ja.*
- 7 **Schüler 15:** *Ja.*
- 8 **Wittmann:** *Ja. Ist oder ist nicht?*
- 9 **Schüler 15:** *Langsamer. Ja.*

Zitat 288

Schüler 15 akzeptiert, dass von Max aus gesehen die Radfahrerin langsamer (Zeile 9 von Zitat 288), aber nicht unbedingt langsam (Zeile 3 von Zitat 288) ist, wenn er ihr nachläuft. In weiterer Folge akzeptiert Schüler 15, dass es für Max unter Zuhilfenahme entsprechender Mittel möglich ist, die Radfahrerin einzuholen und zu überholen.

Auf die Frage, ob das Auto aus Abbildung 6.4b auf Seite 175 von Max aus gesehen langsamer sei oder nicht, wenn er dem Auto nachläuft, antwortet Schülerin 14 so:

- 1 **Schülerin 14:** *Langsamer.*

Zitat 289

Schülerin 14 akzeptiert, dass das Auto von Max aus gesehen langsamer ist, wenn er dem Auto nachläuft (Zitat 289).

Auf die Frage, ob Max, wenn er entsprechende Hilfsmittel hat, das Auto ein- und überholen könne, antworten Schülerin 14 und Schüler 15:

- 1 **Schüler 15:** *Ja.*
- 2 **Schülerin 14:** *Ja.*

Zitat 290



Abbildung 6.5.: Zu Zitat 292

Die SchülerInnen verstehen, dass Max das Auto ein- und überholen kann, wenn er entsprechende Hilfsmittel verwendet (Zitat 290 auf der vorherigen Seite).

Daraufhin formuliert Schüler 15 spontan:

- 1 **Schüler 15:** *Das ist auch beim Gewehr und bei der Gewehrkegel (Ab-*
- 2 *bildung 6.4c auf Seite 175; Anm.) und bei der Rakete (Abbil-*
- 3 *dung 6.4d auf Seite 175; Anm.) so.*

Zitat 291

Schüler 15 versteht, dass alle Gegenstände im Prinzip einholbar und überholbar sind (Zitat 291).

Anhand einer von mir spontan gezeichneten Skizze von Max, vor dem Licht fliegt (Abbildung 6.5), frage ich Schülerin 14 und Schüler 15, ob der Lichtstrahl von Max aus gesehen langsamer sei. Die SchülerInnen antworten:

- 1 **Schüler 15:** *Ja.*
- 2 *[...]*
- 3 **Schülerin 14:** *Ja.*

Zitat 292

Nachdem ich den SchülerInnen erklärte, dass auch von der schnellsten Rakete aus das Licht nicht langsamer ist, wenn sie dem Licht nachfliegt, reagiert Schüler 15 so:

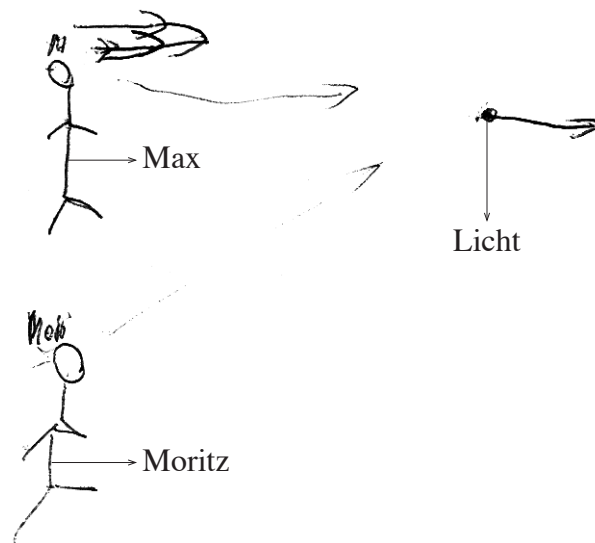


Abbildung 6.6.: Zu Zitat 294 auf der nächsten Seite

- 1 **Schüler 15:** Demnach muss das Licht immer im ..., wenn der jetzt
 2 eine Rakete nimmt, muss das Licht jeweils um die ... um die Ge-
 3 schwindigkeit quasi schneller werden, die auch der Max schnel-
 4 ler wird ...

Zitat 293

Schüler 15 entwickelt die Vorstellung, man würde das Licht gewissermaßen „vor sich her treiben“, wann man ihm nachläuft (Zitat 293). Um dieser Vorstellung zu begegnen, zeichne ich zu Abbildung 6.5 auf der vorherigen Seite den auf dem Boden stehenden Moritz sowie die Pfeile von Max bzw. von Moritz zum Licht, die die Messung der Geschwindigkeit des Lichts andeuten sollen, hinzu (Abbildung 6.6).

Auf die Frage, ob Max und Moritz in Abbildung 6.6 dieselbe Geschwindigkeit für das Licht messen würden, antworten Schülerin 14 und Schüler 15:

- 1 **Schüler 15:** Nein.
 2 **Wittmann:** Was sagst du?
 3 **Schülerin 14:** Ob sie jetzt ... ob sie jetzt ... was ...
 4 **Wittmann:** Schau, da ist EIN Lichtstrahl (zeigt auf das Licht in Abbil-
 5 dung 6.6; Anm.). [...] Der Max (zeigt auf Max in Abbildung 6.6;
 6 Anm.) rennt dem nach und misst die Geschwindigkeit von dem

- 7 *Lichtstrahl. [...] Der Moritz (zeigt auf Moritz in Abbildung 6.6*
8 *auf der vorherigen Seite; Anm.) steht auf der Straße. Der rührt*
9 *sich nicht und misst die Geschwindigkeit vom gleichen Licht-*
10 *strahl. Frage: ...*
11 **Schülerin 14:** *... ob sie das Gleiche messen.*
12 **Wittmann:** *Messen sie das Gleiche oder misst einer was anderes?*
13 **Schülerin 14:** *Hm, ich glaub, dass sie das Gleiche messen.*
14 **Schüler 15:** *Gleiche wär eher logisch.*
15 **Wittmann:** *Weil vorher hast du gesagt, dass sie was anderes messen.*
16 **Schüler 15:** *Ja.*
17 **Wittmann:** *Was hast du da gedacht? Wo hast du gemeint ... wer misst*
18 *mehr; wer misst weniger?*
19 **Schüler 15:** *Dadurch, dass der schneller ist, kann er den Lichtstrahl*
20 *irgend... quasi zu ihm langsamer erscheint ... ein bisschen*
21 *langsamer erscheint ... die Geschwindigkeit ... wenn ich mir's*
22 *recht überlege ... ist eher relativ.*
23 **Wittmann:** *Mhm. Sie messen beide dasselbe. Also sozusagen, bei der*
24 *Rakete wär's nicht und beim Radfahrer. Wenn ich auf der Straße*
25 *stehe und den Radfahrer messe, dann ist der für mich schneller*
26 *als wenn ich dem nachrenn.*
27 **Schüler 15:** *Das ist klar.*
28 **Wittmann:** *Das ... das haben wir schon gehabt. Licht ist anders.*
29 *Einem Lichtstrahl kann ich nachrennen, was immer ich will.*
30 *Der wird nicht langsamer. Der wird von mir aus gesehen nicht*
31 *langsamer ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... Was ... was denkt*
32 *ihr euch jetzt dazu? Was für einen Kommentar gibt's?*
33 **Schüler 15:** *Wie funktioniert das?*
34 *[...]*
35 **Schülerin 14:** *Ja, auch.*

Zitat 294

Schüler 15 ist zunächst der Ansicht, Max und Moritz würden für die Geschwindigkeit des Lichtstrahls Unterschiedliches messen (Zeile 1 von Zitat 294). Das ist logisch, wenn er davon ausgeht, dass Max den Lichtstrahl „vor sich her treibt“ (Zitat 293 auf der vorherigen Seite). Schülerin 14 versteht die Aufgabenstellung nicht (Zeile 3 von Zitat 294), worauf ich die Situation noch einmal erkläre (Zeilen 4 bis 10 von Zitat 294). Schülerin 14 dürfte nun verstanden haben, worum es geht, da sie mir ins Wort fällt und die Frage selbst formuliert (Zeile 11 von

Zitat 294 auf der vorherigen Seite). Schülerin 14 hat wahrscheinlich nicht die Vorstellung entwickelt, Max würde den Lichtstrahl „vor sich hertreiben“. Darum fällt es ihr auch nicht schwer zu antworten, beide würden dasselbe messen (Zeile 13 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite), was ich kurz vorher unterrichtete. Was das bedeutet, dürfte sie aber noch nicht durchdacht haben, da sie nicht überrascht wirkt. Schüler 15 steigt auf ihre Antwort ein (Zeile 14 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite). Er verwirft offenbar sein Konzept vom Lichtstrahl, der von Max „vorangetrieben“ wird (Zitat 293 auf Seite 193), und übernimmt die Aussage, beide würden dasselbe messen. Auch Schüler 15 dürfte nicht durchdacht haben, was das bedeutet, denn er ist nicht nur nicht überrascht, sondern bezeichnet die Messergebnisse sogar als logisch (Zeile 14 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite). Zu dem Widerspruch zu seiner vorhergehenden Aussage angesprochen (Zeilen 15 bis 18 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite) kehrt Schüler 15 zu seiner ursprünglichen Vorstellung zurück, die Geschwindigkeit des Lichts hätte wie ein Gegenstand einen relativen Wert zur Person, die misst (Zeilen 19 bis 22 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite). Dass die Geschwindigkeit eines Gegenstandes einen relativen Wert zur messenden Person hat, was ich noch einmal wiederhole (Zeilen 23 bis 26 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite), ist Schüler 15 klar (Zeile 27 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite). Nachdem ich noch einmal den Unterschied zum Licht herausgearbeitet habe (Zeilen 28 bis 32 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite), reagieren die SchülerInnen überrascht (Zeilen 33 und 35 von Zitat 294 auf der vorherigen Seite). Erst jetzt dürfte ein kognitiver Konflikt aufgetreten sein.

Erst nachdem ich Abbildung 6.6 auf Seite 193 gezeichnet habe, begreifen die SchülerInnen den prinzipiellen Unterschied zwischen den Messwerten der Geschwindigkeit von Gegenständen und der Geschwindigkeit von Licht, die verschiedene, zueinander bewegte Personen erhalten. Möglicherweise unterstützt es den Lernprozess besser, die Geschwindigkeit *eines* Objekts von *zwei* zueinander bewegten Personen zu betrachten wie in Abbildung 6.6 auf Seite 193 als *ein* Objekt von *einer* Person in *zwei* verschiedenen Bewegungszuständen, wie es mit Hilfe der Abbildungen 6.3 auf Seite 174, 6.4 auf Seite 175 und 6.5 auf Seite 192 geschieht.

Im zweiten Unterrichtsdurchgang sind beim Übergang von den Geschwindigkeiten von Gegenständen zur Geschwindigkeit des Lichts zwei Neuerungen aufgetreten. Die eine ist, dass die Geschwindigkeit des Lichts im Gegensatz zur Geschwindigkeit von Gegenständen für alle Personen gleich groß ist. Die andere ist, dass sich die zeichnerischen Darstellungen ändern. In den Abbildungen 6.3 auf Seite 174 und 6.4 auf Seite 175 ist jeweils *eine* Person zu sehen, die die Geschwindigkeit eines Objekts misst, in Abbildung 6.6 auf Seite 193 sind *zwei* Personen zu sehen, die die Geschwindigkeit messen. Es ist möglicherweise

ungünstig, diese beiden Neuerungen gleichzeitig einzuführen. Vielleicht ist das auch der Grund, warum Schülerin 14 die Situation zunächst nicht versteht (Zeile 3 von Zitat 294 auf Seite 194). Da aber mit Hilfe der Darstellungen in den Abbildungen 6.3 auf Seite 174 und 6.4 auf Seite 175 gut verstanden wurde, dass die Werte der Geschwindigkeit von Gegenständen vom Bezugssystem abhängen, in dem man misst, werde ich diese Darstellungen im nächsten Unterrichtsdurchgang beibehalten. Bevor allerdings *ein* Lichtstrahl von *zwei* zueinander bewegten Personen betrachtet wird, muss diese Darstellung anhand der Gegenstände aus Abbildung 6.4 auf Seite 175 thematisiert werden.

Auf die Frage von Schüler 15, wie Max und Moritz für die Geschwindigkeit des Lichts in Abbildung 6.6 auf Seite 193 denselben Wert messen könnten, antworte ich mit der Gegenfrage, wieso elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt. Schülerin 14 meint dazu:

¹Schülerin 14: *Ist einfach so.*

Zitat 295

In weiterer Folge nimmt Schülerin 14 zur Kenntnis, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ebenso ein physikalisches Grundprinzip ist wie die Erzeugung eines Magnetfeldes durch elektrischen Strom.

Die Frage, was man über die Geschwindigkeit von Moritz von Max aus gesehen sagen kann, wenn sich dieser in Abbildung 6.3 auf Seite 174 in die andere Richtung bewegt als Moritz, beantwortet Schüler 15 so:

¹Schüler 15: *Der Moritz bewegt sich schneller.*

Zitat 296

Schüler 15 versteht, dass Moritz von Max aus gesehen schneller ist, wenn er sich in die andere Richtung bewegt als Moritz (Zitat 296). Das gleiche Prinzip versteht Schüler 15 für die Radfahlerin, das Auto, die Gewehrkegel und die Rakete aus Abbildung 6.4 auf Seite 175. Nach der Geschwindigkeit des Lichts befragt, wenn Max sich in die andere Richtung als der Lichtstrahl bewegt, sagt Schüler 15:

¹Schüler 15: *Egal.*

Zitat 297

Schüler 15 kann die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit richtig anwenden, wenn sich Max in die andere Richtung bewegt als der Lichtstrahl (Zitat 297 auf der vorherigen Seite).

Aufgabe 8 auf Seite 138 beantwortet Schüler 15 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 15:** *Kann's trotzdem bei weitem nicht einholen.*
2 **Wittmann:** *Nein, einholen kann's es nicht. Was misst der (Rakete;*
3 *Anm.) für das Licht?*
4 **Schüler 15:** *Das Gleiche.*

Zitat 298

Schüler 15 kann die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auch bei Objekten anwenden, die nahezu Lichtgeschwindigkeit haben (Zitat 298). Aufgabe 9 auf Seite 138 wurde aus Zeitgründen nicht erprobt.

Das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit fasst Schüler 15 so zusammen:

- 1 **Schüler 15:** *[...] Wenn zwei Gegenstände sich hintereinander bewe-*
2 *gen ... voneinander weg bewegen oder zueinander ... [...] ...*
3 *ah, halt der eine und der andere läuft hinterher, erscheint der*
4 *andere Gegenstand entweder schneller oder langsamer. [...]*
5 *Jedoch bei Licht kann man das nicht messen. Es ist ... kann*
6 *man dann keinen Unterschied feststellen. Es ist einfach immer*
7 *gleich schnell.*

Zitat 299

Schüler 15 kann das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit korrekt formulieren (Zitat 299).

Um eine Rückmeldung zum Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gebeten sagt Schüler 15:

- 1 **Schüler 15:** *Wie kann Licht ... nicht mit Energie, aber trotzdem, wie*
2 *kann Licht trotzdem schnell genug sein, um immer die gleiche*
3 *Geschwindigkeit messbar zu sein ... immer mit der gleichen*
4 *Geschwindigkeit messbar zu sein und ob das ... [...] ... ob*
5 *man selber quasi ... [...] ... fast die gleiche Geschwindigkeit*
6 *hat, sodass das immer ein Kilometer pro Sekunde Unterschied ...*
7 *[...] ... ist oder nicht, dass da immer noch ... immer noch die*
8 *gleiche Geschwindigkeit misst wie ...*

- 9 [...]
10 **Wittmann:** [...] Vielleicht kann man's so sagen, dadurch, dass das die
11 schnellste Geschwindigkeit ist, hat das Licht eben das Vorrecht,
12 überall die schnellste Geschwindigkeit zu sein. Und zwar immer
13 die gleiche. Gute Antwort oder Ausrede?
14 **Schüler 15:** Dass immer das Schnellste, ist schon klar. Aber dass,
15 wenn etwas fast gleich schnell ist, dass es trotzdem gleich schnell
16 erscheint, genauso schnell erscheint, ... [...] ... wie wenn
17 jemand ... wie wenn etwas steht, das versteh ich einfach nicht.
18 **Wittmann:** Na gut. Ja, o. k. Aber was soll man machen? [...] Es ist
19 so.
20 **Schüler 15:** Keine Ahnung.
21 **Wittmann:** Na gut. Aber wir müssen's akzeptieren, o. k.?
22 **Schüler 15:** Im Moment schon.

Zitat 300

Schüler 15 versteht den Widerspruch zwischen der klassischen Physik und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Zeilen 1 bis 8 von Zitat 300). Der Erklärungsversuch, wonach Licht das „Vorrecht“ hat, für alle gleich schnell zu sein, hilft Schüler 15 nicht weiter (Zeilen 14 bis 17 von Zitat 300). Schüler 15 gibt zu, dass ihm nichts anderes übrig bleibt, als die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu akzeptieren (Zeile 22 von Zitat 300), ist aber sichtlich unzufrieden (Zeile 18 bis Zeile 20 von Zitat 300).

6.2.1.4. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Nachdem die SchülerInnen den Film ein zweites Mal gesehen haben, antwortet Schüler 15 auf Aufgabe 10 auf Seite 141 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 15:** Die Kon. ..., ah, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit,
2 glaub ich.
3 **Wittmann:** Ja. Kannst du das ein bisschen erklären?
4 **Schüler 15:** Dadurch, dass die Strahlen gleichzeit. ... gleichzeitig los-
5 geschickt werden ... [...] ... sind sie ... zwar ... sind sie
6 gleich schnell. [...] Und das ändert sich nicht. Nur ... nur beim
7 System A, dadurch dass die Licht auch ... dass der Betrachter
8 sich bewegt, ah, merkt man ... merkt derjenige nicht, dass es
9 entweder auch gleichzeitig auch nicht gleichzeitig ist.

Zitat 301

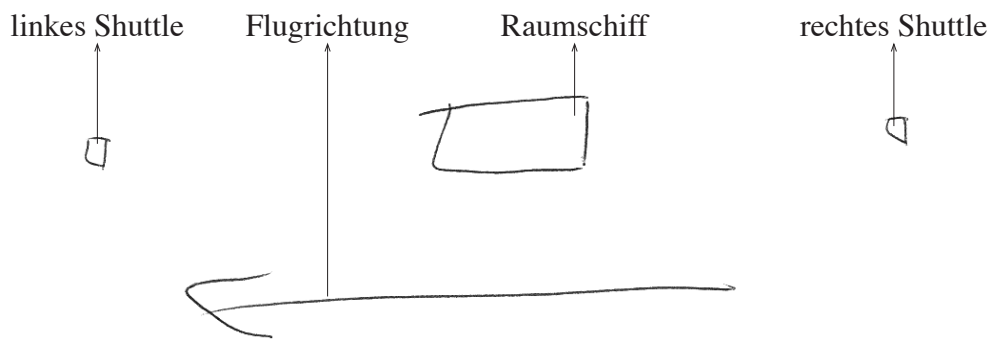


Abbildung 6.7.: Zu Zitat 302

Schüler 15 kann erklären, dass sich die Geschwindigkeit des Lichts nicht ändert (Zeile 6 von Zitat 301 auf der vorherigen Seite), wenn man die Systeme wechselt. Der Effekt kommt durch die Bewegung des einen Betrachters (Zeile 7 von Zitat 301 auf der vorherigen Seite) zustande.

Zu Aufgabe 16 auf Seite 176, die ich mit Hilfe der Skizze in Abbildung 6.7 illustriere, gibt Schüler 15 folgende Antwort:

1 **Schüler 15:** Dann wär's da (deutet auf rechtes Shuttle in Abbil-
 2 dung 6.7; Anm.) zuerst und dann da (deutet auf linkes Shuttle in
 3 Abbildung 6.7; Anm.). [...] Weil dadurch, dass dieses Shuttle
 4 (deutet auf rechtes Shuttle in Abbildung 6.7; Anm.) dem ent...
 5 dem Lichtstrahl entgegen kommt ... [...] ... hat das Licht eine
 6 kürzere Distanz hinzulegen und kommt dadurch früher an. Je-
 7 doch da läuft das (linke; Anm.) Shuttle wie schon in der ... dem
 8 Licht davon und braucht halt länger.

9 **Wittmann:** Ist das klar?

10 **Schülerin 14:** (nickt; Anm.)

Zitat 302

Schüler 15 kann die Argumentation aus dem Film anwenden und damit die zeitliche Reihenfolge des Ankommens der Lichtstrahlen erklären (Zeilen 1 bis 8 von Zitat 302). Schülerin 14 stimmt der Argumentation zu (Zeile 10 von Zitat 302).

Aufgabe 17 auf Seite 176, die ich dadurch spezifiziere, indem ich die Geschwindigkeit des Konvois bezüglich der Erde mit 100 km/h angebe, beantwortet Schüler 15 so:

1 **Schüler 15:** *Minimal. [...] Dadurch, dass ... dass ... dass die Raum-*
2 *schiffe sich wesentlich schneller ... ah, langsamer bewegen,*
3 *wirk... wirken ... eig... sollten eigentlich die Strahlen auch*
4 *wesentlich ... sollten die Strahlen eigentlich schneller wirken*
5 *und dadurch ... [...] ... die Zeitspanne zwischen den beiden*
6 *Momenten, in den... in denen die Strahlen jeweils ankommen, ...*
7 *[...] ... immer kürzer werden, je kürz... langsamer sich die*
8 *bewegen.*

Zitat 303

Schüler 15 kann die Aufgabe korrekt lösen, indem er die Argumentationsweise aus dem Filme anwendet (Zitat 303).

Anstelle der Aufgabe 18 auf Seite 177 formuliere ich spontan:

1 **Wittmann:** *[...] Wie ist das im Alltag mit der Relativität der Gleichzei-*
2 *tigkeit? Wenn man unsere Alltagsgeschwindigkeiten betrachtet?*
3 *Merkt man die oft oder merkt man die nicht, die Relativität der*
4 *Gleichzeitigkeit?*
5 **Schüler 15:** *Eigentlich ziemlich oft, weil ... ziemlich oft Formel 1*
6 *schaut. Das tu ich eigentlich nicht, aber da kann man teilweise*
7 *wirklich ... ist der ja so bei einem Fahrzeug ja so Kameras*
8 *eingebaut ... [...] ... und so kann man das dann sehen.*

Zitat 304

Schüler 15 hält die verschwommenen Bild von Kameras, die auf Formel 1-Wägen montiert sind, für Manifestationen der Relativität der Gleichzeitigkeit (Zeilen 5 bis 8 von Zitat 304). Das kann mehrere Gründe haben. Durch die offene Fragestellung (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 304) werden in Schüler 15 möglicherweise eher Alltagsvorstellungen aktiviert als das zuvor Gelernte. Er äußert keinen Zusammenhang zu Aufgabe 17 auf Seite 176. Nach Zitat 266 auf Seite 181 hält Schüler 15 die Relativität der Gleichzeitigkeit für einen Alltagseffekt, wobei er aber nicht weiß, unter welchen Umständen dieser auftreten kann. Möglicherweise wurde nun durch die Thematisierung der Geschwindigkeit im Unterrichtsdurchgang die Vorstellung ausgelöst, durch die verschwommenen Bilder bei Formel 1-Rennen würde die Relativität der Gleichzeitigkeit sichtbar gemacht.

Um eine Zusammenfassung des Filmes in eigenen Worten gebeten sagen Schülerin 14 und Schüler 15:

- 1 **Schülerin 14:** Na, ja, wenn man ein System A und System B ... Sys-
2 tem B ist, wenn man von der Erde aus betrachtet. [...] Dann
3 ist es dort (deutet nach links; Anm.) schneller, ... [...] ... das
4 Licht, und dort (deutet nach rechts; Anm.) langsamer ...
5 **Wittmann:** Dort kommt's früher an, meinst du?
6 **Schülerin 14:** Ja, genau.[...] Und wenn man da oben ist, ... [...] ...
7 dann kommen sie gleichzeitig an.
8 **Wittmann:** Ja, und wieso ist das so?
9 **Schülerin 14:** Sag du's.
10 **Schüler 15:** Ich hab ... ich hab echt keine Ahnung ... (9 Sekunden
11 Pause; Anm.)
12 **Wittmann:** Wieso kommt es, wenn sich der Konvoi an der Erde be-
13 wegt ... vorbei fliegt, wieso schaut ... wieso ist es von der
14 Erde so, dass das nicht gleichzeitig ist? Woran liegt das? ...
15 (6 Sekunden Pause; Anm.)
16 **Schüler 15:** Vielleicht dadurch, dass die Raumschiff sich entweder
17 schneller oder langsamer als die Erde bewegen ... [...] ... und
18 dadurch kommt eine gewisse Unregelmäßigkeit auch von den
19 Lichtstrahlen.
20 **Wittmann:** Nein.
21 **Schüler 15:** Nein. Das müsste ...
22 **Wittmann:** Im Prinzip haben wir's grad gehabt.
23 **Schüler 15:** Ach so, ja. Dadurch, dass die ... die einen davon fah-
24 ren ... [...] Dieses ... das ...
25 **Wittmann:** Genau. Das ... es ist ... was kann man über die Geschwin-
26 digkeit des Lichts sagen, von der Erde aus und von Raumschiff
27 aus?
28 **Schüler 15:** Herzlich wenig, außer wie schnell es ist, aber sonst ...
29 **Wittmann:** Ja, na, wie schnell es ist, ja, genau. Ja.
30 **Schüler 15:** Aber das ist alles.
31 **Wittmann:** Genau. Was kann ich sagen über die Geschwindigkeit,
32 wenn ich die vergleiche? Was mess ich von der Erde, was mess
33 ich vom Raumschiff aus für die Geschwindigkeit des Lichts?
34 **Schüler 15:** Keinen Unterschied.

Zitat 305

Schülerin 14 kann beschreiben (Zeilen 1 bis 7 von Zitat 305), aber nicht erklären (Zeile 9 von Zitat 305), wie die Relativität der Gleichzeitigkeit zustande

kommt. Schüler 15 kann die Ursache der Relativität der Gleichzeitigkeit auch nicht erklären (Zeile 10 von Zitat 305 auf der vorherigen Seite), vermutet aber gewisse Unregelmäßigkeiten als Gründe (Zeilen 16 bis 19 von Zitat 305 auf der vorherigen Seite). Er kennt die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Zeile 34 von Zitat 305 auf der vorherigen Seite), hält sie aber in diesem Zusammenhang für unerheblich (Zeilen 28 und 30 von Zitat 305 auf der vorherigen Seite), obwohl er in Zitat 301 auf Seite 198 den Sachverhalt richtig beschreibt. Im nächsten Unterrichtsdurchgang muss die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als grundlegende Voraussetzung für die Relativität der Gleichzeitigkeit stärker hervorgehoben werden.

Zum Einsatz des Filmes sagen Schülerin 14 und Schüler 15:

- 1 **Schülerin 14:** *Ich find, man sollte ihn am Anfang zeigen und nachher*
2 *nicht mehr.*
3 *[...]*
4 **Schüler 15:** *Ich würd ... ich würd's, wenn, dann so machen, dass*
5 *man das Ganze dann von Anfang an noch einmal kurz ... in*
6 *Kurzfassung wiederholt und dann erst den Film schaut, damit*
7 *das Ganze besser aufgenommen wird.*

Zitat 306

Schülerin 14 würde den Film nur nach der Geschichte des einführenden Beispiels zeigen (Zeile 1 von Zitat 306). Schüler 15 würde den Film nach den physikalischen Grundlagen ein zweites Mal zeigen, diese aber vorher noch einmal kurz wiederholen (Zeilen 4 bis 7 von Zitat 306).

6.2.1.5. Die Lösung

Aufgabe 13 auf Seite 142 beantwortet Schüler 15 so:

- 1 **Schüler 15:** *Das ist doch die ..., warte, wie ... [...] ... Ine... Iner-*
2 *tialsystem, glaub ich ...*

Zitat 307

Schüler 15 hat sich die genaue Bezeichnung des Begriffs nicht gemerkt, meint aber sicherlich die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme (Zitat 307), was richtig ist.

Nach dem ersten Satz von Aufgabe 19 auf Seite 177 fällt mir Schüler 15 ins Wort:

- 1 **Schüler 15:** *Ist ziemlich exakt das Gleiche.*
2 **Wittmann:** *[...] Was ... entspricht wem im Film? [...]*
3 *[...]*
4 **Schüler 15:** *[...] Ah, das (zeigt auf die Planeten in Abbildung 5.4b*
5 *auf Seite 142; Anm.) sind die beiden kleinen Schiffe ... [...] ...*
6 *und das (zeigt auf Voyager in Abbildung 5.4b auf Seite 142;*
7 *Anm.) ist das Mutterschiff.*
8 **Wittmann:** *[...] im Film wär das (zeigt auf Enterprise in Abbil-*
9 *dung 5.4b auf Seite 142; Anm.) was da?*
10 **Schüler 15:** *Ah ... die Erde.*

Zitat 308

Schüler 15 erkennt die Ähnlichkeit der beiden beschriebenen Situation und versteht, welches Objekt jeweils welchem entspricht (Zitat 308). Das zeigt, dass Aufgabe 19 auf Seite 177 verständlicher gestellt ist als Aufgabe 14 auf Seite 142, wodurch das Arbeitsblatt „Die Lösung“ verbessert wurde.

Aufgabe 19 auf Seite 177 beantwortet Schüler 15 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 15:** *Da (zeigt auf Garcus in Abbildung 5.4b auf Seite 142;*
2 *Anm.). [...] Und dann da (zeigt auf Aldubian in Abbildung 5.4b*
3 *auf Seite 142; Anm.).*
4 **Wittmann:** *Ja. Warum?*
5 **Schüler 15:** *Weil von der Erde aus ges... von der Er... von der Enter-*
6 *prise aus gesehen ... [...] ... dauert ... ah, braucht das Licht*
7 *bis da (zeigt auf Garcus in Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.)*
8 *her nicht so lang, weil es ... weil da kommt der Planet dem*
9 *Licht entgegen ... [...] ... und da (zeigt zwischen Enterprise*
10 *und Aldubian in Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.) geht der*
11 *Planet weg, [...]*

Zitat 309

Schüler 15 kann die Aufgabe richtig lösen (Zeile 1 bis 3 von Zitat 309) und die Lösung begründen (Zeilen 5 bis 11 von Zitat 309).

Zu Aufgabe 15 auf Seite 143 gibt Schüler 15 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 15:** *Ah, dass da (zeigt auf Garcus in Abbildung 5.4b auf Sei-*
2 *te 142; Anm.) der Lichtstrahl zuerst ankommt, zuerst da (zeigt*
3 *auf Garcus in Abbildung 5.4a auf Seite 142; Anm.) und dann da*
4 *(zeigt auf Aldubian in Abbildung 5.4a auf Seite 142; Anm.).*

5 **Wittmann:** *Ja, warum? Was steckt da dahinter?*

6 **Schüler 15:** *Durch die Geschwindigkeit, egal, was sich bewegt, ...*
7 *[...] ... dadurch erscheint ... scheint das Licht ... dadurch,*
8 *dass das Licht immer gleiche Geschwindigkeit zu egal welchem*
9 *Körper hat, ... [...] ... erscheint für jeden ... für alle gleich*
10 *schnell ... erscheint gleich schnell. Nur da geht das ... geht*
11 *das Raumschiff (zeigt auf die Enterprise in Abbildung 5.4a auf*
12 *Seite 142; Anm.) die ganze Zeit zu (zeigt nach rechts in Abbil-*
13 *dung 5.4a auf Seite 142; Anm.) und dadurch wirkt, wenn das*
14 *Raumschiff (Enterprise; Anm.) wirklich so rüber fliegt, wirkt*
15 *das für das Raumschiff (Enterprise; Anm.) ... wirkt das für das*
16 *Raumschiff (Enterprise; Anm.) so, als würden die drei (Planeten*
17 *und Voyager; Anm.) in die Richtung (zeigt nach links; Anm.) ...*

Zitat 310

Schüler 15 kann die Aufgabe richtig lösen (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 310). In seiner Erklärung verwendet er sowohl die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Zeilen 6 bis 10 von Zitat 310) als auch das Prinzip der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme (Zeilen 10 bis 17 von Zitat 310). Dass Schüler 15 die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in seine Erklärung integriert, spricht dafür, dass ihm die Rolle dieses Prinzips mittlerweile mehr bewusst wurde.

Ob das Licht für alle gleich schnell zu sein scheint oder für alle gleich schnell ist, beantwortet Schüler 15 so:

1 **Schüler 15:** *Wenn man ... wenn man den Messungen glauben kann,*
2 *dann ist es so.*

Zitat 311

Für Schüler 15 sind die Messergebnisse zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die er kennt. (Zitat 311).

Um eine Zusammenfassung der Lösung in eigenen Worten gebeten sagt Schüler 15:

1 **Schüler 15:** *[...] Jedenfalls, egal, wie sich die zueinander ... egal,*
2 *wie System A und System B sich zueinander bewegen, da ...*
3 *wenn das System A drei Körper sind und die von ... eines*
4 *exakt in der Mitte ist und gleichzeitig Lichtstrahlen in beide*

- 5 *Richtungen aussendet, wird, ah, bei einem das zuerst ankommen*
6 *als beim ... als beim ... früher ankommen als beim anderen,*
7 *gesehen vom System B. Vom System A aus ge... vom System A*
8 *gesehen kommen sie exakt gleich schnell an.*

Zitat 312

Schüler 15 beschreibt korrekt, wie sich die Relativität der Gleichzeitigkeit in diesem Fall darstellt (Zitat 312).

6.2.1.6. Abschließende Rückmeldung

Um eine Rückmeldung zum gesamten Unterrichtsdurchgang gebeten sagen Schülerin 12 und Schüler 13:

- 1 **Schülerin 14:** *Ich fand's eigentlich ganz gut. Es war auch gut erklärt.*
2 *Und man kann sich das auch so halbwegs gut vorstellen. [...]*
3 *Na, das ist so ... so ... so dargestellt ist mit den ... mit den ...*
4 *mit den Raumschiffen und so, das ist gut.*
5 **Wittmann:** *Mhm. Und hast du das Gefühl, dass du was Neues gehört*
6 *hast, dass du was gelernt hast?*
7 **Schülerin 14:** *Ja, ich hab was gelernt.*
8 **Wittmann:** *Hat ... hat dich das, ah, das Thema, sozusagen, interes-*
9 *siert oder ... findest du es interessant oder sagst du, na ja ...*
10 **Schülerin 14:** *Es ist so interessant gestaltet, [...]*
11 *[...]*
12 **Schüler 15:** *Also, an sich war das ziemlich einfach ... ungefähr ...*
13 *ziemlich leicht ... ziemlich gut so gemacht, dass man es leicht*
14 *versteht. Ich hab's zumindest sehr schnell verstanden.*

Zitat 313

Die SchülerInnen finden das Thema gut erklärt und mit Hilfe der Raumschiffe interessant gestaltet, sodass es leicht verständlich erscheint. Sie haben das Gefühl, etwas gelernt zu haben (Zitat 313). Es ist also sinnvoll, dieses Thema auf diese Art für diese Altersstufe zugänglich zu machen.

6.2.2. Revision nach dem zweiten Unterrichtsdurchgang

Durch den Frontalunterricht habe ich einige spontane formulierte Aufgaben gestellt, die ich in den weiteren Unterrichtsdurchgängen erproben werden. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass möglicherweise scheinbar geringfügige Variationen in gesprochenen Erklärungen Denkprozesse in eine ungünstige Richtung leiten können. Daraus lassen sich Verbesserungen für den Unterricht herleiten. Um ungünstige Variationen in der Darstellung und damit verbundene Verständnisschwierigkeiten zu vermeiden und die SchülerInnen im Sinne einer konstruktivistischen Didaktik aktiv arbeiten zu lassen, werde ich den nächsten Unterrichtsdurchgang wieder mit Hilfe der Arbeitsblätter durchführen.

Auf Basis der Analyse des zweiten Unterrichtsdurchgangs unterziehe ich das für den zweiten Unterrichtsdurchgang überarbeitete Unterrichtskonzept einer Revision. Das überarbeitete Unterrichtskonzept wird in einem weiteren Unterrichtsdurchgang erprobt.

6.2.2.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Durch den frontalen Vortrag der Geschichte des einführenden Beispiels entfällt dessen kindliche Wirkung und tritt die Intention, einen überraschenden Effekt zu präsentieren, stärker hervor. Ebenso fällt die Schwierigkeit weg, die Ausbreitung des Lichtsignals von der Voyager zu beschreiben. Die SchülerInnen vermuten Effekte der Lichtlaufzeit als Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Enterprise und der Voyager, was sich mit den Ergebnissen der Interviews aus Kapitel 4 deckt. Ebenso werden unterschiedliche Messmethoden oder Störungen vermutet. Die SchülerInnen akzeptieren den Messprozess als Datensammlung mit anschließender Auswertung. Die Relativität der Gleichzeitigkeit wirkt auf die SchülerInnen überraschend. Auch dieses stimmt mit den Ergebnissen der Interviews überein. Dadurch, dass ich möglicherweise nicht ausreichend genug auf die Rolle der hohen Geschwindigkeit bei der Relativität der Gleichzeitigkeit hinweise, sind die SchülerInnen bereit, die Relativität der Gleichzeitigkeit sogar als einen Alltagseffekt zu akzeptieren, der ihnen noch nicht aufgefallen ist. Sie verstehen die Geschichte des einführenden Beispiels, finden sie aber zu lang. Sie muss daher auf das Wesentliche gekürzt werden. Somit wird im dritten Unterrichtsdurchgang die Geschichte in der folgenden Version in einer Sequenz Frontalunterricht vorgetragen:

Das sind die Planeten Aldubian und Garcus (SchülerInnen bekommen Abbildung 6.2a auf Seite 171 vorgelegt.). Sie tragen dieses Jahr die galaktischen Spiele, so etwas wie die Olympischen Spiele, gemeinsam aus, so wie Österreich und die Schweiz die Fußball-EM 2008 gemeinsam ausgetragen haben. Es wurde

vereinbart, dass jeder der Planeten eine eigene Eröffnungszeremonie bekommt und dass diese Zeremonien gleichzeitig starten.

Da es sich bei Aldubian und Garcus zufällig um zwei Planeten handelt, deren Abstand sich nie ändert, wird der Startvorgang folgendermaßen bewerkstelligt: Das Raumschiff USS Voyager unter der erfahrenen Kapitänin Kathryn Janeway wird sich genau in der Mitte zwischen Aldubian und Garcus platzieren (SchülerInnen bekommen Abbildung 6.2b auf Seite 171 vorgelegt). An der Voyager ist außen eine Lichtquelle angebracht (Eine Lichtquelle wird außen an die Voyager gezeichnet in Abbildung 6.2b auf Seite 171.), die man sich wie eine riesige Glühbirne vorstellen kann. Diese wird kurz zum Aufleuchten gebracht. Dadurch sendet sie in alle Richtungen Lichtstrahlen aus (Es werden radial Lichtstrahlen von der Lichtquelle weg gezeichnet in Abbildung 6.2b auf Seite 171.). Einer dieser Lichtstrahlen trifft auf Aldubian und einer auf Garcus (Es wird je ein Lichtstrahl von der Lichtquelle zu Aldubian und einer zu Garcus gezeichnet in Abbildung 6.2b auf Seite 171.). Sobald das Licht bei den Planeten ankommt, löst es einen Mechanismus aus, der die jeweilige Zeremonie startet. Alle Vorgänge werden auf der Voyager genau aufgezeichnet und analysiert. Zur Freude der gesamten Mannschaft hat der Vorgang geklappt: Die Spiele begannen auf beiden Planeten gleichzeitig.

Zufällig kommt die USS Enterprise unter dem Kommando von Kapitän James T. Kirk mit halber Lichtgeschwindigkeit vorbei (SchülerInnen bekommen Abbildung 6.2c auf Seite 171 vorgelegt.). Aus Interesse lässt auch Kirk den Startvorgang der galaktischen Spiele aufzeichnen und analysieren. Zum Erstaunen seiner Mannschaft stellt er fest, dass die Spiele auf Garcus früher gestartet wurden als auf Aldubian. Kirk teilt Janeway seine Analyse mit. Er ersucht sie, ihre Daten noch einmal zu prüfen. Er werde das mit seinen ebenfalls tun. Doch die neuerliche Prüfung bringt keine Änderung: Janeway behauptet, die Spiele hätten gleichzeitig begonnen. Kirk behauptet hingegen, die Spiele hätten zuerst auf Garcus und dann auf Aldubian begonnen.

Beim nächsten Unterrichtsdurchgang werde ich mich wieder erkundigen, ob die SchülerInnen die Raumschiffe Enterprise und Voyager kennen. Sollte das nicht der Fall sein, werde ich fragen, ob es störend erscheint, sie in der Geschichte zu verwenden.

Der Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] wird von den SchülerInnen verständlich gefunden. Obwohl sie die physikalischen Grundlagen noch nicht kennen, kann der Inhalt des Filmes im Großen und Ganzen wiedergegeben werden. Dazu bietet der Film einen Ausblick auf das zu Lernende. Das dürfte einen motivierenden Effekt auf die SchülerInnen haben. Darum werde ich im nächsten Unterrichtsdurchgang den Film wieder unmittelbar an das einführende Beispiel zeigen. Wie bereits in Punkt 6.1.2.1 beschrieben, werde ich im nächsten Unter-

richtsdurchgang Punkt 5.2.1.3 weglassen. Ich werde beobachten, ob der Film den SchülerInnen eine adäquate Antwort auf Aufgabe 1 auf Seite 129 gibt. Insbesondere werde ich darauf achten, ob ohne Punkt 5.2.1.3 zu unterrichten, die Fehlvorstellung auftritt, die Relativität der Gleichzeitigkeit sei ein bislang nicht bemerkter Alltagseffekt.

6.2.2.2. Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit

Der Begriff des Inertialsystems wird ausgehend von fahrenden und auf der Erde stehenden Zügen gut verstanden und kann in verschiedenen Situationen angewendet werden. Die SchülerInnen brauchen allerdings die Beschäftigung mit einigen Anwendungsbeispiele, bis sie erkennen, dass zur Charakterisierung eines Inertialsystems dessen Bewegung explizit beschrieben werden muss. Die Anzahl der Anwendungsbeispiele zu diesem Thema kann daher nicht verringert werden.

Das Prinzip von der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme wird in der dargestellten Situation gut verstanden. Das deckt sich mit den Erkenntnissen, die aus den Interviews aus Kapitel 4 gewonnen wurden. Die SchülerInnen akzeptieren, dass die Beschreibungen der Welt mit Hilfe zwei verschiedener Inertialsysteme physikalisch gleichwertig sind. Die Schülervorstellung, man könne im Weltall von Ruhe nicht sprechen, weil sich die Sterne bewegen, kommt der im ersten Unterrichtsdurchgang im gleichen Zusammenhang geäußerten Schülervorstellung nahe, im Weltall bewege sich alles irgendwohin. Ich werde diese Vorstellung bei der Erklärung des Prinzips der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme verwenden. Darum wird im vorletzten Absatz des Texts von Punkt 5.2.2.1 nach dem zweiten Satz folgender Satz eingefügt: *Im Weltraum bewegt sich alles irgendwie.*

Die striktere thematische Trennung vom Begriff des Inertialsystems und dem Prinzip der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme hat sich bewährt. Es kommt nicht mehr zu Vermischung dieser Themenbereiche. Da diese Trennung sinnvoll erscheint, wird das Arbeitsblatt „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ im nächsten Unterrichtsdurchgang in die Arbeitsblätter „Inertialsysteme“ und „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ zerlegt. Die ersten drei Absätze des Texts von Punkt 5.2.2.1 mit den Aufgaben 2 bis 6 auf Seite 137 werden zum Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ zusammengefasst, wobei die letzten drei Sätze des dritten Absatzes ersetzt werden durch: *Bezugssysteme, in denen man sich genauso fühlt wie auf der Erdoberfläche, nennt man Inertialsysteme. Beide Laboratorien in unserem Beispiel sind Inertialsysteme.* Die Absätze 5 bis 12 des Texts von Punkt 5.2.2.1 werden gemeinsam mit den Abbildungen 5.2 auf Seite 134 und 5.3 auf Seite 136 zum Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ zusammengefasst, wobei der erste Satz des fünften Absatzes

ersetzt wird durch: *Im Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ waren zwei Laboratorien auf Waggons beschrieben, in denen man nicht feststellen konnte, ob der Waggon fährt oder auf der Erde steht. Du wirst vielleicht denken, wenn man aus den Waggons hinausschaut, kann man trotzdem sehen, welcher sich bewegt oder nicht.* Das Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ schließt mit Aufgabe 7 auf Seite 137 ab, der folgende Aufgabe²¹ vorangestellt wird, die meiner spontan gestellten Frage in Zeile 1 von Zitat 280 auf Seite 187 entspringt:

20. Die Besatzung der Columbus behauptet, sie würde ruhen. Die Besatzung der Galileo behauptet, sie würde ruhen. Wer hat Recht? Begründung!

Die Beschäftigung mit Aufgabe 20 soll die SchülerInnen unterstützen, die Vorstellung zu entwickeln, dass alle Inertialsysteme physikalisch gleichwertig sind.

Die SchülerInnen kennen neben Raumschiff Voyager auch Deep Space Nine nicht. Die Verwendung dieser Objekte stellt für die SchülerInnen aber kein Problem dar.

6.2.2.3. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Dass der Wert der Geschwindigkeit von Gegenständen vom Bezugssystem abhängt, in dem man misst, wird gut verstanden. Abbildungen 6.3 auf Seite 174 und 6.4 auf Seite 175 werden gut angenommen. Anhand von Abbildung 6.4 auf Seite 175 kann Schüler 15 richtige Hypothesen formulieren. Die SchülerInnen verstehen nach einiger Zeit die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und erkennen die überraschenden Auswirkungen in verschiedenen Situationen. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem ersten Unterrichtsdurchgang. Um den Widerspruch zur klassischen Physik noch prägnanter herausarbeiten zu können, wird im nächsten Unterrichtsdurchgang zum einen die der spontanen gezeichneten Skizze aus Abbildung 6.5 auf Seite 192 nachempfundene Abbildung 6.8 auf der nächsten Seite in das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ eingefügt. Am Ende des ersten Satzes des dritten Absatzes wird auf diese Abbildung verwiesen.

Zum anderen wird die Messung der Geschwindigkeit *eines* Lichtstrahls von *zwei* zueinander bewegten Personen thematisiert, wobei zuvor Überlegungen zur Messung der Geschwindigkeit von *einem* Gegenstand durch *zwei* Personen, die sich zueinander bewegen, angestellt werden. Dazu werden dem Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ folgende Aufgaben²² angefügt:

²¹Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

²²Siehe Fußnote 8 auf Seite 137



Abbildung 6.8.: Lichtstrahl ist immer gleich schnell.

21. Max steht auf der Straße. Eine Radfahlerin fährt von Max weg. Moritz läuft der Radfahlerin nach. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen die Radfahlerin dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist sie langsamer? Begründung!
22. Max steht auf der Straße. Eine Gewehr-kugel fliegt von Max weg. Moritz läuft der Gewehr-kugel nach. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen die Gewehr-kugel dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist sie langsamer? Begründung!
23. Max steht auf der Straße. Ein Auto fährt von Max weg. Moritz läuft in die entgegengesetzte Richtung als die, in die das Auto fährt. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen das Auto dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist es langsamer? Begründung!
24. Max steht auf der Straße. Eine Rakete fliegt von Max weg. Moritz läuft in die andere Richtung als die, in die die Rakete fliegt. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen die Rakete dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist sie langsamer? Begründung!
25. Max steht auf der Straße. Ein Lichtstrahl fliegt von Max weg. Moritz läuft dem Lichtstrahl nach. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen der Lichtstrahl dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist er langsamer? Begründung!
26. Max steht auf der Straße. Ein Lichtstrahl fliegt von Max weg. Moritz läuft in die andere Richtung als die, in die der Lichtstrahl fliegt. Zeichne

die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen der Lichtstrahl dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist er langsamer? Begründung!

In den Aufgaben 21 bis 26 auf der vorherigen Seite müssen die SchülerInnen den Inhalt des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ in einer neuen Situation anwenden und können ihn nicht einfach nur wiedergeben, wodurch verstärkt das Verständnis getestet werden kann. Durch die Zeichnungen, die in den Aufgaben 21 bis 26 auf der vorherigen Seite von den SchülerInnen angefertigt werden sollen, müssen sie nicht abstrakt über physikalische Sachverhalte sprechen, sondern können diese Sachverhalte zuerst zu Papier bringen und dann das Gezeichnete beschreiben. Die Aufgaben 8 und 9 auf Seite 138 werden vom Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ gestrichen, da die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in den Aufgaben 25 und 26 auf der vorherigen Seite enthalten ist.

Die SchülerInnen akzeptieren, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ebenso ein grundlegendes Naturprinzip ist wie die Erzeugung eines Magnetfeldes durch elektrischen Strom. Die SchülerInnen sind bereit, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu akzeptieren, wenn sie sie auch nicht verstehen. Der Erklärungsversuch, Licht habe das „Vorrecht“, für alle gleich schnell zu sein, weil es sich mit der schnellstmöglichen Geschwindigkeit bewegt, hilft den SchülerInnen nicht weiter.

Um hervorzuheben, dass *ein* Lichtstrahl für *zwei* verschiedene Personen, die sich zueinander bewegen, dieselbe Geschwindigkeit hat, wird der letzte Satz des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ ersetzt durch: *Jeder Lichtstrahl ist für alle gleich schnell.*

6.2.2.4. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die SchülerInnen können die Beschreibung aus dem Film, wie die Relativität der Gleichzeitigkeit entsteht, nachvollziehen und anwenden. Sie können auch ansatzweise die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erklären, was ein Fortschritt gegenüber dem ersten Unterrichtsdurchgang ist. Mit Hilfe der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit können die SchülerInnen aber nicht konsequent argumentieren. Um sie intensiver über die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit reflektieren zu lassen, wird Aufgabe 10 auf Seite 141 im nächsten Unterrichtsdurchgang durch folgende Aufgabe²³ ersetzt:

²³Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

27. *Angenommen, ein Lichtstrahl wäre nicht für alle gleich schnell. Wieso könnte man dann nicht sagen, dass im Film von der Erde aus gesehen das Licht beim linken Shuttle früher ankommt als beim rechten?*

Die offene Fragestellung, ob die Relativität der Gleichzeitigkeit im Alltag bemerkbar ist, löst möglicherweise Vorstellungen aus, die irreführend sind. Darum sollte man, sobald die Relativität der Gleichzeitigkeit mit dem Alltag verbunden wird, klar voranstellen, dass dieser Effekt für uns im Alltag nicht wahrnehmbar ist, wie es in Aufgabe 18 auf Seite 177 geschieht. Damit die SchülerInnen einen Anhaltspunkt bekommen, wie sie diese Aufgabe lösen sollen, wird sie zu folgender Aufgabe²⁴ umformuliert:

28. *Wieso kommt es im Alltag nicht vor, dass zwei Ereignisse für einen gleichzeitig stattfinden und für den anderen nicht? (Hinweis: Aufgabe 17 auf Seite 176)*

Die SchülerInnen sind sich nicht einig, ob der Film nach dem Unterrichten der physikalischen Grundlagen ein zweites Mal gezeigt werden soll. Daher werde ich im nächsten Unterrichtsdurchgang nach dem Unterrichten der physikalischen Grundlagen diese noch einmal kurz zusammenfassen und dann die SchülerInnen entscheiden lassen, ob sie den Film ein zweites Mal sehen wollen oder nicht.

Bevor sie ergründen sollen, wie die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise im einführenden Beispiel zustande kommen, sollen sich die SchülerInnen durch die Aufgaben 27, 16 auf Seite 176, 17 auf Seite 176 und 28 mit den physikalischen Inhalten des Filmes auseinandersetzen. Diese Aufgaben werden daher im dritten Unterrichtsdurchgang vom Arbeitsblatt „Die Lösung“ gestrichen und zu einem eigenen Arbeitsblatt „Fragen zum Film“ zusammengefasst, welches den SchülerInnen gegeben wird, nachdem die physikalischen Grundlagen zusammengefasst wurden und eventuell der Film ein zweites Mal gezeigt wurde.

6.2.2.5. Die Lösung

Die SchülerInnen verstehen das gesamte Arbeitsblatt „Die Lösung“, was eine Verbesserung gegenüber den ersten Unterrichtsdurchgang ist. Sie erkennen die Ähnlichkeit der Situation zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und dem Film. Sie können erklären, wie aus der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit die Relativität der Gleichzeitigkeit folgt. Für die SchülerInnen sind die Messergebnisse ebenso

²⁴Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

glaubwürdig wie andere, geläufigere Messergebnisse, was in Einklang mit den Ergebnissen der Interviews aus Kapitel 4 steht. Daher dürften die SchülerInnen die gemessenen Effekte für „real“ und nicht für eine Täuschung halten.

Meine im Dialog mit den SchülerInnen spontan formulierte Frage aus Zeile 2 von Zitat 308 auf Seite 203 baue ich im nächsten Unterrichtsdurchgang in Aufgabe 19 auf Seite 177 ein, die damit zu folgender Aufgabe²⁵ umformuliert wird:

29. *Vergleicht die Darstellung aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 mit der Situation, wenn im Film der Konvoi von rechts nach links fliegen würde. Was entspricht im Film der Enterprise? Was entspricht im Film der Voyager? Was entspricht im Film Aldubian? Was entspricht im Film Garcus? In welcher Reihenfolge sieht die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten ankommen?*

Das Arbeitsblatt „Die Lösung“ besteht also im dritten Unterrichtsdurchgang aus dem Text von Punkt 5.2.3.3 (inklusive Abbildung 5.4 auf Seite 142) und den Aufgaben 13 auf Seite 142, 29 und 15 auf Seite 143.

6.2.2.6. Beispiel

Nach einer Diskussion im Seminar für DissertantInnen und DiplomandInnen habe ich mich entschlossen, das Verständnis der SchülerInnen zur Relativität der Gleichzeitigkeit mit einem abschließenden Beispiel zu testen. Das Beispiel soll auf der Erde spielen und keine Weltraumfahrzeuge enthalten, sodass es die SchülerInnen nicht durch bloße Ähnlichkeitsüberlegungen lösen können, sondern ihr Wissen auf eine völlig neue Situation anwenden müssen. Am Ende des dritten Unterrichtsdurchgangs bekommen die SchülerInnen dieses Beispiel auf einem Arbeitsblatt „Beispiel“, welches aus dem folgenden Text (inklusive Abbildung 6.9 auf der nächsten Seite) und den Aufgaben²⁶ 30 und 31 auf der nächsten Seite besteht, ausgehändigt.

Im europäischen Kernforschungszentrum CERN werden Protonen in Experimenten fast auf Lichtgeschwindigkeit gebracht. Plötzlich wird ein Feueralarm ausgelöst. Feuerwehrmann Max steht auf der Straße, Feuerwehrmann Moritz geht (Abbildung 6.9 auf der nächsten Seite). Die Sirenen sind so geschaltet, dass sie von Max aus gesehen gleichzeitig losheulen.

30. *Heulen die Sirenen auch vom Proton aus gesehen gleichzeitig los? Begründung! Wenn nein, welche heult für das Proton zuerst los? Begründung!*

²⁵Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

²⁶Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

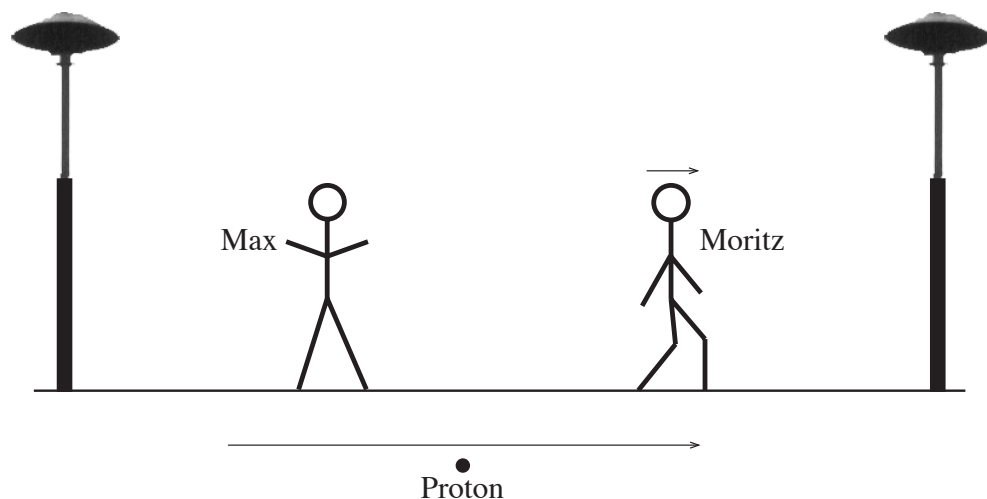


Abbildung 6.9.: Feueralarm beim CERN²⁷

31. Heulen die Sirenen auch von Moritz aus gesehen gleichzeitig los? Begründung! Wenn nein, welche heult für ihn zuerst los? Begründung!

In den Aufgaben 30 auf der vorherigen Seite und 31 sind die Zeitpunkte gemeint, in denen die Sirenen losheulen, und nicht die Zeitpunkte, in denen der Schall bei den Personen oder dem Proton eintrifft. Die Signallaufzeiten müssen berücksichtigt werden.

6.3. Dritter Unterrichtsdurchgang

Im dritten Unterrichtsdurchgang wird das nach dem zweiten Unterrichtsdurchgang revidierte Unterrichtskonzept einer Erprobung unterzogen.

6.3.1. Analyse des dritten Unterrichtsdurchgangs

6.3.1.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Schülerin 16 beantwortet Aufgabe 1 auf Seite 129 folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 16:** Die ... die zwei (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171
- 2 auf Voyager und Enterprise; Anm.), ... [...] ... weil ich mein,
- 3 die sind in Bewegung ... [...] ... und vielleicht ist dadurch ein
- 4 Unterschied entstanden ...

²⁷Quelle Sirene: <http://feurett.beepworld.de/rettungsdienst-nf.htm> [Stand: 20. Juni 2011]

5 [...]

6 **Wittmann:** [...] war's dann wirklich so oder messen die das nur? Was

7 glaubst du?

8 **Schülerin 16:** (6 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung.

Zitat 314

Schülerin 16 vermutet, die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise könnten durch die Bewegung entstanden sein (Zeilen 3 bis 4 von Zitat 314). Schülerin 16 kann aber nicht näher erklären, was sie damit meint. Ob es sich dabei nur um einen Messeffekt handelt, kann sie auch nicht sagen (Zeilen 6 bis 8 von Zitat 314).

Schüler 17 gibt zu Aufgabe 1 auf Seite 129 folgende Antwort:

1 **Schüler 17:** [...] Hm, ich glaub, da messen sie's einfach anders, weil

2 sie sich mit einer anderen Geschwindigkeit vielleicht ... ich weiß

3 nicht genau ... es ... es ist ziemlich ... also ich glaube, dass

4 das untere Raumschiff (Enterprise; Anm.) das einfach anders

5 misst als das obere (Voyager; Anm.), weil die sich von dem

6 Planeten (Aldubian; Anm.) wegbewegen.

Zitat 315

Schüler 17 meint, die Messung würde aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten jeweils anders ablaufen (Zitat 315). Er lässt sich aber in weiterer Folge davon überzeugen, dass auf den beiden Raumschiffen zwar *etwas anderes* gemessen wird, aber mit *gleichen* Messmethoden.

Schüler 17 hat eine weitere Idee zu Aufgabe 1 auf Seite 129:

1 **Schüler 17:** [...] Sie sind genau am gleichen Fleck die zwei Raum-

2 schiffe, beim Messen?

Zitat 316

Mit seiner Frage zielt Schüler 17 auf unterschiedliche Entfernungen der Raumschiff zu den Planeten (Zitat 316) und damit auf Effekte der Lichtlaufzeit. Er akzeptiert aber in weiterer Folge, dass diese Effekte herausgerechnet werden. Damit akzeptiert er auch den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung.

Nach einigem Nachdenken fragt Schülerin 16:

- 1 **Schülerin 16:** (10 Sekunden Pause; Anm.) ... Aber was genau mes-
2 sen ... wie genau messen die das da? [...] Dadurch, dass ich
3 halt nicht genau weiß, welches, ähm, welche Techniken die dazu
4 benutzen um zu messen, ist es mir momentan noch nicht so ganz
5 klar, wo ... was passiert sein könnte, dass sie's unterschiedli-
6 che ...

Zitat 317

Schülerin 16 denkt offenbar daran, dass die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise durch die verwendete Messtechnik (Zeile 3 von Zitat 317) oder durch eine beschränkte Genauigkeit der Messung (Zeile 1 von Zitat 317) zustande kommen. Die Wendung „was passiert sein könnte“ (Zeile 5 von Zitat 317) deutet darauf hin, dass Schülerin 16 an einen Fehler oder ein Missgeschick denkt. Sie akzeptiert in weiterer Folge, dass die Messgeräte beliebig genau messen könnten und das Ergebnis nicht von einem bestimmten Messverfahren abhängt.

Schüler 17 fragt nach:

- 1 **Schüler 17:** Aber es kann ja nicht beides stimmen, oder?
2 **Wittmann:** Das ist die Frage. [...] Frage, kann das so sein. Kann das
3 nicht so sein? ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... Wolltest was
4 sagen?
5 **Schülerin 16:** (schüttelt den Kopf; Anm.)
6 **Schüler 17:** Ja, wie soll das funktionieren? Ich weiß nicht. Also, ich
7 kann mir echt nicht vorstellen.

Zitat 318

Schülerin 16 und Schüler 17 halten die Gleichzeitigkeit offenbar für eine absolute Eigenschaft zweier Ereignisse (Zitat 318). Die SchülerInnen sind von den unterschiedlichen Messergebnissen auf der Voyager und der Enterprise überrascht.

Schüler 17 hat eine weitere Idee:

- 1 **Schüler 17:** Hm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... hat das eine andere
2 Atmosphäre die Planeten oder ...

Zitat 319

Schüler 17 vermutet eine unterschiedliche Beschaffenheit der Planeten als Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zitat 319 auf der vorherigen Seite). Er akzeptiert aber, dass das nicht der Grund dafür ist.

Die SchülerInnen kennen Raumschiff Enterprise, aber nicht Raumschiff Voyager. Sie können keine anderen Weltraumserien nennen, die SchülerInnen ihres Alters kennen könnten, finden aber die Verwendung von Voyager nicht störend. Ob die Geschichte zu kindlich wirke, beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

1 **Schüler 17:** *Nein.*

2 **Schülerin 16:** *Nein.*

3 **Schüler 17:** *Ich glaub, das kann man in einer Schule machen.*

Zitat 320

Die SchülerInnen halten die Geschichte als geeignet für die Schule (Zitat 320).

Schüler 17 fasst die Geschichte des einführenden Beispiels folgendermaßen zusammen:

1 **Schüler 17:** *Na, es geht darum, dass die beiden Raumschiffe, also dass*
2 *die zwei Planeten, [...] Planeten gleichzeitig eine Meisterschaft*
3 *machen wollen. [...] O. k., ahm, dann misst halt ein Raumschiff*
4 *genau in der Mitte, weil das ihre Idee ist, ob, weil die wollen*
5 *auch beide gleichzeitig die Zeremonie beginnen in demselben*
6 *Moment ... [...] ... und dann misst ein Raumschiff in der Mit-*
7 *te, ahm, ob sie es per Lichtsignal senden können, sodass die*
8 *beiden genau denselben Moment erwischen, um die Zeremo-*
9 *nie zu starten. [...] Und das Raumschiff misst das. Und das*
10 *funktioniert bei denen. Und dann kommt aber eben das andere*
11 *Raumschiff her und rein aus Interesse messen die das auch. Mit*
12 *halber Lichtgeschwindigkeit, weiß ich nicht, wahrscheinlich ist*
13 *das wesentlich.*

14 **Wittmann:** *Schnell soll's sein, schnell soll's sein.*

15 **Schüler 17:** *O. k., also es ist sehr schnell. Und, ah, misst aber etwas*
16 *anderes und teilt das denen auch mit. Und die streiten sich und*
17 *werden sich aber nicht einig.*

18 *[...]*

- 19 **Schüler 17:** *Aber das mit der halben Lichtgeschwindigkeit schon ...*
20 *hat schon was damit zu tun oder dass es sehr schnell ist?*

Zitat 321

Schüler 17 kann den Inhalt der Geschichte des einführenden Beispiels richtig zusammenfassen (Zeilen 1 bis 17 von Zitat 321). Der Schüler ist aber nicht sicher, ob es wesentlich ist, dass die Enterprise mit „halber Lichtgeschwindigkeit“ unterwegs ist, oder ob es nur darauf ankommt, dass sie „schnell“ ist (Zeilen 19 bis 20 von Zitat 321). Daher werde ich die Geschichte des einführenden Beispiels für den nächsten Unterrichtsdurchgang modifizieren. Es soll besser ersichtlich werden, dass die Enterprise eine Geschwindigkeit haben soll, die in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit liegt, dass es aber unerheblich ist, dass das Raumschiff *genau* halbe Lichtgeschwindigkeit hat.

In diesem Unterrichtsdurchgang zeige ich den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05], ohne vorher Punkt 5.2.1.3 zu unterrichten. Unmittelbar nach dem Zeigen des Filmes will ich wissen, wie ihn die SchülerInnen als Antwort auf Aufgabe 1 auf Seite 129 annehmen:

- 1 **Wittmann:** *[...] Hat der Film irgendwas mit dem zu tun, was wir jetzt*
2 *gemacht haben?*
3 **Schülerin 16:** *Ja.*
4 **Wittmann:** *Verwirrt er?*
5 **Schülerin 16:** *Nein. [...] Es ... also, es dadurch, wenn das ... wenn*
6 *die Raumschiffe gleich schnell fliegen würden, dann würd das*
7 *auch für beide Raumschiffe so aussehen, als ob's gleichzeitig*
8 *ankommen würde.*

Zitat 322

Schülerin 16 erkennt durch den Film die Rolle der Geschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit (Zeilen 5 bis 8 von Zitat 322). Meine spontan gestellte Frage (Zeile 1 von Zitat 322) verbindet den Film mit der Geschichte des einführenden Beispiels. Ich werde diese Frage für den nächsten Unterrichtsdurchgang als Aufgabe formulieren.

Die Frage, ob ich die Gründe für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise unterrichten hätte sollen, bevor ich den Film zeigte, beantworten Schülerin 16 und Schüler 17 so:

- 1 **Schüler 17:** *Nein, ich glaub, das mit dem Film war schon gut.*

2 **Schülerin 16:** *Der ... der Film war echt gut.*

Zitat 323

Die SchülerInnen halten den Film für gut und die Art und Weise, wie er eingesetzt wurde, für zweckmäßig (Zitat 323).

Auf seine Aussage angesprochen, das Eintreffen der Lichtsignale bei den Planeten können nicht sowohl gleichzeitig als auch nicht gleichzeitig sein (Zeile 1 von Zitat 318 auf Seite 216), sagt Schüler 17:

1 **Schüler 17:** *Na, ja. Es ... hm ... es sieht für beide anders aus, aber*
2 *ist es für beide auch wirklich anders oder schaut's nur anders*
3 *aus?*

4 **Wittmann:** *Das ist das, was die messen. Sie messen es nach allen*
5 *Regeln der Kunst.*

6 **Schüler 17:** *Also ist es für beide wirklich anders?*

7 *[...]*

8 **Schülerin 16:** *Na, es kommt ... wenn alle in der gleichen ... [...] ...*
9 *Geschwindigkeit wären, wenn das da in der ... wenn das auch ...*
10 *[...] ... stehen (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.) würde, dann würde's für die (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.) nicht gelten. [...]*
11 *Nur dadurch, dass andere ... [...] ... eine andere ... [...] ...*
12 *Geschwindigkeit ...*
13
14

Zitat 324

Schüler 17 erkundigt sich, ob lediglich die Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise unterschiedlich seien oder ob das Eintreffen der Lichtsignale für beide wirklich anders sei (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 324). Er regiert erstaunt darauf, dass die Ereignisse für beide Raumschiff tatsächlich zeitlich unterschiedlich sind (Zeile 6 von Zitat 324). Schülerin 16 hat erkannt, dass die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die die Raumschiffe haben, die Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse sind (Zeilen 8 bis 14 von Zitat 324).

Die SchülerInnen nach dem Betrachten des Filmes mit ihren vorherigen Antworten zu Aufgabe 1 auf Seite 129 zu konfrontieren, löst eine Diskussion über den Inhalt des Filmes und seinen Folgerungen aus. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang durch entsprechende Aufgaben erproben, ob durch diese Vorgangsweise wieder eine Diskussion über den Film ausgelöst werden kann.

Schülerin 16 thematisiert noch einmal die unterschiedlichen Messergebnisse bei gleichen Messmethoden, die auf den Raumschiffen angewendet werden:

- 1 **Schülerin 16:** *Die Messmethode ist dieselbe. [...] Wir sehen's anders*
2 *und man misst's anders. [...] Also es ist nicht nur so, dass wir*
3 *das jetzt anders sehen würden ... [...] ... und dass es schon*
4 *richtig gemessen werden würde, sondern es wird auch anders*
5 *gemessen.*
6 **Wittmann:** *[...] Und wenn die beide (Enterprise und Voyager; Anm.)*
7 *die gleiche Geschwindigkeit (zeigt in Abbildung 6.2c auf Sei-*
8 *te 171 nach rechts; Anm.) hätten ...*
9 **Schüler 17:** *Wär's für beide ... [...] Nicht gleichzeitig.*
10 **Wittmann:** *Richtig, ja, genau. Also das ist im Prinzip das ... also die*
11 *Antwort war ... die Antwort ist, ja, das ist wirklich ...*
12 **Schüler 17:** *Weil's verschiedene Geschwindigkeiten ...*

Zitat 325

Schülerin 16 reflektiert über die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zeile 1 bis 5 von Zitat 325). Schülerin 16 ist dabei zu akzeptieren, dass nicht ein „richtig[es]“ (Zeile 4 von Zitat 325) Messergebnis „anders“ (Zeile 3 von Zitat 325) gesehen wurde, sondern dass die Messergebnisse tatsächlich anders sind (Zeilen 4 bis 5 von Zitat 325). Ich werde diesen Punkt im nächsten Unterrichtsdurchgang durch eine entsprechende Aufgabenstellung prägnanter herausarbeiten. Schüler 17 erkennt, dass die beiden Ereignisse auch für die Voyager nicht gleichzeitig stattfänden, wäre sie mit der gleichen Geschwindigkeit unterwegs wie die Enterprise (Zeile 9 von Zitat 325). Er findet auch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Voyager und der Enterprise als Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse (Zeile 12 von Zitat 325).

Um eine Zusammenfassung des Filmes gebeten sagt Schülerin 16:

- 1 **Schülerin 16:** *O. k. Ahm, es ist im Prinzip so, in einem System, in dem*
2 *sich alle gleichzeitig ... mit der gleichen Geschwindigkeit be-*
3 *wegen ... [...] ... und, ahm, etwas ausgesendet wird von der*
4 *Mitte, Lichtstrahlen, dann wirkt das von dem System aus so, also*
5 *ob sie gleichzeitig ankommen würden. Wenn aber ein anderes*
6 *System das beobachtet, das in einer anderen Geschwindigkeit un-*
7 *terwegs ist, dann wirkt es so, als ob es beim Hinfahren schneller*
8 *ankommen würde, weil's so aussieht, als ob das dem nachfliegen*
9 *würde, und das vordere ... ähm, beim vorderen länger brauchen*
10 *würde anzukommen, weil das davon ...*
11 **Wittmann:** *[...] Du hast jetzt ein paar Mal gesagt, WIRKT SO ALS*
12 *OB.*

13 **Schülerin 16:** *Ja oder ist so.*

14 **Wittmann:** *Wirkt es nur so oder ist es so?*

15 **Schülerin 16:** *Es ist so. Oder ich weiß nicht. Ich ... ich ... ich ...*

Zitat 326

Schülerin 16 kann den Inhalt des Filmes richtig wiedergeben (Zeilen 1 bis 10 von Zitat 326). Sie ist aber nicht sicher, ob das Eintreffen der Lichtsignale bei den Planeten für beide Raumschiffe tatsächlich zeitlich unterschiedlich ist, oder ob das nur so wirkt (Zeile 15 von Zitat 326). In weiterer Folge akzeptiert Schülerin 16, dass physikalische Messergebnisse nicht das Produkt eines aus dem Alltag gewohnten Betrachtens einer Situation sind, sondern Resultate normierter und anerkannter physikalischer Verfahren. Diese Resultate werden als „real“ betrachtet.

Nachdem die SchülerInnen keine Fragen mehr bezüglich des Filmes haben, erläutere ich ihnen das weitere Programm dieses Unterrichtsdurchganges: Mit Hilfe der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird die Relativität der Gleichzeitigkeit erklärt. Daraufhin fragt Schüler 17:

1 **Schüler 17:** *Was sind Inertialsysteme?*

Zitat 327

Schüler 17 fragt nach einer Erklärung für einen ihm unbekannten Begriff (Zitat 327). Das deutet darauf hin, dass Schüler 17 motiviert ist, mehr über die Ursache der Relativität der Gleichzeitigkeit zu erfahren.

6.3.1.2. Inertialsysteme

Die Frage, ob der Text des Arbeitsblattes „Inertialsysteme“ verständlich formuliert sei, beantworten Schülerin 16 und Schüler 17 so:

1 **Schülerin 16:** *Ich denk's.*

2 **Schüler 17:** *Ja.*

Zitat 328

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt für verständlich (Zitat 328).

Bezüglich der beiden Laboratorien hat Schüler 17 eine Frage:

- 1 **Schüler 17:** *Na ja, ich hätt jetzt die Frage, ob das wirklich so ist. [...]*
2 *O... ob ... ob's wirklich so ist, dass beide stehen, oder ob der*
3 *eine fährt, aber sie's nur anders messen.*
4 **Wittmann:** *Nein, nein, es ist nicht feststellbar. [...]*
5 **Schüler 17:** *Das ist wieder so was wie mit dem System A und B.*

Zitat 329

Schüler 17 will wissen, ob man vom physikalischen Standpunkt aus beide Laboratorien als ruhend betrachten darf (Zeile 1 bis Zeile 3 von Zitat 329). Schüler 17 kann sofort einen Zusammengang zum Film herstellen (Zeile 5 von Zitat 329) und akzeptiert in weiterer Folge, dass beide Laboratorien als ruhend betrachtet werden dürfen.

Aufgabe 2 auf Seite 137 beantwortet Schüler 17 so:

- 1 **Schüler 17:** *Wahrscheinlich daran, dass man den Unterschied nicht*
2 *messen kann, also daran, dass man nicht messen kann, ob man*
3 *sich bewegt oder nicht.*

Zitat 330

Schüler 17 versteht, dass es darauf ankommt, einen Unterschied zu einem auf dem Boden ruhenden Flugzeug feststellen zu können (Zitat 330).

Aufgabe 3 auf Seite 137 beantwortet Schülerin 16 folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 16:** *Na ja, weil sich ... weil sich da die Sachen ja nicht so*
2 *verhalten als ob er stehen würde, weil sich zum Beispiel Sachen*
3 *bewegen durch die Trägheit.*

Zitat 331

Schülerin 16 versteht, dass es auf das andere Verhalten der Sachen im Zug im Gegensatz zu einem auf dem Boden stehenden Zug ankommt (Zitat 331).

Zu Aufgabe 4 auf Seite 137 geben Schülerin 16 und Schüler 17 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 16:** *Was ist ein Ringelspiel?*
2 *[...]*

- 3 **Schüler 17:** *Ahm, ah, weil man durch die Trägheit nach außen ge-*
4 *drückt wird.*

Zitat 332

Schülerin 16 ist das Wort „Ringelspiel“ nicht sofort geläufig, was aber keine Probleme verursacht, da sie nach einer kurzen Erklärung weiß, was gemeint ist. Schüler 17 kann das Beispiel lösen (Zitat 332).

Aufgabe 5 auf Seite 137 beantwortet Schülerin 16 so:

- 1 **Schülerin 16:** *[...] Im Prinzip alles, was sich ... es kann ja jedes*
2 *bewe... also jedes mögliche Fahrzeug oder ... [...] ... was*
3 *auch immer sein, das sich eben so bewegt. [...] Gleichmäßig*
4 *und so was. [...] Also ein Auto, ein Zug.*

Zitat 333

Schülerin 16 kann Beispiele für Inertialsysteme finden. Sie erfasst, dass es auf die gleichmäßige Bewegung ankommt. (Zitat 333).

Aufgabe 6 auf Seite 137 beantworten Schülerin 16 und Schüler 17 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 17:** *Ahm, ein Sessel, wenn man darauf herumschnebelt. [...]*
2 *Weil ... weil ... weil man sich bewegt und weil man das auch*
3 *eindeutig ...*
4 **Wittmann:** *Na, ja. Sessel, wo man sich ... wo man herumschnebelt. In*
5 *einem Zug kann ich auch herumgehen.*
6 **Schüler 17:** *Ah, gibt nur ... Bewegung muss eindeutig feststellen kann.*
7 *Es ... a... alles, was sich nicht, ahm ... gleichmäßig bewegt.*
8 **Schülerin 16:** *Ja, oder alles was sich im Kreis bewegt oder so was*
9 *Ähnliches.*
10 *[...]*
11 **Wittmann:** *Klar, ist auch nicht gleichmäßig. Ja, und woran merkt man*
12 *das dann, dass es keines ist?*
13 **Schüler 17:** *Man spürt's. [...] Durch Bewegung von sei... sich selber.*
14 *[...] Auch wenn man nichts macht.*

Zitat 334

Schüler 17 denkt wahrscheinlich zunächst an seine unregelmäßigen Bewegungen, wenn er auf einem Sessel herumrutscht und erklärt diesen daher zu keinem Inertialsystem (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 334 auf der vorherigen Seite). Schüler 17 verwechselt seine Bewegung, die er spürt, mit der Bewegung eines Bezugssystems. Er versteht meinen Einwand (Zeilen 4 bis 5 von Zitat 334 auf der vorherigen Seite) und findet Bezugssysteme, die keine Inertialsysteme sind. Er erkennt, dass die nicht gleichmäßige Bewegung wesentlich ist (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 334 auf der vorherigen Seite). Schülerin 16 kann diese Beispiele konkretisieren (Zeilen 8 bis 9 von Zitat 334 auf der vorherigen Seite). Schüler 17 erfasst, dass es nicht auf seine Bewegung ankommt, sondern auf die Bewegung des Systems (Zeilen 13 bis 14 von Zitat 334 auf der vorherigen Seite).

Auf meine Frage, ob der Begriff des Inertialsystems verständlich sei, antwortet Schülerin 16:

1 Schülerin 16: *Mhm.*

Zitat 335

Schülerin 16 ist der Meinung, den Begriff des Inertialsystems verstanden zu haben (Zitat 335). Schüler 17 äußert kein Unverständnis.

Um eine Zusammenfassung des Arbeitsblattes „Inertialsysteme“ gebeten sagt Schüler 17:

1 Schüler 17: *Ahm, also, ah, Physiker werden in einem Zug, ah, gleichmä...*
2 *... also da gibt's zwei Züge. Und in beiden Zügen gibt's*
3 *Physiker. Und die dürfen alles machen in dem Zug. [...] Und*
4 *dann wird der eine Zug gleichmäßig losgeschickt. Also der fährt*
5 *gleichmäßig und ... und, ja, und bewegt sich halt einfach ohne*
6 *Rütteln und ohne Geschwindigkeitsverlust ... [...] ... also,*
7 *weiß nicht, sagt man Dazugewinnung? [...] Ahm, und die ma-*
8 *chen halt Experimente im Zug drinnen und die Fenster werden*
9 *zugeklebt, damit man nicht rausschauen kann. Und dann müssen*
10 *sie herausfinden, ob sie in dem Zug sind, der sich bewegt, oder*
11 *ob sie in dem Zug sind, der steht. [...] Ja, und sie schaffen's*
12 *nicht, weil ... [...] ... es nicht machbar ist.*

13 Wittmann: *Genau. Und was versteht man unter einem Inertialsystem?*

14 Schüler 17: *Ah, also ein ... ein System, in dem man nicht feststellen*
15 *kann, ob man sich bewegt oder nicht.*

Zitat 336

Schüler 17 kann den Inhalt des Arbeitsblattes „Inertialsysteme“ richtig zusammenfassen (Zitat 336 auf der vorherigen Seite). In der Erklärung des Inertialsystems (Zeilen 14 bis 15 von Zitat 336 auf der vorherigen Seite) bezieht er sich offensichtlich auf die Bewegung des Systems und nicht auf die Bewegung vom sich selbst.

6.3.1.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Unmittelbar nachdem er mit dem Lesen des Arbeitsblattes „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ begonnen hat, fragt Schüler 17:

¹**Schüler 17:** *Was ist Deep Space Nine?*

Zitat 337

Die SchülerInnen kennen weder Deep Space Nine (Zitat 337) noch eine andere Raumstation aus dem Bereich der Sciencefiction. Ein Hinweis auf dem Arbeitsblatt, dass es sich bei Deep Space Nine um eine Raumstation handelt, sollte nach Ansicht der SchülerInnen das Problem beheben.

Um einen Kommentar zum Arbeitsblatt gebeten sagen Schülerin 16 und Schüler 17:

¹**Schüler 17:** *Verständlich.*

²**Schülerin 16:** *Verständlich.*

Zitat 338

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt für verständlich (Zitat 338).

Aufgabe 20 auf Seite 209 beantwortet Schülerin 16 so:

¹**Schülerin 16:** *Na, ja, im Prinzip ist es nur von dem einen aus betrachtet. Und man kann das nur anhand von anderen messen ...*
²*[...] ... ob sich da etwas bewegt oder nicht. Deshalb kann ...*
³*kommt also, sobald jemand anderer ... aber man kann sich*
⁴*nicht entscheiden, welcher sich bewegt ... [...] ... bewegt oder*
⁵*nicht, weil das physikalisch nicht wirklich ... weil sich im Prin-*
⁶*zip alles an anderen gemessen ... man kann nur an anderen*
⁷*messen, ob es sich bewegt oder nicht.*
⁸

Zitat 339

Schülerin 16 hat verstanden, dass man Bewegung immer nur in Bezug auf etwas anderes messen kann (Zitat 339 auf der vorherigen Seite).

Schüler 17 hat eine Frage:

- 1 **Schüler 17:** *Wenn man mit Zügen fährt und man sieht all... man sieht*
2 *also nur ... nur den Himmel und ein anderer Zug kommt auf*
3 *einen zu. Und man weiß nicht, ob man bei einem Bahnsteig steht*
4 *oder nicht, ist das auch ein Inertialsystem? [...] Ah, also ist das*
5 *auch Gleichwertigkeit des ... na, ja, wenn sich ... man könnte*
6 *sich selber bewegen oder der andere Zug sich bewegt?*

Zitat 340

Auf Nachfrage spezifiziert Schüler 17, dass er folgende Situation meint: Manchmal, wenn man in einem Bahnhof in einem Zug sitzt und nicht den Bahnsteig, sondern nur einen anderen Zug und den Himmel sieht, und man stellt eine langsame Relativbewegung zwischen dem anderen Zug und sich selbst fest, kann man nicht sagen, ob sich der andere Zug bewegt oder der Zug, in dem man sitzt. Schüler 17 will wissen, ob das mit der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme zusammenhängt (Zitat 340). Er findet damit ein eigenes Beispiel für die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme, das er aus seiner eigenen Erfahrung kennt, und beantwortet dadurch Aufgabe 7 auf Seite 137. Da ich nicht weiß, wie viele SchülerInnen eine solche Erfahrung gemacht haben, werde ich dieses Beispiel nicht in das Arbeitsblatt einbauen, aber die SchülerInnen gegebenenfalls auf diese Situation ansprechen.

Was man unter der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme versteht, formuliert Schüler 17 so:

- 1 **Schüler 17:** *Dass beide inertielle Systeme vom an... von dem anderen*
2 *denken, dass er sich bewegt, ... [...] ... weil die für sich selber*
3 *nicht bewegen könnten.*
4 **Wittmann:** *Bewegen sie sich nicht oder ...*
5 **Schüler 17:** *... oder sie messen, dass sie sich nicht bewegen.*

Zitat 341

Schüler 17 hat verstanden, dass sich beide Systeme als nicht bewegend und somit das jeweils andere als bewegend betrachten können (Zeile 1 bis 3 von Zitat 341). Auf meine Frage (Zeile 4 von Zitat 341) meint er wahrscheinlich, dass sie nicht messen, dass sie sich bewegen (Zeile 5 von Zitat 341).

Um das Verständnis zur Beschreibung der Welt mit Hilfe verschiedener Sichtweisen zu testen (vergleiche Zitat 283 auf Seite 189), frage ich:

- 1 **Wittmann:** [...] Ahm, wenn, sozusagen, ich bin in einem Inertial-
2 system und hätte jetzt zwei Möglichkeiten. Entweder kann ich
3 sagen, ich bewege mich nicht und schau die Welt an, dann sag
4 ich, ich bewege mich und schau die Welt an. Welcher ... welcher
5 Standpunkt ist richtiger?
6 **Schüler 17:** Na ja, wahrscheinlich der ich bewege mich nicht da. Weil ...
7 ich weiß nicht oder beide gleich richtig.
8 **Wittmann:** Was sagst du (Schülerin 16; Anm.)?
9 [...]
10 **Schülerin 16:** Ich glaub, dass das keinen Unterschied macht.

Zitat 342

Schüler 17 ist sich der Antwort nicht sicher (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 342). Schülerin 16 hält beide Beschreibungsmöglichkeiten für physikalisch gleichwertig (Zeile 10 von Zitat 342). Die Gleichwertigkeit verschiedener Beschreibungen der Natur muss durch geeignete Aufgaben noch eingehender thematisiert werden.

Um eine Zusammenfassung des Arbeitsblattes „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ gebeten sagt Schüler 17:

- 1 **Schüler 17:** O. k., äh, es geht darum, dass ... dass die Deep Space
2 Nine, das ist ... [...] ... ein Space Shuttle, ahm, da, weiß
3 nicht, da sind Wolken oder so ... [...] ... auf jeden Fall, die
4 können nicht anhand von etwas anderem messen, ob sie sich
5 bewegen oder nicht. [...] Und die Columbus ist schon bei ihnen.
6 Und, weiß nicht, und bewegt sich in gleichmäßigem Abstand zu
7 ihnen ... [...] ... oder bewegt sich eben nicht zu ihnen. Und
8 die sagen halt, ahm, ja, wir sind jetzt bei euch und wir bewegen
9 uns nicht mehr und wir bleiben aber ich gleichen Abstand. Also
10 müsst ihr euch ... könnt ihr euch auch nicht bewegen. Und dann
11 sagt die Deep Space Nine irgendwie: Ja, ist o. k. oder ... [...]
12 Gut, ahm, und dann kommt eben die Galileo und die kommt noch
13 auf sie zu. Und dann ... die bewegt sich aber auch nicht mehr
14 und sehen sie aber auf sich zukommen. Also ... und dann funken
15 die sie halt wieder an. Und sagen ihnen nein, ganz eindeutig,
16 ihr bewegt euch, weil wir bleiben stehen und wir bewegen uns
17 nicht mehr und ihr kommt aber auf uns zu. Also müsst ihr euch
18 bewegen. [...] Und, ja. [...] Das können sie halt nicht messen.

19 **Wittmann:** *Genau. Und wer hat Recht?*

20 **Schüler 17:** *Niemand. Beide.*

Zitat 343

Schüler 17 kann den Inhalt des Arbeitsblattes richtig wiedergeben (Zeilen 1 bis 18 von Zitat 343). Er hat verstanden, dass die beiden Inertialsysteme physikalisch gleichwertig sind (Zeile 20 von Zitat 343).

Ob sie noch Fragen zum Thema der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme hätten, beantworten Schülerin 16 und Schüler 17 so:

1 **Schülerin 16:** *(schüttelt den Kopf; Anm.)*

2 **Schüler 17:** *(schüttelt den Kopf; Anm.)*

Zitat 344

Die SchülerInnen haben keine weiteren Fragen zum Thema der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme (Zitat 344).

6.3.1.4. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Auf die Frage, ob der Text und die Grafiken auf dem Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ verständlich seien, sagt Schüler 17:

1 **Schüler 17:** *Verständlich.*

Zitat 345

Schüler 17 hält das Arbeitsblatt für verständlich (Zitat 345). Schülerin 16 findet einen Tippfehler. Sonst hat sie nichts zu beanstanden.

Aufgabe 21 auf Seite 210 löst Schüler 17 folgendermaßen:

1 **Schüler 17:** *Die bewegen sich da weg und der Moritz läuft dem nach*

2 *(zeichnet Abbildung 6.10 auf der nächsten Seite; Anm.).*

3 *[...]*

4 **Schülerin 16:** *Vom Moritz aus gesehen ist sie langsamer als vom Max*

5 *aus gesehen. [...] Weil Moritz der Radfaherin hinterherläuft.*

Zitat 346



Abbildung 6.10.: Zu Zitat 346 auf der vorherigen Seite



Abbildung 6.11.: Zu Zitat 347

Schülerin 16 und Schüler 17 können die Aufgabe lösen und die Antwort begründen (Zitat 346 auf der vorherigen Seite, Abbildung 6.10).

Aufgabe 22 auf Seite 210 löst Schüler 17 so:

- 1 **Schüler 17:** Wieder das Gleiche, na. [...] Soll ich's wieder zeichnen?
- 2 **Wittmann:** Na, du kannst sozusagen ... da weg (deckt die Radfahlerin
- 3 in Abbildung 6.10 ab; Anm.).
- 4 **Schüler 17:** Ja (zeichnet die Gewehrkugel zu Abbildung 6.10 unter
- 5 der Radfahlerin hinzu (Abbildung 6.11); Anm.).
- 6 **Wittmann:** Genau, und wie ist es ... wie ist die Geschwindigkeit?
- 7 Messen die dasselbe für die Gewehrkugel oder nicht?
- 8 **Schüler 17:** Nein.
- 9 **Wittmann:** Für wen ist sie langsamer?
- 10 **Schüler 17:** Moritz.
- 11 **Wittmann:** Ja, genau, richtig. Ist ... ist das ... ist das logisch?
- 12 **Schüler 17:** Ja.
- 13 **Schülerin 16:** Mhm.

Zitat 347



Abbildung 6.12.: Zu Zitat 348



Abbildung 6.13.: Zu Zitat 349

Schüler 17 kann die Aufgabe lösen (Zeilen 6 bis 10 von Zitat 347 auf der vorherigen Seite, Abbildung 6.11 auf der vorherigen Seite). Er und Schülerin 16 verstehen, dass der Wert der Geschwindigkeit vom Bezugssystem abhängt, mit Hilfe dessen man misst (Zeilen 12 und 13 von Zitat 347 auf der vorherigen Seite).

Zu Aufgabe 23 auf Seite 210 gibt Schüler 17 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 17:** (zeichnet Abbildung 6.12; Anm.) Ach so, es fährt von ihm
- 2 weg, o. k. [...] Jetzt ist es für den Moritz schneller als für den
- 3 Max.

Zitat 348

Schüler 17 kann die Aufgabe lösen (Zitat 348, Abbildung 6.12).

Aufgabe 24 auf Seite 210 löst Schüler 17 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 17:** Ich hab noch nie eine Rakete gezeichnet (zeichnet die Ra-
- 2 kete zu Abbildung 6.12 unter dem Auto hinzu (Abbildung 6.13);
- 3 Anm.).

4 **Wittmann:** *Ja, und wie ist das wieder mit der Geschwindigkeit?*

5 **Schüler 17:** *Wieder schneller.*

6 **Wittmann:** *Für wen?*

7 **Schüler 17:** *Moritz.*

Zitat 349

Schüler 13 kann die Aufgabe lösen (Zitat 349, Abbildung 6.13 auf der vorherigen Seite).

Aufgabe 25 auf Seite 210 beantworten Schülerin 16 und Schüler 17 so:

1 **Schülerin 16:** *Na, ja, beim Lichtstrahl ist das nichts so, weil Licht-*

2 *strahlen kann man auch nicht ein- oder überholen ... [...] ...*

3 *deshalb wirken sie für beide gleich schnell.*

4 **Wittmann:** *Wirken sie oder sind sie?*

5 **Schülerin 16:** *Sie sind für beide gleich schnell.*

6 **Wittmann:** *Das heißt, wenn ich da jetzt also den Lichtstrahl herzeich-*

7 *ne (zeichnet einen Lichtstrahl mit einem Pfeil über ihm zu Ab-*

8 *bildung 6.11 auf Seite 229 zwischen Moritz und Radfahrerin*

9 *hinzu (Abbildung 6.14 auf der nächsten Seite); Anm.), der in*

10 *die Richtung geht, was messen die beiden (zeigt auf Max und*

11 *Moritz in Abbildung 6.14 auf der nächsten Seite; Anm.) für eine*

12 *Geschwindigkeit?*

13 **Schüler 17:** *Die gleiche.*

14 **Wittmann:** *Richtig.*

15 **Schülerin 16:** *Mhm. [...] Und wenn er in die andere Richtung geht,*

16 *auch.*

17 **Wittmann:** *Wenn der da rüber (zeichnet zu Abbildung 6.14 auf der*

18 *nächsten Seite über Moritz einen Pfeil nach links hinzu (Abbil-*

19 *dung 6.15 auf der nächsten Seite); Anm.) rennt ...*

20 **Schülerin 16:** *Messen sie das Gleiche.*

21 **Wittmann:** *Auch die gleiche Geschwindigkeit, ja. Ahm, ist das einmal*

22 *verständlich, das?*

23 **Schülerin 16:** *Ja.*

24 **Schüler 17:** *(nickt; Anm.)*

Zitat 350

Die SchülerInnen können die Aufgabe lösen (Zeilen 5 und 13 von Zitat 350). Sie können auch Aufgabe 26 auf Seite 210 lösen (Zeilen 15 bis 16, 20, 23 und 24 von Zitat 350).

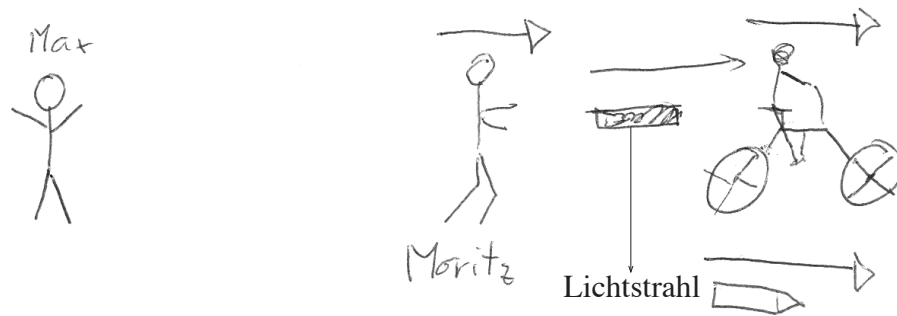


Abbildung 6.14.: Zu Zitat 350 auf der vorherigen Seite

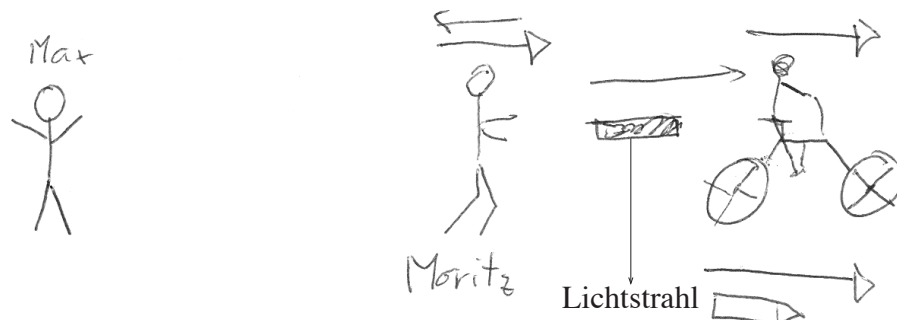


Abbildung 6.15.: Zu Zitat 350 auf der vorherigen Seite

Um die Bitte nach einem Kommentar dazu, dass die Geschwindigkeit des Lichts für alle den gleichen Wert hat, sagen Schülerin 16 und Schüler 17:

1 **Schüler 17:** Ich find's interessant, vor allem, weil dann für dieses
2 Beispiel mit den zwei Planeten eigentlich gelten muss, dass sich
3 die Planeten verschieden schnell bewegen und nicht das Licht,
4 aber, na, ja ...

5 **Wittmann:** Wie meinst du, verschieden schnell bewegen?

6 [...]]

7 **Schülerin 16:** Was ... ich glaub, was er meint ist, dass ... sich das
8 ganze System (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Voyager
9 und die Planeten; Anm.) gleich bewegt. Das, was der (zeigt
10 in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.) anders
11 misst, ... [...] ... dass ... dass er ja nicht ... dass für ...
12 für ihn (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise;
13 Anm.), dass sich das Licht trotzdem genauso bewegt (zeigt in
14 Abbildung 6.2c auf Seite 171 von Voyager nach rechts zu Garcus;

15 *Anm.), wie das man eben sieht, [...]*

Zitat 351

Schüler 17 findet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit interessant (Zeile 1 von Zitat 351). Er wendet zwei wesentliche Punkte der Unterrichtssequenz zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eigenständig auf die Geschichte des einführenden Beispiels an. Er erkennt zum einen, dass die Geschwindigkeit der Planeten von jedem der Raumschiffe gemessen einen anderen Wert hat, und zum anderen, dass das Licht für beide Raumschiffe dieselbe Geschwindigkeit hat (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 351). Da ich nicht sofort verstehe, was Schüler 17 meint (Zeile 5 von Zitat 351), erklärt es Schülerin 16 ausführlicher. Sie versteht, dass sich die Voyager und die der Planeten „gleich beweg[en]“ (Zeilen 7 bis 9 von Zitat 351), das heißt, dass sie in jedem bestimmten Bezugssystem dieselbe Geschwindigkeit haben, die sich aber von der in einem anderen Bezugssystem unterscheiden kann. Es ist diese Geschwindigkeit, die die Enterprise „anders misst“ als die Voyager (Zeilen 9 bis 11 von Zitat 351). Trotzdem bewegt sich das Licht für die Enterprise genauso wie für die Voyager (Zeilen 11 bis 15 von Zitat 351).

Zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit meint Schülerin 16:

1 **Schülerin 16:** *Also ich mein im ersten ... im ... ich weiß nicht ob*
2 *man da draufkommt, dass das ... [...]* *Ja, das mein ich, dass es*
3 *ein bisschen überraschend kommt, dass sich Licht genau anders*
4 *verhält als die andern ..., also ich hätt mir ... ja, nicht gedacht,*
5 *aber ...*

Zitat 352

Schülerin 16 hätte die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht erwartet und findet sie überraschend (Zitat 352).

Eine Unzufriedenheit über die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wie im vorherigen Unterrichtsdurchgang (siehe Zitat 300 auf Seite 198) äußern die SchülerInnen nicht. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Die Frage, ob der Inhalt der Unterrichtssequenz zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verständlich sei, beantworten Schülerin 16 und Schüler 17 so:

1 **Schüler 17:** *Ja.*

2Schülerin 16: *Ja.*

Zitat 353

Die SchülerInnen halten die Unterrichtssequenz zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für verständlich (Zitat 353).

Um eine Zusammenfassung der Unterrichtssequenz gebeten sagt Schülerin 16:

1Schülerin 16: *Ja, also im Prinzip, wenn ... wenn sich der Max in die*
2 *gleiche Richtung bewegt wie ein Auto oder eine Rakete oder*
3 *was auch immer, ... [...] ... dann wirkt's für ihn, als ob das*
4 *langsamer fahren würde als wenn jemand anderes steht. [...]*
5 *Und wenn er in die entgegengesetzte Richtung zu den hinrennt,*
6 *dann wirkt's für den schneller. [...] Nur eben für Licht gilt das*
7 *nicht, weil egal aus welcher Position, Licht fliegt immer gleich*
8 *schnell.*

Zitat 354

Schülerin 16 kann die Tatsache, dass die Geschwindigkeit von Gegenständen in verschiedenen, zueinander bewegten Bezugssystemen unterschiedliche Werte hat, und in diesem Zusammenhang das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit formulieren (Zitat 354).

6.3.1.5. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die SchülerInnen erachten es nicht für notwendig, den Film noch einmal zu sehen, bevor sie die Aufgaben auf dem Arbeitsblatt „Fragen zum Film“ bearbeiten.

Aufgabe 27 auf Seite 212 beantwortet Schüler 17 und Schülerin 16 so:

1Schüler 17: *Ahm, weil sich dann wieder mit dem Inertialsystem mit*
2 *bewegen würde und damit wär das wieder ...*
3Wittmann: *Ja, aber das ein bisschen genauer. [...]*
4Schüler 17: *Weil das mit dem hin... hingehen und weggehen, dass*
5 *sich dann die Geschwindigkeit nicht verändert, ... [...] ...*
6 *dass ... dass dann gleich aussieht. Also dass dann gleich an-*
7 *kommen würde ... [...] ... für den außen Stehenden. Dass sie*
8 *sich im Inertialsystem genauso bewegen wie im ... im anderen*
9 *Inertialsystem.*

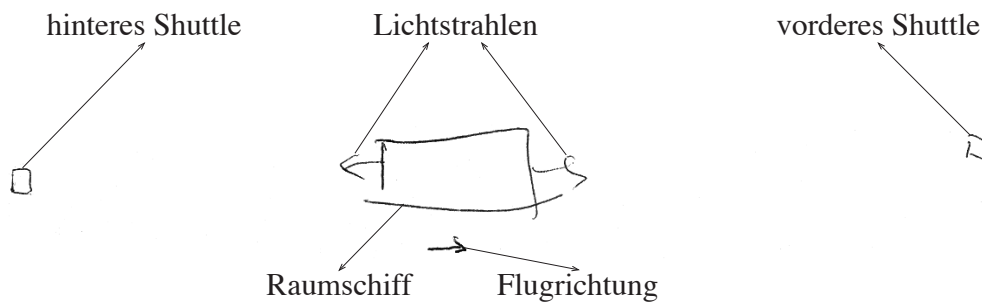


Abbildung 6.16.: Zu Zitat 355

10 **Wittmann:** Mhm, ja, vielleicht ... vielleicht. Was sagst du (Schülerin 16; Anm.)?

12 **Schülerin 16:** Ähm, also gemeint ist damit, ähm, bei diesen vorbeifliegenden drei ...

14 **Wittmann:** Ja, du hast sozusagen, du hast ja das gehabt, du hast da gehabt, dieses ... wart einmal ...

16 **Schülerin 16:** Dieses System von diesen drei ...

17 **Wittmann:** ... du hast da dieses Mutterschiff in der Mitte (zeichnet das Raumschiff in Abbildung 6.16; Anm.) ...

19 **Schülerin 16:** Ja, in der Mitte. Und dann ...

20 **Wittmann:** ... das sind sie Shuttles hinten und vorne (zeichnet die Shuttles in Abbildung 6.16; Anm.)

22 **Schülerin 16:** ... und von der Erde aus gesehen fliegen die in ...

23 **Wittmann:** ... in die Richtung (zeichnet einen Pfeil nach rechts in Abbildung 6.16; Anm.).

25 **Schülerin 16:** ... diese Richtung ... [...] ... und deshalb sieht, weil das Licht sich ... wirkt ... wenn das Licht jetzt aber ... also im Prinzip würd's dann das ... würde das Licht dann, wenn ... wenn das genauso sein ... reagieren würde wie ... wie ... wie die anderen ... [...] ... dann würde das für die Erde in diese Richtung (zeigt nach rechts; Anm.) schneller sein als in die Richtung (zeigt nach links; Anm.), ... [...] ... weil ... weil das ... weil ... weil's mit ... weil's mit dem, ähm, weil's ... weil's dem entgegen kommt (zeigt auf vorderes Shuttle in Abbildung 6.16; Anm.) ... [...] ... und dem (zeigt auf hinteres Shuttle in Abbildung 6.16; Anm.) ... [...] ... mit dem ... [...] ... mitfliegt.

Zitat 355

Schüler 17 hat zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit offenbar die Vorstellung entwickelt, dass das Licht sich mit dem Bezugssystem nicht mitbewegt (Zeile 1 von Zitat 355 auf der vorherigen Seite). Dadurch wird das Licht bei Abschuss von dem System im Gegensatz zu einem Körper nicht „mitgerissen“. Somit hat Licht in beiden Systemen dieselbe Geschwindigkeit (Zeilen 4 bis 9 von Zitat 355 auf der vorherigen Seite). Was Schüler 17 sagt, ist richtig. Ich bin mir aber nicht sicher, ob er verstanden hat, was der springende Punkt in der Argumentation ist. Darum frage ich Schülerin 16 (Zeile 10 von Zitat 355 auf der vorherigen Seite). Sie argumentiert konkreter: Würde sich das Licht so verhalten wie die anderen Gegenstände, wäre es von der Erde aus gesehen in Flugrichtung schneller als gegen die Flugrichtung des Konvois (Zeilen 27 bis 31 von Zitat 355 auf der vorherigen Seite). Dadurch „eilt“ es zum vorderen Shuttle („weil’s dem entgegen kommt“; Zeilen 32 bis 34 von Zitat 355 auf der vorherigen Seite) und ist zum hinteren Shuttle langsamer unterwegs, weil es mit dessen Geschwindigkeit „mitfliegt“ (Zeile 35 von Zitat 355 auf der vorherigen Seite).

Die SchülerInnen äußern beide die Vorstellung des Mitfliegens von Gegenständen im Gegensatz zum Licht. Ich werde diese Vorstellung in den nächsten Unterrichtsdurchgängen als Erklärung erproben, falls SchülerInnen Verständnisschwierigkeiten zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit haben.

Schülerin 16 argumentiert konkreter, nachdem ich die Skizze aus Abbildung 6.16 auf der vorherigen Seite gezeichnet habe. Möglicherweise unterstützt eine solche Zeichnung den Lernprozess. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang die Verwendung einer Skizze durch eine entsprechende Aufgabenstellung erproben.

Aufgabe 16 auf Seite 176 beantworten Schüler 17 und Schülerin 16 folgendermaßen:

1 **Schülerin 16:** Umgekehrt.

2 **Schüler 17:** Ja.

3 **Schülerin 16:** Also dann würd’s ... vorhin ist es bei dem (zeigt auf
4 das linke Shuttle in Abbildung 6.16 auf der vorherigen Seite;
5 Anm.) ... [...] ... früher angekommen und dann würd’s bei
6 dem (zeigt auf das rechte Shuttle in Abbildung 6.16 auf der
7 vorherigen Seite; Anm.) früher ankommen und bei dem später
8 (zeigt auf das linke Shuttle in Abbildung 6.16 auf der vorherigen
9 Seite; Anm.).

10 **Wittmann:** Ja, kannst du ... kannst du’s ... das stimmt, sozusagen,
11 man kann natürlich sagen, wenn’s umgekehrt ist, ist es umge-
12 kehrt. Aber wie kann man das sozusagen mit der Bewegung des
13 Lichts oder mit der Bewegung von dem Ganzen beschreiben?

14 [...]

15 **Schülerin 16:** Aber, ahm, da das in die Richtung (zeigt nach links;
16 Anm.) fährt, ist es ... ist ... ist für die Erde das (zeigt auf
17 den Lichtstrahl zum linken Shuttle in Abbildung 6.16 auf Sei-
18 te 235; Anm.) langsamer (als es klassisch betrachtet wäre; Anm.)
19 und das (zeigt auf den Lichtstrahl zum rechten Shuttle in Ab-
20 bildung 6.16 auf Seite 235; Anm.) schneller (als es klassisch
21 betrachtet wäre; Anm.), deshalb ... [...] ... fliegt das (zeigt
22 auf rechtes Shuttle in Abbildung 6.16 auf Seite 235; Anm.)
23 dem (zeigt auf das Raumschiff in Abbildung 6.16 auf Seite 235;
24 Anm.) im Prinzip hinterher und deshalb ist die Strecke (zeigt auf
25 die Strecke zwischen rechtem Shuttle und Raumschiff in Abbil-
26 dung 6.16 auf Seite 235; Anm.), obwohl sie eigentlich vom Licht
27 her die ... die gleiche Geschwindigkeit haben müsste ... kommt
28 da (zeigt auf rechtes Shuttle in Abbildung 6.16 auf Seite 235;
29 Anm.) schneller an.

Zitat 356

Zunächst argumentieren die SchülerInnen, ohne auf den inneren Mechanismus einzugehen. Dreht sich die Flugrichtung um, ändert sich die zeitliche Reihenfolge, in denen die Lichtstrahlen bei den Shuttles ankommen (Zeilen 1 bis 9 von Zitat 356). Das zeigt, dass es den SchülerInnen plausibel erscheint, dass sich diese Reihenfolge ändert.

Schülerin 16 kann mit Hilfe des Lichts argumentieren. In Flugrichtung des Konvois ist das Licht von der Erde aus betrachtet langsamer als im klassischen Fall wäre (Zeilen 16 bis 18 von Zitat 356), gegen die Flugrichtung schneller (Zeilen 19 bis 21 von Zitat 356). Da das rechte Shuttle dem Raumschiff nachfliegt (Zeile 21 bis 24 von Zitat 356), kommt das Licht bei rechten Shuttle früher an (Zeilen 27 bis 29 von Zitat 356). Schülerin 16 argumentiert von sich aus anhand der Skizze auf Abbildung 6.16 auf Seite 235. Offenbar erscheint der Schülerin diese Skizze hilfreich. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang die Verwendung einer Skizze durch eine entsprechende Aufgabenstellung erproben.

Aufgabe 17 auf Seite 176, die ich wieder spezifiziere, indem ich die Geschwindigkeit des Konvois bezüglich der Erde mit 100 km/h angebe, beantwortet Schüler 17 so:

1 **Schüler 17:** Es ist schon noch ein Unterschied, aber der Unterschied
2 ist geringer.

- 3 **Wittmann:** *Ja, warum? Das ist die Frage ist, wieso ist Unterschied ...*
4 **Schüler 17:** *Weil ... weil dieses Shuttle (zeigt auf rechtes Shuttle in*
5 *Abbildung 6.16 auf Seite 235; Anm.) einen geringeren Weg in*
6 *dieser Zeit nachfliegt. [...] Also nachfliegt, ja. [...] Und da-*
7 *durch ist der Unterschied nicht so groß bemerkbar ... [...] ...*
8 *wie wenn das eben schnell ...*

Zitat 357

Schüler 17 erkennt, dass der Unterschied geringer ist (Zeile 2 von Zitat 357), und erklärt es mit dem geringeren Weg, den das Shuttle zurücklegt (Zeile 4 bis 6 von Zitat 357). Dadurch ist der Unterschied der Strecken, die die Lichtstrahlen zurücklegen, bzw. der Zeitpunkte, in denen die Lichtstrahlen die Shuttles erreichen, nicht so groß wie bei einem schneller fliegenden Konvoi (Zeilen 6 bis 8 von Zitat 357). Schüler 17 verwendet zur Lösung dieser Aufgabe die Skizze aus Abbildung 6.16 auf Seite 235. Er findet das offensichtlich hilfreich. Ich werde diese Aufgabe für den nächsten Unterrichtsdurchgang so umformulieren, dass für die Lösung eine Skizze anzufertigen ist. Darüber hinaus werde ich die 100 km/h als konkrete Zahl in die Angabe einarbeiten.

Zu Aufgabe 28 auf Seite 212 gibt Schülerin 16 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 16:** *Na, ja, weil das zu langsam und so ... [...] Na, ja, die*
2 *Ereignisse, die ... also ... die gleichzeitig stattfinden, weil ...*
3 *weil man die Sachen, die gleichzeitig stattfinden, müssen sich*
4 *in einer wesentlich anderen Geschwindigkeit als der, der das*
5 *dann betrachtet und für den es nicht gleichzeitig stattfindet,*
6 *bewegen ...*
7 **Wittmann:** *[...] ... ist das so weit klar?*
8 **Schüler 17:** *(nickt; Anm.)*

Zitat 358

Schülerin 16 erkennt, dass die Alltagsgeschwindigkeiten zu niedrig sind, um die Relativität der Gleichzeitigkeit zu bemerken (Zeile 2 bis 6 von Zitat 358). Schüler 17 stimmt zu (Zeile 8 von Zitat 358). Die Vorstellung, man könne die Relativität der Gleichzeitigkeit im Alltag bemerken, tritt nicht mehr auf. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem zweiten Unterrichtsdurchgang.

Die Frage, ob das Aufgabenblatt „Fragen zu Film“ verständlich formuliert sei, beantwortet Schülerin 16 folgendermaßen:

¹**Schülerin 16:** *Ja.*

Zitat 359

Schülerin 16 hält das Aufgabenblatt für verständlich (Zitat 359). Schüler 17 widerspricht nicht.

6.3.1.6. Die Lösung

Auf die Frage, ob das Arbeitsblatt „Die Lösung“ verständlich sei, antworten Schülerin 16 und Schüler 17 so:

¹**Schülerin 16:** *Ja.*

²**Schüler 17:** *Ja.*

Zitat 360

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt für verständlich (Zitat 360).

Aufgabe 13 auf Seite 142 beantworten Schüler 17 und Schülerin 16 folgendermaßen:

¹**Schüler 17:** *Mit dem Gleichwertigkeitsprinzip der Inertial... [...] ...*

² *systeme.*

³**Wittmann:** *Genau, richtig, ja. Ist das ... ist das logisch?*

⁴**Schüler 17:** *Ja.*

⁵**Schülerin 16:** *Ja.*

Zitat 361

Die SchülerInnen verstehen, wie hier das Prinzip der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme angewendet wird (Zitat 361).

Zu Aufgabe 29 auf Seite 213 gibt Schülerin 16 folgende Antwort:

¹**Schülerin 16:** *Das da (zeigt auf Enterprise in Abbildung 5.4b auf*

² *Seite 142; Anm.) ... [...] ... der Erde. Die Enterprise der*

³ *Erde. [...] Und das da (zeigt auf Voyager in Abbildung 5.4b auf*

⁴ *Seite 142; Anm.) ist dem Mutterschiff und dem zwei (zeigt auf*

⁵ *die Planeten in Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.) ... ähm,*

⁶ *was waren das? [...] Shuttles.*

- 7 [...]
8 **Wittmann:** [...] In welcher Reihenfolge, wenn wir jetzt den Vergleich
9 ziehen, kommt dann, wenn wir es so (zeigt auf Abbildung 5.4b
10 auf Seite 142; Anm.) betrachten, mit dem unteren ... [...] ...
11 zuerst das Licht an bei den Planeten?
12 [...]
13 **Schülerin 16:** Bei ihm (zeigt in Abbildung 5.4b auf Seite 142 auf Gar-
14 cus; Anm.).
15 **Wittmann:** Da, richtig, ja, wieso? Kannst du's noch einmal kurz erklä-
16 ren?
17 **Schülerin 16:** Weil das da (zeigt in Abbildung 5.4b auf Seite 142 auf
18 Garcus; Anm.) dem (zeigt in Abbildung 5.4b auf Seite 142 auf
19 Voyager; Anm.) entgegen kommt. [...] Und dadurch wird der
20 Weg halt ... [...] Ja, kürzer und ...

Zitat 362

Schülerin 16 kann die Darstellung aus dem Lehrfilm und Abbildung 5.4b auf Seite 142 richtig in Zusammenhang bringen (Zeilen 1 bis 6 von Zitat 362). Indem die Schülerin die Argumentationsweise aus dem Film anwendet, kann sie erklären, bei welchem Planeten aus der Sichtweise von Abbildung 5.4b auf Seite 142 der Lichtstrahl zuerst ankommt (Zeilen 13 bis 20 von Zitat 362).

Aufgabe 15 auf Seite 143 beantworten Schüler 17 und Schülerin 16 so:

- 1 **Schüler 17:** Kommt's ja auch gleich (in gleicher Weise wie in der
2 Betrachtungsweise aus Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.) an,
3 oder?
4 **Schülerin 16:** Das ist das Gleiche, weil egal, ob sich das (zeigt in
5 Abbildung 5.4b auf Seite 142 auf Voyager und Planeten; Anm.)
6 in die Richtung (zeigt in Abbildung 5.4b auf Seite 142 nach
7 links; Anm.) ... [...] ... oder das (zeigt in Abbildung 5.4a
8 auf Seite 142 auf Enterprise; Anm.) in die Richtung (zeigt in
9 Abbildung 5.4a auf Seite 142 nach rechts; Anm.) ... [...] ...
10 bewegt.
11 **Wittmann:** Also für die Enterprise kommt es wo zuerst an?
12 **Schüler 17:** Wieder rechts (bei Garcus; Anm.).
13 **Schülerin 16:** Ja, wieder rechts (zeigt in Abbildung 5.4a auf Seite 142
14 auf Garcus; Anm.).
15 [...]
16 **Wittmann:** O. k., ist das logisch? Ist das verständlich?

17 **Schüler 17:** *(nickt; Anm.)*

18 **Schülerin 16:** *Ja.*

Zitat 363

Die SchülerInnen akzeptieren, dass die Lichtstrahlen von der Enterprise aus betrachtet zuerst bei Garcus und dann bei Aldubian ankommen (Zeilen 1 bis 3 und 12 bis 18 von Zitat 363). Schülerin 16 erklärt das Ergebnis, indem sie das Prinzip der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme anwendet (Zeilen 4 bis 10 von Zitat 363).

Die Frage, ob sie noch immer der Meinung seien, dass die Lichtstrahlen nicht sowohl gleichzeitig als auch nicht gleichzeitig bei den Planeten ankommen könnten (Zitat 318 auf Seite 216), antworten Schüler 17 und Schülerin 16:

1 **Schülerin 16:** *Jetzt nicht mehr. Wenn man ... wenn man das ... das ...*

2 *dann kann man das verstehen.*

3 **Wittmann:** *Ist das nachvollziehbar, warum das so ist?*

4 **Schüler 17:** *(nickt; Anm.)*

Zitat 364

Die SchülerInnen halten die Erklärung für die Relativität der Gleichzeitigkeit für verständlich und nachvollziehbar (Zitat 364).

Um eine Zusammenfassung des Arbeitsblattes „Die Lösung“ gebeten sagen Schüler 17 und Schülerin 16 Folgendes:

1 **Schüler 17:** *Dass die zwei ... äh ... Inertialsysteme sich ... also dass*

2 *es zwei Inertialsysteme sind. [...] Eigentlich. [...] Und dadurch*

3 *sehen's beide anders.*

4 **Schülerin 16:** *Dann sehen sie's gleich (gleichwertig; Anm.), könn-*

5 *ten auch beide sich bewegen. [...] Das in die Richtung und ...*

6 *[...] ... das in die Richtung. Von beiden aus gesehen bewegt*

7 *sich das Licht gleich ... [...] ... aber von dem (zeigt in Ab-*

8 *bildung 5.4b auf Seite 142 auf Enterprise; Anm.) aus gesehen*

9 *bewegen sich die (zeigt in Abbildung 5.4b auf Seite 142 auf*

10 *Garcus; Anm.) ... [...] ... anders, weil ... [...] ... in diese*

11 *Richtung ...*

Zitat 365

Die SchülerInnen erkennen, dass es sich um Betrachtungsweisen der Welt aus zwei verschiedenen Inertialsystemen handelt (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 365 auf der vorherigen Seite). Diese Betrachtungsweisen sind anders (Zeile 3 von Zitat 365 auf der vorherigen Seite), aber gleich(wertig) (Zeile 4 von Zitat 365 auf der vorherigen Seite). Beide Inertialsysteme können auch als bewegt betrachtet werden (Zeile 4 bis 6 von Zitat 365 auf der vorherigen Seite). Die Geschwindigkeit des Lichts ist in beiden Inertialsystemen gleich (Zeile 7 von Zitat 365 auf der vorherigen Seite). Von der Enterprise aus gesehen bewegt sich Garcus (Zeilen 7 bis 11 von Zitat 365 auf der vorherigen Seite), wodurch der Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit zustande kommt.

6.3.1.7. Beispiel

Die Frage, ob das Arbeitsblatt „Beispiel“ verständlich sei, beantwortet Schülerin 16 so:

¹**Schülerin 16:** *Mhm.*

Zitat 366

Schülerin 16 findet das Arbeitsblatt verständlich (Zitat 366). Schüler 17 widerspricht nicht.

Schülerin 16 hat eine Frage:

¹**Schülerin 16:** *Ähm, wo ... wo ist das Proton im Verhältnis zu dem*
² *(zeigt auf Abbildung 6.9 auf Seite 214; Anm.) ... die alle auf*
³ *dem gleichen ...*

Zitat 367

Schülerin 16 fragt nach dem genauen Ort des Protons (Zitat 367). Sie akzeptiert in weiterer Folge, dass sich das Proton in einem Tunnel unter der Erdoberfläche bewegt, dass aber die genaueren Umstände unwesentlich seien, da es genauso wie die Enterprise die gesamte Situation „kennt“ und die Laufzeit des Schalls wie die des Lichts mit einbezogen wird.

Aufgabe 30 auf Seite 213 beantwortet Schüler 17 folgendermaßen:

¹**Schüler 17:** *Na, dann wird's wahrscheinlich nicht gleichzeitig ... für*
² *das Proton.*

3 **Wittmann:** Ja, wieso?

4 **Schüler 17:** Weil's ja hinfliegt. [...] Zu dem Rechten (zeigt in Abbil-
5 dung 6.9 auf Seite 214 auf die rechte Sirene; Anm.). [...] Und
6 damit ist es früher ... [...] Das ist ein ... ahm ... das ist ...
7 ah ... [...] Na, ja, da sind ja ... [...] ... zwei Inertialsysteme ...
8 [...] ... und das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214
9 auf das Proton; Anm.) fliegt in die Richtung (zeigt nach rechts;
10 Anm.) ... [...] ... mit relativ hoher Geschwindigkeit. [...] Und
11 damit bewegt ... für das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214
12 auf das Proton; Anm.) ... [...] ... bewegt sich das (zeigt in
13 Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die Sirenen und Feuerwehr-
14 männer; Anm.) in die Geschwindigkeit (zeigt nach links; Anm.).
15 Das andere. [...] Und ... [...] Und dadurch kommt das hier
16 schneller (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die rechte
17 Sirene und zeigt nach rechts; Anm.) ... [...] ... weil... weil
18 sich's zu ihm bewegt.

19 **Wittmann:** Genau. Und wo ist es zuerst? Welches geht zuerst los?

20 **Schüler 17:** Das Rechte (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die
21 rechte Sirene; Anm.).

Zitat 368

Schüler 17 erkennt, dass er mit Hilfe zweier Inertialsysteme argumentieren muss (Zeile 7 von Zitat 368). Das eine bewegt sich mit dem Proton nach rechts (Zeilen 8 bis 10 von Zitat 368). Das andere bewegt sich für das Proton mit den Sirenen und der Feuerwehrmännern nach links (Zeilen 10 bis 15 von Zitat 368). Die letztere Sichtweise vergleicht Schüler 17 offenbar mit dem nach links fliegenden Konvoi und stellt sich in der Mitte eine Lichtquelle vor, die wie das Raumschiff Signale aussendet. Die rechte Sirene bewegt sich auf das Signal zu und empfängt es deshalb früher als die linke Sirene (Zeilen 15 bis 18 von Zitat 368). Daher heult für das Proton die rechte Sirene früher los (Zeile 20 von Zitat 368).

Diese Interpretation der Aussagen von Schüler 17 in Zitat 368 stützt sich auf seine folgenden Ausführungen. Er sagt, nachdem ich ihn gebeten habe, die Situation auf Abbildung 6.9 auf Seite 214 mit der Situation mit den Raumschiffen und Planeten zu vergleichen:

1 **Schüler 17:** Ja, ahm ... (nimmt sich das Arbeitsblatt „Die Lösung“;
2 Anm.) ... das ... das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214
3 zwischen die Feuermänner; Anm.) ist die Voyager und das (zeigt

4 *in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die Sirenen; Anm.) sind die*
5 *Planeten. [...] Und das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214*
6 *auf das Proton; Anm.) ist die Enterprise ... [...] ... nur dass*
7 *diesmal das Signal von den Planeten kommt und nicht ...*

Zitat 369

Schüler 17 vergleicht die Sirenen mit den Planeten und das Proton mit der Enterprise (Zeilen 3 bis 6 von Zitat 369). Die Voyager lokalisiert er in der Mitte der Abbildung (Zeilen 2 bis 3 von Zitat 369) als virtuelles Konstrukt, das den Alarm triggert, aber unsichtbar bleibt. Die Wirkung sieht man nur an den „Planeten“ (Sirenen), die Signale aussenden (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 369).

Um die Akzeptanz der Relativität der Gleichzeitigkeit zu testen, frage ich:

1 **Wittmann:** *Ah, das Proton sagt, die heulen ... also zuerst heult die*
2 *(zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die rechte Sirene; Anm.)*
3 *auf, dann die (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die linke*
4 *Sirene; Anm.). [...] Der Max, die (zeigt in Abbildung 6.9 auf*
5 *Seite 214 auf die Sirenen; Anm.) gehen gleichzeitig an. Wer hat*
6 *Recht?*

7 **Schüler 17:** *Beide.*

Zitat 370

Schüler 17 akzeptiert, dass beide Sichtweisen physikalisch gleichwertig sind (Zeile 7 von Zitat 370).

Aufgabe 31 auf Seite 214 beantwortet Schülerin 16 so:

1 **Schülerin 16:** *Ja, der bewegt sich ja in die gleiche Richtung wie das*
2 *Proton. [...] Nur wahrscheinlich nicht so schnell.*

3 **Wittmann:** *Nein, überhaupt nicht so schnell.*

4 **Schülerin 16:** *Ja eben, also ... [...] Aber für ihn wird's trotzdem*
5 *wahrscheinlich, wenn er sich schnell genug bewegt, dass es für*
6 *ihn einen Unterschied macht ...*

7 **Wittmann:** *Äh ... der ... also, du ... du hast im Prinzip Recht ...*
8 *ah ... ist das ... ist das für uns wahrnehmbar?*

9 **Schülerin 16:** *Na, wahrscheinlich nicht, weil er sich wahrscheinlich*
10 *nicht schnell genug bewegt ... [...] ... dass er's wahrnimmt.*
11 *Aber würde er sich schnell genug bewegen ... [...] ... würde*
12 *es für ihn genauso ...*

Zitat 371

Schülerin 16 erkennt, dass sich Moritz langsamer in die gleiche Richtung bewegt wie das Proton (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 371 auf der vorherigen Seite). Die Schülerin meint, dass für Moritz die Sirenen nicht gleichzeitig losheulen, dass er es aber nicht merkt, da er zu langsam ist (Zeilen 4 bis 12 von Zitat 371 auf der vorherigen Seite). Möglicherweise denkt sie aber auch an Laufzeiteffekte des Schalls (siehe Zitat 372).

Auf die Frage, ob das Arbeitsblatt „Beispiel“ verständlich formuliert sei, antworten Schülerin 16 und Schüler 17:

- 1 **Schülerin 16:** *Mhm.*
- 2 **Schüler 17:** *Es ist eigentlich das Gleiche, nur dass es diesmal von*
- 3 *außen kommt, das Signal.*
- 4 **Wittmann:** *Richtig. Also, sozusagen, die ... die Voy... wo ist da (zeigt*
- 5 *auf das Arbeitsblatt „Beispiel“; Anm.) die Voyager?*
- 6 **Schüler 17:** *Eigentlich außen (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf*
- 7 *die Sirenen; Anm.). [...] Und die schicken das (zeigt in Abbil-*
- 8 *dung 6.9 auf Seite 214 von den Sirenen in die Mitte; Anm.). [...]*
- 9 *Na, ja, es gib niemanden, der das losschickt ... also Voyager?*
- 10 **Wittmann:** *Richtig, ja, ja. Also, die fehlt eigentlich, das ist quasi ...*
- 11 **Schülerin 16:** *Man könnt's als Max bezeichnen, weil er in der Mitte*
- 12 *steht.*
- 13 **Wittmann:** *Nein, der Max ist es nicht. Der Max löst es nicht aus.*
- 14 **Schülerin 16:** *Nein, er löst's nicht aus, aber er ist in der Mitte und für*
- 15 *ihn ist es gleichzeitig ... es ist sowieso gleichzeitig.*
- 16 **Wittmann:** *Na, Moment einmal, wenn der Max da (zeichnet in Abbil-*
- 17 *dung 6.9 auf Seite 214 Max unmittelbar neben die linke Sirene;*
- 18 *Anm.) ... wenn der Max da stünde, wär's dann für ihn auch*
- 19 *gleichzeitig oder nicht?*
- 20 **Schülerin 16:** *Nein, wär's nicht, weil er's ja nicht berechnen würde,*
- 21 *aber da steht ...*

Zitat 372

Schülerin 16 hält das Arbeitsblatt „Beispiel“ für verständlich (Zeile 1 von Zitat 372). Schüler 17 betont Ähnlichkeiten mit dem zuvor Gelernten (Zeilen 2 bis 3 von Zitat 372). Nach einigem Zögern erkennt er, dass es in Abbildung 6.9 auf Seite 214 keine Entsprechung für die Voyager gibt (Zeilen 6 bis 9 von Zitat 372). Schülerin 16 identifiziert Max als Entsprechung zur Voyager, weil er ihrer Meinung nach in der Mitte zwischen den Sirenen steht (Zeile 11 von Zitat 372), obwohl er sich in Abbildung 6.9 auf Seite 214 dort eindeutig nicht

befindet, und für ihn ebenso wie für die Voyager beide Ereignisse gleichzeitig stattfinden (Zeilen 14 bis 15 von Zitat 372 auf der vorherigen Seite). Auf Nachfrage (Zeilen 16 bis 19 von Zitat 372 auf der vorherigen Seite) gibt Schülerin 16 an, dass die Position von Max wesentlich sei (Zeile 20 von Zitat 372 auf der vorherigen Seite), und begründet es damit, dass er Laufzeiteffekte nicht einberechnen würde (Zeile 20 von Zitat 372 auf der vorherigen Seite). Schülerin 16 versteht also den Unterschied, der sich ergibt, wenn man Laufzeiteffekte mit einbezieht. Es ist unklar, warum sie der Meinung ist, diese würden hier nicht einbezogen, obwohl Schülerin 16 nach einer thematisch ähnlichen Frage (Zitat 367 auf Seite 242) kurz vorher akzeptiert, dass sie einbezogen werden würden. Möglicherweise hat die Schülerin an ihren Alltag gedacht, in dem es wesentlich ist, wann man Geräusche hört, und nicht, wann sie erzeugt wurden. Das gilt insbesondere für Feuerwehrmänner. Bei einem Proton, das nicht hören kann, ist es vielleicht gedanklich einfacher, der Geräuschwahrnehmung eine geringere Bedeutung zuzuerkennen als der Geräuscherzeugung. Ich werde die Berücksichtigung der Laufzeit des Schalls im nächsten Unterrichtsdurchgang intensiver thematisieren.

6.3.1.8. Abschließende Rückmeldung

Um eine abschließende Rückmeldung gebeten sagen Schülerin 16 und Schüler 17:

1 **Schülerin 16:** *Hm ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... ich find's inter-*
2 *essant, also am Anfang hätt ich mir nicht gedacht, dass man das*
3 *so ... so ... so ... also, ich ... ich ... ich hätt nicht gedacht,*
4 *dass man das so wirklich so eine gute, detaillierte Erklärung*
5 *dazu bekommt. Weil ich war am Anfang jetzt nicht so ... wusste*
6 *ich nicht, dass das so in die Tiefe geht. [...] Das hab ich irgend-*
7 *wie nicht erwartet. [...] Aber, also ... so versteht man's dann*
8 *am Schluss ganz gut.*

9 **Wittmann:** *Mhm. Ja.*

10 **Schüler 17:** *Passt alles.*

11 *[...]*

12 **Wittmann:** *O. k. Habt ihr das Gefühl, dass ihr was gelernt habt jetzt?*

13 **Schüler 17:** *Ja.*

14 **Schülerin 16:** *Ja.*

Zitat 373

Die SchülerInnen empfinden das Thema interessant und den Unterrichtsdurchgang detailliert und unerwartet tief gehend erklärt. Sie haben das Gefühl, etwas gelernt zu haben (Zitat 373 auf der vorherigen Seite). Es erscheint daher sinnvoll, dieses Thema für den Schulunterricht dieser Altersgruppe aufzubereiten.

6.3.2. Revision nach dem dritten Unterrichtsdurchgang

Auf Basis der Analyse des dritten Unterrichtsdurchgangs unterziehe ich das für den dritten Unterrichtsdurchgang überarbeitete Unterrichtskonzept einer Revision. Das überarbeitete Unterrichtskonzept wird in einem weiteren Unterrichtsdurchgang erprobt.

6.3.2.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Als Gründe für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise nennen die SchülerInnen eine unterschiedliche Beschaffenheit der Planeten, nicht spezifizierte Gründe aufgrund der Bewegung, unterschiedliche Messmethoden, technische Probleme beim Messen und Effekte der Lichtlaufzeit. Die letzten beiden Begründungen waren aufgrund der Interviews aus Kapitel 4 zu erwarten. Die SchülerInnen akzeptieren die Existenz exakter Messgeräte, geeigneter Messverfahren und die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit. Damit wird der Messprozess als Sammeln von Daten mit späterer Auswertung akzeptiert, was im Einklang mit den Ergebnissen aus den Interviews ist. Die SchülerInnen verstehen die Geschichte des einführenden Beispiels und halten sie für geeignet, in der Schule eingesetzt zu werden. Die Ausbreitung des Lichtsignals von der Voyager stellt für die SchülerInnen kein gedankliches Problem dar. Sie sind über die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise überrascht. Der Gleichzeitigkeitsbegriff der SchülerInnen ist offenbar ein absoluter, was sich mit den Erkenntnissen aus den Interviews deckt. Damit nicht der Eindruck entsteht, die Voyager müsse genau mit der halben Lichtgeschwindigkeit unterwegs sein, wird der erste Satz des dritten Absatzes der Geschichte des einführenden Beispiels umformuliert zu: *Zufällig kommt die USS Enterprise unter dem Kommando von Kapitän James T. Kirk vorbei, die mit sehr hoher Geschwindigkeit, nämlich mit halber Lichtgeschwindigkeit, unterwegs ist (SchülerInnen bekommen Abbildung 6.2c auf Seite 171 vorgelegt.).* Mit dieser Formulierung soll hervorgehoben werden, dass es wichtig ist, dass die Enterprise mit einer Geschwindigkeit unterwegs ist, die in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit ist. Raumschiff Enterprise ist den SchülerInnen bekannt, Raumschiff Voyager nicht. Sie finden aber die Verwendung von Voyager nicht als störend.

Die SchülerInnen halten den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] für gut und für günstig eingesetzt. Die SchülerInnen sehen einen Zusammenhang zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und dem Film und können wesentliche Inhalte des Filmes erfassen. Sie erkennen die Rolle der Geschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit. Die Vorstellung, die Relativität der Gleichzeitigkeit sei ein im Alltag wahrnehmbarer Effekt, wird nicht geäußert. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem zweiten Unterrichtsdurchgang. Der Film und die danach präsentierte Vorschau auf den restlichen Unterrichtsdurchgang dürfte motivierend wirken. Die SchülerInnen akzeptieren die Relativität der Gleichzeitigkeit als einen real existierenden Effekt, der nicht Ergebnis einer Täuschung ist. Um diesen Aspekt intensiver zu thematisieren, werde ich im nächsten Unterrichtsdurchgang den SchülerInnen nach dem Zeigen des Filmes folgende Aufgaben²⁸ stellen:

32. *Für den Astronauten, der dieselbe Geschwindigkeit hat wie das Raumschiff und die zwei Shuttles, kommen die Lichtstrahlen bei den Shuttles gleichzeitig an. Für die BeobachterInnen auf der Erde kommt der Lichtstrahl beim hinteren Shuttle früher an als beim vorderen. Wer hat Recht? Begründung!*

Das Zeigen des Filmes nach dem einführenden Beispiel, ohne Punkt 5.2.1.3 zu unterrichten, hat sich in diesem Unterrichtsdurchgang bewährt. Nach dem Vorführen des Filmes muss allerdings ausreichend Raum für Fragen und Diskussionen gegeben werden, um dessen Inhalt und den Zusammenhang mit der Geschichte des einführenden Beispiels zu reflektieren. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang wieder in dieser Abfolge unterrichten. Um einen Zusammenhang zwischen dem Film und der Geschichte des einführenden Beispiels herzustellen und eine Diskussion auszulösen, werde ich den SchülerInnen nach der Diskussion über Aufgabe 32 folgende Aufgaben²⁹ stellen:

33. *Was hat der Film mit der Geschichte des einführenden Beispiels zu tun?*
34. *Hilft uns der Film, Aufgabe 1 auf Seite 129 zu beantworten? Wenn ja, wie? Wenn nein, warum nicht?*

6.3.2.2. Inertialsysteme

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ für verständlich. Der Begriff des Inertialsystems wird ausgehend vom Beispiel fahrender und auf dem

²⁸Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

²⁹Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

Boden stehender Züge gut verstanden. Die SchülerInnen können den Begriff des Inertialsystems in verschiedenen Situationen anwenden. Verständnisschwierigkeiten können im Zuge eines Dialoges überwunden werden. Ich werde das Thema Inertialsysteme im nächsten Unterrichtsdurchgang wieder auf dieselbe Art unterrichten.

6.3.2.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ für verständlich. Deep Space Nine ist als Raumstation nicht bekannt. Darum wird der letzte Satz des ersten Absatzes des Arbeitsblattes umformuliert zu: *Um das zu klären, betrachten wir einen Vermessungsversuch der Raumstation Deep Space Nine.* Es wird gut akzeptiert, dass man Bewegung nur in Bezug auf etwas anderes angeben kann. Die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme wird gut verstanden. Das deckt sich mit den Ergebnissen aus den Interviews aus Kapitel 4. Um die Gleichwertigkeit verschiedener Beschreibungen der Welt eingehender zu thematisieren, werden auf dem Arbeitsblatt zwischen die Aufgaben 20 auf Seite 209 und 7 auf Seite 137 folgende Aufgaben³⁰ eingeschoben:

35. *Die Shuttles Columbus und Galileo bewegen sich zueinander. Beide betrachten die Welt aus ihrem Blickwinkel. Welche Sicht auf die Welt, die sich dabei ergibt, ist das richtigere? Begründung!*
36. *Die Galileo betrachtet sich einmal als ruhend und einmal als bewegt und betrachtet dabei jeweils die Welt. Welche Sicht auf die Welt, die sich dabei ergibt, ist das richtigere? Begründung!*

6.3.2.4. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ und die Unterrichtssequenz für verständlich. Sie verstehen, dass die Geschwindigkeit eines Körpers in verschiedenen Bezugssystemen unterschiedliche Werte haben kann. Die SchülerInnen verstehen in diesem Zusammenhang, was die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bedeutet, und finden sie unerwartet und überraschend.

Der Übergang von *einer* Person, die in *zwei* verschiedenen Bewegungszuständen die Geschwindigkeit eines Körpers misst, zu *zwei* Personen in jeweils verschiedenen Bewegungszuständen, die die Geschwindigkeit eines Körpers messen, wird gut bewältigt. Die Aufgaben 21 bis 26 auf Seite 210, in denen

³⁰Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

Zeichnungen angefertigt werden müssen, werden gut angenommen. Die Vorstellung, jemand Bewegter würde Licht „vor sich her treiben“, lässt sich nicht mehr feststellen. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem zweiten Unterrichtsdurchgang. Die SchülerInnen können die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit selbstständig auf die Geschichte des einführenden Beispiels anwenden und damit einen wesentlichen Gedankengang zur Lösung erkennen. Eine Unzufriedenheit über die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wie im vorherigen Unterrichtsdurchgang ist nicht erkennbar. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Ich werde die Unterrichtssequenz zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im nächsten Unterrichtsdurchgang wieder auf dieselbe Art unterrichten.

6.3.2.5. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Für die SchülerInnen ist das Aufgabenblatt „Fragen zum Film“ verständlich. Sie entwickeln die Vorstellung, Licht würde im Gegensatz zu Körpern in Bezugssystemen nicht mitfliegen. Sollte es in den weiteren Unterrichtsdurchgängen Verständnisschwierigkeiten zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit geben, werde ich diese Vorstellung als Erklärung erproben. Die SchülerInnen können die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit erklären. Skizzen dürften bei diesen Erklärungen und eventuell dem vorangegangenen Lernprozess hilfreich sein. Daher wird Aufgabe 27 auf Seite 212 zu folgender Aufgabe³¹ umformuliert:

37. *Angenommen, ein Lichtstrahl wäre nicht für alle gleich schnell. Wieso könnte man dann nicht sagen, dass im Film von der Erde aus gesehen das Licht beim linken Shuttle früher ankommt als beim rechten? Erkläre mit Hilfe einer Zeichnung.*

Die SchülerInnen können erklären, in welcher Reihenfolge die Lichtstrahlen bei den Shuttles eintreffen, wenn der Konvoi in die entgegengesetzte Richtung fliegt. Die SchülerInnen verwenden bei der Erklärung von sich aus eine Skizze. Diese finden die SchülerInnen offenbar hilfreich. Deshalb wird Aufgabe 16 auf Seite 176 zu folgender Aufgabe³² umformuliert:

38. *Beschreibt die Situation, wenn der Konvoi von rechts nach links an der Erde vorbei fliegt. Kommt das Licht von der Erde aus gesehen bei den Shuttles gleichzeitig an? Wenn nein, wo kommt es früher an? Begründet euren Standpunkt mit Hilfe einer Zeichnung.*

³¹Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

³²Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

Die SchülerInnen verstehen, dass der Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit geringer ist, wenn der Konvoi langsam an der Erde vorbeifliegt, und können erklären, warum dem so ist. Die SchülerInnen verwenden bei der Erklärung von sich aus wieder eine Skizze. Ich werde die Anfertigung einer Skizze in die Aufgabenstellung einbeziehen. Ebenfalls einbauen werde ich die Angabe von 100 km/h, damit den SchülerInnen klar ist, was mit *viel kleiner als der Lichtgeschwindigkeit* gemeint ist. Es darf aber nicht der Eindruck entstehen, der Konvoi müsse genau diese Geschwindigkeit haben. Daher wird Aufgabe 17 auf Seite 176 zu folgender Aufgabe³³ umformuliert:

39. *Was kann man über den Zeitunterschied sagen, mit dem die Lichtsignale von der Erde aus betrachtet bei den Shuttles ankommen, wenn der Konvoi mit einer Geschwindigkeit an der Erde vorbeifliegt, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, nämlich 100 km/h, ist? Begründe mit Hilfe einer Zeichnung.*

Die SchülerInnen erkennen, dass man die Relativität der Gleichzeitigkeit im Alltag nicht wahrnimmt, weil die Alltagsgeschwindigkeiten dafür zu gering sind. Die Vorstellung, die Relativität der Gleichzeitigkeit könnte sich im Alltag bemerkbar machen, wird nicht entwickelt. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem zweiten Unterrichtsdurchgang.

6.3.2.6. Die Lösung

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt „Die Lösung“ für verständlich. Sie verstehen, dass die beiden Sichtweisen in Abbildung 5.4 auf Seite 142 aufgrund der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme physikalisch ununterscheidbar sind. Die SchülerInnen können die Argumentation aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] verwenden, um aus der Sichtweise der ruhenden Enterprise zu erklären, in welcher zeitlichen Reihenfolge die Lichtstrahlen bei den Planeten eintreffen. Mit Hilfe des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme können die SchülerInnen dieses Ergebnis auf die Sichtweise der bewegten Enterprise übertragen.

Die SchülerInnen können unter Verwendung des Prinzips der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für den gegenständlichen Fall die Relativität der Gleichzeitigkeit erklären. Sie finden diese Erklärung verständlich und nachvollziehbar.

Ich werde im nächsten Unterrichtsversuch diese Sequenz wieder auf dieselbe Art unterrichten. Es muss lediglich ein Formulierungsfehler in Aufgabe 15 auf

³³Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

Seite 143, der noch nicht aufgefallen ist und keine Rolle gespielt hat, ausgetauscht werden. Diese Aufgabe wird zu folgender Aufgabe³⁴ umformuliert:

40. *Die Situationen aus den Abbildungen 5.4a und 5.4b auf Seite 142 sind nicht unterscheidbar. In welcher Reihenfolge kommen nach Aufgabe 29 auf Seite 213 für die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten an, wenn man die Enterprise als an den Planeten und der Voyager vorbeifliegend betrachtet?*

6.3.2.7. Beispiel

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt „Beispiel“ für verständlich. Sie akzeptieren, dass die Laufzeiten für den Schall berücksichtigt werden würden, wenden das aber nicht durchgehend an. Ich werde diesem Punkt im nächsten Unterrichtsdurchgang erhöhte Aufmerksamkeit schenken. Die SchülerInnen können Abbildung 6.9 auf Seite 214 zu den Abbildungen mit den Raumschiffen und den Planeten in Beziehung bringen. Die SchülerInnen können Aufgabe 30 auf Seite 213 lösen, indem sie die Situation aus zwei zueinander bewegten Inertialsystemen betrachten. Aufgabe 31 auf Seite 214 wird ebenfalls richtig gelöst, der Gedankengang, der zur Lösung führt, kommt aber nicht klar zutage. Ich werde diesen Punkt beim nächsten Unterrichtsdurchgang verstärkt beobachten.

Die Formulierung der Aufgaben regt zu Rückfragen, zum Beispiel zur Berücksichtigung der Signallaufzeiten, an. Ich will diesen Rückfragen nicht durch detailliertere Formulierungen der Aufgaben zuvorkommen, weil dadurch möglicherweise Dialoge unterbleiben und somit Lernprozesse weniger gut sichtbar werden. Ich werde daher das Arbeitsblatt für den nächsten Unterrichtsdurchgang nicht abändern.

6.4. Vierter Unterrichtsdurchgang

Im vierten Unterrichtsdurchgang wird das nach dem dritten Unterrichtsdurchgang revidierte Unterrichtskonzept einer Erprobung unterzogen.

6.4.1. Analyse des vierten Unterrichtsdurchgangs

6.4.1.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Schüler 19 beantwortet Aufgabe 1 auf Seite 129 folgendermaßen:

³⁴Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

- 1 **Schüler 19:** *Da muss ich erst einmal wissen, wie die das gemessen*
2 *haben.*

Zitat 374

Beide SchülerInnen akzeptieren in weiterer Folge, dass die Kenntnis der Messmethode (Zitat 374) nicht nötig ist.

Schüler 19 fragt nach:

- 1 **Schüler 19:** *Kommen die Signale, die sie aussenden [...], auf beiden*
2 *Planeten auch dann gleichzeitig an, oder gibt es da Unterschiede?*
3

Zitat 375

Ich fasse noch einmal zusammen, dass auf der Voyager das Ankommen der Signale gleichzeitig gemessen wird und auf der Enterprise nicht gleichzeitig. Daraufhin wendet Schülerin 18 ein:

- 1 **Schülerin 18:** *Man weiß ja nicht, wie's wirklich dann ist, oder?*

Zitat 376

Schülerin 18 akzeptiert in weiterer Folge zunächst, dass es man im Rahmen physikalischer Theorien die Messergebnisse als Abbildung der Natur (Zitat 376) betrachtet. Dieser Punkt wird aber noch einmal thematisiert (siehe Zitat 393 auf Seite 260).

Schülerin 18 gibt zu Aufgabe 1 auf Seite 129 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 18:** *Vielleicht hat das was mit der Richtung, in die sie fliegen*
2 *zu tun, oder so?*
3 **Wittmann:** *Wer, wer jetzt?*
4 **Schülerin 18:** *Ahm, das hier (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171*
5 *auf Enterprise; Anm.).*

Zitat 377

Schülerin 18 akzeptiert in weiterer Folge, dass die Flugrichtung der Enterprise in den Messprozess mit einbezogen wird und somit nicht Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise ist.

Schüler 19 hat folgenden Vorschlag zur Lösung von Aufgabe 1 auf Seite 129:

1 **Schüler 19:** *Dass eines der Messgeräte einen Fehler hat.*

Zitat 378

Schüler 19 akzeptiert, dass die Sternenflotte fehlerfrei messende Geräte entwickelt hat, die bei der Messung alle funktionstüchtig waren.

Schüler 19 hat folgende Idee zur Lösung von Aufgabe 1 auf Seite 129:

1 **Schüler 19:** *Vielleicht, wenn ... wenn die das irgendwie so messen,*
2 *dass das Licht zurückgeworfen wird (zeigt in Abbildung 6.2c auf*
3 *Seite 171 auf Garcus; Anm.) und das Licht dann zuerst bei dem*
4 *(zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.)*
5 *ankommt, weil's in die Richtung fliegen (zeigt in Abbildung 6.2c*
6 *auf Seite 171 nach rechts), nachher erst bei denen (zeigt in*
7 *Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Voyager; Anm.).*

Zitat 379

Schüler 19 vermutet, der Effekt werde durch unterschiedlich lange Laufzeiten des Lichts von Garcus zur Enterprise bzw. zur Voyager verursacht (Zitat 379). Die SchülerInnen akzeptieren in weiterer Folge, dass die Lichtlaufzeiten einbezogen werden. Sie akzeptieren damit auch den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung.

Schüler 19 hat einen weiteren Vorschlag zur Lösung von Aufgabe 1 auf Seite 129:

1 **Schüler 19:** *Vielleicht ist es, ich hab irgendwie einmal gehört, dass in*
2 *der Nähe vom Mars oder so die Zeit langsamer oder schneller*
3 *vergeht oder so. Ist das da vielleicht auch so ähnlich?*

Zitat 380

Schüler 19 dürfte darauf anspielen, dass das Vergehen der Zeit von der Stärke des Gravitationsfeldes abhängt (Zitat 380). Er akzeptiert, dass auch dieser Effekt mit einbezogen wurde.

Schülerin 18 meint:

- 1 **Schülerin 18:** *Das heißt, es muss jetzt einen Unterschied zwischen*
2 *diesen zwei ... ähm ... zwischen den zwei Flugzeugen (Raum-*
3 *schiffen; Anm.) geben, also zwischen den zwei Mess...*

Zitat 381

Schülerin 18 ist der Meinung, die Ursache für die beiden unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise sei in den Raumschiffen oder den Messungen zu suchen (Zitat 381). Offenbar kann sich die Schülerin nicht vorstellen, dass die Gleichzeitigkeit tatsächlich relativ ist. Die Schülerin akzeptiert aber in weiterer Folge, dass auf beiden Raumschiffen gleiche Messverfahren verwendet werden, die unterschiedliche Messergebnisse hervorbringen.

Schüler 19 hat folgende Idee zur Lösung von Aufgabe 1 auf Seite 129:

- 1 **Schüler 19:** *Vielleicht ist das da (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171*
2 *zwischen Enterprise und Garcus; Anm.) irgendwo ein ... ein ...*
3 *ahm ... Hindernis im Weg oder hier halt (zeigt in Abbildung 6.2c*
4 *auf Seite 171 zwischen Aldubian und Enterprise; Anm.).*

Zitat 382

Schüler 19 akzeptiert in weiterer Folge, dass ein Hindernis (Zitat 382) von den Sensoren der Raumschiffe detektiert worden wäre und somit als Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise ausgeschlossen werden kann.

Schüler 19 gibt zu Aufgabe 1 auf Seite 129 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 19:** *Vielleicht ist das so, dass das Licht von den Planeten ir-*
2 *gendwie ... ahm ... in die Richtung (zeigt in Abbildung 6.2c auf*
3 *Seite 171 von Garcus nach links) ... in die Richtung schneller*
4 *zurückgestrahlt wird als in die oder so.*

Zitat 383

Schüler 19 vermutet eine richtungsabhängige Rückstrahlung als Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zitat 383). Er akzeptiert aber, dass die Rückstrahlung richtungsunabhängig ist.

Nachdem den SchülerInnen nach eigener Angabe kein weiterer Lösungsvorschlag für Aufgabe 1 auf Seite 129 einfällt, fragt Schüler 19:

1Schüler 19: *Und was ist die Lösung?*

Zitat 384

Schüler 19 will die Antwort zu Aufgabe 1 auf Seite 129 wissen (Zitat 384), was darauf hindeutet, dass durch die Aufgabenstellung sein Interesse geweckt wurde. Damit ist er sicherlich auch motiviert, sich im restlichen Unterrichtsdurchgang das nötige Wissen zum Verständnis der Lösung zu erarbeiten.

Schüler 19 hat doch noch eine Idee zu Aufgabe 1 auf Seite 129:

1Schüler 19: *Hat das irgendwas mit dem Licht selber zu tun? Also, dass*
2 *das Licht sich irgendwie verändert? Oder die verschiedenen*
3 *Farben des Lichts oder so?*

Zitat 385

Schüler 19 denkt an eine Veränderung des Lichts (Zitat 385). Er akzeptiert jedoch, dass eine solche Veränderung nicht eintritt.

Auch Schülerin 18 hat noch eine Idee zu Aufgabe 1 auf Seite 129:

1Schülerin 18: *Sind die gleich groß (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Garcus)?*
2 *te 171 auf Garcus)?*
3Wittmann: *Die Planeten?*
4Schülerin 18: *Ja.*

Zitat 386

Schülerin 18 vermutet unterschiedliche Größen der Planeten als Ursache für die verschiedenen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zitat 386). Die Schülerin akzeptiert in weiterer Folge, dass die Planetengröße irrelevant ist.

Da die SchülerInnen angeben, keine weitere Idee zu Aufgabe 1 auf Seite 129 zu haben, ersuche ich sie, die Geschichte des einführenden Beispiels zusammenzufassen. Dies geschieht folgendermaßen:

1Schülerin 18: *Es geht darum, dass zwei ... ähm ... zwei Flugzeuge*
2 *(Raumschiffe; Anm.), die genau die gleichen Messungs... geräte*
3 *haben, zwei unterschiedliche Messergebnisse haben. Ähm ...*
4Schüler 19: *... und man soll herausfinden, warum das so ist.*
5Wittmann: *Was messen sie unterschiedlich?*

6**Schülerin 18:** *Ahm, sie versuchen ...*

7**Schüler 19:** *Sie messen, dass auf Garcus die galaktischen Spiele*
8 *schneller angefangen haben, oder früher angefangen haben*
9 *als auf Aldubian.*

10**Wittmann:** *Beide messen das, oder ... ?*

11**Schüler 19:** *Nein.*

12**Schülerin 18:** *Nein.*

13**Schüler 19:** *Nur Enterprise.*

14**Schülerin 18:** *Die Enterprise misst, dass das (zeigt in Abbildung 6.2c*
15 *auf Seite 171 auf Garcus; Anm.) früher angefangen hat als Al-*
16 *dubian. Aber (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Voyager;*
17 *Anm.) meint, dass sie beide gleichzeitig angefangen haben.*

Zitat 387

Die SchülerInnen können das physikalisch Wesentliche der Geschichte des einführenden Beispiels richtig zusammenfassen (Zitat 387).

Während ich den Laptop hochfahre, um den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] zeigen zu können, sinnieren Schülerin 18 und Schüler 19 weiter über Aufgabe 1 auf Seite 129. Sie meinen:

1**Schülerin 18:** *Fakt ist, dass es zwei Planeten gibt.*

2**Schüler 19:** *Und es ist vollkommen irrelevant, wie die sind?*

Zitat 388

Schüler 19 denkt offenbar daran, dass die Beschaffenheit der Planeten die Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise sein könnte (Zeile 2 von Zitat 388). Er akzeptiert aber, dass die Beschaffenheit der Planeten keine Rolle spielt.

Die SchülerInnen denken weiter nach:

1**Schülerin 18:** *Jetzt gibt es ein Raumschiff, das genau in der Mitte ist.*
2 *Und es strahlt mit Licht (zeigt in Abbildung 6.2b auf Seite 171*
3 *von der Voyager zu den Planeten; Anm.) genau von der Mitte*
4 *auf beide Planeten. Und das heißt, dass die dann anfangen. Und*
5 *es (zeigt in Abbildung 6.2b auf Seite 171 auf Voyager; Anm.)*
6 *meint, dass sie beide gleichzeitig angefangen haben.*

- 7 **Schüler 19:** Also prinzipiell ... also prinzipiell geht es nur darum,
8 dass es vier Punkte gibt, und dass dieser eine Punkt (zeigt in Ab-
9 bildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.) meint, dass es
10 da (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Garcus; Anm.) ...
11 dass das Licht da (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf
12 Garcus; Anm.) früher angekommen ist als hier (zeigt in Abbil-
13 dung 6.2c auf Seite 171 auf Aldubian; Anm.).
14 **Schülerin 18:** Und es ist alles richtig gemessen?

Zitat 389

Die SchülerInnen reflektieren für sich noch einmal die Aufgabenstellung und fassen dabei das physikalisch Wesentliche wieder korrekt zusammen (Zeilen 1 bis 13 von Zitat 389). Schülerin 18 kann es offenbar nicht glauben, dass die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise durch korrekte Messungen zustande gekommen sind (Zeile 14 von Zitat 389).

Schüler 19 hat noch eine Idee zu Aufgabe 1 auf Seite 129:

- 1 **Schüler 19:** Kann es sein, dass das Licht von der Lampe hier (zeigt
2 in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Voyager; Anm.) das hier
3 (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.)
4 getroffen hat und nicht so (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171
5 von Voyager zu Garcus, Anm.)?

Zitat 390

Schüler 19 vermutet eine unbeabsichtigte Reflexion als Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zitat 390). Er akzeptiert aber, dass das durch eine korrekte Durchführung des Startvorganges ausgeschlossen werden kann.

Abschließend wundert sich Schülerin 18:

- 1 **Schülerin 18:** Die haben alles richtig gemacht, alles ganz richtig ge-
2 macht? [...] Wie kann das sein?

Zitat 391

Schülerin 18 kann sich die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise nicht erklären (Zitat 391 auf der vorherigen Seite). Die Schülerin ist davon offensichtlich überrascht. Der Gleichzeitigkeitsbegriff der Schülerin ist offenbar ein absoluter. Das deckt sich mit den Ergebnissen der Interviews aus Kapitel 4.

Die SchülerInnen geben an, Raumschiff Enterprise zu kennen, Raumschiff Voyager jedoch nicht. Die Verwendung von Voyager in der Geschichte des einführenden Beispiels finden sie aber nicht störend.

Unmittelbar nach dem Ende des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* sagt Schülerin 18:

- 1 **Schülerin 18:** *Das würde heißen, dass das (zeigt in Abbildung 6.2c*
2 *auf Seite 171 auf Voyager; Anm.) jetzt das System A wäre ...*
3 **Schüler 19:** *... also das Mutterschiff (aus dem Lehrfilm; Anm.) ...*
4 **Schülerin 18:** *... aber die Enterprise wäre ein anderes System. Und*
5 *deswegen sieht es das anders als jemand, der im System A ist.*

Zitat 392

Die SchülerInnen können einen Zusammenhang zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und dem Lehrfilm herstellen (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 392). Damit beantworten sie Aufgabe 33 auf Seite 248. Außerdem können sie die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise mit den unterschiedlichen Sichtweisen der Systeme aus dem Lehrfilm in Verbindung bringen (Zeilen 4 und 5 von Zitat 392). Damit beantworten die SchülerInnen Aufgabe 34 auf Seite 248.

Da die SchülerInnen von sich aus bereits einen Zusammenhang zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und dem Lehrfilm hergestellt haben, formuliere ich äquivalent zu Aufgabe 32 auf Seite 248:

- 1 **Wittmann:** *In dem einen System, Voyager, gleichzeitig. Im anderen*
2 *System (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise;*
3 *Anm.) nicht gleichzeitig. Frage ist: Wer hat Recht?*
4 **Schüler 19:** *Beide haben Recht.*
5 **Schülerin 18:** *Beide haben Recht. Das hat nur mit der Sichtweise was*
6 *zu tun.*
7 **Wittmann:** *Ist das für die Voyager – beide gleichzeitig – wirklich oder*
8 *sehen die das nur so?*
9 **Schülerin 18:** *Ich glaub, sie sehen's nur so.*
10 **Wittmann:** *Und wie ist das für die Enterprise?*

- 11 **Schüler 19:** *Sie sehen's auch nur so.*
12 **Schülerin 18:** *Sie sehen's nur so.*
13 **Wittmann:** *Und was ist wirklich?*
14 **Schüler 19:** *Beides ist wirklich.*
15 **Wittmann:** *Also ist es jetzt wirklich oder sehen sie's nur so?*
16 **Schülerin 18:** *(lacht; Anm.) ... Nein.*
17 **Schüler 19:** *Ja, sicher ist beides wirklich.*
18 **Schülerin 18:** *Ja, nur weil man's so sieht, muss es ja nicht wirklich*
19 *sein.*
20 **Schüler 19:** *Ja, dann ist gar nichts wirklich.*
21 **Schülerin 18:** *Ja, doch.*
22 **Schüler 19:** *Ja wieso? Es ist doch beides wirklich. Für den da (zeigt*
23 *in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Voyager; Anm.) ist es halt*
24 *wirklich, dass beides gleichzeitig ankommt. Für den da (zeigt in*
25 *Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.) ist es halt*
26 *wirklich, dass es da (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf*
27 *Garcus; Anm.) früher ankommt als da (zeigt in Abbildung 6.2c*
28 *auf Seite 171 auf Aldubian; Anm.).*
29 **Schülerin 18:** *Ja, o. k.*

Zitat 393

Für die SchülerInnen sind die Sichtweisen der Voyager und der Enterprise gleichwertig (Zeilen 1 bis 6 von Zitat 393). Im nachfolgenden Dialog entwickeln die SchülerInnen ihre Interpretation der Messergebnisse. Zunächst sind die SchülerInnen der Ansicht, das Ankommen der Lichtstrahlen werde von der Voyager bzw. der Enterprise aus nur gleichzeitig bzw. nicht gleichzeitig *gesehen*, sei aber nicht *wirklich* (Zeilen 7 bis 12 von Zitat 393). Auf die Frage, was nun wirklich sei (Zeilen 13 und 15 von Zitat 393), erkennen die SchülerInnen die damit verbundene erkenntnistheoretische Problematik (Zeilen 14 und 16 bis 20 von Zitat 393). Sie gelangen aber zu dem Schluss, dass im Rahmen physikalischer Betrachtungen Messergebnisse als „wirklich“ aufgefasst werden (Zeilen 22 bis 29 von Zitat 393). Die Entwicklung dieser Sichtweise werde ich im nächsten Unterrichtsdurchgang durch eine entsprechende Aufgabenstellung unterstützen.

Um eine Reaktion zum Lehrfilm gebeten sagen die SchülerInnen:

- 1 **Schüler 19:** *War ziemlich klar und logisch.*
2 **Schülerin 18:** *Ja.*

Zitat 394

Die SchülerInnen qualifizieren den Lehrfilm als klar und logisch (Zitat 394 auf der vorherigen Seite). Darüber hinaus finden sie den Lehrfilm an dieser Stelle gut eingesetzt (siehe Zitat 427 auf Seite 279).

6.4.1.2. Inertialsysteme

Aufgabe 2 auf Seite 137 beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

- 1 **Schüler 19:** *Also ... ahm ... wenn man im Flugzeug sitzt, [...] dann*
- 2 *merkt man halt nicht, dass man sich bewegt, [...]*
- 3 **Schülerin 18:** *Es ist das gleiche, als würde man einfach nur da drinnen*
- 4 *sitzen und es würde sich nicht bewegen.*

Zitat 395

Die SchülerInnen verstehen, dass man in einem mit konstanter Geschwindigkeit fliegenden Flugzeug genauso sitzen kann wie in einem, das auf dem Boden steht (Zitat 395).

Aufgabe 3 auf Seite 137 löst Schüler 19 so:

- 1 **Schüler 19:** *[...] Weil man nach vorne gedrückt wird.*

Zitat 396

Schüler 19 versteht den Unterschied zu einem auf dem Boden stehenden Zug (Zitat 396).

Zu Aufgabe 4 auf Seite 137 gibt Schüler 19 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 19:** *Weil man da die ganze Zeit in der Kurve liegt. [...] Man*
- 2 *spürt, dass man nach außen gedrückt wird.*

Zitat 397

Schüler 19 kann den Unterschied zu einem Inertialsystem erklären (Zitat 397).

Aufgabe 5 auf Seite 137 beantwortet Schülerin 18 so:

- 1 **Schülerin 18:** *Na ja, ein Auto, wenn man fährt, dann spürt man ja*
- 2 *eigentlich auch nichts.*
- 3 **Wittmann:** *Kommt drauf an, wie man fährt.*

- 4 **Schülerin 18:** *Ja, wenn man gleich ... gleich fährt (zeigt geradeaus;*
5 *Anm.) und es ist sozusagen ... wenn es erschütterungsfrei fährt,*
6 *[...] dann spürt man nicht, dass man fährt.*

Zitat 398

Schülerin 18 identifiziert ein mit konstanter Geschwindigkeit fahrendes Auto als Inertialsystem und erklärt, woran man merkt, dass dieses Auto ein Inertialsystem ist (Zitat 398).

Aufgabe 6 auf Seite 137 beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

- 1 **Schüler 19:** *Na man kann ja eigentlich ziemlich viel sagen. Straßen-*
2 *bahn, die dauernd im Kreis fährt.*
3 **Schülerin 18:** *Ja, wenn man im Kreis fährt, dann ist eigentlich alles*
4 *keines.*
5 **Schüler 19:** *Oder die dauernd auf und ab fährt.*

Zitat 399

Die SchülerInnen erkennen, dass es die wechselnde Geschwindigkeit ist, die Bezugssysteme zu keinen Inertialsystemen macht (Zitat 399).

Die SchülerInnen finden den ersten Satz des zweiten Absatzes des Arbeitsblattes „Inertialsysteme“ zu lang und deshalb schwer verständlich. Der Inhalt dieses Satzes muss im nächsten Unterrichtsdurchgang in kürzeren Formulierungen wiedergegeben werden. Sonst kommentieren die SchülerInnen dieses Arbeitsblatt folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 18:** *Das ist eigentlich ganz klar.*
2 **Schüler 19:** *Ich finde das ziemlich klar. Das ist gut.*

Zitat 400

Abgesehen von den beanstandeten Formulierungen des zweiten Absatzes beurteilen die SchülerInnen das Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ als klar und gut (Zitat 400).

Schüler 19 fasst das Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ folgendermaßen zusammen:

1 **Schülerin 18:** Ähm, es geht darum, dass wenn ein Zug oder ein Auto,
2 eben was sich bewegt, in einem konstanten Tempo fährt (zeigt
3 geradeaus; Anm.) ohne irgendeine Erschütterung, dann würde
4 man eigentlich nicht merken, dass man fährt. [...] Es würd sich
5 gleich anfühlen, als würde man einfach nur dort sitzen und es
6 würde sich nicht bewegen. [...] Das ändert sich aber, wenn man
7 entweder anfährt oder stoppt. Weil, wenn man anfährt, wird man
8 nach hinten gedrückt. Und wenn man stoppt, dann wir man ...
9 fällt man nach vorne, sozusagen.

Zitat 401

Schüler 18 kann korrekt beschreiben, wie man feststellen kann, ob ein Bezugssystem ein Inertialsystem ist oder nicht (Zitat 401).

6.4.1.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Nach dem Lesen des Arbeitsblattes „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ geben die SchülerInnen an, das Arbeitsblatt sei im Wesentlichen verständlich. Lediglich die Bezeichnung „bezüglich“ bei der Beschreibung der Bewegungen fänden sie verwirrend. Die SchülerInnen schlagen vor, dieses Wort durch die Wendung „aus der Sicht (von)“ zu ersetzen. Deep Space Nine ist ihnen nicht bekannt, die Verwendung stellt aber kein Problem dar. Durch die gewählte Formulierung ist klar, dass es sich bei Deep Space Nine um eine Raumstation handelt. Das ist eine Verbesserung gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Aufgabe 20 auf Seite 209 beantworten die SchülerInnen so:

1 **Schüler 19:** Beide haben Recht, weil ... weil die Galileo bewegt sich
2 [...] aus der Sicht der Columbus der Deep Space Nine [...]
3 weil Columbus und Deep Space Nine sind ja gleich ... mit
4 gleicher Geschwindigkeit [...] und aus der Sicht von Galileo
5 bewegen sich Columbus und Deep Space Nine.
6 **Wittmann:** Richtig. Sozusagen, hat einer mehr Recht als der andere
7 oder ist das völlig gleich?
8 **Schüler 19:** Nein.
9 **Schülerin 18:** Nein.
10 **Schüler 19:** Völlig gleich.

Zitat 402

Die SchülerInnen qualifizieren die Standpunkt der Columbus und der Galileo als gleichwertig (Zitat 402 auf der vorherigen Seite). Schüler 19 verwendet bei der Beschreibung der Geschwindigkeiten von sich aus den Ausdruck „aus der Sicht“ (Zeilen 1 bis 5 von Zitat 402 auf der vorherigen Seite). Das spricht dafür, dass eine solche Formulierung den Lernprozess unterstützen könnte. Darüber hinaus ist diese Formulierung der im Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ gebrauchten Wendung „von ... aus gesehen“ ähnlich, durch die dort Bezugssysteme charakterisiert werden, von denen aus Geschwindigkeiten gemessen werden.

Von einem Bezugssystem aus Ruhe und Bewegung festzustellen oder Geschwindigkeiten zu messen sind begrifflich eng verknüpft, sodass es günstig sein kann, für die Beschreibung beider Vorgänge ähnliche Formulierungen zu verwenden. Im nächsten Unterrichtsdurchgang wird daher auf dem Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ das Wort „bezüglich“ durch die Wendung „aus der Sicht (von)“ ersetzt.

Zu Aufgabe 35 auf Seite 249 fragen die SchülerInnen:

- 1 **Schüler 19:** Was ist mit der richtigeren gemeint?
- 2 **Schülerin 18:** Was hat das mit richtig ... ? Ich mein', die sehen einfach
- 3 aus zwei verschiedenen Blickwinkeln.

Zitat 403

Die SchülerInnen verstehen, dass aus der Sicht der Shuttles die Welt unterschiedlich beschrieben wird. Die Fragestellung ist den SchülerInnen aber nicht klar (Zitat 403). Nach einer Erklärung verstehen sie, was gemeint ist, können aber keine verständlichere Formulierung vorschlagen.

Die SchülerInnen denken bei der Bearbeitung der Aufgabe 35 auf Seite 249 intensiv über den Begriff der Bewegung nach:

- 1 **Schülerin 18:** Aber weiß man überhaupt, ob sie (Shuttles; Anm.) sich
- 2 bewegen oder ob sie sich nicht bewegen? Bewegen sie sich ...
- 3 [...]
- 4 **Schüler 19:** Kann man das irgendwie feststellen?
- 5 [...]
- 6 **Schülerin 18:** Also könnte sein, dass sich Galileo bewegt, aber halt
- 7 behauptet, weil das sich für ihn anfühlt, als würde er sich nicht
- 8 bewegen, dass der andere ihm näher kommt. [...] Obwohl er
- 9 sich eigentlich bewegt.
- 10 **Wittmann:** Von wem aus gesehen?

11 **Schülerin 18:** *Ah!*

Zitat 404

Schüler 18 fragt nach einer absoluten Bewegung der Shuttles (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 404). Schülerin 19 will wissen, ob man diese feststellen könne (Zeile 4 von Zitat 404). Schüler 18 zieht nun in Betracht, dass eine absolute Bewegung nicht spürbar sein könnte (Zeilen 6 bis 9 von Zitat 404), versteht aber dann, dass Bewegung kein absoluter Begriff ist (Zeile 11 von Zitat 404). In einer weiteren Diskussion akzeptieren die SchülerInnen, dass man Bewegung immer nur in Bezug auf etwas anderes angeben kann. Das Argument, dass sich im Weltraum alles bewegt und damit kein fixer Punkt zu finden ist, bewährt sich wieder.

Schließlich sagt Schülerin 19 zu Aufgabe 35 auf Seite 249:

- 1 **Schüler 19:** *Und was heißt jetzt, welche Sicht auf die Welt, die sich*
2 *dabei ergibt, ist die richtigere? Es gibt doch keine richtigere.*

Zitat 405

Schülerin 19 erkennt, dass die Naturbeschreibungen, die von beiden Shuttles aus gemacht werden, gleichwertig sind (Zitat 405).

Aufgabe 35 auf Seite 249 löst einen intensiven Denk- und Lernprozess bezüglich des Geschwindigkeitsbegriffs aus und hilft, die Vorstellung gleichwertiger Naturbeschreibungen von verschiedenen Inertialsystemen aus zu entwickeln.

Aufgabe 36 auf Seite 249 beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 18:** *Also ich mein, weil man kann ja nicht feststellen, ob*
2 *man sich bewegt oder nicht [...] also kann man auch nicht*
3 *wissen, ob sich jetzt der andere bewegt oder man selber [...]*

- 4 **Schüler 19:** *Also kann man auch nicht wissen, wer die richtigere Sicht*
5 *hat.*

6 *[...]*

- 7 **Wittmann:** *Gibt's eine richtigere?*

- 8 **Schülerin 18:** *Nein.*

- 9 **Schüler 19:** *Nein.*

Zitat 406

Die SchülerInnen haben den Umstand, dass es keine absolute Bewegung gibt, so weit akzeptiert, dass sie ihn zur Lösung von Aufgabe 36 auf Seite 249 verwenden (Zeilen 1 bis 5 von Zitat 406 auf der vorherigen Seite) und damit zu einer richtigen Lösung gelangen (Zeilen 8 bis 9 von Zitat 406 auf der vorherigen Seite). Die SchülerInnen haben keine Verständnisprobleme mit Aufgabe 36 auf Seite 249. Das ergibt sich wahrscheinlich aus der ähnlichen Formulierung zur bereits verstandenen Aufgabe 35 auf Seite 249.

Zur Unmöglichkeit, „Bewegung“ und „Ruhe“ eines Inertialsystems festzustellen, fragt Schüler 19:

- 1 **Schüler 19:** *Funktioniert das eigentlich nur im Weltraum oder auch*
2 *auf Planeten? [...] ... wenn man auf einem Planeten steht, zum*
3 *Beispiel in einem Auto. Das eine steht, das andere bewegt sich ...*
4 *ach so ... [...] Aber prinzipiell bewegt sich doch dann das, das*
5 *sich bewegt, und das, das steht, bewegt sich nicht.*

Zitat 407

Schüler 19 hat bereits akzeptiert, dass man im Weltraum weit weg von Himmelskörpern zwischen „Ruhe“ und „Bewegung“ eines Inertialsystems nicht unterscheiden kann (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 406 auf der vorherigen Seite), hat aber nun Zweifel, ob das auch auf einem Planeten gilt (Zeile 2 von Zitat 407). Er ist der Ansicht, ein Auto, das auf einem Planeten steht, würde ruhen, und eines das fährt, würde sich bewegen (Zeilen 2 bis 5 von Zitat 407). In der Vorstellung des Schülers ist ein planetenfestes Koordinatensystem ein bevorzugtes. Er akzeptiert in der weiteren Diskussion, dass es auf dem Planeten Erde für den Alltag praktisch ist, ein erdfestes Koordinatensystem zu bevorzugen, dass dies aber keine prinzipielle physikalische Relevanz hat.

Es ist offenbar für Schüler 19 gedanklich einfacher, „Ruhe“ und „Bewegung“ eines Inertialsystems in einer Situation zu erfassen, die weit weg von Himmelskörpern angesiedelt ist. Dabei kann nämlich kein gedanklicher Konflikt mit Vorstellungen über bevorzugte erd- oder planetenfeste Koordinatensysteme auftreten. Beim Versuch, „Ruhe“ und „Bewegung“ eines Inertialsystems in Zusammenhang mit Bewegungen auf einem Planeten zu bringen, tritt der Konflikt auf. Diesem kann durch den Vergleich mit der bereits gedanklich bewältigten Situation weitab von Himmelskörpern begegnet werden. Es dürfte für den Lernprozess, „Ruhe“ und „Bewegung“ eines Inertialsystems zu erfassen, förderlich sein, mit einer Situation zu beginnen, in der keine Himmelskörper vorkommen.

Die Aufgaben 35 und 36 auf Seite 249 regen intensive Diskussionen über „Ruhe“ und „Bewegung“ eines Inertialsystems und die Gleichwertigkeit der

Inertialsysteme an und führen zu tiefgreifenden Denkprozessen. Deshalb werden diese Aufgaben beim nächsten Unterrichtsdurchgang beibehalten. Sie werden lediglich zur besseren Verständlichkeit teilweise umformuliert.

Am Ende der Diskussion über den Geschwindigkeitsbegriff merkt Schülerin 18 an:

- 1 **Schülerin 18:** *Beim Zug ist mir das auch schon oft passiert, dass ich*
2 *einfach im Zug saß und nicht wusste, ob ich oder derjenige fährt.*
3 *[...] ... wenn man den anderen Zug sieht.*
4 *[...]*
5 **Schüler 19:** *Das war eigentlich schon das Beispiel (Aufgabe 7 auf*
6 *Seite 137; Anm.).*

Zitat 408

Schülerin 18 kann eine persönliche Erfahrung mit der Unmöglichkeit, zwischen Ruhe und Bewegung eines Inertialsystems unterscheiden zu können, in Zusammenhang bringen (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 408). Schüler 19 erkennt, dass das eine Lösung zu Aufgabe 7 auf Seite 137 ist (Zeile 5 von Zitat 408).

Abschließend geben die SchülerInnen an, das Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ für verständlich zu halten. Das Arbeitsblatt fassen die SchülerInnen folgendermaßen zusammen:

- 1 **Schüler 19:** *Also es geht darum. Die Galileo und die Columbus und*
2 *die Deep Space Nine sind im Weltraum. Die Columbus ist neben*
3 *der Deep Space Nine und bewegt sich aus der Sicht der Deep*
4 *Space Nine nicht. Oder die Deep Space Nine bewegt sich aus*
5 *der Sicht der Columbus nicht. Und die Galileo ist ein Stück weit*
6 *weg und sagt aber, dass die Columbus und die Deep Space Nine*
7 *sich auf sie zubewegen. Die anderen sagen aber das Gegenteil.*
8 *Und es geht darum, dass beides richtig ist, oder beides falsch.*
9 *Wie man es eben sieht. Und, ja ...*
10 **Schülerin 18:** *... es kommt darauf an, von welcher Sicht man das*
11 *sieht.*

Zitat 409

Schüler 19 kann die Situation, in der das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme vorgestellt wird, korrekt wiedergeben. Die SchülerInnen haben

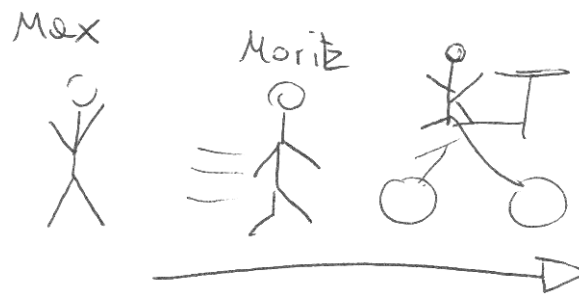


Abbildung 6.17.: Zu Zitat 410

verstanden, dass man Bewegung immer nur aus einer Sichtweise beschreiben kann, wobei verschiedene Sichtweisen gleichwertig sind (Zitat 409 auf der vorherigen Seite). Da die SchülerInnen zur Beschreibung von Bewegungen wieder die Wörter „Sichtweise“ und „Sicht“ verwenden, werde ich im nächsten Unterrichtsdurchgang diese Wörter statt „bezüglich“ oder „Bezugssystem“ verwenden. Möglicherweise erleichtert das, richtige Vorstellungen zu entwickeln.

6.4.1.4. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die SchülerInnen finden das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ verständlich. Sie schlagen lediglich vor, das Wort „folgen“ im 1. Absatz durch „hinterhergehen“ zu ersetzen.

Aufgabe 21 auf Seite 210 beantwortet Schülerin 18 so:

- 1 **Schülerin 18:** (Zeichnet Abbildung 6.17; Anm.) Im Prinzip, ähm, hat
2 sie immer die gleiche Geschwindigkeit, nur von der Sicht ist es
3 natürlich anders. Weil Moritz, ähm, bewegt sich jetzt ihr hinter-
4 her, [...] deswegen erscheint es für ihn, dass sie langsamer ist
5 als für Max, weil er immer am gleichen Punkt bleibt.

Zitat 410

Schülerin 18 versteht die Aufgabe und kann die beschriebene Situation aufzeichnen (Abbildung 6.17). Die Striche links von Moritz in Abbildung 6.17 sind die aus Comic-Zeichnungen bekannten Linien, die sich in Bewegungsrichtung gesehen hinter laufenden Personen befinden. Der Pfeil unter den Personen gibt die Bewegungsrichtung der Radfahlerin an.

In der Vorstellung von Schülerin 18 koexistieren offenbar zwei Vorstellungen über die Geschwindigkeit der Radfahlerin. Eine *echte* Geschwindigkeit („hat



Abbildung 6.18.: Zu Zitat 411

sie immer die gleiche Geschwindigkeit“: Zeilen 1 bis 2 von Zitat 410 auf der vorherigen Seite), die sich wahrscheinlich auf die Erde bezieht, und eine *scheinbare* Geschwindigkeit aus der Sicht des laufenden Moritz („erscheint es für ihn, dass sie langsamer ist“: Zeile 4 von Zitat 410 auf der vorherigen Seite). Dass Schülerin 18 Max als ruhend betrachtet („er immer am gleichen Punkt bleibt“: Zeile 5 von Zitat 410 auf der vorherigen Seite) spricht dafür, dass sie die Erde als bevorzugtes Bezugssystem ansieht.

Die Vorstellung einer absoluten Geschwindigkeit, die sich auf die Erde bezieht, ist offensichtlich so dominant, dass diese Vorstellung nicht restlos durch einen physikalisch korrekten Geschwindigkeitsbegriff ersetzt werden kann. Durch die gewählte Darstellung wurde der Schülerin aber die Möglichkeit eröffnet, eine weitere Vorstellung von Geschwindigkeit zu entwickeln, auf die die Schülerin zurückgreifen kann, wenn die Geschwindigkeit eines Objekt in verschiedenen Bezugssystemen beschrieben wird.

Zu Aufgabe 22 auf Seite 210 gibt Schüler 19 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 19:** (Zeichnet Abbildung 6.18; Anm.) Ja, also, die Gewehrku-
- 2 gel ist aus der Sicht von Moritz langsamer, weil er sich ja in die
- 3 Richtung daher bewegt (zeigt auf Abbildung 6.18 nach rechts;
- 4 Anm.) und aus der Sicht vom Max her schneller.

Zitat 411

Schüler 19 versteht die Aufgabe und kann die beschriebene Situation aufzeichnen (Abbildung 6.18). Die Striche links von Moritz und der Gewehrku- gel in Abbildung 6.18 sind die aus Comic-Zeichnungen bekannten Linien, die sich in Bewegungsrichtung gesehen hinter laufenden Personen und fliegenden Objekten befinden. Schüler 19 kann die Aufgabe richtig lösen (Zitat 411).

Aufgabe 23 auf Seite 210 löst Schülerin 18 so:

- 1 **Schülerin 18:** (Zeichnet Abbildung 6.19 auf der nächsten Seite; Anm.)
- 2 O. k., das ist im Prinzip wieder das Gleiche, ähm, nur andersrum,

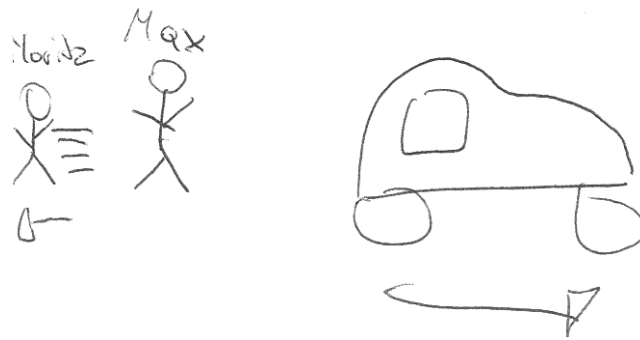


Abbildung 6.19.: Zu Zitat 412

- 3 weil das Auto bewegt sich jetzt nicht in die gleiche Richtung wie
4 Moritz [...] Deswegen kommt Moritz das Auto schneller vor
5 als Max, [...] weil er dem Auto sozusagen jetzt ... näher ist
6 und halt konstant näher bleibt. Und Max halt, ähm, Moritz in
7 die andere Richtung läuft. Und deswegen die Entfernung größer
8 wird.

Zitat 412

Schülerin 18 versteht die Aufgabe und kann die beschriebene Situation aufzeichnen (Abbildung 6.19). Die Striche rechts von Moritz sind die aus Comic-Zeichnungen bekannten Linien, die sich in Bewegungsrichtung gesehen hinter laufenden Personen befinden. Die Pfeile unter Moritz bzw. dem Auto geben die jeweilige Bewegungsrichtung an.

Schülerin 18 dürfte wieder die Vorstellung einer scheinbaren Geschwindigkeit des Autos von Moritz aus haben („kommt Moritz das Auto *schneller* vor“: Zeile 4 von Zitat 412). Die Schülerin argumentiert den Wert der scheinbaren Geschwindigkeit mit der unterschiedlichen Abstandsänderung der betrachteten Körper (Zeilen 5 bis 8 von Zitat 412), was dem physikalisch Geschwindigkeitsbegriff entspricht und daher anschlussfähig ist.

Aufgabe 24 auf Seite 210 beantwortet Schüler 19 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 19:** (Zeichnet Abbildung 6.20 auf der nächsten Seite; Anm.)
2 Ja, also, von der Sicht vom Moritz aus ist die Rakete schneller,
3 weil er sich in die andere Richtung bewegt. [...] Und sich
4 deswegen schneller von ihr entfernt als der Max.

Zitat 413

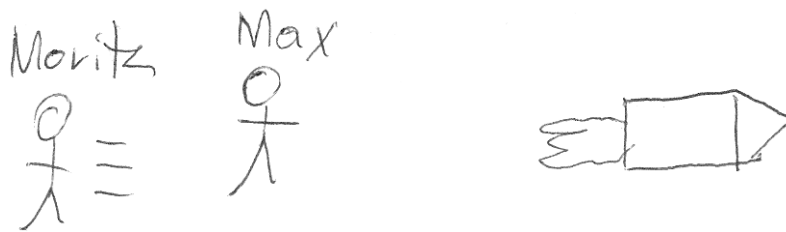


Abbildung 6.20.: Zu Zitat 413 auf der vorherigen Seite



Abbildung 6.21.: Zu Zitat 414

Schüler 19 versteht die Aufgabe und kann die beschriebene Situation aufzeichnen (Abbildung 6.20). Die Striche rechts von Moritz sind die aus Comic-Zeichnungen bekannten Linien, die sich in Bewegungsrichtung gesehen hinter laufenden Personen befinden. Der Schüler kann die Aufgabe richtig lösen. Auch er argumentiert mit der unterschiedlichen Entfernungsänderung der betrachteten Körper (Zeile 4 von Zitat 413 auf der vorherigen Seite).

Zu Aufgabe 25 auf Seite 210 gibt Schüler 19 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 19:** (Zeichnet Abbildung 6.21) Ähm, im Text ist gestanden,
- 2 dass das Licht von jedem Standpunkt aus gleich schnell ist. [...]
- 3 Ja. [...] Gleich schnell.

Zitat 414

Schüler 19 versteht die Aufgabe und kann die beschriebene Situation aufzeichnen (Abbildung 6.21). Die Striche links von Moritz sind die aus Comic-Zeichnungen bekannten Linien, die sich in Bewegungsrichtung gesehen hinter laufenden Personen befinden. Der Schüler akzeptiert sehr rasch, dass das Licht für Max und Moritz gleich schnell ist (Zitat 414).

Schülerin 18 beantwortet Aufgabe 26 auf Seite 210 so:

- 1 **Schülerin 18:** (Zeichnet Abbildung 6.22 auf der nächsten Seite) Dies-
- 2 mal läuft Moritz in die andere Richtung, [...] aber der Licht-



Abbildung 6.22.: Zu Zitat 415

- 3 *strahl ist trotzdem, ahm, gleich schnell, [...] weil es eben von*
4 *jedem, egal wohin man immer läuft, immer gleich schnell ist.*

Zitat 415

Schülerin 18 versteht die Aufgabe und kann die beschriebene Situation aufzeichnen (Abbildung 6.22). Der Pfeil unter Moritz zeigt in dessen Bewegungsrichtung. Die Schülerin akzeptiert, dass der Lichtstrahl für Max und Moritz gleich schnell ist (Zitat 415).

Um einen Kommentar gebeten, dass der Lichtstrahl für Max und Moritz gleich schnell ist, sagt Schüler 19:

- 1 **Schüler 19:** *Also ich fand's irgendwie ... überraschend.*

Zitat 416

Schüler 19 ist von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht (Zitat 416).

Die SchülerInnen geben an, den Inhalt des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ verstanden zu haben. Schülerin 18 fasst ihn folgendermaßen zusammen:

- 1 **Schülerin 18:** *Ähm, es geht darum, es geht wieder um die verschie-*
2 *denen Sichtweisen, ähm, dass, wenn sich ein Objekt, ähm, von*
3 *jemandem wegbewegt und man ihm hinterherläuft, kommt es*
4 *einem schneller vor, äh, kommt es einem langsamer vor als*
5 *demjenigen, der einfach ruhig an einem Platz steht. [...] Ähm,*
6 *wenn man aber dem Gegenstand in die entgegengesetzte Rich-*
7 *tung wegläuft, sozusagen, kommt es einem schneller vor, weil*
8 *man sich selber auch halt [...] auseinander bewegt, als dem,*
9 *der steht. [...] Das ist aber nicht so, wenn es eben um einen*

- 10 *Lichtstrahl geht, weil da kommt es nicht auf die Sichtweise an,*
11 *weil's immer gleich schnell ist.*

Zitat 417

Schülerin 18 dürfte wieder die Vorstellung einer scheinbaren Geschwindigkeit haben. Die Schülerin spricht von „kommt es einem langsamer vor“ (Zeile 4 von Zitat 417) und „kommt es einem schneller vor“ (Zeile 7 von Zitat 417). Sie bringt das mit einer Entfernungsänderung der Körper in Zusammenhang („auseinander bewegt“: Zeile 8 von Zitat 417). Licht hat aber für alle die gleiche Geschwindigkeit (Zeilen 9 bis 11 von Zitat 417).

Möglicherweise hat Schülerin 18 die Vorstellung, Gegenstände hätten eine scheinbare und eine echte Geschwindigkeit, Licht aber nur eine echte. Die scheinbare Geschwindigkeit steht in Zusammenhang mit der Abstandsänderung der Körper und entspricht daher dem physikalischen Geschwindigkeitsbegriff. Die echte Geschwindigkeit von Gegenständen ist offenbar die Geschwindigkeit bezüglich eines als bevorzugt betrachteten Bezugssystems. Da der Schülerin dieses Bezugssystem weder als solches noch dessen bevorzugte Rolle bewusst wird, dürfte die Schülerin die echte Geschwindigkeit als alleinige Eigenschaft des Gegenstandes betrachten, wodurch diese Geschwindigkeit in der Vorstellung der Schülerin unabhängig von jedem Bezugssystem ist.

6.4.1.5. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Nachdem die SchülerInnen das Aufgabenblatt „Fragen zum Film“ durchgesehen haben, wollen sie den Film noch einmal sehen. Den Film an dieser Stelle je nach Bedarf zu zeigen, ist eine Möglichkeit den Unterricht zu individualisieren.

Die SchülerInnen verstehen nicht, was mit Aufgabe 37 auf Seite 250 gemeint ist. Insbesondere die zweimalige Verneinung macht ihnen Probleme. Nachdem die Verständnisschwierigkeiten beseitigt wurden, beantwortet Schülerin 18 nicht die Aufgabe, sondern erklärt mit Hilfe der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, warum die Lichtstrahlen von der Erde aus gesehen nicht gleichzeitig bei den Shuttles ankommen:

- 1 **Schülerin 18:** *Ja, weil sich die in die Richtung bewegen (zeigt nach*
2 *rechts; Anm.). [...] Der Lichtstrahl bewegt sich nicht mit die-*
3 *ser ... mit diesem System. [...] Weil der ist unabhängig. [...]*
4 *Und deswegen, ahm, deswegen ...*

Zitat 418

Schülerin 18 hat die Vorstellung entwickelt, der Lichtstrahl würde sich nicht mit dem Konvoi mitbewegen (Zeile 2 von Zitat 418 auf der vorherigen Seite). Diese Vorstellung wurde bereits im vorherigen Unterrichtsdurchgang geäußert. Weiters äußert Schülerin 18, der Lichtstrahl sei unabhängig (Zeile 3 von Zitat 418 auf der vorherigen Seite). Gemeint ist wahrscheinlich, unabhängig vom Konvoi.

Was geschehen würde, wäre Licht nicht für alle gleich schnell, beantwortet Schülerin 18 folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 18:** *Ja, dann würde er bei beiden sowieso gleichzeitig an-*
2 *kommen. Ja, das wäre genau das Gleiche als würden sie stehen.*
3 *Das heißt, wenn ich jetzt [...] zwei Bälle mit gleicher Geschwin-*
4 *digkeit [...] von mir weg schieße (zeigt mit beiden Händen von*
5 *sich seitlich weg; Anm.) [...] und es gibt zwei Ziele, die gleich*
6 *weit von mir weg sind, ... dann würde ich die beide gleichzeitig*
7 *treffen. ... [...] ... Lichtstrahlen sind unabhängig, aber Bälle*
8 *sind ...*

Zitat 419

Das Wort „sowieso“ (Zeile 1 von Zitat 419) deutet darauf hin, dass die Schülerin für den Fall, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht konstant wäre, an eine absolute Gleichzeitigkeit denkt. Für die Schülerin „wäre [das] genau das Gleiche als würden sie stehen“ (Zeile 2 von Zitat 419). Sie führt das mittels klassischer Objekte aus. Bälle kommen für sie in allen Bezugssystemen gleichzeitig an (Zeilen 3 bis 7 von Zitat 419). Die Vorstellung dahinter dürfte der klassischen Geschwindigkeitsaddition entsprechen. Die Schülerin erklärt auch, warum ihrer Meinung nach Bälle in allen Bezugssystemen gleichzeitig ankommen, Licht aber nur in *einem*: Lichtstrahlen sind im Gegensatz zu Bällen unabhängig (Zeilen 7 bis 8 von Zitat 419); gemeint ist offensichtlich unabhängig vom Bezugssystem.

Schülerin 18 hat offenbar ansatzweise für Alltagsgegenstände eine Vorstellung entwickelt, die der klassischen Physik entspricht, und für Lichtstrahlen eine Vorstellung, die der relativistischen Physik entspricht. Im Rahmen dieser Vorstellung ist Licht unabhängig von Bezugssystemen. Daher kann es keine scheinbare Geschwindigkeit haben, da sie eine Abhängigkeit von einem Bezugssystem ausdrückt. Licht hat daher nur eine echte Geschwindigkeit. Alltagsgegenstände werden als abhängig von Bezugssystemen betrachtet. Diese Abhängigkeit bewirkt, dass diese Gegenstände eine scheinbare Geschwindigkeit bezüglich dieses Systems haben. Dazu kommt die echte Geschwindigkeit, die die Gegenstände nach der Vorstellung der Schülerin von sich aus besitzen

und die unabhängig von Bezugssystemen ist (siehe Analyse zu Zitat 417 auf Seite 273).

Wie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in die Argumentation eingeht, dürfte die Schülerin gut verstanden haben.

Das Argument mit klassischen Bällen ist gefährlich, weshalb ich es von mir aus nicht bringen würde. Schließlich könnten die SchülerInnen auf die Idee kommen, die Gleichzeitigkeit mit Hilfe von Bällen, die sie für rein klassische Objekte halten, und nicht mit Hilfe von Lichtstrahlen zu definieren. Eine Frage von Schüler 19 deutet in diese Richtung:

- 1 **Schüler 19:** [...] Aber wenn man jetzt statt Licht jetzt Bälle schießen
2 würde. Würde es von der Sicht dieser drei Schiffe aus beide
3 gleichzeitig treffen?

Zitat 420

Schüler 19 kehrt zwar die Fragestellung um: Würden klassische Bälle, die aus der Sicht der Erde gleichzeitig bei den Shuttles ankommen, auch aus Sicht des Konvois gleichzeitig ankommen (Zitat 420)? Das zielt auf die Definition der Relativität der Gleichzeitigkeit. In weiterer Folge akzeptiert der Schüler aber, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit auch für das Ankommen von Bällen gilt. Der zeitliche Unterschied des Eintreffens ist aber wegen der im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit geringen Geschwindigkeit der Bälle winzig. Der Schüler akzeptiert, dass Lichtstrahlen verwendet werden, weil mit ihnen der Effekt deutlicher sichtbar und leichter herleitbar wird.

Schüler 19 beantwortet Aufgabe 37 auf Seite 250 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 19:** Weil, na wenn es sich unabhängig bewegt, [...] dann
2 kommt das linke Shuttle dem Licht eigentlich entgegen, [...] das
3 andere fährt ihm davon [...] das heißt, die Strecke für das linke
4 Licht sozusagen ist kürzer als [...] für die des rechten.

Zitat 421

Schüler 19 argumentiert korrekt mit dem Abstand (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 421). Ist mit der Aussage „wenn es sich unabhängig bewegt“ (Zeile 1 von Zitat 421) die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gemeint, ist damit die Relativität der Gleichzeitigkeit aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hergeleitet. Der Schüler beantwortet die Aufgabe nicht so, wie sie gestellt ist, sondern so, als ob

sie positiv formuliert wäre. Das spricht dafür, dass die zweifache Verneinung in der Fragestellung problematisch ist. Ich werde die Aufgabe für den nächsten Unterrichtsdurchgang umformulieren.

Ich will genauer wissen, was mit „unabhängig bewegt“ (Zeile 1 von Zitat 421 auf der vorherigen Seite) gemeint ist. Auf die Frage, warum das Licht von der Erde gesehen bei den Shuttles nicht gleichzeitig ankomme, bewege es sich nicht unabhängig, antwortet Schüler 19:

1Schüler 19: ... weil's dann Schwung mitbekommt.

Zitat 422

Eine Abhängigkeit der Bewegung des Lichts würde sich nach der Vorstellung des Schülers darin äußern, dass es Schwung mitbekäme (Zitat 422), also nach vorne geschleudert werden würde. Das ist eine ähnliche Vorstellung wie die des Mitbewegens, die Schülerin 18 hat und die bereits im vorherigen Unterrichtsdurchgang formuliert wurde.

Schülerin 18 und Schüler 19 lösen Aufgabe 37 auf Seite 250 ohne Zeichnung, die als Hilfestellung bei Verbalisierungsproblemen gedacht war. Auch wenn diese Hilfe hier nicht nötig war, werde ich sie in der Aufgabenstellung beibehalten, damit SchülerInnen bei Bedarf darauf zurückgreifen können.

Zu Aufgabe 38 auf Seite 250 antworten Schülerin 18 und Schüler 19 folgendermaßen:

1Schülerin 18: (zeigt nach rechts; Anm.)

2Schüler 19: Beim rechten.

3Schülerin 18: Ja, beim rechten.

4Wittmann: Könnt ihr es auch aufzeichnen und ein bisschen erklären,

5 warum?

6Schüler 19: (zeichnet Raumschiff und Shuttles in Abbildung 6.23 auf

7 der nächsten Seite³⁵; Anm.) Jetzt geht hier Licht raus (zeichnet

8 rechten Lichtstrahl in Abbildung 6.23 auf der nächsten Seite;

9 Anm.); hier Licht raus (zeichnet linken Lichtstrahl in Abbil-

10 dung 6.23 auf der nächsten Seite; Anm.). Das (zeigt auf linkes

11 Shuttle in Abbildung 6.23 auf der nächsten Seite; Anm.) fliegt

12 ihm halt weg (zeigt in Abbildung 6.23 auf der nächsten Seite

13 nach links; Anm.). Und das (zeigt auf rechtes Shuttle in Abbil-

14 dung 6.23 auf der nächsten Seite; Anm.) kommt auch hier hin

³⁵Die Striche rechts von den Shuttles und dem Raumschiff sind die aus Comic-Zeichnungen bekannten Linien, die sich in Bewegungsrichtung gesehen hinter bewegten Objekten befinden.

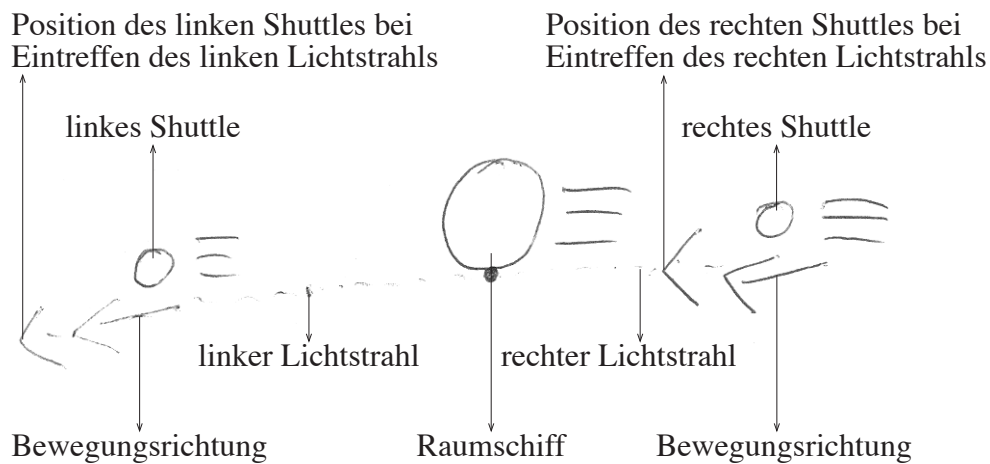


Abbildung 6.23.: Zu Zitat 423

- 15 (zeigt nach links in Abbildung 6.23; Anm.). Weil's dem (zeichnet
 16 Position des rechten Shuttles bei Eintreffen des rechten Licht-
 17 strahls in Abbildung 6.23; Anm.) entgegen kommt. Und das
 18 (zeigt auf linkes Shuttle in Abbildung 6.23; Anm.) fliegt ihm
 19 (zeichnet Position des linken Shuttles bei Eintreffen des linken
 20 Lichtstrahls in Abbildung 6.23; Anm.) halt weg.

Zitat 423

Die SchülerInnen lösen die Aufgabe richtig (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 423). Schüler 19 erklärt die Lösung anhand einer Zeichnung (Abbildung 6.23) mit den unterschiedlich langen Wegstrecken, die die Lichtstrahlen zurücklegen (Zeilen 7 bis 20 von Zitat 423). Er kann die Argumentation aus dem Film nachvollziehen. Ich werde die Aufgabe in dieser Formulierung beim nächsten Unterrichtsdurchgang beibehalten.

Zu Aufgabe 39 auf Seite 251 fertigt Schülerin 18 die Zeichnung aus Abbildung 6.24 auf der nächsten Seite an. Die Schülerin versteht die in der Aufgabe beschriebene Situation. Die SchülerInnen verstehen aber nicht, was von ihnen weiter verlangt wird. Schüler 19 fragt nach einer Rechnung. Nachdem ich erklärt habe, dass ich nur eine qualitative Lösung erwarte, antworten die SchülerInnen:

- 1 **Schüler 19:** Sehr wenig. [...] Na, weil, wenn das Licht auf beiden
 2 Seiten gleich schnell fliegt, [...] und die nur 100 Kilometer pro
 3 Stunde ...
 4 **Schülerin 18:** Stimmt, o. k.

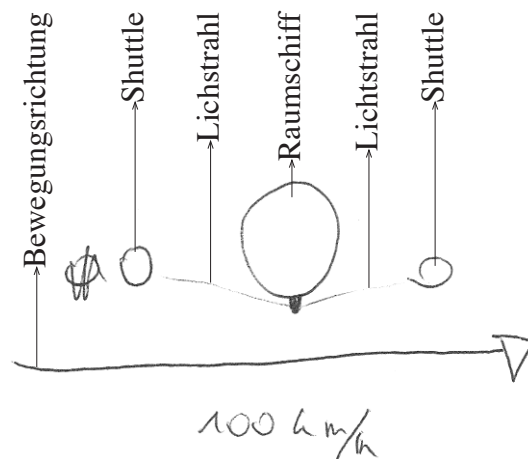


Abbildung 6.24.: Zu Aufgabe 39 auf Seite 251

- 5 **Schüler 19:** ... fliegen, das ist sehr, sehr langsam. [...] Und das Licht
6 ist extrem schnell. Also kommt's dort, wo das Schiff ihm entgegen
7 fliegt, nur ganz, ganz wenig früher an als auf der andern Seite.
8 **Schülerin 18:** Genau, weil wenn's schneller wegfliegen würde, dann
9 würde das Licht, ahm, dann würde es zwar hinten ganz schnell
10 ankommen, aber vorne müsste es einen längeren ...

Zitat 424

Schüler 19 kann die Aufgabe richtig lösen (Zeile 1 von Zitat 424). Er versteht, dass es auf das Verhältnis der Geschwindigkeit des Konvois zur Lichtgeschwindigkeit ankommt (Zeilen 5 bis 7 von Zitat 424). Schülerin 18 erklärt, wieso der Zeitunterschied bei einem schneller fliegenden Konvoi größer wäre (Zeilen 8 bis 10 von Zitat 424).

Für den nächsten Unterrichtsdurchgang werde ich diese Aufgabe so umformulieren, dass klar ist, dass als Antwort keine Zahl sondern eine qualitative Aussage vorgesehen ist.

Aufgabe 28 auf Seite 212 beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

- 1 **Schüler 19:** Vielleicht, weil es dann so gering ist?
2 **Schülerin 18:** Ja, ganz gering.
3 **Schüler 19:** Das (Aufgabe 28 auf Seite 212; Anm.) klingt jetzt irgend-
4 wie so, als ob das überhaupt nicht so ... oder vielleicht einfach
5 irgendwo: Wieso kommt es im Alltag nicht vor, dass zwei Ereig-
6 nisse für einen MERKBAR gleichzeitig oder so irgendwie. [...]

- 7 *Weil zuerst hab ich gedacht, dass es wirklich nicht ... nicht*
8 *gleichzeitig ...*

Zitat 425

Die SchülerInnen können die Aufgabe richtig beantworten (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 425). Schüler 19 findet die Fragestellung irreführend (Zeilen 3 bis 4 und 7 bis 8 von Zitat 425) und schlägt eine bessere Formulierung vor (Zeilen 5 bis 6 von Zitat 425). Ich werde diese Aufgabe für den nächsten Unterrichtsdurchgang entsprechend umformulieren.

Schüler 19 fasst den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* folgendermaßen zusammen:

- 1 **Schüler 19:** *Es gibt ein Mutterschiff, zwei Shuttles. [...] Aus der Sicht*
2 *des Mutterschiffs und der beiden Shuttles [...] kommt das Licht*
3 *auf beiden Seiten gleich an. [...] Und aus der Sicht der Erde*
4 *aber nicht, [...] da sie sich aus der Sicht der Erde bewegen,*
5 *[...] von links nach rechts. [...] Und das linke Shuttle demnach*
6 *dem Licht sozusagen entgegen kommt, [...] weil sich das unab-*
7 *hängig bewegt. [...] Und deswegen sieht's halt so aus, also ob*
8 *das links schneller ankommen würde als rechts.*

Zitat 426

Der Schüler kann den Inhalt des Filmes richtig zusammenfassen und erkennt die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit (Zeile 6 von Zitat 426). Der Konjunktiv, in dem der Schüler die Sichtweise der Erde formuliert (Zeilen 7 bis 8 von Zitat 426), deutet darauf hin, dass hier die Vorstellung von einem bevorzugten Bezugssystem durchschlägt. Um noch einmal die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme hervorzuheben, hätte ich rückfragen können, ob es nur so aussieht oder wirklich so ist. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang konsequent auf diesen Punkt achten.

Auf die Frage, ob der Film zwei Mal gezeigt oder am Anfang weggelassen werden sollte, antworten die SchülerInnen:

- 1 **Schüler 19:** *Nein, ich find das gut, dass Sie ihn uns am Anfang gezeigt*
2 *haben.*
3 **Schülerin 18:** *Ja, ja.*

Zitat 427

Für die SchülerInnen ist der Lehrfilm in den Unterrichts günstig einbezogen. Sie finden seinen Einsatz nach der Geschichte des einführenden Beispiels gut (Zitat 427 auf der vorherigen Seite). Um den nochmaligen Einsatz haben sie selbst gebeten.

6.4.1.6. Die Lösung

Der zweite Satz des Arbeitsblattes „Die Lösung“ ist für die SchülerInnen aufgrund der Partizipialkonstruktionen schwer verständlich. Für den nächsten Unterrichtsdurchgang wird diese Passage umformuliert. Der Rest des Arbeitsblattes bereitet den SchülerInnen keine sprachlichen Probleme.

Aufgabe 13 auf Seite 142 beantwortet Schüler 19 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 19:** *Ja, es sind zwei voneinander unabhängige Systeme [...]*
2 *und aus der Sicht der Enterprise (zeigt auf Enterprise in Abbil-*
3 *dung 5.4b auf Seite 142; Anm.) bewegt sich das andere System*
4 *mit der Voyager nach links (zeigt auf Garcus und Voyager in*
5 *Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.). [...]* Und vom System
6 *der Voyager (zeigt auf Voyager in Abbildung 5.4b auf Seite 142;*
7 *Anm.) bewegt sich die Enterprise nach rechts (zeigt auf Enter-*
8 *prise in Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.).*
9 **Wittmann:** *Genau. Und welche Sicht ist die bessere?*
10 **Schülerin 18:** *Es gibt keine.*
11 **Schüler 19:** *Gibt keine bessere.*

Zitat 428

Schüler 19 beschreibt korrekt die unterschiedlichen Sichtweisen aus den verschiedenen Systemen (Zeilen 1 bis 8 von Zitat 428). Die SchülerInnen geben an, dass keine der beiden Sichtweisen besser ist (Zeilen 10 bis 11 von Zitat 428), was der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme entspricht.

Zu Aufgabe 29 auf Seite 213 geben die SchülerInnen folgende Antwort:

- 1 **Schüler 19:** *Die Enterprise entspricht der Erde. [...], die Voyager*
2 *dem Mutterschiff [...]* und die beiden Planeten halt den ...
3 *Drohnen ...*
4 **Schülerin 18:** *... Space Shuttles.*
5 *[...]*
6 **Schüler 19:** *Kommt's auf Garcus (zeigt auf Garcus in Abbildung 5.4b*
7 *auf Seite 142; Anm.) zuerst an.*

8 **Schülerin 18:** *Ja, genau.*

9 **Schüler 19:** *Das ist dasselbe wie im Mutterschiff, [...] weil die fliegen*
10 *so und aus der Sicht von dem (zeigt auf Enterprise in Abbil-*
11 *dung 5.4b auf Seite 142; Anm.) fliegen's dem (zeigt von der*
12 *Voyager zu Garcus in Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.) [...]*
13 *entgegen.*

Zitat 429

Die SchülerInnen können eine Verbindung zwischen dem Film und der Situation aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 herstellen (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 429). Sie können die Argumentationsweise aus dem Film auf diese Situation anwenden und damit die Reihenfolge des Ankommens der Lichtstrahlen aus der Sicht der Enterprise bestimmen (Zeilen 6 bis 13 von Zitat 429).

Aufgabe 40 auf Seite 252 beantwortet Schüler 19 so:

1 **Schüler 19:** *Ja auch in diesem Beispiel sieht's doch die Enterprise so,*
2 *als ob das da (zeigt auf Garcus in Abbildung 5.4a auf Seite 142;*
3 *Anm.) früher ankommt.*

Zitat 430

Schüler 19 kann die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme richtig anwenden und damit die Lösung finden (Zitat 430).

Schülerin 18 fasst das Arbeitsblatt „Die Lösung“ folgendermaßen zusammen:

1 **Schülerin 18:** *Es geht wieder um Voyager, Raumschiff Enterprise und*
2 *in diesem Fall um Planeten. Es geht darum, egal ob sich jetzt das*
3 *System mit den zwei Planeten oder das System mit Raumschiffe*
4 *Enterprise bewegt, [...] dass immer, ahm, dass der Lichtstrahl*
5 *immer zuerst auf Garcus ankommt, aus der Sicht von Raumschiff*
6 *Enterprise.*

Zitat 431

Schülerin 18 hat verstanden, dass der Lichtstrahl aus der Sicht der Enterprise zuerst auf Garcus ankommt. Dabei ist es unerheblich, welches der Inertialsysteme man als ruhend und welches als bewegt betrachtet (Zitat 431). Die Schülerin wendet damit das Prinzip der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme richtig an.

6.4.1.7. Beispiel

Zu Aufgabe 30 auf Seite 213 geben die SchülerInnen folgende Antwort:

- 1 **Schüler 19:** *Ich würd sagen, also, es kommt nicht gleichzeitig an, son-*
2 *dern der Ton der rechten Sirene kommt zuerst an, weil ...*
3 **Schülerin 18:** *... weil er in die Richtung (nach rechts; Anm.) fliegt.*
4 **Schüler 19:** *Ja.*
5 **Schülerin 18:** *Obwohl ich das nicht ganz verstehe, weil Schall ... o. k.*
6 *Schall breitet sich auch aus.*

Zitat 432

Schüler 19 betrachtet den Zeitpunkt, in dem der Schall beim Proton ankommt (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 432). Schülerin 18 erklärt das damit, dass das Proton dem Schall der rechten Sirene entgegen fliegt (Zeilen 3 und 5 bis 6 von Zitat 432). In der darauf folgenden Diskussion erkennen die SchülerInnen, dass nicht der Zeitpunkt gefragt ist, in dem der Schall beim Proton eintrifft, sondern der Zeitpunkt, in dem die Sirene zu heulen beginnt. Es wird ihnen bewusst, dass wie beim Licht und den Raumschiffen auch beim Schall die Laufzeit einge-rechnet werden muss. Es zeigt sich in der Diskussion, dass die SchülerInnen den Unterschied zwischen dem Zeitpunkt des Eintreffens des Schalls und dem Zeitpunkt der Schallemission begrifflich richtig einordnen können. Daraufhin beantwortet Schüler 19 Aufgabe 30 auf Seite 213 so:

- 1 **Schüler 19:** *Also fürs Proton (zeigt auf das Proton in Abbildung 6.9*
2 *auf Seite 214; Anm.) geht die rechte zuerst an, [...] weil es*
3 *fliegt in die Richtung (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 nach*
4 *rechts; Anm.) oder das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf*
5 *die Sirenen, Max und Moritz; Anm.) fliegt in die Richtung (zeigt*
6 *in Abbildung 6.9 auf Seite 214 nach links; Anm.) [...] und der*
7 *Schall oder was auch immer [...] (zeigt in Abbildung 6.9 auf*
8 *Seite 214 auf die linke Sirene; Anm.) hinterher fliegen und der*
9 *(zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die rechte Sirene; Anm.)*
10 *kann ihm aber entgegen fliegen und so kommt es wesentlich*
11 *früher an.*

Zitat 433

Der Schüler wendet zur Lösung das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme richtig an. Anstatt das Proton als nach rechts fliegend zu betrachten, betrachtet er den Rest als nach links fliegend (Zeilen 2 bis 6 von Zitat 433 auf der vorherigen Seite). Der Schüler denkt sich offenbar die Sirenen wie den Start der galaktischen Spiele durch ein Signal, das aus der Mitte kommt, ausgelöst. Das Signal („Schall oder was auch immer“: Zeile 7 von Zitat 433 auf der vorherigen Seite) fliegt der linken Sirene hinterher (Zeile 8 von Zitat 433 auf der vorherigen Seite), die rechte Sirene fliegt ihm entgegen (Zeile 10 von Zitat 433 auf der vorherigen Seite). Somit kommt das Signal dort früher an (Zeile 11 von Zitat 433 auf der vorherigen Seite).

Das Einzige, das der Schüler in seiner Argumentation übersieht, ist, dass mit Schall die Relativität der Gleichzeitigkeit nicht so elementar erklärbar ist wie mit Licht, da die Schallgeschwindigkeit nicht absolut ist³⁶. Durch den Schall, den die Sirenen abgeben, ist der Schüler wahrscheinlich auf die Idee gekommen, das auslösende Signal eventuell auch durch Schall („Schall oder was auch immer“: Zeile 7 von Zitat 433 auf der vorherigen Seite) zu übermitteln. Abgesehen davon überträgt der Schüler die Argumentation, die beim Arbeitsblatt „Die Lösung“ verwendet wird, richtig auf die neue Situation. Er hat das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme so weit akzeptiert, dass er in diesem Beispiel den Erdboden nicht als bevorzugtes Bezugssystem ansieht.

Um zu testen, wie weit die SchülerInnen dieses Beispiel mit der Geschichte des einführenden Beispiels in Verbindung bringen können, ersuche ich sie, die Situation auf Abbildung 6.9 auf Seite 214 mit der Situation mit den Raumschiffen und den Planeten zu vergleichen. Schüler 19 antwortet:

- 1 **Schüler 19:** Wenn man den Moritz auslöst, [...] dann ist das (zeigt in
- 2 Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf Max; Anm.) Voyager, die beiden
- 3 (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die Sirenen; Anm.) die
- 4 Planeten und das Proton die Enterprise.

Zitat 434

Schüler 19 vergleicht Max mit der Voyager, die Sirenen mit den Planeten und das Proton mit der Enterprise (Zitat 434). Auf die Frage, ob es einen Unterschied zwischen der Rolle von Max und der Voyager gibt, antwortet der Schüler:

- 1 **Schüler 19:** Es kommt von den beiden (zeigt in Abbildung 6.9 auf
- 2 Seite 214 von den Sirenen in Richtung Max; Anm.) und nicht

³⁶Betrachtet man die Schallausbreitung nicht-relativistisch, ist das gleichzeitige Ankommen von Schallsignalen absolut.

- 3 vom Max (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 von Max in
4 Richtung Sirenen; Anm.).

Zitat 435

Schüler 19 erkennt, dass Max, ebenso wie die Voyager, Signale bekommt, durch die er die Gleichzeitigkeit von Ereignissen feststellt. Im Gegensatz zur Voyager löst er aber die Emission der Signale nicht aus (Zitat 435).

Dass Schüler 19 eine sinnvolle Parallele zwischen der Situation auf Abbildung 6.9 auf Seite 214 und der Situation mit den Raumschiffen und den Planeten herstellen kann und damit richtig operiert, stützt die Annahme in der Analyse zu Zitat 433 auf Seite 282, er denke, die Sirenen würden durch ein Signal, das aus der Mitte kommt, ausgelöst.

Um die Akzeptanz der Relativität der Gleichzeitigkeit zu testen, frage ich:

- 1 **Wittmann:** Was stimmt jetzt? Geht das (Sirenen; Anm.) gleichzeitig
2 los oder nicht?
3 **Schülerin 18:** Kommt auf die Sichtweise an.

Zitat 436

Schülerin 18 akzeptiert, dass es die Gleichzeitigkeit bzw. Nicht-Gleichzeitigkeit von der Sichtweise abhängt (Zitat 436).

Aufgabe 31 auf Seite 214 beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

- 1 **Schüler 19:** Für den Moritz ist es dasselbe (wie für das Proton; Anm.),
2 nur dass der Unterschied da nicht so extrem ist, weil der sich
3 nicht so schnell bewegt.
4 **Wittmann:** Kann das der Mensch wahrnehmen, den Unterschied?
5 **Schüler 19:** Glaub nicht.
6 **Schülerin 18:** Nein, weil er zu langsam ist.

Zitat 437

Die SchülerInnen erkennen, dass nicht nur für das Proton, sondern auch für Moritz die Sirenen nicht gleichzeitig losheulen. Da er aber sehr langsam unterwegs ist, ist der Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit zu gering, um ihn wahrzunehmen (Zitat 437).

Schüler 19 fasst das Arbeitsblatt „Beispiel“ so zusammen:

- 1 **Schüler 19:** *Max und Moritz, beide Feuerwehrmänner, sind beim Kern-*
2 *forschungszentrum CERN. [...] Ja, der Max steht. [...] Kann's*
3 *einberechnen, wie das jetzt für ihn war. Für ihn gehen beide*
4 *gleichzeitig los. [...] Und man soll halt herausfinden, ob's für*
5 *das Proton und für Moritz auch so ist.*

Zitat 438

Schüler 19 kann die Aufgabenstellung richtig zusammenfassen. Er betont („Kann's einberechnen“: Zeilen 2 bis 3 von Zitat 438), dass es nicht darauf ankommt, wann Max die Signale hört, sondern wann für Max die Signale ausgesandt wurden.

Abschließend zu dem Beispiel geben die SchülerInnen an, dass es ihnen verständlich und ihrer Meinung nach zur Thematik passend gewählt sei.

6.4.1.8. Abschließende Rückmeldung

Um eine abschließende Rückmeldung gebeten sagen die SchülerInnen, dass sie das Thema sehr interessant fänden und der Unterricht gut gestaltet sei. Die Arbeitsblätter fänden sie bis auf ein paar Sätze, die zu lang seien, verständlich. Die Graphiken seien logisch, das Aufzeichnen bei den Aufgaben hilfreich für das Verständnis. Die Aufgaben jeweils nach dem Text seinen gut zur Wiederholung. Die SchülerInnen hätten zum ersten Mal von diesem Thema gehört, es aber sofort verstanden.

Das Interesse der SchülerInnen rechtfertigt es, dieses Thema für diese Altersstufe zugänglich zu machen. Die Verwendung der Arbeitsblätter mit Erklärungen, Grafiken und Aufgaben wird positiv beurteilt. Das Aufzeichnen von Sachverhalten wird als hilfreich eingestuft. Insgesamt beurteilen die SchülerInnen den Unterrichtsdurchgang als verständlich.

6.4.2. Revision nach dem vierten Unterrichtsdurchgang

Auf Basis der Analyse des vierten Unterrichtsdurchgangs unterziehe ich das für den vierten Unterrichtsdurchgang überarbeitete Unterrichtskonzept einer Revision. Das überarbeitete Unterrichtskonzept wird in einem weiteren Unterrichtsdurchgang erprobt.

6.4.2.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Als Gründe für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise geben die SchülerInnen die Flugrichtung der Voyager, Effekte der

Gravitation, ein Hindernis für der Licht, eine richtungsabhängige Rückstrahlung von den Planeten, eine Veränderung des Lichts, die Größe der Planeten, eine unbeabsichtigte Reflexion, Effekte der Lichtlaufzeit oder einen Fehler eines Messgerätes an. Die letzten beiden Begründungen waren aufgrund der Interviews aus Kapitel 4 zu erwarten. Die SchülerInnen akzeptieren die Existenz exakt arbeitender Messgeräte und geeigneter Messverfahren sowie die Einbeziehung der Lichtlaufzeit und anderer bekannter Effekte. Der Messprozess wird als Datensammlung mit anschließender Auswertung akzeptiert.

Die Durchführung des Startvorganges der galaktischen Spiele stellt für die SchülerInnen keine Schwierigkeit dar. Die Geschichte des einführenden Beispiels ist für die SchülerInnen verständlich und wirkt nicht kindlich. Sie sind von den unterschiedlichen Messergebnissen auf der Voyager und der Enterprise überrascht, was darauf hindeutet, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff der SchülerInnen ein absoluter ist. Das deckt sich mit den Ergebnissen aus den Interviews. Die Vorstellung, die Voyager müsse mit genau der halben Lichtgeschwindigkeit unterwegs sein, wird nicht geäußert. Das ist ein Fortschritt zum vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Obwohl die SchülerInnen zunächst angeben, keine weitere Erklärung zu Aufgabe 1 auf Seite 129 zu finden, denken sie weiter über diese Aufgabe nach und finden weitere Gründe, die die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise erklären könnten. Das deutet darauf hin, dass die Geschichte des einführenden Beispiels bei den SchülerInnen intensive Denkprozesse und großes Interesse auslöst, was die Motivation zu lernen steigert.

Die SchülerInnen kennen Raumschiff Enterprise, jedoch nicht Raumschiff Voyager. Trotzdem finden sie dessen Verwendung nicht störend.

Der Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* wird von den SchülerInnen als klar und logisch und dessen Einsatz als gut bewertet.

Die Diskussionen zu den Aufgaben 32, 33 und 34 auf Seite 248, die teilweise von den SchülerInnen vorweggenommen wurden, sind hilfreich, um den Film in den richtigen Zusammenhang zur Geschichte des einführenden Beispiels zu bringen. Deswegen werden diese Aufgaben beim nächsten Unterrichtsdurchgang beibehalten.

Um die Abbildung der Natur im Rahmen physikalischer Theorien durch Messungen zu thematisieren, wird im nächsten Unterrichtsdurchgang nach Aufgabe 32 auf Seite 248 folgende Aufgabe³⁷ gestellt:

41. *Kommen die Lichtstrahlen für den Astronauten, der sich gleich schnell wie das Raumschiff und die Shuttles bewegt, wirklich gleichzeitig an oder misst er das nur? Kommen die Lichtstrahlen für die BeobachterInnen auf*

³⁷Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

der Erde wirklich beim hinteren Shuttle früher an als beim vorderen oder messen sie das nur?

6.4.2.2. Inertialsysteme

Ausgehend von auf dem Boden stehenden und fahrenden Zügen wird der Begriff des Inertialsystems gut verstanden. Die SchülerInnen können mit dem Begriff des Inertialsystems korrekt operieren. Das Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ wird als verständlich bezeichnet, abgesehen vom ersten Satz des zweiten Absatzes. Daher wird dieser Satz, der als zu lang empfunden wird, umformuliert zu: *Wenn wir in einem Zug sitzen, der erschütterungsfrei mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus fährt, spüren wir nicht, dass er fährt. Spüren wir es deshalb nicht, weil wir keine Sinnesorgane dafür haben, oder kann man überhaupt nicht feststellen, dass der Zug fährt?*

6.4.2.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ im Großen und Ganzen für verständlich. Lediglich das Wort „bezüglich“ bei der Beschreibung von Bewegungen finden die SchülerInnen störend. Auf ihren Vorschlag und weil sie selbst Bewegungen mit der Wendung „aus der Sicht“ beschreiben, werden die Sätze 4 bis 8 des 7. Absatzes dieses Arbeitsblattes umformuliert zu: *Bewegung kann es immer nur aus der Sicht von jemand anderem geben. Die Galileo bewegt sich aus der Sicht der Columbus und Deep Space Nine. Die Columbus ruht aus der Sicht von Deep Space Nine. Deep Space Nine ruht aus der Sicht der Columbus. Deep Space Nine und die Columbus bewegen sich aus der Sicht der Galileo.*

Die SchülerInnen akzeptieren rasch die Gleichwertigkeit von Inertialsystemen, die sich weit weg von Himmelskörpern befinden. Zur Relativität der Bewegung dieser Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit wird durch die Aufgaben 35 und 36 auf Seite 249 ein intensiver Lernprozess angestoßen. Wieder bewährt sich das Argument, im Weltraum bewege sich alles, wodurch sich kein fester Punkt finden lässt. Dadurch können sich die SchülerInnen von der Vorstellung einer absoluten Bewegung dieser Inertialsysteme lösen. Sobald die SchülerInnen versuchen, diese neu gewonnene Vorstellung über die Relativität der Bewegung auf eine Situation anzuwenden, in denen ein Planet vorkommt, geraten sie in einen kognitiven Konflikt. Die SchülerInnen beziehen sich dabei offenbar auf die Erde, die sie offensichtlich als bevorzugtes Bezugssystem betrachten. In einer Diskussion, die sich daraus ergibt, erkennen die SchülerInnen, dass die Planeten, insbesondere die Erde, auch nichts anderes sind als sich bewegende

Himmelskörper. Dadurch wird den die SchülerInnen die Möglichkeit eröffnet, sich von der Vorstellung eines bevorzugten Bezugssystems „Erde“ zu lösen. Sie finden sogar von selbst ein Beispiel aus ihrer eigenen Erfahrung für die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, in dem die Erde vorkommt. Dieses Beispiel ist den Situationen aus den Interviews aus Kapitel 4 ähnlich, in denen die SchülerInnen der Meinung waren, es könne nicht festgestellt werden, ob Züge führen oder auf der Erde stünden.

Es dürfte den Lernprozess bezüglich des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme unterstützen, dieses Prinzip in einer Situation vorzustellen, in der keine Himmelskörper vorkommen. Dadurch können nämlich keine Konflikte mit Vorstellungen über bevorzugte erdfeste Koordinatensysteme auftreten. Deshalb werde ich das Thema Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme im nächsten Unterrichtsdurchgang wieder auf dieselbe Art unterrichten. Zur besseren Verständlichkeit werden die Aufgaben 35 und 36 auf Seite 249 zu den folgenden Aufgaben³⁸ umformuliert:

42. *Die Shuttles Columbus und Galileo bewegen sich zueinander. Beide betrachten die Welt aus ihrer Sicht. Welche Sicht auf die Welt, die sich dabei ergibt, beschreibt die Natur richtiger? Begründung!*
43. *Die Galileo betrachtet sich einmal als ruhend und einmal als bewegt und betrachtet dabei jeweils die Welt. Welche Sicht auf die Welt, die sich dabei ergibt, beschreibt die Natur richtiger? Begründung!*

6.4.2.4. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Für die SchülerInnen ist das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ verständlich. Sie schlagen lediglich vor, das Wort „folgen“ durch „hinterhergehen“ zu ersetzen. Der dritte Satz dieses Arbeitsblattes wird daher umformuliert zu: *Max kann hinter Moritz hergehen.*

Die SchülerInnen können die Aufgaben lösen und den beschriebenen Sachverhalt richtig aufzeichnen.

Bei Schülerin 18 dürften zwei Konzepte zur Geschwindigkeit koexistieren: das Konzept einer *echten* Geschwindigkeit und das Konzept einer *scheinbaren* Geschwindigkeit. Die echte Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit bezüglich eines als bevorzugt betrachteten Bezugssystems, welches aber weder als solches erkannt wird noch dessen bevorzugte Rolle ins Bewusstsein der Schülerin dringt. In den Aufgaben auf dem Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“

³⁸Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

dürfte dieses bevorzugte Bezugssystem die Erde sein. Die scheinbare Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit bezüglich eines anderen Bezugssystem. Diese scheinbare Geschwindigkeit wird mit Abstandsänderungen in Zusammenhang gebracht und entspricht daher dem physikalischen Geschwindigkeitsbegriff.

Die echte Geschwindigkeit wird als unabhängig von Bezugssystemen betrachtet, weil das als bevorzugt betrachtete Bezugssystem nicht als ein solches realisiert wird. Bei der scheinbaren Geschwindigkeit wird das Bezugssystem als ein solches erkannt und die Rolle, die es spielt, bewusst. Dadurch wird klar, dass die scheinbare Geschwindigkeit vom Bezugssystem abhängt.

Schülerin 18 dürfte die Vorstellung entwickelt haben, dass Gegenstände eine echte und eine scheinbare Geschwindigkeit haben, Licht jedoch nur eine echte, die somit unabhängig vom Bezugssystem ist.

Die scheinbare Geschwindigkeit, die Gegenstände haben, entspricht dem physikalischen Geschwindigkeitsbegriff. Die echte Geschwindigkeit, die Licht hat, entspricht der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Falls SchülerInnen das Konzept einer echten und einer scheinbaren Geschwindigkeit entwickeln, muss es das Ziel einer unterrichtlichen Intervention sein, SchülerInnen die Möglichkeit zu eröffnen, für Gegenstände auf den Begriff der scheinbaren Geschwindigkeit zuzugreifen und für Licht auf den Begriff der echten Geschwindigkeit. Diese Vorgangsweise ist physikalisch anschlussfähig, da die Konzepte der scheinbaren Geschwindigkeit von Gegenständen und der echten Geschwindigkeit von Licht gemeinsam im Geschwindigkeitsbegriff in der relativistischen Physik aufgehen.

Die SchülerInnen akzeptieren schnell die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Das spricht für die Koexistenz der Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit. In [Mac82] wird gezeigt, dass bei SchülerInnen der 10. Schulstufe als Bezugssystem fast stets der Erdboden gewählt wird, der damit als bevorzugtes Bezugssystem betrachtet wird. Schülerin 18 trifft offenbar dieselbe Wahl. Für sie ist die echte Geschwindigkeit also das, was sie meist im Alltag als Geschwindigkeit betrachtet und als absolut ansieht. Da sie somit die meisten Alltagsgeschwindigkeiten als absolut betrachtet, ist es für sie gedanklich nicht schwierig, auch die Lichtgeschwindigkeit als absolut zu akzeptieren. Dass der Begriff der scheinbaren Geschwindigkeit, der sich nur mit gedanklicher Mühe vom Alltagsbegriff der Geschwindigkeit absetzen kann, nicht auf das Licht angewendet wird, kann dadurch sogar als erleichternde Überraschung aufgenommen werden.

Um den Bruch mit der klassischen Physik erkennbar zu machen, muss der Schwerpunkt auf die scheinbare Geschwindigkeit gelegt werden. Wird das Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit nicht verstanden, kann der Bruch mit der klassischen Physik nicht erkannt werden. Das Überraschende dürfte für die meisten SchülerInnen die scheinbare Geschwindigkeit sein. Die Konstanz der

Lichtgeschwindigkeit könnte man damit so formulieren: *Licht hat nur eine echte Geschwindigkeit, Gegenstände jedoch eine echte UND eine scheinbare.*

Während der Diskussion über die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme ist bei den SchülerInnen bereits eine Unzufriedenheit über deren Konzept bezüglich Ruhe und Bewegung aufgetreten (siehe Zitat 407 auf Seite 266). Ruhe und Bewegung wurden aus unterschiedlichen Sichtweisen beschrieben. Das für die SchülerInnen neue Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit fußt ebenfalls auf verschiedenen Sichtweisen. Möglicherweise versprechen sich die SchülerInnen von diesem für sie neuen Geschwindigkeitsbegriff ein verständliches, plausibles und fruchtbares Konzept für ein tieferes Verständnis von Ruhe und Bewegung und sind daher bereit, sich auf diesen neuen Geschwindigkeitsbegriff einzulassen.

Demnach muss zunächst der Begriff der Relativität von Ruhe und Bewegung verstanden werden, bevor die SchülerInnen bereit sind, das Konzept einer scheinbaren Geschwindigkeit zu akzeptieren. Die Akzeptanz dieses Konzepts ist wiederum nötig, um zu erkennen, was die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit besagt. Diese Abfolge werde ich auch im nächsten Unterrichtsdurchgang einhalten. Um die Diskussion über „Ruhe“ und „Bewegung“ noch intensiver anzuregen und damit eine gute Basis für die weiteren Überlegungen zu schaffen, wird auf dem Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ vor Aufgabe 7 auf Seite 137 folgende Aufgabe³⁹ eingeschoben:

44. *Ein Zug fährt mit konstanter Geschwindigkeit auf gerader Strecke. Ein anderer Zug steht in einem Bahnhof. Kann man sagen, welcher dieser beiden Züge sich nicht bewegt? Begründung!*

6.4.2.5. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die SchülerInnen möchten den Lehrfilm vor der Bearbeitung des Aufgabenblattes „Fragen zum Film“ noch einmal sehen. Der optionale Einsatz des Filmes an dieser Stelle individualisiert den Unterricht und gibt den Lernenden mehr Möglichkeiten, im Lernprozess selbst zu entscheiden, was eine bessere Voraussetzung für dauerhaftes Behalten schafft und Eigenverantwortung, Selbstvertrauen und Motivation steigert, [Rei08].

Die SchülerInnen äußern die Vorstellung, die Lichtstrahlen würden sich mit dem Konvoi nicht mitbewegen. Diese Vorstellung ist auch bereits beim vorherigen Unterrichtsdurchgang aufgetreten. Weiteres sind die SchülerInnen der Ansicht, Licht bewege sich unabhängig. Das spricht für die Existenz der Konzepte einer echten und einer scheinbaren Geschwindigkeit. Hat Licht nur eine echte

³⁹Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

Geschwindigkeit, ist diese unabhängig vom Bezugssystem. Das bedeutet, dass Licht sich unabhängig vom Bezugssystem bewegt. Es kann sich daher auch mit einem Bezugssystem nicht mitbewegen. Es nimmt von einem Bezugssystem keinen Schwung mit.

Die Bälle, die die Schülerinnen in die Diskussion einbringen, haben eine scheinbare Geschwindigkeit, die vom Bezugssystem abhängt. Darum bewegen sich die Bälle abhängig vom Bezugssystem, was zur Folge hat, dass sie von diesem Schwung mitnehmen können.

Für Gegenstände und deren scheinbare Geschwindigkeit dürften die SchülerInnen ansatzweise eine Vorstellung entwickelt haben, die der klassischen Physik entspricht. Für Licht und dessen echte Geschwindigkeit dürfte eine Vorstellung entstanden sein, die der relativistischen Physik entspricht. Die Koexistenz dieser Vorstellungen entspricht der Verwendung der klassischen Physik bei Geschwindigkeiten, deren Betrag klein ist gegenüber der Lichtgeschwindigkeit, und der Verwendung der relativistischen Physik bei Geschwindigkeiten, deren Betrag in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit kommt. Wer den Unterschied dieser beiden Vorstellungen erkennt, hat gute Chancen, den Bruch zwischen klassischer und relativistischer Physik zu begreifen.

Um bereits bei der Einführung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit die Idee zu stimulieren, dass sich Licht unabhängig von Bezugssystemen bewegt, wird dem 6. Absatz des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ folgender Satz angefügt: *Licht bewegt sich unabhängig von denjenigen, die es beobachten.*

Die SchülerInnen dürften die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit erkennen. Um Verständnisschwierigkeiten zu vermeiden, wird Aufgabe 37 auf Seite 250 zu folgender Aufgabe⁴⁰ umformuliert:

45. *Die Lichtstrahlen, die das Raumschiff aussendet, sind für alle gleich schnell. Das ist wichtig, denn nur so kann man begründen, dass die Lichtstrahlen von der Erde aus gesehen bei den Shuttles nicht gleichzeitig ankommen. Erkläre mit Hilfe einer Zeichnung, wieso die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bei der Begründung wichtig ist.*

Die SchülerInnen können die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Situation richtig anwenden. Um klarzustellen, dass zu Aufgabe 39 auf Seite 251 eine quantitative Lösung erwartet wird, wird diese Aufgabe zu folgender Aufgabe⁴¹ umformuliert:

⁴⁰Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

⁴¹Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

46. *Nehmen wir an, der Konvoi bewegt sich mit einer Geschwindigkeit, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist, an der Erde vorbei, nämlich mit 100 km/h. Wird dann der Zeitunterschied, mit dem die Lichtsignale von der Erde aus betrachtet bei den Shuttles ankommen, größer, kleiner oder bleibt er gleich? Begründe mit Hilfe einer Zeichnung.*

Auf Vorschlag der SchülerInnen wird Aufgabe 28 auf Seite 212 zu folgender, korrekter gestellten Aufgabe⁴² umformuliert:

47. *Wieso merkt man es im Alltag nicht, dass zwei Ereignisse für einen gleichzeitig stattfinden und für den anderen nicht? (Hinweis: Aufgabe 46)*

Die SchülerInnen können den Inhalt des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* zusammenfassen und finden ihn günstig in den Unterricht einbezogen. Ich werde den Film im nächsten Unterrichtsdurchgang daher wieder nach der Geschichte des einführenden Beispiels und auf Verlangen zum Arbeitsblatt „Fragen zum Film“ zeigen.

6.4.2.6. Die Lösung

Bis auf den zweiten Satz ist das Arbeitsblatt „Die Lösung“ sprachlich gut verständlich. Dieser Satz wird umformuliert zu: *Man kann es entweder so sehen, dass die Enterprise an Aldubian, der Voyager und an Garcus nach rechts vorbeifliegt (Abbildung 5.4a auf Seite 142), oder so, dass Aldubian, die Voyager und Garcus an der Enterprise nach links vorbeifliegen (Abbildung 5.4b auf Seite 142).* Um eine ähnliche Formulierung in Aufgabe 40 auf Seite 252 zu verwenden, wird diese Aufgabe zu folgender Aufgabe⁴³ umformuliert:

48. *Die Situationen aus den Abbildungen 5.4a und 5.4b auf Seite 142 sind nicht unterscheidbar. In welcher Reihenfolge kommen nach Aufgabe 29 auf Seite 213 für die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten an, wenn man es so sieht, dass die Enterprise an Aldubian, der Voyager und an Garcus nach rechts vorbeifliegt?*

Die SchülerInnen erkennen, dass die beiden Situationen, die in Abbildung 5.4 auf Seite 142 dargestellt sind, physikalisch gleichwertig sind. Die SchülerInnen können die Situation aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] auf die Sichtweise übertragen, in der die Enterprise ruht. Damit können sie erklären, wie man in dieser Sichtweise erkennt, dass das Licht zuerst auf Garcus eintrifft.

⁴²Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

⁴³Siehe Fußnote 8 auf Seite 137

Indem die SchülerInnen das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme anwenden, können die SchülerInnen erklären, wie man aus der Sicht der fliegenden Enterprise verstehen kann, dass das Licht zuerst bei Garcus ankommt und dann bei Aldubian. Ich werde im nächsten Unterrichtsdurchgang diese Sequenz wieder auf dieselbe Art und Weise unterrichten.

6.4.2.7. Beispiel

Die Fragen nicht detaillierter zu formulieren als im letzten Unterrichtsdurchgang hat sich bewährt. Dadurch ergibt sich noch einmal die Möglichkeit, den Unterschied zwischen dem Zeitpunkt eines Ereignisses und dem Zeitpunkt der Messung dieses Ereignisses an einem anderen Ort herauszustreichen. Die SchülerInnen begreifen die Wichtigkeit dieser Unterscheidung für eine Messung und deren Auswertung.

Die SchülerInnen können die Aufgaben lösen, indem sie das zuvor Gelernte sinnvoll auf die neue Situation übertragen und anwenden. Sie akzeptieren auch in diesem Fall, dass Gleichzeitigkeit bzw. Nicht-Gleichzeitigkeit eine Frage der Sichtweise ist.

Das Arbeitsblatt „Beispiel“ ist für die SchülerInnen verständlich. Sie geben an, dass das Beispiel ihrer Meinung nach zum Thema passt.

Ich werde das Arbeitsblatt „Beispiel“ für den nächsten Unterrichtsdurchgang unverändert lassen.

6.5. Fünfter Unterrichtsdurchgang

Im fünften Unterrichtsdurchgang wird das nach dem vierten Unterrichtsdurchgang revidiert Unterrichtskonzept einer Erprobung unterzogen.

6.5.1. Analyse des fünften Unterrichtsdurchgangs

6.5.1.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Zu Aufgabe 1 auf Seite 129 gibt Schülerin 20 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 20:** *Wegen der Geschwindigkeit höchstwahrscheinlich.*
- 2 *[...] Weil da ... hier fliegt er (Enterprise; Anm.) ja sozusagen*
- 3 *gegen das Licht (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 zwischen*
- 4 *Aldubian und Voyager; Anm.) und hier fliegt er mit dem Licht*

- 5 (*zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 zwischen Voyager und*
6 *Garcus; Anm.*).

Zitat 439

Schülerin 20 hält die Richtung der Geschwindigkeit der Enterprise in Relation zur Richtung der ausgesandten Lichtstrahlen für die Ursache der unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zitat 439). Die Schülerin kann ihre Vermutung aber nicht näher spezifizieren, akzeptiert aber in weiterer Folge, dass die Bewegungen aller beteiligten Objekte bekannt seien und im Ergebnis berücksichtigt werden. Die Schülerin fragt daraufhin nach:

- 1 **Schülerin 20:** *Also hat es mit der Geschwindigkeit nichts zu tun?*
2 **Wittmann:** *Na ja, das ist die Frage. Was, sozusagen ...*
3 **Schülerin 20:** *Das wird schon irgendwas mit der Geschwindigkeit zu*
4 *tun haben.*

Zitat 440

Die Schülerin hält weiterhin die Geschwindigkeit für die Ursache der unterschiedlichen Messergebnisse auf der Enterprise und der Voyager, kann das aber nicht näher spezifizieren (Zitat 440).

Schüler 21 gibt zu Aufgabe 1 auf Seite 129 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 21:** *Er (Enterprise; Anm.) ist vielleicht so in der Art den*
2 *Lichtstrahlen hinterher geflogen, so in der Art? Also dass er*
3 *quasi sie fast eingeholt hat?*
4 **Wittmann:** *Aber was hat das dann damit zu tun, wann sie da ankom-*
5 *men?*
6 **Schüler 21:** *Kann ich nicht beantworten.*
7 **Schülerin 20:** *Vielleicht hat er selber auch Licht weggelassen und das*
8 *mit gemessen?*

Zitat 441

Schüler 21 vermutet, die Enterprise habe die Lichtstrahlen fast eingeholt (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 441), kann aber nicht erklären, wie daraus die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise resultieren (Zeile 6 von Zitat 441). Schülerin 20 vermutet, die Enterprise habe möglicherweise ei-

genes Licht mit gemessen (Zeile 7 von Zitat 441 auf der vorherigen Seite). Die Schülerin akzeptiert in weiterer Folge, dass die Enterprise nur gemessen hat, also lediglich passiv beteiligt war.

Die SchülerInnen meinen zu Aufgabe 1 auf Seite 129:

1 **Schülerin 20:** *Keine Ahnung.*

2 **Schüler 21:** *(schüttelt den Kopf; Anm.) Mit fällt dazu nichts mehr ein.*

Zitat 442

Die SchülerInnen geben an, keine weitere Idee zur Lösung von Aufgabe 1 auf Seite 129 zu haben (Zitat 442).

Den SchülerInnen ist Raumschiff Enterprise bekannt, Schüler 21 kennt auch Raumschiff Voyager. Die Verwendung beider Raumschiffe halten die SchülerInnen für passend.

Sie haben doch noch eine Idee zu Aufgabe 1 auf Seite 129:

1 **Schülerin 20:** *Ich glaub nur, das hat irgendwas damit zu tun, dass der*
2 *(zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.)*
3 *in die Richtung fliegt (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171*
4 *nach rechts; Anm.), dass es genau dort (zeigt in Abbildung 6.2c*
5 *auf Seite 171 auf Garcus; Anm.) mit der Messung schneller*
6 *ankommt.*

7 **Wittmann:** *Nein, die Messung kommt nicht schneller an. Das Licht*
8 *kommt schneller an.*

9 **Schülerin 20:** *Ja, dass er glaubt, dass Licht schneller ankommt.*

10 **Schüler 21:** *Es ist was mit der Distanz vielleicht.*

11 **Wittmann:** *Na, ja, du meinst, weil er (Enterprise; Anm.) da herüben*
12 *(zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 zwischen Voyager und*
13 *Garcus; Anm.) schon ist?*

14 **Schüler 21:** *Ja.*

Zitat 443

Schülerin 20 ist der Meinung, aufgrund der Bewegung der Enterprise „glaubt“ (Zeile 9 von Zitat 443) man dort (siehe auch Zitat 446 auf Seite 297), das Licht käme auf Garcus früher an (Zeilen 1 bis 9 von Zitat 443). Schüler 21 meint, die unterschiedlichen Distanzen der Enterprise zu den Planeten bei der Messung könnten die unterschiedlichen Messergebnisse erklären. Er akzeptiert

aber zunächst, dass die Positionen aller beteiligten Objekte in die Messung mit einbezogen werden. Er akzeptiert damit auch die Messung als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung.

Schülerin 20 hat noch eine Erklärung zu Aufgabe 1 auf Seite 129:

1 **Schülerin 20:** *Vielleicht kommt es gar... da schneller an. Mit der*
2 *Zeitverschiebung? Nein.*

3 **Wittmann:** *Was meinst du mit Zeitverschiebung?*

4 **Schülerin 20:** *Na ja, wenn die weit auseinander sind, könnte doch*
5 *eine Zeitverschiebung dort sein.*

6 **Wittmann:** *Was meinst du mit Zeitverschiebung?*

7 **Schülerin 20:** *Na ja, wenn ... in Amerika ist es jetzt später⁴⁴ als hier*
8 *(Wien; Anm.). [...] Und das sind zwei verschiedene Planeten,*
9 *die dann um einiges weiter auseinander sind.*

Zitat 444

Schülerin 20 schlägt vor, die verschiedenen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise durch unterschiedliche Zeitzonen zu erklären (Zitat 444). Die Schülerin akzeptiert aber in weiterer Folge, dass unterschiedliche Zeitzonen, so es sie gibt, im Ergebnis berücksichtigt werden.

Schüler 21 gibt zu Aufgabe 1 auf Seite 129 folgende Antwort:

1 **Schüler 21:** *Vielleicht mit der Rotation der Planeten.*

Zitat 445

Schüler 21 glaubt, die Rotation der Planeten könnte etwas mit den unterschiedlichen Messergebnissen auf der Voyager und der Enterprise zu tun haben (Zitat 445). Er akzeptiert in weiterer Folge, dass Effekte der Rotation berücksichtigt worden wären.

Ich komme noch einmal auf eine Aussage der Schülerin in Zitat 443 auf der vorherigen Seite zurück:

1 **Wittmann:** *Da hast vorher gesagt, es scheint, dass es nicht gleichzeitig*
2 *ist.*

3 **Schülerin 20:** *Ja.*

⁴⁴Richtig: früher

4 **Wittmann:** *Ist es nicht gleichzeitig, oder scheint's nur so? Glauben*
5 *die das nur?*

6 **Schülerin 20:** *Ich glaub, dass der (Enterprise; Anm.) durch die Bewe-*
7 *gung eine falsche Messung kriegt, aber es eigentlich gleichzeitig*
8 *ist.*

Zitat 446

Schülerin 20 ist der Ansicht, die Messung auf der Enterprise verlaufe aufgrund der Bewegung falsch. Auch für die Enterprise seien die Beginne der galaktischen Spiele „eigentlich“ gleichzeitig (Zeilen 6 bis 8 von Zitat 446). Das spricht dafür, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff der Schülerin ein absoluter ist. Sie akzeptiert aber in weiterer Folge, dass die Hochtechnologie-Geräte der Sternenflotte fehlerfrei messen können.

Nachdem die SchülerInnen angeben, keinen weiteren Vorschlag zu Aufgabe 1 auf Seite 129 zu haben, fasst Schüler 21 die Geschichte des einführenden Beispiels folgendermaßen zusammen:

1 **Schüler 21:** *Das Licht braucht von dem Detektor (zeigt in Abbil-*
2 *dung 6.2c auf Seite 171 auf die Lichtquelle der Voyager; Anm.)*
3 *[...] gleich lang zu den beiden Planeten (zeigt in Abbildung 6.2c*
4 *auf Seite 171 von der Voyager in Richtung beider Planeten;*
5 *Anm.). Nur erscheint's so, wenn ein offensichtlich sich bewe-*
6 *gendes Objekt sich dort hin bewegt (zeigt in Abbildung 6.2c*
7 *auf Seite 171 von der Enterprise zu Garcus; Anm.), dass die*
8 *Messung hier (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Gar-*
9 *cus; Anm.) früher ankommt als hier (zeigt in Abbildung 6.2c auf*
10 *Seite 171 auf Aldubian; Anm.).*

11 **Wittmann:** *Scheint nur so, oder ist es so?*

12 **Schüler 21:** *Es scheint, glaub ich, nur so, weil, ich glaub Raum-Zeit-*
13 *Kontinuum ...*

14 **Wittmann:** *Ist ja wurscht, wie man's nennt.*

15 **Schüler 21:** *... weil, weil es sich bewegt, nimmt er das Licht früher*
16 *wahr als der, von dem er sich wegbewegt. Also dort, wo er*
17 *sich hinbewegt, nimmt er es früher wahr, als dort, wo er sich*
18 *wegbewegt.*

Zitat 447

Schüler 21 kann die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise beschreiben (Zeilen 1 bis 10 von Zitat 447 auf der vorherigen Seite). Mit der Wendung „die Messung [...] früher ankommt“ ist wahrscheinlich gemeint „das Gemessene [...] früher ankommt“. Eine ähnliche Gleichsetzung macht bereits Schülerin 20 in Zitat 443 auf Seite 295. Schüler 21 hält das Messergebnis auf der Enterprise für ein scheinbares, das er damit begründet, dass sich die Enterprise von Aldubian weg- und zu Garcus hinbewegt (Zeilen 12 bis 18 von Zitat 447 auf der vorherigen Seite). Der Schüler hält offensichtlich unterschiedlich lange Wegstrecken von den Planeten zur Enterprise für die Ursache des Messergebnisses auf der Enterprise. Die Erklärung, dass das Messergebnis ein rückgerechnetes aus den Positionen aller beteiligten Objekte ist, wird vom Schüler wieder akzeptiert.

Schülerin 20 will Näheres zu Aufgabe 1 auf Seite 129 wissen:

1 Schülerin 20: *Eine Frage: Gibt's Schatten?*

Zitat 448

Die Schülerin denkt an Abschattungen als mögliche Ursachen für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zitat 448). Die Schülerin akzeptiert in weiterer Folge, dass es hier keine Abschattungen gibt.

Schülerin 20 beantwortet Aufgabe 1 auf Seite 129 so:

1 Schüler 20: *Vielleicht, weil er (Enterprise; Anm.) unten ist. Weil er*
2 *(Enterprise; Anm.) nicht genau dazwischen (zwischen den Pla-*
3 *neten; Anm.) steht. Aber er steht trotzdem genau gleich entfernt*
4 *von beiden.*

Zitat 449

Auch Schülerin 20 vermutet, dass die Position der Enterprise etwas mit den unterschiedlichen Messergebnissen auf der Voyager und der Enterprise zu tun hat (Zitat 449). Die Schülerin akzeptiert aber in weiterer Folge, dass die Positionen aller beteiligten Objekte bei der Messung eingerechnet werden.

Schüler 21 beantwortet Aufgabe 1 auf Seite 129 folgendermaßen:

1 Schüler 21: *Dadurch dass er (Enterprise; Anm.) sich bewegt, braucht*
2 *das Licht von hier (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf*

- 3 *Aldubian; Anm.) länger als von hier (zeigt in Abbildung 6.2c auf*
4 *Seite 171 auf Garcus; Anm.) nach da (zeigt in Abbildung 6.2c*
5 *auf Seite 171 auf Enterprise; Anm.).*

Zitat 450

Schüler 21 hält wieder unterschiedlich lange Abstände von den Planeten zur Enterprise für die Ursache der unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise (Zitat 450). Ich erkläre noch einmal, dass die Positionen aller beteiligten Objekte im Messergebnis eingerechnet sind. Schüler 21 meint daraufhin:

- 1 **Schüler 21:** *Ach so!*

Zitat 451

Schüler 21 bemerkt, dass wir die Positionen der beteiligten Objekte bereits als Grund für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise ausgeschlossen haben (Zitat 451).

Den SchülerInnen fällt keine weitere Antwort zu Aufgabe 1 auf Seite 129 ein. Sie finden die Geschichte des einführenden Beispiels gut und nicht kindlich.

Nachdem die SchülerInnen den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* gesehen haben, beurteilen sie ihn als gut und finden den Sachverhalt gut erklärt und verständlich. Im weiteren Verlauf des Unterrichtsdurchganges halten sie den Einsatz des Filmes nach der Geschichte des einführenden Beispiels für passend gewählt.

Aufgabe 32 auf Seite 248 beantwortet Schülerin 20 so:

- 1 **Schülerin 20:** *Ich glaub, man kann gar nicht sagen, wer Recht hat,*
2 *[...] weil es sozusagen zwei Sichtweisen ist und halt relativ ist*
3 *[...] und wenn man sich ... ich glaub, das ist das Gleiche, ob ...*
4 *wenn sich die Raumschiffe bewegen oder wenn man sich selber*
5 *bewegt, [...] dass das dann anders aussieht und das ist einfach*
6 *andere Sicht... also Perspektive, aber trotzdem auch richtig.*

Zitat 452

Schülerin 20 hält die Sichtweisen des Astronauten und der BeobachterInnen auf der Erde für gleichwertig (Zeilen 1 bis 3 und 5 bis 6 von Zitat 452). Die Schülerin nimmt möglicherweise im Ansatz die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme vorweg (Zeilen 3 bis 5 von Zitat 452).

Zu Aufgabe 41 auf Seite 286 gibt Schülerin 20 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 20:** Für ihn wirklich, für die Erde oder da hier (zeigt auf
2 Abbildung 6.2c auf Seite 171; Anm.) Raumschiff, fürs andere
3 Raumschiff nicht.
4 **Wittmann:** Ja, und sozusagen die auf der Erde messen sozusagen
5 erst hinten dann vorne. Messen sie das nur oder ist das für sie
6 wirklich wirklich?
7 **Schülerin 20:** Ist für sie wirklich wirklich.

Zitat 453

Für die Schülerin ist das Messergebnis des Astronauten wirklich gleichzeitig, für die Erde oder das andere Raumschiff (Enterprise) nicht gleichzeitig (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 453). Für die Schülerin bilden die Messergebnisse des Astronauten und der BeobachterInnen auf der Erde die Natur gleichberechtigt ab (Zeilen 1 und 7 von Zitat 453). Darüber hinaus stellt die Schülerin eigenständig einen Bezug vom Lehrfilm zur Geschichte des einführenden Beispiels her (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 453).

Schüler 21 beantwortet Aufgabe 33 auf Seite 248 folgendermaßen:

- 1 **Schüler 21:** Ja, und zwar, weil, ähm, wenn es für den, den unabhängi-
2 gen Beobachter, ahm, sieht es so aus, als würden die Lichtstrah-
3 len, die von hier nach hier kommen (zeigt in Abbildung 6.2c
4 auf Seite 171 von Voyager zu Garcus; Anm.), hier hin kürzer
5 dauern, weil es sich ... weil, ahm, die sich in seiner Bewe-
6 gung ... mit ... mit seiner Richtung mit bewegen, und die (zeigt
7 in Abbildung 6.2c auf Seite 171 zwischen Voyager und Aldubian;
8 Anm.) ...
9 [...]]
10 **Wittmann:** Du hast vorhin wieder gesagt, es scheint für ihn so. Scheint
11 es für ihn nur so oder ist es für ihn auch so?
12 **Schüler 21:** Ahm, für ihn ist es wirklich so.

Zitat 454

Schüler 21 beschreibt die Messung durch die Enterprise als die Sichtweise eines „unabhängigen Beobachters“ (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 454). Im Lehrfilm wird die Erde als ein eigenes System bezeichnet, das *unabhängig* von den fliegenden Raumschiffen existiert. Die Verwendung des Wortes „unabhängig“ durch den

Schüler im Zusammenhang mit der Sichtweise der Enterprise lässt darauf schließen, dass der Schüler die Erde aus dem Lehrfilm mit der Enterprise identifiziert. Daraus folgt, dass der Schüler auch einen Zusammenhang zwischen dem Konvoi aus dem Lehrfilm und den Planeten und der Voyager herstellt. Der Schüler versucht sogar, eine Begründung für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zu finden (Zeilen 1 bis 8 von Zitat 454 auf der vorherigen Seite), was ihm aber noch nicht gelingt. Er ist außerdem der Ansicht, das Messergebnis des unabhängigen Beobachters ist gleichwertig mit dem anderen Messergebnis (Zeile 12 von Zitat 454 auf der vorherigen Seite).

Schülerin 20 beantwortet Aufgabe 34 auf Seite 248 so:

- 1 **Schülerin 20:** *Weil er sozusagen zeigt, dass beides richtig ist, weil*
- 2 *er ... Wir waren vorher auf die Idee versessen, dass nur eines*
- 3 *der beiden Raumschiffe richtig messen kann, [...] aber der zeigt,*
- 4 *dass es einfach ... kommt drauf an für wen, richtig ist.*

Zitat 455

Für Schülerin 20 ist der Lehrfilm hilfreich, weil er zeigt, dass beide Messergebnisse, das der Voyager und das der Enterprise, im Gegensatz zu dem, was die SchülerInnen zuvor angenommen haben, richtig sind (Zitat 455). Dass die SchülerInnen vor dem Betrachten des Lehrfilmes nicht in Betracht gezogen haben, beide Messergebnisse könnten korrekt sein, lässt darauf schließen, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff, den die SchülerInnen in den Unterrichtsdurchgang mitbrachten, ein absoluter war. Die Relativität der Gleichzeitigkeit ist also für die SchülerInnen unerwartet und überraschend.

Schüler 21 fasst den Inhalt des Lehrfilmes folgendermaßen zusammen:

- 1 **Schüler 21:** *Ahm, wenn sich, ahm, eine Gruppe, ein System von drei*
- 2 *Raumschiffen, ahm, alle mit derselben Geschwindigkeit, ahm, in*
- 3 *eine Richtung bewegen und das eine Raumschiff Lichtstrahlen*
- 4 *aussendet (bewegt seine Hände auseinander; Anm.), kommen*
- 5 *die immer gleichzeitig an. Ahm, und wenn jetzt jemand das*
- 6 *mit derselben Geschwindigkeit von außen beobachtet, dann*
- 7 *sieht das für ihn auch wirklich so aus. Wenn dieses System jetzt*
- 8 *allerdings zum Beispiel jetzt an der Erde vorbeifliegt und wir*
- 9 *beobachten das, sieht's für uns so aus, als würden die Strahlen,*
- 10 *die nach hinten ausgesendet werden, quasi ins Flugzeug hinein*
- 11 *und ... also in das eine Raumschiff (Shuttle; Anm.) hinein und*
- 12 *das vordere muss es ... müssen sie die Strahlen quasi folgen.*

- 13 *[...] Deswegen sieht's für uns aus, als würde der Planet (zeigt in*
14 *Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Garcus; Anm.) das zuerst sehen*
15 *und der (zeigt in Abbildung 6.2c auf Seite 171 auf Aldubian;*
16 *Anm.) erst danach.*
17 **Wittmann:** *Sieht's für uns nur so aus oder ist ...*
18 **Schüler 21:** *Es ist für uns so.*

Zitat 456

Der Inhalt des Lehrfilmes wird von Schüler 21 richtig zusammengefasst. Dabei identifiziert er die Shuttles mit den Planeten und stellt somit eine Verbindung zwischen dem Film und der Geschichte des einführenden Beispiels her (Zeilen 1 bis 16 von Zitat 456). Dabei sieht er das Ergebnis, welches auf der Erde gemessen wird, als gleichwertig mit dem anderen Messergebnis an (Zeile 18 von Zitat 456).

6.5.1.2. Inertialsysteme

Die SchülerInnen beurteilen das Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ als klar und verständlich. Die Verständnisschwierigkeiten, die im vierten Unterrichtsdurchgang aufgetreten sind, scheinen durch eine Umformulierung nicht mehr auf. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Aufgabe 2 auf Seite 137 beantwortet Schülerin 20 folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 20:** *Weil man, wenn man nicht aus dem Fenster schaut, im*
2 *Flugzeug nicht merkt, dass man sich fortbewegt.*

Zitat 457

Schülerin 20 erkennt, woran man merkt, dass ein mit konstanter Geschwindigkeit fliegendes Flugzeug ein Inertialsystem ist (Zitat 457).

Aufgabe 3 auf Seite 137 beantwortet Schüler 21 so:

- 1 **Schüler 21:** *Man merkt daran, dass dieser bremsende Zug kein Iner-*
2 *tialsystem ist, weil, ähm, dadurch dass er bremst, ähm, spüren*
3 *wir, dass er sich bewegt.*
4 **Wittmann:** *Was spüren wir da?*
5 **Schüler 21:** *Ahm, die, ähm, Trägheit zieht uns nach vorn.*

Zitat 458

Schüler 21 kann erklären, woran man erkennt, dass ein bremsender Zug kein Inertialsystem ist (Zitat 458 auf der vorherigen Seite).

Zu Aufgabe 4 auf Seite 137 geben die SchülerInnen folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 20:** *Ahm, der erste Punkt ist mal, ein Ringelspiel ist nicht*
- 2 *erschütterungsfrei. [...]*
- 3 **Wittmann:** *Wenn wir jetzt nur auf die Bewegung eingehen? [...]*
- 4 **Schüler 21:** *Da würde man vermutlich die Fliehkräfte spüren. [...]*
- 5 *Weil die drücken dich in den Sessel hinein.*

Zitat 459

Die SchülerInnen können erklären, woran man merkt, dass ein rotierendes Ringelspiel kein Inertialsystem ist (Zeilen 1 bis 2 und 4 bis 5 von Zitat 459).

Aufgabe 5 auf Seite 137 beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

- 1 **Schüler 21:** *Ein Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus*
- 2 *und bewegungsfrei fährt.*
- 3 **Wittmann:** *Wie meinst du bewegungsfrei?*
- 4 **Schülerin 20:** *Erschütterungsfrei.*
- 5 **Schüler 21:** *Erschütterungsfrei, ja. Ähm, und es wäre meiner Meinung*
- 6 *nach auch eines, weil man spürt eigentlich nur das Anfahren,*
- 7 *[...] weil während der Fahrt selbst spürt man nichts.*

Zitat 460

Die SchülerInnen können ein Inertialsystem nennen und erklären, warum es eines ist (Zitat 460).

Schülerin 20 beantwortet Aufgabe 6 auf Seite 137 so:

- 1 **Schülerin 20:** *Es (Auto; Anm.) muss Erschütterung haben.*

Zitat 461

Schülerin 20 identifiziert ein Auto, das nicht erschütterungsfrei fährt, als Bezugssystem, das kein Inertialsystem ist (Zitat 461). Aus dem Zusammenhang (siehe Zitat 460) ist klar, dass sie meint, durch die Erschütterung würde man eine Bewegung spüren.

Schülerin 20 fasst den Inhalt des Arbeitsblattes „Inertialsysteme“ folgendermaßen zusammen:

- 1 **Schülerin 20:** Also, wenn man in einem Was-auch-immer, das nicht
2 erschütterungsfrei ... das erschütterungsfrei ist und sich konti-
3 nuierlich gleich schnell [...] fortbewegt [...], kann man ... ist
4 das ... kann man nicht nachweisen, dass es sich bewegt.

Zitat 462

Schülerin 20 kann erklären, woran man merkt, dass ein Bezugssystem ein Inertialsystem ist (Zitat 462).

6.5.1.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Die SchülerInnen finden das Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ verständlich.

Aufgabe 20 auf Seite 209 beantwortet Schüler 21 so:

- 1 **Schüler 21:** Also, ahm, da beide sich jeweils, ahm, mit konstanter
2 Geschwindigkeit bewegen [...] und sich die Columbus quasi an
3 der, ahm, Deep Space Nine orientieren kann, [...] glaubt die
4 Columbus, dass sie ruht. [...] Ahm, glaubt die Galileo von sich,
5 dass sie ruht. [...] Nun sieht sie, ahm, eben die Raumstation und
6 das andere Schiff auf sich zufliegen [...] Also, ähm, also Recht
7 hat eigentlich keiner, [...] weil eben jedes System gleichwertig
8 ist. Man kann nicht genau sagen, welches das Richtige ist quasi.

Zitat 463

Schüler 21 ist der Ansicht, man könne nicht sagen, wer Recht hat, da beide Systeme gleichwertig sind (Zeilen 6 bis 8 von Zitat 463). Er versteht, dass sich beide Shuttles mit konstanter Geschwindigkeit bewegen (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 463). Daher kann sich entweder die Columbus samt der Deep Space Nine als ruhend betrachten oder sich die Galileo als ruhend und die Columbus samt der Deep Space Nine als auf sich zubewegend betrachten (Zeilen 2 bis 6 von Zitat 463).

Schülerin 20 beantwortet Aufgabe 42 auf Seite 288 folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 20:** Na ja, wenn sie die Welt betrachten, werden sie wohl
2 sehen, dass sie sich bewegen.

- 3 **Wittmann:** *Ja schon, sozusagen. Die Frage ist sozusagen, die Gali-*
 4 *leo schaut hinaus und sieht die Sterne oder was auch immer,*
 5 *[...] die Columbus macht dasselbe. Sozusagen das bewegt sich*
 6 *natürlich anders von der aus gesehen. Frage: Was ist richtiger?*
 7 **Schülerin 20:** *Na, ja, beides ist nicht richtig. Wenn sie glauben, sie*
 8 *stehen und die ganze Galaxie bewegt sich [...] kann man ...*
 9 *sind beide nicht richtig [...] beide Messungen sozusagen falsch.*
 10 **Wittmann:** *Na, die messen schon was Richtiges. Die Frage ist die*
 11 *Naturbeschreibung, die sich ergibt.*
 12 **Schülerin 20:** *Die messen ... die können nicht sagen, die Sterne be-*
 13 *wegen sich so schnell, sondern die bewegen sich.*
 14 **Wittmann:** *[...] Bewegen sich die Stern. ... Wie ist das mit den Sternen,*
 15 *die sich bewegen? Kann man das sagen, dass die ruhen? Das*
 16 *bewegt sich doch alles irgendwie.*
 17 **Schülerin 20:** *Ja, sie bewegen sich schon. Aber wenn sich zum Beispiel*
 18 *die Sterne ... Es ist genauso wie bei Galileo und Columbus.*
 19 *Wenn sie sich aufeinander zu bewegen, [...] und kontinuierlich*
 20 *sich bewegen, glauben sie beide, sie bewegen sich nicht. [...]*
 21 *Und die Sterne bewegen sich einfach auch. Und wenn man von*
 22 *... annimmt, man bewegt sich nicht und die Sterne bewegen*
 23 *sich [...] glaubt man, dass die Sterne sich mehr bewegen als*
 24 *sie eigentlich tun.*
 25 **Wittmann:** *Was tun sie eigentlich?*
 26 **Schülerin 20:** *Ein bisschen sich bewegen.*
 27 *[...]*
 28 **Wittmann:** *Mhm. Und die Columbus sieht das auch?*
 29 **Schülerin 20:** *Ja, wenn sich beide bewegen [...] Sie glauben nur, dass*
 30 *sie sich in verschiedene Richtungen bewegen.*

Zitat 464

Schülerin 20 geht offenbar von der Vorstellung einer absoluten Bewegung aus (Zeilen 1 bis 2 von Zitat 464). Dabei wird offensichtlich die Galaxie von der Schülerin als bevorzugtes Bezugssystem betrachtet, weshalb sie Beschreibungen („Messungen“: Zeile 9 von Zitat 464), in denen sich die Galaxie bewegt, als falsch einstuft (Zeilen 7 bis 9 von Zitat 464). Daraufhin schwächt die Schülerin ihre Vorstellung vom bevorzugten Bezugssystem Galaxie insofern ab, als dass sie sagt, die Sterne könnten sich nicht „so schnell“ bewegen, sondern nur die Shuttles (Zeilen 12 bis 13 von Zitat 464). Da die Schülerin den Ausführungen

von Schüler 21 in Zitat 463 auf Seite 304 nicht widerspricht, kann man davon ausgehen, dass die Schülerin bereits akzeptiert hat, dass man jedes der Shuttles sowohl als ruhend als auch als bewegt betrachten kann. Die Schülerin weiß, dass sich die Sterne bewegen und vergleicht deren Bewegung mit der Bewegung der Shuttles (Zeilen 17 bis 18 von Zitat 464 auf der vorherigen Seite). Aus diesem Vergleich kann die Schülerin schließen, dass man auch die Sterne sowohl als ruhend als auch als bewegt betrachten kann. Dieses Wissen kollidiert nun mit der Vorstellung des bevorzugten Bezugssystems Galaxie, was zur Vorstellung führt, die Sterne würden sich „ein bisschen [...] bewegen“ (Zeile 26 von Zitat 464 auf der vorherigen Seite). Daraus folgt für die Schülerin, „dass die Sterne sich mehr bewegen als sie eigentlich tun“ (Zeilen 23 bis 24 von Zitat 464 auf der vorherigen Seite), wenn man „annimmt, man bewegt sich nicht und die Sterne bewegen sich“ (Zeilen 22 bis 23 von Zitat 464 auf der vorherigen Seite). Die Schülerin räumt ein, dass jedes der Shuttles diese Sichtweise entwickeln kann, wobei beide Sichtweisen gleichwertig sind (Zeilen 29 bis 30 von Zitat 464 auf der vorherigen Seite).

Schülerin 20 ist offenbar gerade dabei, von der alleinigen Vorstellung eines bevorzugten Koordinatensystems ein wenig abzurücken. Im Rahmen ihrer neuen Vorstellungen ist die Schülerin offensichtlich bereit, die Naturbeschreibungen aus der Sicht beider Shuttles als gleichwertig zu akzeptieren.

Die Verwendung der Shuttles und der Raumstation weit weg von Himmelskörpern gemeinsam mit dem Argument, alle Sterne bewegen sich, bewährt sich wieder, um zu zeigen, dass die Vorstellung eines bevorzugten Koordinatensystems im Weltraum nicht sinnvoll ist.

Zu Aufgabe 43 auf Seite 288 geben die SchülerInnen folgende Antwort:

1 **Schüler 21:** *Ich find auf die dritte Frage eigentlich keine wirklich gute*
2 *Antwort, da, ahm, die Sicht jeweils, ahm, hängt natürlich ganz*
3 *vom Betrachter ab, ähm [...] je nachdem, ob der Betrachter*
4 *sich selbst auch bewegt oder ob er ruht [...] Ähm, wenn er*
5 *ruht, sieht er natürlich das Bild richtiger, wenn sich die Galileo*
6 *auch nicht bewegt. Aber wenn er sich bewegt, sieht er das Bild*
7 *richtiger, wenn sich die Galileo auch bewegt. Also ...*

8 **Wittmann:** *Die Frage ist, woran merkt er, ob er sich bewegt oder*
9 *nicht?*

10 **Schüler 21:** *Ahm, an der, ahm, Geschwindigkeit der Sterne, nehm ich*
11 *an.*

12 **Wittmann:** *Die bewegen sich auch alle. Sterne bewegen sich. [...] Wie*
13 *kann man eigentlich feststellen, ob man sich bewegt oder nicht?*
14 *[...]*

- 15 **Schüler 21:** *Man braucht ... man braucht ... man braucht einen*
 16 *Fixpunkt.*
 17 **Wittmann:** *Ja, wo findest du denn den?*
 18 *[...]*
 19 **Schülerin 20:** *Ja, aber wenn sich alles bewegt, [...] gibt es keinen*
 20 *Punkt, der wirklich fix ist und sich nicht bewegt.*
 21 **Wittmann:** *Eben, richtig.*
 22 **Schüler 21:** *Also auch keine Raumstation, die von sich glaubt, dass*
 23 *sie zwar still steht, aber sich in Wahrheit doch bewegt. Also ...*
 24 **Wittmann:** *„In Wahrheit“ ist gut, „in Wahrheit“ ist gut. Also wir*
 25 *finden keinen fixen Punkt.*
 26 **Schülerin 20:** *Es gibt keinen.*
 27 **Wittmann:** *Es gibt keinen fixen Punkt. Wie ist das jetzt mit der ... mit*
 28 *der Bewegung? Wer bewegt ... wer kann jetzt von sich sagen,*
 29 *ich stehe still?*
 30 *[...]*
 31 **Schülerin 20:** *Alle bewegen sich?*
 32 **Wittmann:** *Können sich auch alle bewegen.*
 33 **Schülerin 20:** *Oder alle ruhen. Also, man kann es nicht feststellen.*
 34 **Wittmann:** *Richtig, genau. [...] Wer hat mehr Recht?*
 35 **Schülerin 20:** *Na, ja, man kann ja nicht messen, ob sie sich jetzt*
 36 *bewegen oder stehen. Also kann man nicht ... man müsste*
 37 *beide Beschreibungen machen [...] und dann überlegen, ob es*
 38 *irgendwas gibt, wo man begründen kann, ...*
 39 **Wittmann:** *Und wenn man keinen Grund findet?*
 40 **Schülerin 20:** *Dann sagt man, es gibt zwei Theorien und man weiß*
 41 *nicht, welche stimmt.*
 42 **Wittmann:** *Genau, oder Beschreibungen.*
 43 **Schülerin 20:** *Ja, Beschreibungen.*
 44 **Wittmann:** *Und wie ist es dann, wenn ich sage, ich betrachte mich als*
 45 *ruhend oder bewegt?*
 46 **Schülerin 20:** *Das ist eine Vermutung.*

Zitat 465

Schüler 21 geht von der Vorstellung einer absoluten Bewegung des Betrachters aus (Zeilen 3 bis 4 von Zitat 465). Daraus ergibt sich für den Schüler folgerichtig, dass diejenige Sicht auf die Welt richtiger ist, die dem seiner Meinung nach tatsächlichen Bewegungszustand des Betrachters entspricht (Zeilen 4 bis 7

von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). Nach Ansicht des Schülers lässt sich die eigene Bewegung an der Geschwindigkeit der Sterne erkennen (Zeile 10 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). Sein als bevorzugt betrachtetes Bezugssystem wird offenbar von den Sternen oder der ganzen Galaxie gebildet. Wieder erweist sich das Argument, im Weltall bewegen sich alle Sterne, als hilfreich. Der Schüler erkennt nämlich nun, dass man zur Bestimmung einer absoluten Geschwindigkeit einen Fixpunkt bräuchte (Zeile 16 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). Schülerin 20 erkennt, dass es einen solchen Punkt, der sich nicht bewegt, nicht geben kann (Zeilen 19 bis 20 und 26 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). In der Vorstellung von Schüler 21 dürften mittlerweile zwei Konzepte zum Bewegungszustand (Bewegung bzw. Ruhe) existieren: das Konzept eines *scheinbaren* Bewegungszustandes („Raumstation, die von sich glaubt, dass sie zwar still steht“; Zeilen 22 bis 23 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite) und das Konzept eines *echten* Bewegungszustandes („aber sich in Wahrheit doch bewegt“; Zeile 23 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). Der echte Bewegungszustand ist der Bewegungszustand bezüglich eines als bevorzugt betrachteten Bezugssystems. Da dem Schüler dieses Bezugssystem weder als solches noch dessen bevorzugte Rolle bewusst wird, dürfte er den echten Bewegungszustand eines Gegenstandes als alleinige Eigenschaft dieses Gegenstandes betrachten, was zur Vorstellung von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung führt. Der scheinbare Bewegungszustand eines Gegenstandes bezieht sich auf ein anderes Bezugssystem.

Schülerin 20 ist nun offensichtlich bereit, das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes gedanklich zuzulassen. Sie räumt ein, dass sich alle bewegen (Zeile 31 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite) oder alle ruhen (Zeile 33 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite) könnten. Der Unterschied sei nicht feststellbar (Zeile 33 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). Die Vorstellung eines absoluten Bewegungszustandes ist aber offenbar noch so dominant, dass die Schülerin nicht bereit ist, beide Sichtweisen auf die Natur vorbehaltlos als gleichwertig zu betrachten. Da die Schülerin mittlerweile akzeptiert, dass Bewegung und Ruhe nicht messbar sind (Zeilen 35 bis 36 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite), ist die Schülerin bereit, beide Beschreibungen zuzulassen und zu überlegen, ob eine die Natur besser beschreibt (Zeilen 36 bis 38 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). Falls man keinen Grund findet, eine der Beschreibungen zu bevorzugen, hat man nach Ansicht der Schülerin zwei Beschreibungen (Zeile 42 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite), von denen man nicht weiß, welche die richtigere ist („welche stimmt“; Zeile 41 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite). Beide Beschreibungen stuft die Schülerin als „Vermutung“ ein (Zeile 46 von Zitat 465 auf der vorherigen Seite).

Die SchülerInnen haben offenbar das Konzept eines scheinbaren Bewegungs-

zustandes so weit entwickelt, dass sie bereit sind, beide Sichtweisen auf die Natur zuzulassen und als Vermutungen zu akzeptieren. Das Konzept eines echten Bewegungszustandes ist aber noch so dominant, dass die SchülerInnen nicht bereit sind, die Relativität von Ruhe und Bewegung restlos anzunehmen. Darum möchten sie beide Naturbeschreibungen Tests unterziehen, die die „richtige“ Beschreibung herausfiltern. Dieser Standpunkt ist akzeptabel, da er anschlussfähig ist. Die SchülerInnen erhalten die Möglichkeit, auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zuzugreifen. Durch wiederholtes Argumentieren, dass es in keiner Situation ein Argument gibt, einen der beiden Standpunkte physikalisch zu bevorzugen, lässt sich sicherlich erreichen, dass das Konzept des echten Bewegungszustandes immer mehr in den Hintergrund tritt und immer öfter auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zugegriffen wird.

Aufgabe 44 auf Seite 290 beantworten die SchülerInnen so:

- 1 **Schülerin 20:** *Also, wenn man's groß sieht, bewegt sich ja alles durch*
- 2 *die Erdumdrehung. [...] Wenn man aber jetzt sagt, die Erde*
- 3 *würde sich nicht bewegen, dann würde man entweder aus dem*
- 4 *Fenster schauen können und wenn das nicht geht ...*
- 5 **Wittmann:** *Ich kann ja aus dem Fenster schauen.*
- 6 **Schülerin 20:** *Ja, dann sieht man, dass alles vorbei zieht. [...] Oder*
- 7 *einfach alles still steht.*
- 8 **Wittmann:** *Also, gemeint war natürlich im Großen [...] Was kann*
- 9 *man da sagen?*
- 10 **Schülerin 20:** *Na ja, beide stehen nicht still. [...] Weil sich die Erde*
- 11 *dreht.*
- 12 **Wittmann:** *Genau. Ist das klar?*
- 13 **Schüler 21:** *Ja, ja.*

Zitat 466

Schülerin 20 beschreibt die Situation aus der Sichtweise eines erdfesten Bezugssystems („Wenn man aber jetzt sagt, die Erde würde sich nicht bewegen“: Zeilen 2 bis 3 von Zitat 466) und eines Bezugssystems, das wahrscheinlich fest mit dem Fixsternenhimmel verbunden ist („wenn man's groß sieht“: Zeile 1 von Zitat 466). Im letztgenannten Bezugssystem bewegt sich für die Schülerin alles durch die Erdumdrehung (Zeile 2 von Zitat 466), beide Züge stehen nicht still (Zeile 10 von Zitat 466). Aus der Sicht des erdfesten Bezugssystems kann man sehen, ob alles vorbeizieht oder stillsteht (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 466) und damit erkennen, welcher der Züge sich bewegt oder nicht. Schüler 21 stimmt der Argumentation zu (Zeile 13 von Zitat 466).

Die SchülerInnen beschreiben die Situation aus zwei verschiedenen Bezugssystemen und verwenden damit Ruhe und Bewegung als relative Begriffe.

Schüler 21 gibt zu Aufgabe 7 auf Seite 137 folgende Antwort:

1 **Schüler 21:** *Ahm, wenn man jetzt zum Beispiel mit, ahm, einem Auto*
2 *fährt und es versucht, ahm, und es kommt ein Auto entgegen,*
3 *ahm, nur kann er halt, ahm, [...] angenommen man könnte*
4 *blind fahren und würde keinen Unfall bauen [...] ähm, wäre*
5 *jedes Auto für sich selbst stillstehend oder bewegt, je nachdem,*
6 *was es glauben möchte.*

Zitat 467

Schüler 21 beschreibt die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme am Beispiel zweier Autos, aus denen man nicht nach außen blicken kann (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 467). Es ist anzunehmen, dass er die Autos als mit konstanter Geschwindigkeit fahrend betrachtet. Jedes der Autos kann als stillstehend oder bewegt betrachtet werden (Zeilen 4 bis 6 von Zitat 467).

Die SchülerInnen haben keine weiteren Fragen zum Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“. Schüler 21 fasst das Arbeitsblatt so zusammen:

1 **Schüler 21:** *Also, wenn sich diese zwei Raumschiffe, ahm, wurden halt*
2 *zur Aufklärung geschickt, um, ahm, eben zu erkunden, irgendein*
3 *Nebel. Jedenfalls kehrt Columbus schon zurück und ist schon*
4 *bei der Raumstation und sagt, wir stehen still und wir sind*
5 *ein Inertialsystem. Wir bewegen uns nicht. Wir haben die, ahm,*
6 *Deep Space Nine quasi als Fixpunkt. Wir sagen, wir bewegen*
7 *uns nicht. Kommt aber das zweite Shuttle und sagt aber, ihr habt*
8 *nicht Recht. Wir stehen still und ihr bewegt euch auf uns zu. Ahm,*
9 *und da sich alles bewegt im Weltall, kann man nicht sagen, ahm,*
10 *wer von den beiden Recht hat oder nicht. Weil beide von sich*
11 *selbst glauben, dass sie stillstehen.*

Zitat 468

Schüler 21 kann den physikalisch wesentlichen Inhalt richtig wiedergeben. Wählt man Deep Space Nine als Fixpunkt, ist die Columbus stillstehend (Zeilen 3 bis 7 von Zitat 468). Die Galileo behauptet von sich auch stillzustehen (Zeilen 7 bis 8 von Zitat 468). Der Schüler verwendet das Argument, im Weltall bewege sich alles, um zu argumentieren, dass man nicht sagen könne, wer Recht habe (Zeilen 9 bis 11 von Zitat 468).

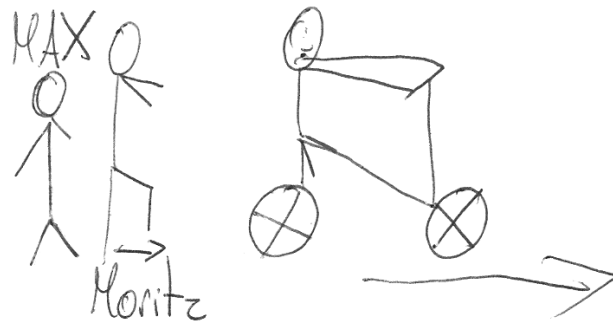


Abbildung 6.25.: Zu Zitat 470

6.5.1.4. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Unmittelbar nach dem Lesen des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ fragt Schülerin 20:

Schülerin 20: Eine Frage: Warum ist Licht anders?

Zitat 469

Die Schülerin ist von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit offenbar überrascht (Zitat 469). Sie akzeptiert in weiterer Folge, dass es sich dabei um ein grundlegendes Naturphänomen handelt.

Das Arbeitsblatt wird von den SchülerInnen als klar und verständlich beurteilt. Es gibt keine Anregungen für Umformulierungen. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Aufgabe 21 auf Seite 210 beantwortet Schülerin 20 folgendermaßen:

Schülerin 20: Max steht auf einer Straße (zeichnet Max in Abbildung 6.25; Anm.), eine Radfahlerin fährt von Moritz weg, ah, fährt von Max weg (zeichnet Radfahlerin in Abbildung 6.25; Anm.) und Moritz läuft der Radfahlerin nach (zeichnet Moritz in Abbildung 6.25; Anm.). Hat von Moritz aus gesehen die Radfahlerin dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Nein, weil der Moritz bewegt sich ja mit oder wird sogar schneller als sie. [...] Also ist sie für ihn langsamer als für den Max.

Zitat 470



Abbildung 6.26.: Zu Zitat 471

Die Schülerin kann die Situation richtig aufzeichnen (Abbildung 6.25 auf der vorherigen Seite) und die Aufgabe lösen (Zitat 470 auf der vorherigen Seite). Die Aussage, Moritz bewegt sich mit der Radfahlerin „mit“ (Zeile 7 von Zitat 470 auf der vorherigen Seite), könnte ein Hinweis auf die Vorstellung einer Abhängigkeit vom Bezugssystem und in Verbindung damit auf das Konzept einer scheinbaren Geschwindigkeit sein.

Aufgabe 22 auf Seite 210 beantwortet Schüler 21 so:

- 1 **Schüler 21:** Also es ist wie das vorige Beispiel (Aufgabe 21 auf Sei-
2 te 210; Anm.). Ahm, der Max ist so quasi der Fixpunkt, der alles
3 von einem bestimmten Punkt aus sieht [...] und die Gewehr-
4 kugel bewegt sich und während der Moritz ihr hinterherläuft,
5 bewegt sie sich halt und (er; Anm.) nimmt die Gewehr-
6 kugel langsamer auf als der Max [...] Weil der Max quasi alles von
7 EINER Position aus sieht, während der Moritz ihr halt eben
8 hinterherläuft und sie überholen kann (zeichnet Abbildung 6.26;
9 Anm.).

Zitat 471

Der Schüler kann die Situation richtig aufzeichnen (Abbildung 6.26) und die Aufgabe lösen (Zitat 471). Er bezeichnet Max als Fixpunkt (Zeile 2 von Zitat 471). Einen solchen bräuchte man nach Ansicht des Schülers, um eine absolute Bewegung feststellen zu können (Zeile 16 von Zitat 465 auf Seite 307). Das deutet darauf hin, dass nach Ansicht von Schüler 21 für Max die Dinge in ihrem echten Bewegungszustand sind. Das als bevorzugt betrachtete Bezugssystem ist wahrscheinlich die Erde, da Max im Gegensatz zu Moritz „alles von

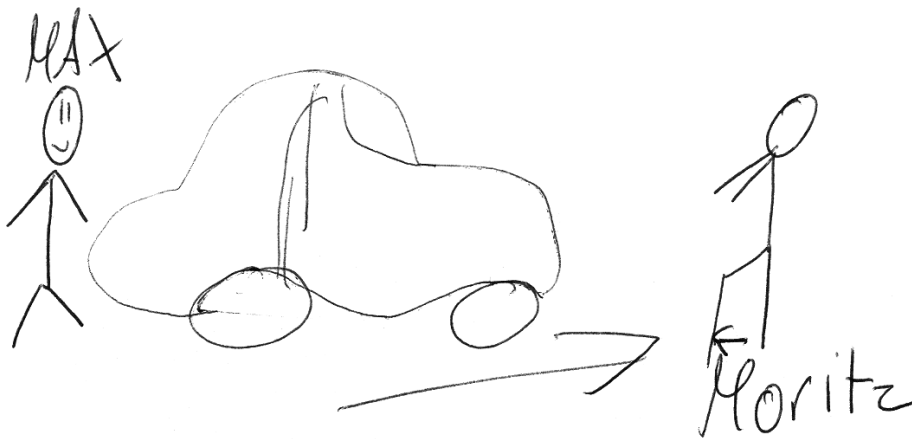


Abbildung 6.27.: Zu Zitat 472

einer Position aus sieht“ (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 471 auf der vorherigen Seite). In Zusammenhang damit steht, dass Max die echte Geschwindigkeit der Dinge sieht. Für den laufenden Moritz kann der Schüler aber auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zurückgreifen, was in Zusammenhang mit der scheinbaren Geschwindigkeit steht (Zeilen 4 bis 6 von Zitat 471 auf der vorherigen Seite).

Zu Aufgabe 23 auf Seite 210 gibt Schülerin 20 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 20:** Das ist eigentlich wieder das Gleiche, nur dass es halt
- 2 ein Auto ist und das ist genau die gleiche Begründung.
- 3 **Wittmann:** Na, Vorsicht, genau lesen.
- 4 **Schülerin 20:** Ahm, ... ah, in die entgegengesetzte Richtung. [...]
- 5 (Schülerin zeichnet Abbildung 6.27; Anm.) Das bedeutet für den
- 6 Max [...] ist das Auto schnell [...] und für Moritz ist das Auto
- 7 schneller, weil er sozusagen entgegenläuft.
- 8 **Wittmann:** [...] Was ist, wenn er da herüber (zeigt in Abbildung 6.27
- 9 links von Max; Anm.) laufen würde? [...] Wäre er auch schnel-
- 10 ler?
- 11 **Schülerin 20:** Ja, wenn sich ... (bewegt beide Händen auseinander;
- 12 Anm.) ... schneller ...

Zitat 472

Die Schülerin kann die Situation aufzeichnen (Abbildung 6.27) und die Aufgabe richtig lösen (Zeilen 4 bis 7 von Zitat 472). Um eine Vergleichbarkeit mit den

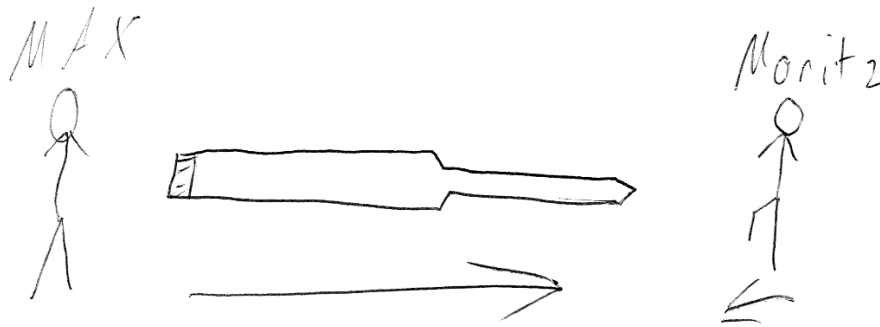


Abbildung 6.28.: Zu Zitat 473

vorherigen Unterrichtsdurchgängen zu bekommen, frage ich die Schülerin nach einer Antwort zu dieser Aufgabe für den Fall, dass sich Moritz links von Max bewegt (Zeilen 8 bis 10 von Zitat 472 auf der vorherigen Seite). Die Schülerin antwortet richtig. Ihre Geste weist darauf hin, dass sie die Geschwindigkeit von Moritz aus gesehen mit der Abstandsänderung in Zusammenhang bringt, was dem physikalischen Geschwindigkeitsbegriff entspricht (Zeilen 11 bis 12 von Zitat 472 auf der vorherigen Seite).

Schüler 20 beantwortet Aufgabe 24 auf Seite 210 so:

- 1 **Schüler 21:** (zeichnet Abbildung 6.28; Anm.) Ahm, auch in dem Fall
2 ist es so, dass der Max die Rakete, ahm, sieht, [...] und zwar
3 in einer konstanten Geschwindigkeit. [...] Aber der Moritz,
4 dadurch, dass er sich in die Richtung bewegt (zeigt in Abbil-
5 dung 6.28 in die Bewegungsrichtung von Moritz; Anm.), [...] ahm,
6 würde er jetzt angenommen mit der gleichen Geschwin-
7 digkeit laufen wie Rakete, [...] würde sich die Geschwindigkeit
8 von ihm aus gesehen verdoppeln.

Zitat 473

Der Schüler kann die Aufgabe richtig lösen (Zitat 473) und die Situation aufzeichnen (Abbildung 6.28). Er argumentiert sogar quantitativ nach der klassischen Geschwindigkeitsaddition (Zeilen 6 bis 8 von Zitat 473). Das spricht dafür, dass er für Gegenstände ansatzweise eine Vorstellung entwickelt hat, die der klassischen Mechanik entspricht.

Schülerin 20 beantwortet Aufgabe 25 auf Seite 210 folgendermaßen:

- 1 **Schülerin 20:** Die nächste Frage ist [...] da ist der Max (zeichnet
2 Max in Abbildung 6.29 auf der nächsten Seite; Anm.) [...], da



Abbildung 6.29.: Zu Zitat 474

- 3 ist der Moritz (zeichnet Moritz in Abbildung 6.29; Anm.) [...]
4 und da geht der Lichtstrahl, der in die Richtung geht (zeichnet
5 Lichtstrahl in Abbildung 6.29; Anm.) [...] und es ist für beide
6 gleich schnell, [...] weil Licht eben eine Ausnahme ist und der
7 Moritz das Licht nie einholen könnte.

Zitat 474

Die Schülerin kann die Aufgabe lösen (Zitat 474) und die Situation richtig aufzeichnen (Abbildung 6.29). Die Schülerin akzeptiert die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit schnell.

Zu Aufgabe 26 auf Seite 210 gibt Schüler 21 folgende Antwort:

- 1 **Schüler 21:** (zeichnet Abbildung 6.30 auf der nächsten Seite; Anm.)
2 Ahm, und hier ist es so, da sich Licht immer mit konstanter
3 Geschwindigkeit bewegt, [...] egal, ob man sich bewegt oder
4 nicht, [...] ahm, ist es so, dass das Licht vom Max aus gesehen
5 genauso schnell ist wie, äh, gesehen von Moritz aus.

Zitat 475

Der Schüler kann die Aufgabe lösen (Zeilen 4 bis 5 von Zitat 475) und die Situation richtig aufzeichnen (Abbildung 6.30 auf der nächsten Seite). Er äußert die Vorstellung eines echten Bewegungszustandes („egal, ob man sich bewegt oder nicht“: Zeilen 3 bis 4 von Zitat 475). Diese Vorstellung impliziert eine echte

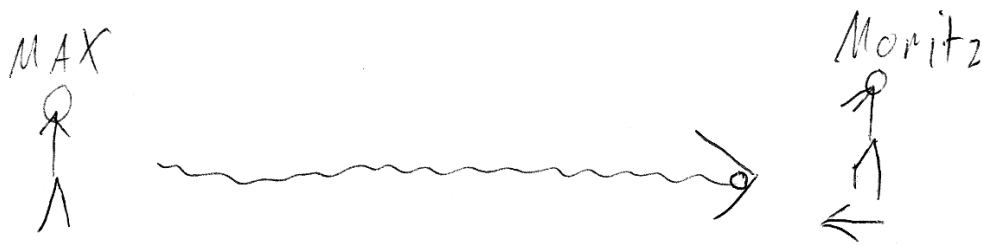


Abbildung 6.30.: Zu Zitat 475 auf der vorherigen Seite

Geschwindigkeit. Möglicherweise wird die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit über die Vorstellung einer echten Geschwindigkeit schnell akzeptiert.

Die SchülerInnen haben keine weiteren Fragen zum Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“. Schülerin 20 fasst das Arbeitsblatt folgendermaßen zusammen:

- 1 **Schülerin 20:** Also, der Max und der Moritz, [...] die ... Der Max
- 2 bleibt stehen, der Moritz rennt einem Auto, ein Fahrrad, eine ...
- 3 Was-auch-immer [...] hinterher und das Licht. Und für ihn wird
- 4 es immer langsamer sein als für den Max. Nur beim Licht ist
- 5 das eine Ausnahme, weil er das Licht nie einholen kann, weil
- 6 man nicht schneller sein kann als die Lichtgeschwindigkeit.

Zitat 476

Die Schülerin kann den wesentlichen physikalischen Inhalt des Arbeitsblattes „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ richtig zusammenfassen (Zitat 476).

6.5.1.5. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die SchülerInnen brauchen den Film nicht noch einmal sehen, um die Aufgaben des Arbeitsblattes „Fragen zum Film“ bearbeiten zu können.

Die SchülerInnen beantworten Aufgabe 45 auf Seite 291 so:

- 1 **Schüler 21:** Hm, weil man an und für sich diese ... wenn ein Betrach-
- 2 ter sich mit derselben bewegen würde wie diese ... wie diese
- 3 drei Schiffe, [...] würden die ... würde das Licht gleichzeitig bei
- 4 den Raumschiffen (Shuttles; Anm.) ankommen. [...] Ahm, da die
- 5 Erde sich allerdings nicht bewegt, die beiden Lichtstrahlen aller-
- 6 dings immer noch Lichtgeschwindigkeit haben, sieht's für uns
- 7 so aus, als würden ... als würde das Licht quasi in das hintere
- 8 Shuttle hinein fliegen und dem vorderen Shuttle hinterher.

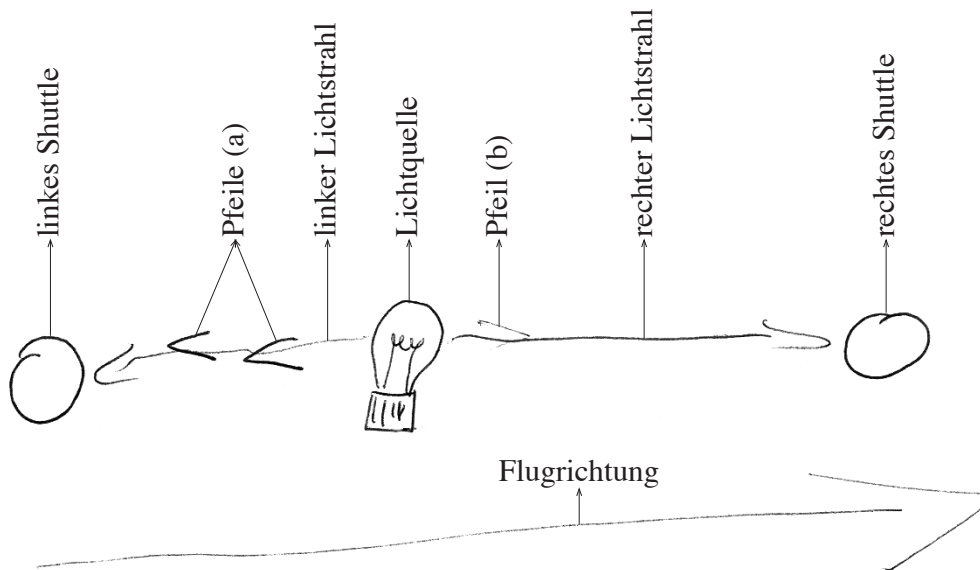


Abbildung 6.31.: Zu Zitat 477

9 **Wittmann:** Aber wieso kann man das nur sagen, dass das so ist von
 10 der Erde aus gesehen, wenn das Licht immer die gleiche Ge-
 11 schwindigkeit hat?

12 **Schülerin 20:** Das Licht immer die gleiche [...] Geschwindigkeit ...
 13 und würde es in die eine Richtung schneller fliegen und in die
 14 andere langsamer, könnte es sein, dass es zufällig wieder gleich-
 15 zeitig ankommt, [...] weil dann würde von der Erde aus würde
 16 es ja das eine von denen ... hinfliegt, wenn es dort lang... lang-
 17 samer wäre, würde es dort später ank... genauso spät wie das
 18 andere ankommen von denen, ... wegfliegt von der Erde.

19 **Wittmann:** Kannst du es mir aufzeichnen? [...]

20 **Schülerin 20:** Hier sind die beiden (zeichnet Shuttles in Abbil-
 21 dung 6.31; Anm.) [...] unsere Lichtquelle (zeichnet Glühbirne in
 22 Abbildung 6.31; Anm.) [...] sendet Licht, [...] sendet Licht hier
 23 hin (zeichnet in Abbildung 6.31 rechten Lichtstrahl; Anm.), und
 24 hier hin (zeichnet in Abbildung 6.31 linken Lichtstrahl; Anm.),
 25 [...] würde DAS Licht schneller sein (zeigt in Abbildung 6.31
 26 auf linken Lichtstrahl, zeichnet in Abbildung 6.31 Pfeile (a) auf
 27 den linken Lichtstrahl; Anm.), würde es trotzdem zuerst ankom-
 28 men, auch wenn sich das Ganze in diese Richtung (zeichnet in
 29 Abbildung 6.31 Pfeil unter die Anordnung; Anm.) bewegt. [...]

- 30 *Warte, nein das (zeigt in Abbildung 6.31 auf der vorherigen Seite*
31 *auf den linken Lichtstahl; Anm.) wäre ja sowieso schneller von*
32 *der Erde aus. Aber wenn das (zeichnet in Abbildung 6.31 auf*
33 *der vorherigen Seite Pfeil (b) auf rechten Lichtstrahl; Anm.) hier*
34 *schneller ist als das (zeigt in Abbildung 6.31 auf der vorherigen*
35 *Seite auf linken Lichtstrahl; Anm.) [...] würde es gleichzeitig*
36 *oder früher [...] oder weniger verschoben ankommen.*

Zitat 477

Schüler 21 kann den Inhalt des Lehrfilmes richtig wiedergeben (Zeilen 1 bis 8 von Zitat 477). Mit der Wendung „sieht’s für uns so aus“ (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 477) meint der Schüler wahrscheinlich, dass es für uns so ist (siehe zum Gebrauch dieser Wendung Zitat 454 auf Seite 300 und Zitat 456 auf Seite 302).

Schülerin 20 dürfte verstehen, dass die Argumentation in Lehrfilm darauf beruht, dass unterschiedlich lange Strecken gleich schnell durchlaufen werden (Zeilen 12 bis 15 von Zitat 477), ich kann ihrer Erklärung (Zeilen 15 bis 18 von Zitat 477) aber nicht folgen. Daraufhin zeichnet die Schülerin die Situation auf (Zeilen 20 bis 24 von Zitat 477). Die Schülerin erkennt, dass der linke Lichtstrahl, wenn man ihn schneller macht, von der Erde aus gesehen früher beim linken Shuttle ankommt als der rechte Lichtstrahl bei rechten Shuttle, wenn die ganze Anordnung nach rechts fliegt (Zeilen 25 bis 29 von Zitat 477). Die Schülerin begreift nun von selbst, dass ihr Argument die Fragestellung nicht beantwortet, da der linke Lichtstrahl von der Erde aus gesehen im Film ohnehin schneller beim Shuttle ist (Zeilen 30 bis 32 von Zitat 477) als der rechte Lichtstrahl. Nun argumentiert die Schülerin mit dem rechten Lichtstrahl. Wäre dieser schneller als der linke Lichtstrahl, wäre das Ankommen der Lichtstrahlen bei den Shuttles aus der Sicht der Erde gleichzeitig, wenn die Geschwindigkeit des rechten Lichtstrahls gerade passt. Tut sie das nicht, könnte er aus der Sicht der Erde auch früher oder zeitlich weniger verschoben ankommen als der linke Lichtstrahl (Zeilen 32 bis 36 von Zitat 477).

Die Schülerin versteht, wie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in die Argumentation eingeht. Das Aufzeichnen hilft, die Erklärungen durchschaubarer zu gestalten.

Zu Aufgabe 38 auf Seite 250 gibt Schülerin 20 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 20:** *(zeichnet Shuttles und Lichtquelle in Abbildung 6.32*
2 *auf der nächsten Seite; Anm.) Jetzt (zeichnet Pfeil für die Flug-*
3 *richtung in Abbildung 6.32 auf der nächsten Seite; Anm.) so an*

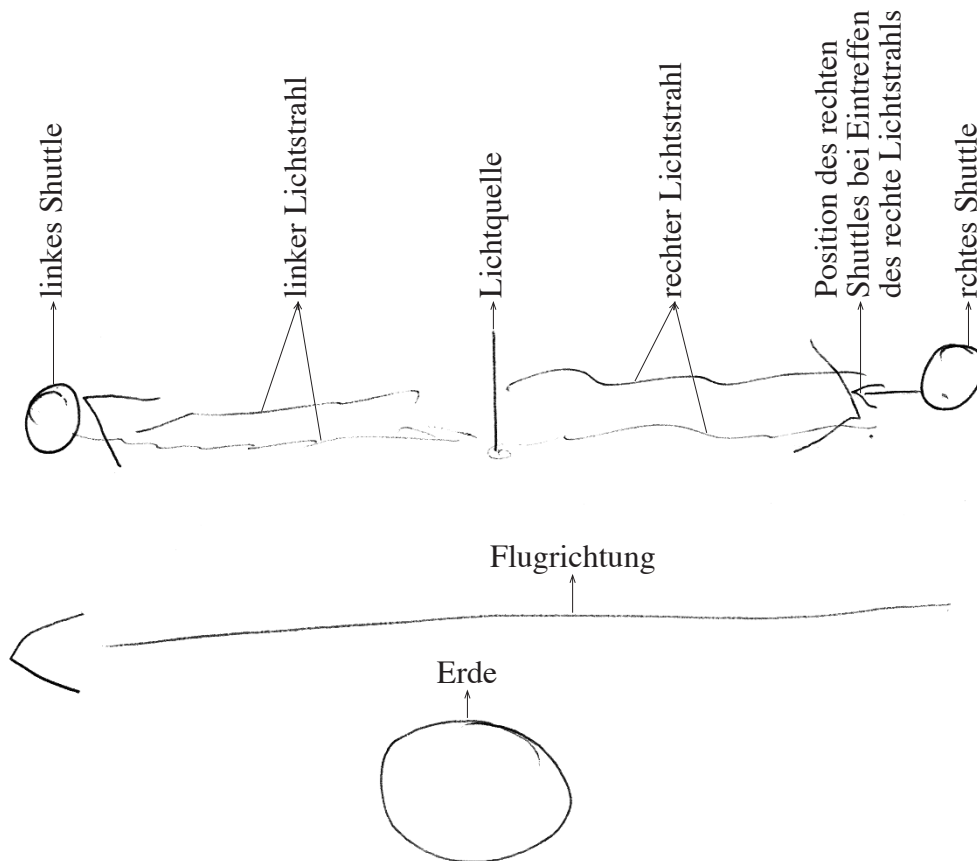


Abbildung 6.32.: Zu Zitat 478

- 4 der Erde vorbeifliegt (zeichnet Erde in Abbildung 6.32; Anm.)
 5 [...], dann würde das sich das ... [...] Licht würde es hier
 6 zum Beispiel aussenden, würde das nach drüben [...] gehen
 7 (zeichnet in Abbildung 6.32 Lichtstrahl von der Lichtquelle zum
 8 rechten Shuttle; Anm.). Aber das hier (zeigt auf rechtes Shuttle
 9 in Abbildung 6.32; Anm.) würde sich herüber bewegen (zeichnet
 10 in Abbildung 6.32 von rechtem Shuttle Pfeil nach links; Anm.)
 11 [...], also würde das Licht vorher auffallen [...] als das (zeigt
 12 auf linkes Shuttle in Abbildung 6.32; Anm.), weil das bewegt
 13 sich ja weiter weg und das Licht, das da hin will (zeichnet in Ab-
 14 bildung 6.32 Lichtstrahl von der Lichtquelle zum linken Shuttle;
 15 Anm.), muss sozusagen eine längere [...] Strecke zurücklegen.

Zitat 478

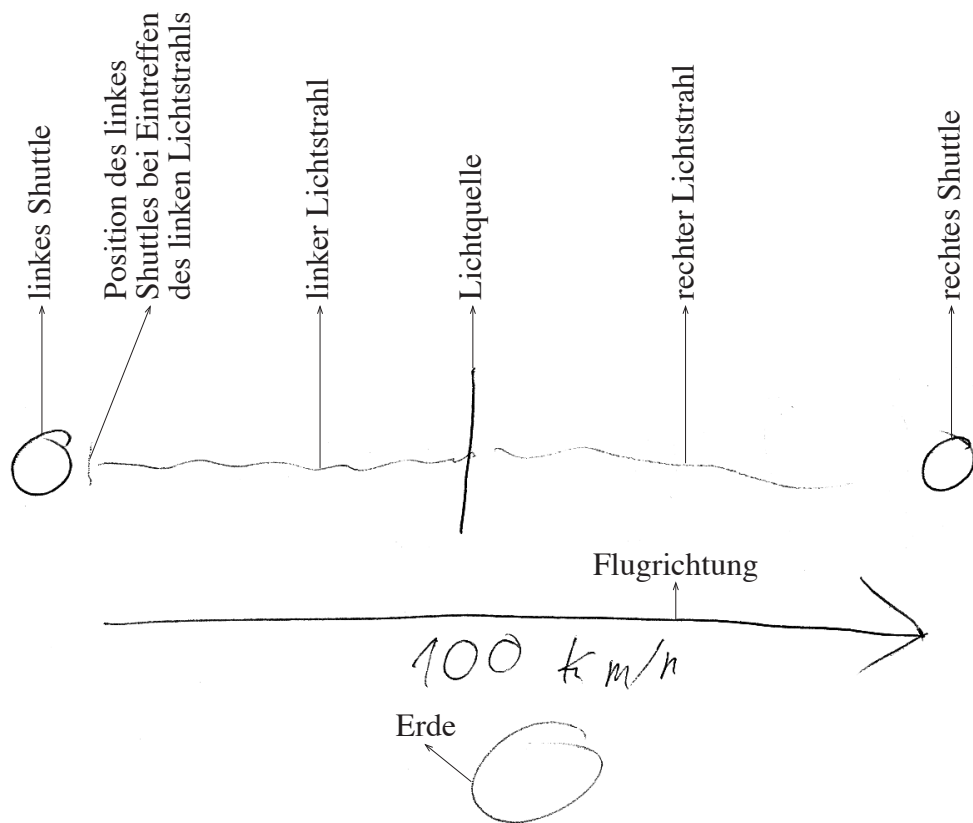


Abbildung 6.33.: Zu Zitat 479

Die Schülerin überträgt die Argumentation, die auf unterschiedlich langen Strecken beruht, richtig auf die neue Situation und kann damit die Aufgabe lösen (Zitat 478 auf der vorherigen Seite). Durch die Zeichnung (Abbildung 6.32 auf der vorherigen Seite) wird die Argumentation klar und nachvollziehbar.

Aufgabe 46 auf Seite 292 beantworten die SchülerInnen so:

1 **Schüler 21:** Ahm, also, ich glaube, [...] dass, ahm, wenn es si... die
 2 sich mit 100 km/h bewegen, [...] kommt das Licht mit geringe-
 3 rem Zeitunterschied an, der für uns, ahm, zwar nicht sehbar ist,
 4 [...] man könnte ihn aber rein theoretisch messen.

5 **Wittmann:** Genau, ja. Warum ist das weniger?

6 **Schüler 21:** Ahm, weil die, dadurch dass ... ahm, die sind vorhin mit
 7 annähernder Lichtgeschwindigkeit geflogen, [...] deswegen hat
 8 es früher das Licht abgefangen, das hintere Shuttle. [...] Da
 9 sie aber jetzt nur mit 100 km/h fliegen und Lichtgeschwindigkeit
 10 300 000 Meter in der Sekunde hat, ist es, ähm, kommt das Licht

- 11 *quasi, ähm, später hinten an, also etwas später aber trotzdem*
 12 *noch früher als beim vorderen.*
 13 **Wittmann:** Kannst du's kurz aufzeichnen?
 14 **Schüler 21:** (zeichnet Shuttles, Lichtquelle, Erde und Pfeil mit Ge-
 15 *schwindigkeitsangabe in Abbildung 6.33 auf der vorherigen*
 16 *Seite; Anm.) Würde das Licht, ähm, hier (zeichnet in Abbil-*
 17 *dung 6.33 auf der vorherigen Seite linken Lichtstrahl; Anm.)*
 18 *zwar früher ankommen, [...] allerdings für uns nicht sehbar.*
 19 **Wittmann:** Ja, warum? Stimmt. Warum? Wie könnt man das da (zeigt
 20 *auf Abbildung 6.33 auf der vorherigen Seite; Anm.) sehen, dass*
 21 *es ... dass es sehr wenig ist? Wie könnt man das zeichnen?*
 22 **Schülerin 20:** Man könnte die Lichtstahlen unterschiedlich lang ma-
 23 *chen, aber ein bisschen (zeigt mit den Fingern eine kleine Stre-*
 24 *cke; Anm.).*
 25 **Wittmann:** Sie hat ... sie hat da gezeichnet (zeigt auf Abbildung 6.32
 26 *auf Seite 319; Anm.), wo der ist, wenn der Lichtstrahl eintrifft*
 27 *(zeigt in Abbildung 6.32 auf Seite 319 auf den nach links wei-*
 28 *senden Pfeil beim rechten Shuttle; Anm.). Wo wär der (zeigt*
 29 *in Abbildung 6.33 auf der vorherigen Seite auf linkes Shuttle;*
 30 *Anm.), wenn der Lichtstrahl eintrifft, wenn das sehr langsam*
 31 *fliegt?*
 32 **Schüler 21:** Dann wär er ungefähr ... (zeigt in Abbildung 6.33 auf
 33 *der vorherigen Seite auf den Strich rechts vom linken Shuttle;*
 34 *Anm.)*
 35 **Wittmann:** Viel oder wenig weiter?
 36 **Schüler 21:** Wenig.

Zitat 479

Schüler 21 kann die Aufgabe richtig lösen (Zeilen 1 bis 4 von Zitat 479). Er begründet das damit, dass bei niedrigerer Geschwindigkeit das hintere Shuttle den Lichtstrahl später abfängt als bei höherer Geschwindigkeit, wodurch die Zeitdifferenz des Eintreffens der Lichtstrahlen geringer wird (Zeilen 6 bis 12 von Zitat 479). Die Argumentation ist korrekt. Da ich an einer Zeichnung interessiert bin, ersuch ich den Schüler, eine solche anzufertigen. Er kann die Situation aufzeichnen (Abbildung 6.33 auf der vorherigen Seite) und erklärt, dass aus der Sicht der Erde der linke Lichtstrahl nur unwesentlich früher beim Shuttle ankommt als der rechte (Zeilen 16 bis 18 von Zitat 479). Schülerin 20 erklärt das mit nur ein wenig unterschiedlich langen Wegstrecken, die die Lichtstrahlen

zurücklegen (Zeilen 22 bis 24 von Zitat 479 auf der vorherigen Seite). Schüler 21 begründet es mit der kurzen Strecke, die das Shuttle zurücklegt, während das Licht vom Raumschiff zum Shuttle fliegt (Zeilen 32 bis 36 von Zitat 479 auf der vorherigen Seite).

Schüler 21 benötigt die Zeichnung nicht, um die Aufgabe in nachvollziehbarer Weise zu lösen. Als mögliche Hilfestellung bleibt die Zeichnung aber in der Aufgabenstellung enthalten. Darüber hinaus kommen durch die Skizze in diesem Unterrichtsdurchgang weitere Erklärungsmöglichkeiten zutage, die im Unterricht hilfreich sein können.

Zu Aufgabe 47 auf Seite 292 geben die SchülerInnen folgende Antwort:

- 1 **Schüler 21:** *Das Tempo ist nicht sch. . . ist nicht hoch genug, als dass*
- 2 *man's merken würde. [...]*
- 3 **Schülerin 20:** *O. k.*
- 4 *[...]*
- 5 **Wittmann:** *Ist es gar nicht, oder für uns nur nicht messbar?*
- 6 **Schülerin 20:** *Für uns nicht messbar.*

Zitat 480

Die SchülerInnen verstehen, dass Alltagsgeschwindigkeiten zu gering sind, um den Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit zu merken, obwohl der Effekt existiert (Zitat 480).

Die SchülerInnen haben keine weiteren Fragen zum Arbeitsblatt „Fragen zum Film“. Die Aufgabenstellungen sind verständlich. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang. Die SchülerInnen halten den Einsatz des Filmes nach der Geschichte des einführenden Beispiels für gut gewählt. Sie geben an, sie hätten die Aufgaben auf dem Arbeitsblatt „Fragen zum Film“ ohne den vorangegangenen Unterricht nicht lösen können. Die SchülerInnen merken damit selbst, dass sie etwas gelernt haben, was als Erfolgserlebnis empfunden werden kann.

Schülerin 20 fasst den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* folgendermaßen zusammen:

- 1 **Schülerin 20:** *Also wenn sich ... wenn einer ... ein System, das*
- 2 *sich ... wo sich alles gleich schnell bewegt, Licht aussendet*
- 3 *in ... das, was genau in der Mitte ist zwischen zwei Messpunk-*
- 4 *ten [...] wird es für das System gleichzeitig ankommen. [...]*
- 5 *Beobachtest du es aber mit einer anderen Geschwindigkeit von*
- 6 *außen, wird es nicht gleichzeitig ankommen für dich. [...] Und*
- 7 *beides ist richtig, nur halt relativ.*

Zitat 481

Die Schülerin kann die Relativität der Gleichzeitigkeit, wie sie im Film dargestellt wird, richtig zusammenfassen (Zitat 481 auf der vorherigen Seite). Die beiden Sichtweisen akzeptiert die Schülerin als gleichwertige Naturbeschreibungen (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 481 auf der vorherigen Seite).

6.5.1.6. Die Lösung

Die SchülerInnen beantworten Aufgabe 13 auf Seite 142 so:

- 1 **Schülerin 20:** *Beides sind Inertialsysteme, [...] aber man kann nicht*
2 *wissen, welches sich bewegt [...] oder welches steht.*
3 **Wittmann:** *[...] Kann man's nur nicht wissen, oder tut's es auch*
4 *nicht?*
5 **Schülerin 20:** *Ahm, na ja, man kann es nicht messen. Aber es ... eines*
6 *der beiden bewegt sich oder bewegt sich nicht.*
7 **Wittmann:** *Bezüglich was?*
8 **Schüler 21:** *Hm, man bräuchte einen Fixpunkt.*
9 **Wittmann:** *Haben wir den?*
10 **Schülerin 20 und Schüler 21:** *Nein.*
11 **Wittmann:** *Haben wir nicht.*
12 **Schülerin 20:** *Hätte man einen Fixpunkt [...] könnte man das messen.*
13 *[...] Aber nachdem wir keinen haben, können wir nicht wissen,*
14 *ob jetzt diese Planeten sich bewegen [...] oder fest stehen oder*
15 *die Enterprise.*

Zitat 482

Schülerin 20 identifiziert beide Bezugssysteme als Inertialsysteme (Zeile 1 von Zitat 482), von denen eines sich bewegt oder nicht, wobei der Bewegungszustand aber nicht messbar ist (Zeilen 5 bis 6 von Zitat 482). Um diesen festzustellen bräuchte man einen Fixpunkt (Zeile 8 von Zitat 482), von dem die SchülerInnen aber wissen, dass es ihn nicht gibt (Zeile 10 von Zitat 482). Schülerin 20 verlangt geradezu nach einem solchen Fixpunkt (Zeile 12 von Zitat 482), um ihre offenbar sehr dominante Vorstellung eines absoluten Bewegungszustandes realisieren zu können. Das Fehlen eines Fixpunktes führt für die Schülerin zur Vorstellung, man könne über die Bewegungszustände der Inertialsysteme nichts wissen (Zeilen 13 bis 15 von Zitat 482).

Die SchülerInnen können ihre Vorstellungen von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung nicht ablegen, wissen aber, dass diese im Widerspruch zur Tatsache stehen, dass es im Weltraum keinen fixen Punkt gibt. Diesen Widerspruch

versuchen die SchülerInnen dadurch zu lösen, dass sie den Dingen nach wie vor einen absoluten Bewegungszustand zuschreiben, über den man aber nichts wissen kann, weshalb man „so tun könne, als ob es ihn nicht gebe“. Dadurch wird es den SchülerInnen möglich, das Konzept des absoluten Bewegungszustandes nicht zu benützen und weiterer Folge mit Hilfe des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme zu argumentieren. Das bedeutet, dass das Konzept des echten Bewegungszustandes weiter existiert, sich aber zusätzlich das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes etabliert, auf das bei physikalischer Argumentation zugegriffen werden kann.

Zu Aufgabe 29 auf Seite 213 gibt Schülerin 20 folgende Antwort:

- 1 **Schülerin 20:** Also die Abbildung 1b (Abbildung 5.4b auf Seite 142;
- 2 Anm.), das ist genauso (wie im Lehrfilm; Anm.), nur dass jetzt
- 3 die Enterprise [...] die Erde ist [...] und dass die beiden ...
- 4 dass ein Raumschiff und die beiden Planeten sind die beiden
- 5 Mess... kleinen [...] Raumschiffe (Shuttles; Anm.) [...] und
- 6 es ist eigentlich genau die gleiche Situation. [...] Aus der Sicht
- 7 der Enterprise kommt es (das Licht; Anm.) zuerst bei Garcus an.
- 8

Zitat 483

Die Schülerin kann Situation aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 ohne Schwierigkeiten auf die Situation im Lehrfilm übertragen, würde in diesem der Konvoi von rechts nach links fliegen. Die Schülerin kann damit die Aufgabe richtig lösen.

Schülerin 20 beantwortet Aufgabe 48 auf Seite 292 so:

- 1 **Schülerin 20:** Es ist genau das Gleiche. Es ist ... man weiß bei beiden
- 2 nur, da man nicht weiß, wer sich bewegt [...], dass die sich so
- 3 auseinander bewegen (zeigt in Abbildung 5.4a auf Seite 142
- 4 mit der rechten Hand auf Enterprise, mit der linken Hand auf
- 5 Voyager und bewegt beide Hände auseinander; Anm.) [...], und
- 6 das ist bei dem (zeigt auf Abbildung 5.4b auf Seite 142; Anm.)
- 7 genau das Gleiche (zeigt in Abbildung 5.4b auf Seite 142 mit der
- 8 rechten Hand auf Enterprise, mit der linken Hand auf Voyager
- 9 und bewegt beide Hände auseinander; Anm.). Also würde es
- 10 (das Licht; Anm.) hier (zeigt in Abbildung 5.4a auf Seite 142 auf
- 11 Garcus; Anm.) zuerst ankommen.

Zitat 484

Die Schülerin argumentiert gegen das Konzept eines absoluten Bewegungszustandes („da man nicht weiß, wer sich bewegt“: Zeile 2 von Zitat 484 auf der vorherigen Seite) und für das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes („man weiß bei beiden nur, [...] dass die sich so auseinander bewegen“: Zeilen 1 bis 3 von Zitat 484 auf der vorherigen Seite). Aus dieser Überlegung betrachtet die Schülerin die Situationen aus den Abbildungen 5.4a und 5.4b auf Seite 142 als gleichwertig (Zeile 1 und Zeilen 3 bis 9 von Zitat 484 auf der vorherigen Seite). Daraus folgert die Schülerin, dass auch aus der Sichtweise von Abbildung 5.4a auf Seite 142 der Lichtstrahl zuerst auf Garcus ankommt (Zeilen 9 bis 11 von Zitat 484 auf der vorherigen Seite).

Die SchülerInnen halten den Text des Arbeitsblattes „Die Lösung“ für verständlich. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang. Schülerin 20 fasst das Arbeitsblatt folgendermaßen zusammen:

1 **Schülerin 20:** Also, wenn sich ... man kann nicht wissen, ob sich
 2 zwei Sachen bewegen oder fix sind, da wir keinen Fixpunkt ha-
 3 ben, aber wir wissen, wie sie sich aneinander vorbei bewegen
 4 und ob sich jetzt das eine bewegt oder das andere steht, ist
 5 eigentlich ganz [...] egal. Aber wenn man sich ... wenn die
 6 Enterprise sich bewegt und ... oder dieser ... Planeten und
 7 das andere Raumschiff, dann wird es sich so bewegen, wie hier
 8 abgebildet, wird zuerst das Licht für die Enterprise da (zeigt in
 9 Abbildung 5.4a auf Seite 142 auf Garcus; Anm.) ankommen und
 10 für das System (zeigt in Abbildung 5.4a auf Seite 142 auf Aldu-
 11 bian, Voyager, Garcus; Anm.) wird das in beiden gleichzeitig
 12 ankommen.

Zitat 485

Die Schülerin argumentiert anhand eines fehlenden Fixpunktes gegen das Konzept eines absoluten Bewegungszustandes (Zeilen 1 bis 3 von Zitat 485) und für das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes (Zeilen 3 bis 5 von Zitat 485). Damit betrachtet sie entweder die Enterprise als bewegt (Zeile 6 von Zitat 485) oder das System, das aus den Planeten und der Voyager gebildet wird (Zeile 7 von Zitat 485). Die Schülerin beschreibt die Relativität der Gleichzeitigkeit in der dargestellten Situation richtig (Zeilen 8 bis 12 von Zitat 485).

Die Schülerin legt das Konzept eines absoluten Bewegungszustandes nicht ab, sie hat aber das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes so weit entwickelt, dass sie darauf zurückgreifen und daraufhin mit Hilfe des Prinzips

der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme die Relativität der Gleichzeitigkeit in dargestellten Situation erklären kann.

6.5.1.7. Beispiel

Aufgabe 30 auf Seite 213 beantworten die SchülerInnen folgendermaßen:

- 1 **Schüler 21:** *Ahm, das ist quasi wie das Beispiel mit den Raumschiffen.*
2 *[...] Das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die Sirenen;*
3 *Anm.) sind die beiden Shuttles quasi. Das (zeigt in Abbildung 6.9*
4 *auf Seite 214 auf Proton; Anm.) ist das große Schiff. Und das ...*
5 *er (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf Max; Anm.) ist ja*
6 *quasi so wie die Erde, ähm, hätt ich zumindest gesagt.*
7 **Wittmann:** *Muss man schauen. Sozusagen, wer ... bewegt ... Warum*
8 *glaubst du das?*
9 **Schüler 21:** *Ahm, weil er (Max; Anm.) sich ... weil er steht, quasi.*
10 *Ahm, er bewegt sich zumindest nicht, ahm, [...] nicht wirklich*
11 *zumindest, also ...*
12 **Wittmann:** *Wenn das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die*
13 *Sirenen; Anm.) die Shuttles sind, dann bleibt der (zeigt in Ab-*
14 *bildung 6.9 auf Seite 214 auf Max; Anm.) ja immer im gleichen*
15 *Abstand zu denen. [...] Wie war das mit den ... mit der Erde?*
16 **Schüler 21:** *Die E... ah! Die Erde würde sich quasi wegbewegen. Al-*
17 *so er (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf Moritz; Anm.)*
18 *wär die Erde eher. [...] Weil er sich halt weg ... von da ... von*
19 *weg (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 von Moritz aus nach*
20 *rechts; Anm.) bewegt. Also das wäre quasi so, als würden sich die*
21 *drei (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die Sirenen und*
22 *Max; Anm.) so hin bewegen (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214*
23 *nach links; Anm.), nur halt läuft er (zeigt in Abbildung 6.9 auf*
24 *Seite 214 auf Moritz; Anm.) halt in die Richtung (zeigt in Abbil-*
25 *dung 6.9 auf Seite 214 von Moritz nach rechts; Anm.). [...] Und*
26 *da hätt ich gesagt, dass für das Proton ist eigentlich das (zeigt*
27 *in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf rechte Sirene; Anm.) zuerst.*
28 *Weil es sich in die Richtung bewegt (zeigt in Abbildung 6.9 auf*
29 *Seite 214 vom Proton nach rechts; Anm.) und dadurch, dass die*
30 *beiden Geschwindigkeiten konstant sind ...*
31 **Wittmann:** *Was ... was ist konstant?*
32 **Schüler 21:** *Na die ... also dass die ... dadurch dass die gleichzeitig*
33 *quasi losheulen, erscheint's fürs Proton so, dass das (zeigt in*

- 34 *Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf rechte Sirene; Anm.) zuerst ist,*
 35 *weil es sich in die Richtung (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214*
 36 *vom Proton nach rechts; Anm.) bewegt.*
 37 **Wittmann:** [...] *Scheint's nur so oder ist es auch so?*
 38 **Schüler 21:** *Es ist fürs Proton so.*
 39 **Wittmann:** (zu Schülerin 20; Anm.) *Was sagst du? Wie würdest es du*
 40 *sagen?*
 41 **Schülerin 20:** *Na ja, wenn für den Max aus gleichzeitig [...] losheult,*
 42 *dann muss das ... also ist das rückgerechtet so für den Max.*
 43 *[...] Also das Proton wird ... ich glaub das Proton wird beide*
 44 *gleichzeitig losheulen ...*
 45 **Schülerin 20:** *Vergleich's einmal mit der Situation mit der ... mit der*
 46 *Erde, mit diesen Raumschiffen ...*
 47 **Schülerin 20:** *Na ja, der Max [...] wär das Raumschiff, das Proton*
 48 *wär das Licht.*
 49 **Wittmann:** *Nein. Wenn das (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf*
 50 *die Sirenen; Anm.) die Shuttles sind und das (zeigt in Abbil-*
 51 *dung 6.9 auf Seite 214 auf Max; Anm.) ist das Raumschiff, [...]*
 52 *was fliegt da vorbei?*
 53 **Schülerin 20:** *Die Enterprise. [...] Ach so, wenn sie in die Richtung*
 54 *(zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 vom Proton nach rechts;*
 55 *Anm.) fliegt [...] und das da (Sirenen und Max; Anm.) in die*
 56 *(zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 nach links; Anm.) [...],*
 57 *würde es zuerst da (zeigt in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die*
 58 *rechte Sirene; Anm.) ankommen.*

Zitat 486

Schüler 21 zieht sofort Parallelen zur Situation im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit*. Der Schüler identifiziert die Sirenen mit den Shuttles, fälschlicherweise das Proton mit dem Raumschiff und fälschlicherweise Max mit der Erde (Zeilen 1 bis 6 von Zitat 486). Max wird mit der Erde identifiziert, da er sich nicht bewegt, „nicht wirklich zumindest“ (Zeilen 10 bis 11 von Zitat 486). Der Schüler dürfte hier das Konzept eines absoluten Bewegungszustandes mit dem als bevorzugt betrachteten Bezugssystem Erde aktivieren. Dadurch wird Max mit der Erde gleichgesetzt, was wahrscheinlich dazu führt, dass Max mit der Erde im Lehrfilm identifiziert wird. Dann bleibt als Gegenstück für das Proton nur noch das Raumschiff übrig. Die Schwierigkeit, dass Max über das als bevorzugt betrachtete Bezugssystem Erde mit der Erde im Lehrfilm verknüpft ist, war nicht

beabsichtigt, ist aber nicht schlecht, da dadurch die Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand noch einmal reflektiert werden müssen.

Mit dem Hinweis, auf die gegenseitige Positionsänderungen der beteiligten Objekte zu achten, findet Schüler 21 die richtige Entsprechung (Zeilen 16 bis 20 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite). Damit kann er offensichtlich auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zurückgreifen, denn er betrachtet nun die Sirenen und Max gleichberechtigt als nach links bewegt, wie er Moritz als nach rechts bewegt betrachtet (Zeilen 20 bis 25 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite). Die gleiche Betrachtungsweise wie für Moritz dürfte der Schüler auch auf das Proton anwenden, da er nun die Aufgabe richtig löst (Zeilen 25 bis 27 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite). Er dürfte sich die Sirenen durch aus der Mitte zwischen ihnen kommende Lichtsignale ausgelöst vorstellen, die eine konstante Geschwindigkeit haben, denn er erklärt seine Antwort analog zur Situation in Abbildung 5.4a auf Seite 142 (Zeilen 28 bis 36 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite). Die Sichtweise des Protons ist für den Schüler gleichwertig mit der Sichtweise von Max (Zeile 38 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite).

Schülerin 20 betont, dass rückgerechnet werden muss, um die tatsächlichen Zeitpunkte des Losgehens der Sirenen zu bestimmen (Zeile 42 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite). Ihre erste Antwort (Zeilen 43 bis 44 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite) dürfte geraten sein. Möglicherweise glaubt sie, ich hätte sie gefragt, weil die Antwort von Schüler 21 falsch gewesen sei. Dadurch könnte die Schülerin motiviert sein, eine andere Antwort zu geben. Darüber hinaus lässt sich die Antwort der Schülerin nicht mit ihrer Identifikation des Lichts mit dem Proton erklären (Zeile 48 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite). Diese für mich völlig unerwartete Entsprechung lässt sich vielleicht aus einer Identifikation von Protonenstrahlen, von denen im Zusammenhang mit dem CERN in den Medien öfter die Rede ist, mit Lichtstrahlen erklären.

Der Hinweis, auf die gegenseitige Positionsänderung der beteiligten Objekte zu achten, hilft der Schülerin weiter. Dadurch greift sie wahrscheinlich auch auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zu und betrachtet die Sirenen und Max gleichberechtigt als nach links fliegend wie das Proton als nach rechts fliegend (Zeilen 53 bis 56 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite). Damit kann die Schülerin die Aufgabe richtig lösen (Zeilen 57 bis 58 von Zitat 486 auf der vorherigen Seite).

Schülerin 20 beantwortet Aufgabe 31 auf Seite 214 so:

- 1 **Schülerin 20:** Für den Moritz sieht's auch so aus, als würde das (zeigt
- 2 in Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die rechte Sirene; Anm.)
- 3 zuerst losheulen, [...] weil er sich auch in diese Richtung (zeigt

- 4 *in Abbildung 6.9 auf Seite 214 von Moritz nach rechts; Anm.)*
5 *[...] bewegt.*
6 **Wittmann:** *Ist das viel oder wenig? Kann er das merken oder nicht?*
7 **Schülerin 20:** *Ich glaub, er würd es nicht merken.*
8 **Wittmann:** *Genau. Du hast vorhin gesagt, es schaut für ihn so aus ...*
9 **Schülerin 20:** *Es ist wirklich so. [...] Es ist einfach immer wirklich*
10 *so.*

Zitat 487

Die Schülerin löst diese Aufgabe richtig, wahrscheinlich im Analogieschluss zu Aufgabe 30 auf Seite 213 (Zeilen 1 bis 5 von Zitat 487), wobei Moritz den Unterschied nicht merken würde (Zeile 7 von Zitat 487). Die Schülerin betrachtet die Sichtweisen von Moritz und von Max als gleichwertig (Zeilen 9 bis 10 von Zitat 487).

Die SchülerInnen halten den Text des Arbeitsblattes „Beispiel“ für verständlich, den Inhalt finden sie gut, haben ihn aber nicht gleich durchschaut. Nachdem sie ihn verstanden haben, finden sie das Arbeitsblatt am Schluss zur Selbstkontrolle geeignet. Da die Aufgaben dieses Arbeitsblattes nicht vorstrukturiert sind, erscheinen sie den SchülerInnen komplizierter als die Aufgaben der anderen Arbeitsblätter. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, das Gelernte noch einmal durchzudenken und zu reflektieren.

6.5.1.8. Abschließende Rückmeldung

Die SchülerInnen finden das Thema interessant und den Unterricht mit den Arbeitsblättern sehr gut gestaltet. Auch das Beispiel zum Abschluss finden sie SchülerInnen gut. Bis auf die Erddrehung haben sie von diesem Thema noch nichts gehört. Zu Beginn hatte sie keine Ahnung, wie die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zustande kommen könnten. Am Ende des Unterrichts finden sie das verständlich. Dadurch wird für die SchülerInnen offensichtlich, etwas gelernt zu haben, was als Erfolgserlebnis empfunden werden kann.

Das Interesse der SchülerInnen spricht dafür, dieses Thema für SchülerInnen dieser Altersgruppe zugänglich zu machen.

6.5.2. Revision nach dem fünften Unterrichtsdurchgang

Auf Basis der Analyse des fünften Unterrichtsdurchgangs unterziehe ich das

für den fünften Unterrichtsdurchgang überarbeitete Unterrichtskonzept einer Revision.

6.5.2.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die SchülerInnen nennen als Gründe für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise die Geschwindigkeit der Enterprise, wobei diese Begründung nicht näher spezifiziert werden kann, das Nachfliegen hinter den Lichtstrahlen, Aussenden von Licht durch die Enterprise, unterschiedliche Zeitzonen im Weltraum, eine Rotation der Planeten, Abschattungen, Messfehler und unterschiedliche Distanzen der Raumschiffe zu den Planeten. Die letzten beiden Erklärungsversuche waren aufgrund der Interviews aus Kapitel 4 zu erwarten. Die SchülerInnen akzeptieren die Existenz exakt arbeitender Messgeräte und den Messvorgang als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung. Der Gleichzeitigkeitsbegriff der SchülerInnen dürfte ein absoluter sein, was sich mit den Ergebnissen aus den Interviews deckt.

Die SchülerInnen haben mit der Geschichte des einführenden Beispiels keine gedanklichen Probleme. Sie finden die Geschichte gut erklärt und nicht kindlich.

Die SchülerInnen geben zunächst an, keine weiteren Erklärungen für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zu finden. Trotzdem fallen den SchülerInnen im weiteren Verlauf des Unterrichtsdurchganges weitere Erklärungsversuche ein. Das deutet darauf hin, dass die Geschichte des einführenden Beispiels intensive Denkprozesse ausgelöst hat. Dadurch werden Motivation und Interesse gesteigert.

Die SchülerInnen kennen Raumschiff Enterprise, der Schüler zusätzlich Raumschiff Voyager. Die Verwendung beider Raumschiffe halten die SchülerInnen für passend.

Die SchülerInnen beurteilen den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* als gut. Sie erkennen anhand des Filmes, dass die Gleichzeitigkeit ein relativer Begriff ist, und können den Film in Zusammenhang mit der Geschichte des einführenden Beispiels bringen. Das zeigt, dass der Film an dieser Stelle des Unterrichts gut eingesetzt ist. Für die SchülerInnen sind beide Sichtweisen, die im Film dargestellt sind, gleichwertig. Die Messergebnisse aus beiden Sichtweisen betrachten die SchülerInnen als gleichwertige Naturbeschreibungen.

Im einführenden Beispiel werden die SchülerInnen durch ein unerwartetes Ereignis aktiviert und es wird ihr Interesse geweckt. Unter Verwendung des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* erkennen sie, dass die Gleichzeitigkeit ein relativer Begriff ist. Sie entwickeln dabei eine Anschauung von der Gleichwertigkeit von Inertialsystemen, auf die aufgebaut werden kann. Die Unterrichtssequenz „Einführendes Beispiel mit Lehrfilm *Gleichzeitigkeit*“ wird daher nicht mehr verändert.

6.5.2.2. Inertialsysteme

Der Begriff des Inertialsystems wird ausgehend von fahrenden und auf dem Boden stehenden Zügen von den SchülerInnen gut verstanden. Sie können den Begriff des Inertialsystems in verschiedenen Situationen richtig anwenden und damit die gestellten Aufgaben lösen. Das Arbeitsblatt wird als klar und verständlich bezeichnet. Aufgrund von Umformulierungen nach dem vierten Unterrichtsdurchgang treten keine textlichen Verständnisschwierigkeiten mehr auf. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang. Die Unterrichtssequenz „Inertialsysteme“ wird nicht mehr verändert.

6.5.2.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Die SchülerInnen halten das Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ für verständlich. Die Formulierung „aus der Sicht“ zur Beschreibung von Bewegungen wird gut angenommen. Die neu formulierten Aufgaben werden von den SchülerInnen verstanden. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Die SchülerInnen akzeptieren schnell die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme in einer Situation, die weit weg von Himmelskörpern spielt. Das Wissen über diese Gleichwertigkeit kann sich aber zunächst nicht gegen die Vorstellung von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung behaupten, sobald die restliche Welt betrachtet wird. Die SchülerInnen rücken zuerst nur wenig von der Vorstellung von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung ab.

Das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme in einer Situation vorzustellen, die weit weg von Himmelskörpern spielt, hat sich wieder bewährt. Dadurch können die SchülerInnen dieses Prinzip in einer Modellsituation akzeptieren, in der es keinen Bezug zur Außenwelt gibt. Sobald diese mit ihren Himmelskörpern und Galaxien betrachtet wird, kollidiert das Wissen über dieses Prinzip mit der Vorstellung von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung. Hier erweist sich wieder das Argument, im Weltraum bewegt sich alles, als hilfreich. Die SchülerInnen erkennen, dass man einen Fixpunkt braucht, um von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung sprechen zu können. Da sich alles bewegt, kann es einen solchen Punkt nicht geben. Damit verstehen die SchülerInnen, dass es im Weltall nicht sinnvoll ist, von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung zu sprechen. Deshalb sind sie bereit, neue Konzepte zu entwickeln und anzunehmen.

Bei den SchülerInnen bilden sich offenbar die Vorstellungen eines scheinbaren Bewegungszustandes und eines echten Bewegungszustandes heraus. Der echte Bewegungszustand ist Ruhe bzw. Bewegung bezüglich eines als bevorzugt

betrachteten Bezugssystems. Da den SchülerInnen dieses Bezugssystem weder als solches noch dessen Bevorzugung bewusst ist, dürften sie den echten Bewegungszustand eines Körpers als alleinige Eigenschaft dieses Körpers betrachten. Somit beschreibt der echte Bewegungszustand die absolute Bewegung bzw. die absolute Ruhe eines Körpers. Der scheinbare Bewegungszustand ist Ruhe bzw. Bewegung bezüglich eines anderen Bezugssystems.

Der echte Bewegungszustand entspricht der Vorstellung von absoluter Ruhe bzw. absoluter Bewegung. Dieses Konzept ist so dominant, dass es nicht durch ein anderes ersetzt werden kann. Die SchülerInnen entwickeln aber ein weiteres Konzept, das des scheinbaren Bewegungszustandes, welches dem physikalisch korrekten Bewegungsbegriff entspricht und damit anschlussfähig ist und auf das sie zugreifen können, wenn es ihnen sinnvoll erscheint. Ziel einer unterrichtlichen Intervention muss es daher sein, den SchülerInnen die Möglichkeit zu geben, die Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand zu entwickeln und in jeder konkreten Situation zu diskutieren, warum der scheinbare Bewegungszustand der sinnvollere ist. Dadurch soll erreicht werden, dass der echte Bewegungszustand immer mehr in den Hintergrund tritt und immer öfter auf den scheinbaren Bewegungszustand zugegriffen wird.

Die Konzepte von echtem Bewegungszustand und von echter Geschwindigkeit (siehe Punkt 6.4.1.4 und Punkt 6.4.2.4) stehen einander sehr nahe, da in beiden Konzepten als bevorzugt betrachtete Bezugssysteme, die als solche nicht erkannt werden, dieselbe Rolle spielen. Ebenso stehen einander die Konzepte von scheinbarem Bewegungszustand und scheinbarer Geschwindigkeit (siehe Punkt 6.4.1.4 und Punkt 6.4.2.4) sehr nahe, das sich das Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit durch dieselbe gedankliche Konstruktion vom Konzept der echten Geschwindigkeit absetzt wie das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes vom Konzept des echten Bewegungszustandes.

Am Ende der Unterrichtssequenz zur Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme beschreiben die SchülerInnen eine Situation, die auf der Erde spielt, aus der Sicht eines erdfesten Bezugssystems und aus der Sicht eines Bezugssystems, in dem sich die Erde bewegt, und relativieren damit die Begriffe Ruhe und Bewegung. Die Aufgaben 42 und 43 auf Seite 288 lösen intensive Denkprozesse und Diskussionen über die Begriffe Ruhe und Bewegung aus und fördern damit die Herausbildung der Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand. Die Unterrichtssequenz „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ wird nicht mehr verändert.

6.5.2.4. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die SchülerInnen beurteilen das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwin-

digkeit“ als klar und verständlich. Sie haben keinerlei Wünsche nach textlichen Veränderungen. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Die SchülerInnen können die Aufgaben, die auf dem Arbeitsblatt gestellt sind, lösen und die beschriebene Situation jeweils richtig aufzeichnen.

In den Antworten der SchülerInnen lassen sich Hinweise auf die Vorstellung eines echten und eines scheinbaren Bewegungszustandes und einer echten und scheinbaren Geschwindigkeit finden. Die scheinbare Geschwindigkeit wird in Zusammenhang zu Abstandsänderungen gebracht, was dem physikalischen Geschwindigkeitsbegriff entspricht. Der Schüler dürfte für Gegenstände ansatzweise eine Vorstellung aufbauen, die der klassischen Mechanik entspricht. Die Ausführungen der Schülerin lassen vermuten, dass sie für Gegenstände die Vorstellung einer Abhängigkeit vom Bezugssystem entwickelt.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist für die SchülerInnen überraschend, wird aber schnell akzeptiert. Möglicherweise geschieht das über die Vorstellung einer echten Geschwindigkeit. Die Unterrichtssequenz „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ wird nicht mehr verändert.

6.5.2.5. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Die SchülerInnen wollen den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* vor dem Bearbeiten der Aufgaben des Arbeitsblattes „Fragen zum Film“ nicht noch einmal sehen.

Die SchülerInnen verstehen die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit. Die Zeichnungen erweisen sich einerseits als nützlich, um die Argumentationen klarer und nachvollziehbarer zu gestalten, und andererseits, um Erklärungsmöglichkeiten zutage zu fördern, die im Unterricht nützlich sein können. Die SchülerInnen können die Argumentationen aus dem Lehrfilm auf neue Situationen richtig anwenden und erkennen, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit im Alltag zwar vorhanden, aber aufgrund der Kleinheit des Effekts nicht merkbar ist.

Die SchülerInnen finden den Film nach der Geschichte des einführenden Beispiels gut eingesetzt. Durch das Zeigen des Filmes an dieser Stelle und das Bearbeiten des Arbeitsblattes „Fragen zum Film“ nach den Unterrichtssequenzen zu den physikalischen Grundlagen erkennen die SchülerInnen, was sie in diesen Unterrichtssequenzen gelernt haben, da sie ohne diese die Aufgaben auf dem Arbeitsblatt „Fragen zum Film“ nicht lösen könnten. Das kann als Erfolgserlebnis empfunden werden.

Die Aufgabenstellungen sind für die SchülerInnen verständlich. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang. Die Unterrichtssequenz „Fragen zum Film“ wird nicht mehr verändert.

6.5.2.6. Die Lösung

Bei den SchülerInnen lassen sich die Konzepte eines echten und eines scheinbaren Bewegungszustandes nachweisen. Die Vorstellungen von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung sind so dominant, dass das Konzept des echten Bewegungszustandes nicht aufgegeben wird. Die SchülerInnen erkennen aber den Widerspruch zwischen diesem Konzept und der ihnen bekannten Tatsache, dass sich im Weltall kein Fixpunkt finden lässt. Das führt dazu, dass die SchülerInnen das Konzept des echten Bewegungszustandes zwar nicht aufgeben, aber einräumen, dass absolute Bewegung nicht messbar ist, weshalb sie ignoriert werden kann. Das führt dazu, dass verstärkt auf das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes zurückgegriffen werden kann, was zu einer physikalisch korrekten Anwendung des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme führt. Die SchülerInnen können damit selbst erarbeiten, wie man die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise in der Geschichte des einführenden Beispiels erklärt.

Das Arbeitsblatt ist für die SchülerInnen verständlich. Die Unterrichtssequenz „Die Lösung“ wird nicht mehr verändert.

6.5.2.7. Beispiel

Die SchülerInnen versuchen sofort, die Situation aus Abbildung 6.9 auf Seite 214 auf die Situation aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* zu übertragen. Eine unbeabsichtigte Schwierigkeit ist, dass Max über das als bevorzugt betrachtete Bezugssystem Erde mit der Erde aus dem Lehrfilm verknüpft sein dürfte. Dadurch ergibt sich aber die Möglichkeit, die Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand noch einmal zu reflektieren. Nach dem Hinweis, auf die gegenseitigen Positionsänderungen der beteiligten Objekte zu achten, können die SchülerInnen auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zugreifen. Das ist ein Hinweis darauf, dass der scheinbare Bewegungszustand mit den gegenseitigen Positionen bzw. Positionsänderungen in Zusammenhang steht, was dem physikalischen Begriff von Ruhe bzw. Bewegung entspricht. Daher ist das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes anschlussfähig.

Nachdem sie auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zugegriffen haben, verwenden die SchülerInnen das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, um die Aufgaben zu lösen. In diesem Zusammenhang wird die Erde nicht mehr als bevorzugtes Bezugssystem betrachtet, sondern samt Aufbauten und Personen auch als bewegt angesehen.

Die SchülerInnen erkennen, dass die aufgenommenen Daten rückgerechnet werden müssen, um die Zeitpunkte des Losgehens der Sirenen ermitteln zu kön-

nen. Das zeigt, dass der Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung gut akzeptiert wird.

Die SchülerInnen akzeptieren, dass die Naturbeschreibungen in verschiedenen Inertialsystemen physikalisch gleichwertig sind.

Die SchülerInnen halten den Text und den Inhalt des Arbeitsblattes „Beispiel“ für verständlich, den Inhalt allerdings erst nach einer gewissen Zeit der Überlegung. Da die Aufgaben dieses Arbeitsblattes nicht vorstrukturiert sind, erscheinen sie den SchülerInnen schwieriger als die Aufgaben der anderen Arbeitsblätter. Die SchülerInnen müssen selbst Lösungsstrategien finden und das zuvor Gelernte in einer neuen Situation anwenden, wodurch es noch einmal reflektiert werden muss. Die SchülerInnen halten das Beispiel am Schluss zur Selbstkontrolle für geeignet. Die Unterrichtssequenz „Beispiel“ wird nicht mehr verändert.

6.6. Querschnittanalyse des teaching experiment

In der Querschnittanalyse werden die einzelnen Unterrichtssequenzen im Verlauf der teaching experiment untersucht und es wird analysiert, welche Interventionen zur Verbesserung des Verständnisses und des Lernertrages geführt haben.

Im Laufe des teaching experiment sind für mich die SchülerInnenvorstellungen von echtem und scheinbarem Bewegungszustand, echter und scheinbarer Geschwindigkeit sowie Abhängigkeit und Unabhängigkeit vom Bezugssystem erkennbar geworden. Nach meinem Dafürhalten hat es sich im Verlauf des teaching experiment gezeigt, dass die Entwicklung dieser Vorstellungen wesentlich für das Verständnis der Relativität der Gleichzeitigkeit ist. Darum analysiere ich die Lernfortschritte vornehmlich anhand dieser Konzepte. Die Auswertung der einzelnen Unterrichtsdurchgänge, die noch ohne Bezug auf diese Vorstellungen durchgeführt wurden, behalten weiter ihre Gültigkeit. Die teilweise neuen Aspekte, die sich nun ergeben, stellen den Fortschritt im Verständnis der SchülerInnenkonzepte im Verlauf dieser Arbeit dar.

6.6.1. Einführendes Beispiel mit Lehrfilm

Gleichzeitigkeit [Gle05]

Im ersten Unterrichtsdurchgang kommt die Intention des einführenden Beispiels, einen unerwarteten Effekt überraschend zu präsentieren, nicht zutage. Der Effekt der Relativität der Gleichzeitigkeit selbst wird aber als unerwartet empfunden. Der Text ist für die SchülerInnen zwar verständlich, wirkt aber zu kindlich. Es ist ihnen außerdem nicht klar, wie der Startvorgang durch die Aussendung der

Lichtsignale von der Voyager ausgelöst wird. Die SchülerInnen akzeptieren exakt arbeitende Messgeräte und den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung. Die SchülerInnen sind auch bereit, das unerwartete Messergebnis der Enterprise zu akzeptieren wie jedes andere Messergebnis, das sie aus dem Alltag oder dem Schulunterricht kennen. Sie schlagen zur Verbesserung vor, das einführende Beispiel frontal zu entwickeln und den Lehrfilm sofort danach einzusetzen.

Im zweiten Unterrichtsdurchgang wird das einführende Beispiel durch die frontale Präsentation als akzeptabel und nicht kindlich, aber als zu lang empfunden. Die überraschende Wirkung tritt aber zutage. Der Startvorgang durch die Aussendung der Lichtsignale von der Voyager bereitet keine Schwierigkeiten. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang. Bei der Erklärung der Lösung übersehe ich, die Rolle der hohen Geschwindigkeit der Enterprise hervorzuheben, die sie bezüglich der Planeten und der Voyager hat. Das hat wahrscheinlich bei den SchülerInnen zur Vorstellung geführt, die Relativität der Gleichzeitigkeit sei ein Alltagseffekt, der ihnen noch nicht aufgefallen sei. Die SchülerInnen akzeptieren den Messvorgang als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung, finden den Film gut und können seinen Inhalt im Großen und Ganzen wiedergeben. Darüber hinaus stellt der Film einen Ausblick dar und motiviert auf das Weitere.

Für den dritten Unterrichtsdurchgang wird die Geschichte des einführenden Beispiels radikal auf das Wesentliche gekürzt. Daraufhin wird diese Geschichte als gut und als für die Schule geeignet eingestuft. Die Geschichte dürfte nun die richtige Länge haben, um einen unerwarteten Effekt überraschend zu präsentieren, ohne geschwätzig zu sein. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang. Die Ausbreitung der Lichtsignale von der Voyager aus bereitet keine Probleme. Die SchülerInnen akzeptieren die Verwendung exakt arbeitender Messgeräte und den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung. Die Relativität der Gleichzeitigkeit wird nicht als ein bislang unbemerkter Alltagseffekt betrachtet und überrascht die SchülerInnen. Sie finden den Film gut eingesetzt und erkennen mit seiner Hilfe die Rolle, die die Geschwindigkeit bei der Relativität der Gleichzeitigkeit spielt. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang. Die SchülerInnen erkennen einen Zusammenhang zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und dem Film, diskutieren ihn und stellen Fragen. Das Zeigen des Filmes an dieser Stelle, ohne die Lösung zu Aufgabe 1 auf Seite 129 zu verraten, führt dazu, dass die Geschichte des einführenden Beispiels reflektiert wird.

Im vierten Unterrichtsdurchgang wird die Geschichte des einführenden Beispiels als verständlich und nicht kindlich bewertet. Der Startvorgang der galaktischen Spiele durch die Lichtsignale von der Voyager bereitet keine Probleme.

Die SchülerInnen akzeptieren die Verwendung exakt arbeitender Messgeräte, den Messvorgang als Sammlung und Auswertung von Daten und die unterschiedlichen Messergebnisse der Voyager und der Enterprise als unterschiedliche, aber gleichberechtigte Sichtweisen auf die Natur. Die Interpretation der Messergebnisse als Abbildung der Natur im Rahmen physikalischer Theorien wird von den SchülerInnen eingehend diskutiert. Die Relativität der Gleichzeitigkeit überrascht die SchülerInnen. Sie finden den Lehrfilm und dessen Einsatz gut und erkennen einen Zusammenhang zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und dem Film. Die SchülerInnen nehmen durch ihre Ausführungen die neu hinzugekommenen Aufgaben, die Diskussionen und Fragestellungen bezüglich des Filmes und des Zusammenhanges zwischen dem Film und der Geschichte des einführenden Beispiels im Unterrichtsverlauf implementieren sollen, teilweise vorweg. Das zeigt, dass die Aufgabenstellungen gut an den Denkprozessen der SchülerInnen orientiert und an einer passenden Stelle platziert sind.

Im fünften Unterrichtsdurchgang beurteilen die SchülerInnen die Geschichte des einführenden Beispiels als gut und nicht kindlich. Sie akzeptieren die Existenz fehlerfrei messender Geräte, den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung und die Einbeziehung der Positionen aller beteiligten Objekte in das Messergebnis. Der Lehrfilm wird als gut und dessen Einsatz als passend gewertet. Die Aufgabenstellungen im Anschluss an den Film führen wie beabsichtigt zu Diskussionen über den Zusammenhang zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und über die Betrachtung der Natur aus verschiedenen Bezugssystemen. Die SchülerInnen können einen Zusammenhang zwischen dem Film und der Geschichte des einführenden Beispiels herstellen. Durch den Film lernen sie, dass die Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise beide richtig sind, was als überraschend empfunden wird. Die SchülerInnen akzeptieren beide Sichtweisen aus dem Film als gleichwertige Naturbetrachtungen, wobei die Messergebnisse als gleichwertige Beschreibungen der Natur angesehen werden.

6.6.2. Inertialsysteme

Im ersten Unterrichtsdurchgang wird der Begriff des Inertialsystems ausgehend vom Beispiel auf dem Boden stehender und fahrender Züge gut verstanden. Es kommt jedoch zu einer begrifflichen Vermischung der Definition von Inertialsystemen und deren Eigenschaften.

Im zweiten Unterrichtsdurchgang wird der Begriff des Inertialsystems ausgehend vom Beispiel auf dem Boden stehender und fahrender Züge wieder gut verstanden. Durch die Aufteilung der Unterrichtssequenz „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ in einen Teil, in dem Inertialsysteme definiert werden,

und einen Teil, in dem die Eigenschaften von Inertialsystemen besprochen werden, kommt es nicht mehr zu einer begrifflichen Vermischung der Definition von Inertialsystemen und deren Eigenschaften. Das ist ein Fortschritt gegenüber dem vorherigen Unterrichtsdurchgang.

Da sich die thematische Trennung der Definition von Inertialsystemen und deren Eigenschaften bewährt hat, wird im dritten Unterrichtsdurchgang die Unterrichtssequenz „Inertialsysteme und deren Gleichwertigkeit“ in die Sequenzen „Inertialsysteme“ und „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ zerlegt. Ab dem dritten Unterrichtsdurchgang wird der Begriff des Inertialsystems ausgehend vom Beispiel auf dem Boden stehender und fahrender Züge gut verstanden.

6.6.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Im ersten Unterrichtsdurchgang wird die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme nur in einer Situation behandelt, die im Weltall weit weg von Himmelskörpern spielt. In dieser Situation ist die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme für die SchülerInnen verständlich. Möglicherweise entwickeln sie in dieser Situation schon die Konzepte von echtem Bewegungszustand („man merkt nicht, welches der beiden steht“: Zeile 6 von Zitat 237 auf Seite 157) und scheinbarem Bewegungszustand, der mit der Abstandsänderung in Zusammenhang gebracht wird („sie bewegen sich aufeinander zu (bewegt beide Hände aufeinander zu; Anm.)“: Zeilen 4 bis 6 von Zitat 237 auf Seite 157). Den SchülerInnen ist gegenwärtig, dass sich im Weltall alles irgendwohin bewegt (Zeilen 17 bis 18 von Zitat 237 auf Seite 157). Darum sehen sie die Sterne wahrscheinlich nicht als bevorzugtes Bezugssystem an, weshalb der echte Bewegungszustand in dieser Situation keine sehr dominante Rolle einnimmt. Ein kognitiver Konflikt zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand lässt sich nicht feststellen.

Auch im zweiten Unterrichtsdurchgang wird die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme nur in Situationen behandelt, die im Weltall weit weg von Himmelskörpern spielen. In diesen Situationen ist die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme für die SchülerInnen verständlich. Auch hier entwickeln sie wahrscheinlich die Vorstellung eines echten Bewegungszustandes, der aber irrelevant ist („Dass man nicht messen kann, welches grad ruht oder sich bewegt. Es ist einfach ... es ist egal“: Zeilen 1 bis 2 von Zitat 283 auf Seite 189), und eines scheinbaren Bewegungszustandes („Beide sind ... ruhen zueinander oder bewegen sich zueinander.“: Zeilen 2 bis 3 von Zitat 283 auf Seite 189). Den SchülerInnen ist bewusst, dass sich die Sterne bewegen (Zeile 13 von Zitat 280 auf Seite 187). Dadurch eignen sich diese wahrscheinlich nicht, um als bevorzugtes Bezugssystem angesehen zu werden, weshalb die Vorstellung eines echten Bewegungszustan-

des in dieser Situation nicht sehr dominant werden dürfte. Zum ersten Mal im teaching experiment wird in diesem Unterrichtsdurchgang die Beschreibung der Welt aus verschiedenen Bezugssystemen thematisiert, wobei aber die Situation im Weltall weit weg von Himmelskörpern angesiedelt ist (Zeilen 4 bis 6 von Zitat 283 auf Seite 189). Da die SchülerInnen für diese Situation offenbar keine sehr starke Vorstellung eines echten Bewegungszustandes entwickelt haben, betrachten sie beide Beschreibungen als gleichwertig (Zeilen 7 bis 9 von Zitat 283 auf Seite 189). Ein kognitiver Konflikt zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand lässt sich nicht feststellen.

Im dritten Unterrichtsdurchgang wird die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme in einer Situation, die im Weltall weit weg von Himmelskörpern spielt, gut verstanden. Es lassen sich wieder Hinweise auf die Konzepte von echtem Bewegungszustand („man kann sich nicht entscheiden, welcher sich bewegt“: Zeilen 4 bis 5 von Zitat 339 auf Seite 225) und scheinbarem Bewegungszustand („weil sich im Prinzip alles an anderen gemessen“: Zeilen 6 bis 7 von Zitat 339 auf Seite 225) finden. Nun überträgt der Schüler von sich aus das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme auf die Situation fahrender und stehender Züge auf der Erde (Zitat 340 auf Seite 226). Damit wird dieses Prinzip zum ersten Mal im teaching experiment in einer Situation behandelt, die auf der Erde spielt. Ich gehe davon aus, dass auch dieser Schüler den Erdboden als bevorzugtes Bezugssystem betrachtet. Damit wird zum ersten Mal im teaching experiment das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme in einer Situation behandelt, in der die SchülerInnen ein Bezugssystem vorfinden, das sie als bevorzugt betrachten. Somit muss für die SchülerInnen in diesem Unterrichtsdurchgang das Konzept des echten Bewegungszustandes eine größere Dominanz erreichen als für die SchülerInnen der vorhergegangenen Unterrichtsdurchgänge. Diese Dominanz, nun in der Vorstellung des Schülers aktiviert, dürfte er nun auch auf Situationen übertragen, die im Weltall weitab von Himmelskörpern spielen. Das zeigt sich daran, dass er das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme zwar richtig formulieren kann (Zitat 341 auf Seite 226), jedoch in einer konkreten Situation Zweifel hat, welche Sichtweise zur Beschreibung der Welt die richtigere ist (Zeilen 6 bis 7 von Zitat 342 auf Seite 227). Hier dürfte die Vorstellung des echten Bewegungszustandes durchschlagen. Da der Schüler aber keine weitere Diskussion beginnt, dürfte der kognitive Konflikt zwischen echtem und scheinbarem Bewegungszustand, der sich dabei erstmals im teaching experiment feststellen lässt, nicht besonders stark sein. Möglicherweise bringt der Schüler die Situation auf der Erde, in der er ein als bevorzugt betrachtetes Bezugssystem vorfindet, und die Situation im Weltall, in der er kein solches Bezugssystem ausmachen kann, nur in einen losen gedanklichen Zusammenhang. Da kognitive Konflikte Ausgangspunkte für Lernprozesse sind,

versuche ich, in den folgenden Unterrichtsdurchgängen durch entsprechende Aufgabenstellungen einen stärkeren kognitiven Konflikt zwischen echtem und scheinbarem Bewegungszustand zu verursachen. Dadurch soll der Bewegungsbegriff von den SchülerInnen verstärkt reflektiert und diskutiert werden. Die Entwicklung eines physikalisch korrekten Bewegungsbegriffs ist Voraussetzung für ein Verständnis relativistischer Effekte.

Im vierten Unterrichtsdurchgang wird die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme in einer Situation, die im Weltraum weit weg von Himmelskörpern spielt, gut verstanden. Wieder lassen sich Hinweise auf die Konzepte von echtem Bewegungszustand („Aber prinzipiell bewegt sich doch dann das, das sich bewegt, und das, das steht, bewegt sich nicht.“: Zeilen 4 bis 5 von Zitat 407 auf Seite 266) und scheinbarem Bewegungszustand („... es kommt darauf an, von welcher Sicht man das sieht.“: Zeilen 10 bis 11 von Zitat 409 auf Seite 267) finden. Die Frage, ob die Beschreibung der restlichen Welt von beiden Shuttles aus gleichwertig sei, führt zu einem kognitiven Konflikt zwischen den Konzepten von scheinbarem und echtem Bewegungszustand (Zitat 404 auf Seite 265). Die SchülerInnen betrachten offenbar die restliche Welt als Bezugssystem, das sie bevorzugt ansehen können. Das löst einen Lernprozess über den Begriff der Bewegung aus (Zitat 404 auf Seite 265), was zur Fragestellung führt, ob das Konzept der scheinbaren Bewegung auch auf eine Situation anwendbar sei, die auf einem Planeten spielt (Zitat 407 auf Seite 266). In der nachfolgenden Diskussion bringt die Schülerin aus ihrer eigenen Erfahrung ein Beispiel zur Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, das auf der Erde spielt (Zitat 408 auf Seite 267).

Auch im fünften Unterrichtsdurchgang wird die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme in einer Situation, die im Weltraum weit weg von Himmelskörpern spielt, gut verstanden. Wieder lassen sich, wie in Punkt 6.5.1.3 analysiert, Hinweise auf die Vorstellungen von echtem und scheinbarem Bewegungszustand finden. Diesmal lösen die Fragestellungen, welches der Shuttle die Welt richtiger beschreibt, und welche Annahme über den eigenen Bewegungszustand eines Shuttles die Welt richtiger wiedergibt, kognitive Konflikte zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand aus. Vermutlich betrachten die SchülerInnen die restliche Welt als bevorzugtes Bezugssystem. Die Diskussion, die sich daraus ergibt, führt zu einer intensiven Reflexion des Bewegungsbegriffs.

Im Verlauf des teaching experiment zeigt sich, dass das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme von den SchülerInnen gut angenommen wird, wenn dieses Prinzip in einer Situation vorgestellt wird, in der sie kein Bezugssystem erkennen, das sich anbietet, als bevorzugt betrachtet zu werden. Damit erklärt sich auch, warum die SchülerInnen in den Interviews aus Kapitel 4 der Ansicht

sind, die jeweiligen Geräte könnten nicht feststellen, ob sie sich auf dem Boden oder dem Waggon befänden. In den Fragen 4 auf Seite 28, 3 auf Seite 84 und 3 auf Seite 103 ist enthalten, dass die Geräte nur sich selbst und einander, aber nicht den Rest der Welt sehen könnten. Damit finden die SchülerInnen kein Bezugssystem vor, das sie als bevorzugt betrachten könnten. In dieser Situation dürfte sich rasch die Vorstellung eines scheinbaren Bewegungszustandes entwickeln.

Sobald das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme in Zusammenhang mit einer Situation gebracht wird, in der die SchülerInnen einem Bezugssystem begegnen, das sie als bevorzugt betrachten, kollidiert das Konzept des echten Bewegungszustandes, von dem man annehmen kann, dass ihn die meisten SchülerInnen in den Unterricht mitnehmen, mit dem Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes. Dadurch werden intensive Diskussionen ausgelöst, die zu einer tiefgreifenden konzeptuellen Revision des Bewegungsbegriffes führen.

Für den Unterricht erscheint es daher sinnvoll zu sein, das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme in einer Situation vorzustellen, in der sich den SchülerInnen kein Bezugssystem anbietet, das sie als bevorzugt ansehen können. Dadurch wird ihnen die Möglichkeit geboten, das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zu entwickeln, welches in Zusammenhang mit Abstandsänderungen von Objekten steht. Dieses Konzept entspricht dem physikalischen Bewegungsbegriff und ist daher anschlussfähig. Damit die SchülerInnen bereit sind, ihr Konzept eines absoluten Bewegungszustandes, von dem angenommen werden kann, dass ihn die meisten in den Unterricht mitbringen, in Frage zu stellen, löst man einen kognitiven Konflikt aus, indem man das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme daraufhin in Zusammenhang mit einer Situation bringt, in der die SchülerInnen einem Bezugssystem begegnen, das sie als bevorzugt betrachten. In den nachfolgenden Diskussionen treten diese beiden Konzepte in Wechselwirkung und grenzen sich gegenseitig ab. Das Konzept des echten Bewegungszustandes bleibt aber in gewissen Situationen so dominant, dass es nicht restlos durch das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes ersetzt werden kann. Das führt dazu, dass nun beide Konzepte in der Vorstellung der SchülerInnen existieren. Die SchülerInnen können aber in die Lage versetzt werden, auch in den Situationen, in denen das Konzept des echten Bewegungszustandes sehr dominant ist, bewusst auf das Konzept des scheinbaren Bewegungszustand zurückzugreifen und mit diesem physikalisch korrekt zu operieren.

6.6.4. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Im ersten Unterrichtsdurchgang lassen sich Anzeichen für die Vorstellung einer

scheinbaren Geschwindigkeit erkennen („wenn man sie überholt, dass man *das Gefühl hat*, dass sie langsamer ist“: Zeilen 2 bis 3 von Zitat 243 auf Seite 160). Hinweise auf die Vorstellung einer echten Geschwindigkeit lassen sich nicht finden. Welche Konzepte über die Geschwindigkeit des Lichts existieren, ist nicht ersichtlich. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht und wird akzeptiert.

Im zweiten Unterrichtsdurchgang lassen sich Hinweise auf das Konzept einer echten Geschwindigkeit („Je schneller du *bist* ...“: Zeilen 16 bis 17 von Zitat 286 auf Seite 190) und einer scheinbaren Geschwindigkeit („... desto langsamer *erscheint* der.“: Zeile 16 von Zitat 286 auf Seite 190) finden. Mit diesen Konzepten wird im zweiten Unterrichtsdurchgang nicht zweckmäßig umgegangen. Die Abbildungen 6.3 auf Seite 174 und 6.4 auf Seite 175 zeigen entweder die echte Geschwindigkeit, wenn Max steht, oder die scheinbare Geschwindigkeit, wenn Max läuft, nicht aber beide Geschwindigkeiten auf einmal. Abbildung 6.6 auf Seite 193 zeigt nur die echte Geschwindigkeit von Licht. Darüber hinaus ist keine Aufgabe für die SchülerInnen vorgesehen, in der beide Konzepte auf einmal angesprochen werden. Das dürfte dazu führen, dass in der Vorstellung der SchülerInnen beide Konzepte nebeneinander existieren, ohne in Interaktion getreten zu sein oder sich gegenseitig abgegrenzt zu haben. Daher können die SchülerInnen nicht erkennen, welches Konzept in welcher Situation sinnvoll ist. Das führt wahrscheinlich dazu, dass die SchülerInnen für die Geschwindigkeit des Lichts sowohl auf das Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit zurückgreifen (Zitat 293 auf Seite 193, Zeile 1 von Zitat 294 auf Seite 194) als auch auf das Konzept der echten Geschwindigkeit (Zeilen 13 und 14 von Zitat 294 auf Seite 194). Der Schüler akzeptiert nur sehr widerwillig die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und wirkt sehr unzufrieden (Zitat 300 auf Seite 198). Das spricht dafür, dass er in dieser Situation für das Licht nicht auf das Konzept der echten Geschwindigkeit zugreifen kann. Möglicherweise wird die Herausbildung einer anschlussfähigen Verknüpfung der Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit auch durch das Fehlen eines kognitiven Konflikts zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand (siehe Punkt 6.6.3) erschwert. Die gegenseitige begriffliche Abgrenzung der Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand sollte die Herausbildung einer tragfähigen Vernetzung der Vorstellungen von echter und scheinbarer Geschwindigkeit erleichtern, da für echten und scheinbaren Bewegungszustand die jeweiligen Bezugssysteme dieselbe Rolle spielen wie für echte und scheinbare Geschwindigkeit.

Im dritten Unterrichtsdurchgang kann man für Gegenstände Hinweise auf das Konzept einer scheinbaren Geschwindigkeit („wenn er [...] zu den hinrennt, dann *wirkt's* für den schneller“: Zeilen 5 bis 6 von Zitat 354 auf Seite 234) und

für Licht auf das Konzept einer echten Geschwindigkeit („Sie (Lichtstrahlen; Anm.) *sind* für beide gleich schnell.“: Zeile 5 von Zitat 350 auf Seite 231) finden. Die SchülerInnen können die Aufgaben 21 bis 24 auf Seite 210, in denen die Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit jeweils auf einmal thematisiert werden, ohne Schwierigkeiten lösen. Ebenso bereiten den SchülerInnen die Aufgaben 25 und 26 auf Seite 210, bei denen jeweils die echte Geschwindigkeit von Licht angesprochen wird, keine Probleme. Bei Gegenständen greifen die SchülerInnen auf das Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit zu, bei Licht auf das Konzept der echten Geschwindigkeit. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht (Zitat 352 auf Seite 233), wird aber problemlos akzeptiert. Das spricht dafür, dass die SchülerInnen das Konzept einer echten Geschwindigkeit, das sie wahrscheinlich in den Unterricht mitbringen, bereitwillig auf das Licht anwenden. Insgesamt zeigt sich, dass die SchülerInnen im Gegensatz zum zweiten Unterrichtsdurchgang im dritten Unterrichtsdurchgang mit den Konzepten von echter und scheinbarer Geschwindigkeit in einer anschlussfähigen Weise umgehen können. Diese Verbesserung hat wahrscheinlich mehrere Ursachen. Erstens dürfte bei den SchülerInnen des dritten Unterrichtsdurchganges erstmals im teaching experiment ein kognitiver Konflikt zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand aufgetreten sein (siehe Punkt 6.6.3). Dadurch können sich diese Konzepte im dritten Unterrichtsdurchgang in einer aufbaufähigeren Form herausbilden als in den Unterrichtsdurchgängen zuvor. Das dürfte die Herausbildung von tragfähigeren Konzepten von echter und scheinbarer Geschwindigkeit fördern. Zweitens werden im dritten Unterrichtsdurchgang zum ersten Mal im teaching experiment Aufgaben eingesetzt, die das Konzept von echter und scheinbarer Geschwindigkeit jeweils auf einmal thematisieren. Dadurch wird die Möglichkeit gegeben, beide Konzepte intensiver wechselwirken zu lassen und besser gegeneinander abzugrenzen. Drittens ist erstmals im teaching experiment in den Aufgabenstellungen 21 bis 26 auf Seite 210 vorgesehen, Situationen aufzuzeichnen. Dadurch wird den SchülerInnen die Möglichkeiten gegeben, Sachverhalte zu visualisieren und auf andere als verbale Ausdrucksmittel zurückzugreifen, was möglicherweise hilfreich ist.

Im vierten Unterrichtsdurchgang lassen sich, wie bereits in Punkt 6.4.1.4 analysiert, Hinweise auf die Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit finden. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht, wird aber schnell akzeptiert. Die SchülerInnen dürften die Vorstellung entwickeln, Gegenstände hätten eine echte und eine scheinbare Geschwindigkeit, Licht nur eine echte. Die SchülerInnen können in einer anschlussfähigen Weise auf diese beiden Geschwindigkeitskonzepte zugreifen und sie verwenden. Zuvor lässt sich im vierten Unterrichtsdurchgang ein kognitiver Konflikt zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand erkennen (siehe Punkt 6.6.3).

Möglicherweise wurde damit ein Grundstein für das Herausbilden von Konzepten einer echten und einer scheinbarer Geschwindigkeit gelegt, auf die man aufbauen kann. Die Aufgaben, in denen mit Hilfe von Zeichnungen echte und scheinbare Geschwindigkeiten von Gegenständen jeweils auf einmal bzw. die echte Geschwindigkeit von Licht thematisiert werden, werden von den SchülerInnen wieder gut angenommen und ohne Schwierigkeiten gelöst. Das ist ein Hinweis dafür, dass diese Art der Aufgabenstellung den Lernprozess gut unterstützt.

Im fünften Unterrichtsdurchgang lassen sich, wie bereits in Punkt 6.5.1.4 ausgeführt, Hinweise auf die Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit finden. Der Schüler addiert Geschwindigkeiten von Gegenständen entsprechend der klassischen Geschwindigkeitsaddition. Die SchülerInnen sind überrascht, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, akzeptieren diese Tatsache aber rasch. Sie entwickeln wahrscheinlich für Gegenstände die Vorstellungen einer echten und einer scheinbaren Geschwindigkeit, für Licht die Vorstellung einer echten Geschwindigkeit. Sie können auf diese Konzepte in einer Art und Weise zugreifen, die physikalisch tragfähig ist. Wieder tritt zuvor im Unterrichtsdurchgang ein kognitiver Konflikt zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand auf, was zu intensiven Diskussionen über den Bewegungsbegriff führt. Das ist ein Hinweis, dass die Herausbildung der Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand die Herausbildung der Konzepte zu echter und scheinbarer Geschwindigkeit fördert. Die Aufgaben, in denen die SchülerInnen mit Hilfe von Zeichnungen mit den Konzepten von echter und scheinbarer Geschwindigkeit von Gegenständen und mit dem Konzept von echter Geschwindigkeit von Licht konfrontiert werden, werden von den SchülerInnen problemlos gelöst und gut aufgenommen. Das deutet darauf hin, dass die Aufgaben den Lernprozess gut unterstützen.

Es zeigt sich im Verlauf des teaching experiment, dass sich die Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit von Gegenständen und das Konzept einer echten Geschwindigkeit von Licht in einer physikalisch tragfähigeren Weise entwickeln dürften, wenn zuvor der Bewegungsbegriff eingehend diskutiert wurde. Können die SchülerInnen mit den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand physikalisch sinnvoll operieren, dürfte es leichter fallen, physikalisch aufbaufähige Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit zu entwickeln. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird möglicherweise über die Vorstellung einer echten Geschwindigkeit, die wahrscheinlich die meisten SchülerInnen in den Unterricht mitbringen, schnell akzeptiert.

Von den beiden in Punkt 5.1 angeführten Wechseln der Konzepte ist der Konzeptwechsel von der Vorstellung eines absoluten Bewegungszustandes bzw. einer absoluten Geschwindigkeit zu einem physikalisch korrekten Bewegungs-

bzw. Geschwindigkeitsbegriff offenbar derjenige, der von intensiveren, tiefgreifenderen und langwierigeren Denkprozessen begleitet ist. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich in einer extremen Dominanz der Vorstellung eines absoluten Bewegungszustandes bzw. einer absoluten Geschwindigkeit. Der Wechsel zum Konzept der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit dürfte sich erst danach vollziehen. Den SchülerInnen wird wahrscheinlich durch die gewählte Darstellung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, die nicht auf der Geschwindigkeitsaddition beruht, und erst nach dem Verständnis des Konzepts der scheinbaren Geschwindigkeit der Widerspruch zwischen diesem Konzept und dem Konzept der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit augenscheinlich, wodurch ein Konzeptwechsel unterstützt wird. Zusätzlich empfinden die SchülerInnen diesen Konzeptwechsel vielleicht als „einen angenehmen Schritt zurück“ zu ihren ursprünglichen Vorstellungen einer absoluten Geschwindigkeit, was dem Konzeptwechsel dienlich sein könnte.

Für den Unterricht erscheint es daher sinnvoll, vor dem Unterricht zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit den Bewegungsbegriff eingehend zu thematisieren und zu diskutieren. Das Ziel sollte sein, in der Vorstellung der SchülerInnen die Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand zu etablieren. Haben die SchülerInnen einmal die Existenz eines scheinbaren Bewegungszustandes anerkannt, ist es für sie offenbar nicht so schwer, die dazugehörige Messgröße, die scheinbare Geschwindigkeit, zu akzeptieren. Es hat sich im Verlauf des teaching experiment gezeigt, dass es sinnvoll sein dürfte, bei diesem Thema Zeichnungen zu verwenden, in denen echte und scheinbare Geschwindigkeit von Gegenständen jeweils auf einmal bzw. die echte Geschwindigkeit von Licht dargestellt werden.

6.6.5. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Im ersten Unterrichtsdurchgang können die SchülerInnen die Argumentation aus dem Film, die sich auf die unterschiedlich langen Strecken, die die Lichtstrahlen durchlaufen, stützt, nachvollziehen und in verschiedenen Situationen anwenden. Die Rolle, die die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit spielt, wird wahrscheinlich nicht erkannt.

Im zweiten Unterrichtsdurchgang können die SchülerInnen die im Film verwendete Begründung, die verschieden lange Wegstrecken, die die Lichtstrahlen zurücklegen, benützt, in verschiedenen Situationen anwenden und nachvollziehen. Die Rolle, die die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit spielt, wird vermutlich kaum erkannt.

Im dritten Unterrichtsdurchgang können die SchülerInnen wieder die Beweisidee aus dem Film, die mit unterschiedlich langen Strecken, die das Licht durchläuft, arbeitet, nachvollziehen und in unterschiedlichen Fällen anwenden. Erstmals im teaching experiment können die SchülerInnen konkret die Rolle erklären, die die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit spielt. Sie entwickeln dabei die Vorstellung, Licht würde mit dem System nicht mitfliegen, sich mit dem System nicht mitbewegen. Dadurch grenzen sie das „Geschwindigkeitsverhalten“ des Lichts gegen das „Geschwindigkeitsverhalten“ von Gegenständen ab. Dieser Fortschritt tritt gerade in jenem Unterrichtsdurchgang auf, in dem sich bei den SchülerInnen erstmals im teaching experiment ein kognitiver Konflikt zwischen den Konzepten von echtem und scheinbarem Bewegungszustand nachweisen lässt und in dem die SchülerInnen erstmals im teaching experiment in einer physikalisch anschlussfähigen Weise auf die Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit zugreifen können. Das legt den Schluss nahe, dass bei der Entwicklung physikalisch tragfähiger Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand und echter und scheinbarer Geschwindigkeit, bei der gegenseitigen Vernetzung dieser Begriffe und dem Faktum, dass Licht nur eine echte Geschwindigkeit hat, die Vorstellung entsteht, Licht bewege sich im Gegensatz zu Gegenständen mit dem Bezugssystem nicht mit. Eine Zeichnung trägt dazu bei, dass die Argumentation der SchülerInnen konkreter und nachvollziehbarer werden. Möglicherweise helfen die Skizzen den SchülerInnen, ihre Konzepte besser strukturieren zu können.

Im vierten Unterrichtsdurchgang können die SchülerInnen wiederum das Argument aus dem Film, das auf unterschiedlich langen Wegen beruht, die die Lichtstrahlen zurücklegen, in verschiedenartigen Beispielen richtig verwenden. Auch in diesem Unterrichtsdurchgang entwickeln die SchülerInnen zuvor physikalisch anschlussfähige Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand und echter und scheinbarer Geschwindigkeit. Wieder bildet sich bei den SchülerInnen die Vorstellung heraus, Licht würde sich mit dem System nicht mitbewegen. Außerdem sei Licht im Gegensatz zu Gegenständen vom System unabhängig, was sich dadurch zeigt, dass das Licht im Gegensatz zu Gegenständen vom System keinen Schwung mitbekommt. Diese Vorstellungen passen logisch zusammen. Wenn Licht unabhängig vom Bezugssystem ist, kann es keine scheinbare Geschwindigkeit haben, die eine Abhängigkeit vom Bezugssystem ausdrückt, und sich nicht mitbewegen, was ebenfalls eine Abhängigkeit bedeuten würde. Da Licht sich nicht mitbewegt, kann es vom System keinen Schwung mitbekommen. Auf der anderen Seite sind Gegenstände abhängig vom System, was sich dadurch ausdrückt, dass sie eine scheinbare Geschwindigkeit haben und durch ihre Abhängigkeit vom System Schwung mitbekommen können. In diesem Unterrichtsdurchgang lassen sich darüber hinaus Hinweise darauf

finden, dass die SchülerInnen für Gegenstände eine Vorstellung entwickeln, die ansatzweise dem klassischen Grenzfall entspricht, und für Licht eine Vorstellung, die ansatzweise dem hochrelativistischen Grenzfall entspricht. Wieder sind Zeichnungen behilflich, Argumentationen nachvollziehbarer zu gestalten.

Im fünften Unterrichtsdurchgang äußern die SchülerInnen keine Vorstellungen über die Unabhängigkeit von Licht oder die Abhängigkeit von Gegenständen vom Bezugssystem. Ebenso kommt nicht zur Sprache, Licht bewege sich mit dem System nicht mit. Trotzdem können die SchülerInnen im Gegensatz zu den SchülerInnen der ersten beiden Unterrichtsdurchgänge die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit präzise erklären. Wieder entwickeln die SchülerInnen dieses Unterrichtsdurchganges zuvor physikalisch tragfähige Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand und echter und scheinbarer Geschwindigkeit und können die Argumentation aus dem Film, die auf die unterschiedlich langen Strecken, die die Lichtstrahlen durchlaufen, basiert, nachvollziehen und in verschiedenen Situationen anwenden. Skizzen helfen wieder, die Erklärungen verständlicher zu machen.

Es zeigt sich im Lauf des teaching experiment, dass die Rolle, die die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit spielt, gut verstanden wird, wenn zuvor die Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand und echter und scheinbarer Geschwindigkeit entwickelt werden und physikalisch sinnvoll auf diese Konzepte zugegriffen werden kann. Bei einigen SchülerInnen, bei denen das der Fall ist, lässt sich nachweisen, dass sie die Vorstellung entwickeln, Licht sei unabhängig vom Bezugssystem, bewege sich mit diesem nicht mit und bekomme von diesem keinen Schwung. Im Gegensatz dazu seien Gegenstände abhängig vom Bezugssystem und könnten von diesem Schwung mit bekommen. Möglicherweise entwickeln diese SchülerInnen für Gegenstände eine Vorstellung, die im Ansatz dem klassischen Grenzfall entspricht, und für Licht eine Vorstellung, die im Ansatz dem hochrelativistischen Grenzfall entspricht.

Für den Unterricht der Relativität der Gleichzeitigkeit dürfte es daher sinnvoll sein, zunächst die Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand und echter und scheinbarer Geschwindigkeit in der Vorstellung der SchülerInnen zu etablieren. Diese Konzepte müssen in einer Art und Weise vernetzt sein, dass die SchülerInnen auf sie in einer physikalisch sinnvollen Weise zugreifen können. Hilfreich könnten Interventionen sein, die die Vorstellung stimulieren, Licht sei im Gegensatz zu Gegenständen unabhängig vom Bezugssystem, bewege sich im Gegensatz zu Gegenständen mit diesem nicht mit und bekomme im Gegensatz zu Gegenständen von diesem keinen Schwung mit. Das Aufzeichnen der Sachverhalte dürfte den SchülerInnen bei der Argumentation helfen.

6.6.6. Die Lösung

Im ersten Unterrichtsdurchgang können die SchülerInnen mit Hilfe des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* [Gle05] erklären, dass aus der Sicht von Abbildung 5.4b auf Seite 142 für die Enterprise das Licht zuerst auf Garcus eintrifft. Die Rolle der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird nicht explizit erwähnt. Obwohl in diesem Unterrichtsdurchgang das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme nur in einer Situation behandelt wird, die im Weltall weit weg vom Himmelskörpern spielt, wenden die SchülerInnen dieses Prinzip auf Abbildung 5.4 auf Seite 142 an. Offenbar betrachten sie die Planeten nicht als bevorzugte Bezugssysteme, sondern aufgrund der Darstellung als mit der Voyager gleichwertig, die die SchülerInnen nicht als bevorzugt betrachten. Indem sie nun das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme anwenden, können die SchülerInnen erläutern, dass auch aus der Sicht von Abbildung 5.4a auf Seite 142 das Licht zuerst auf Garcus ankommt.

Im zweiten Unterrichtsdurchgang wurde das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme auch nur in Situationen behandelt, die im Weltraum weitab von Himmelskörpern spielen. Trotzdem wenden es die SchülerInnen auf die Planeten an, die offensichtlich im Zusammenhang mit der Voyager nicht als bevorzugte Bezugssysteme betrachtet werden. Die SchülerInnen können einen richtigen Zusammenhang zwischen der Situation aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 und der Situation im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] herstellen, würde in diesem der Konvoi von rechts nach links fliegen. Mit Hilfe der Argumentation aus dem Lehrfilm erklären die SchülerInnen, dass das Licht aus der Sicht der ruhenden Enterprise zuerst auf Garcus eintrifft. In diesem Zusammenhang erwähnen sie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht. Die SchülerInnen wenden das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme auf Abbildung 5.4 auf Seite 142 an und erklären damit, dass das Licht auch aus Sicht der sich bewegenden Enterprise zuerst auf Garcus ankommt. In diesem Zusammenhang sprechen die SchülerInnen die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit an. Wie weit sie verstanden haben, wie diese Konstanz in die Argumentation eingeht, lässt sich nicht sagen.

Im dritten Unterrichtsdurchgang setzen die SchülerInnen die Situation aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 mit einer Situation, in der im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] der Konvoi nach links fliegen würde, richtig zueinander in Beziehung. Mit Hilfe der Argumentation aus dem Film erklären sie, dass aus der Sicht der ruhenden Enterprise das Licht zuerst bei Garcus ankommt, wobei sie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erst in der abschließenden Zusammenfassung erwähnen. Mit Hilfe des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme begründen die SchülerInnen, dass das Licht aus Sicht der bewegten Enterprise zuerst auf Garcus ankommt.

Im vierten Unterrichtsdurchgang können die SchülerInnen einen richtigen Zusammenhang zwischen der Situation aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 und der Situation aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05], für den Fall, dass der Konvoi nach links fliegt, herstellen. Mit Hilfe der Argumentation aus dem Film erklären die SchülerInnen, dass das Licht aus der Sicht der ruhenden Enterprise zuerst bei Garcus ankommt. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erwähnen sie dabei nicht explizit. Mit Hilfe des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme erläutern die SchülerInnen, dass auch aus der Sicht der sich bewegenden Enterprise das Licht zuerst auf Garcus eintrifft.

Im fünften Unterrichtsdurchgang stellen die SchülerInnen einen richtigen Bezug zwischen der Situation, falls im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] der Konvoi nach links fliegen würde, und der Situation aus Abbildung 5.4b auf Seite 142 her. Damit erkennen die SchülerInnen, dass aus der Sicht der ruhenden Enterprise das Licht zuerst auf Garcus eintrifft. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit thematisieren sie nicht explizit. Mit Hilfe des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme argumentieren sie, dass aus der Sicht der sich bewegenden Enterprise das Licht auch zuerst bei Garcus eintrifft.

Das Verständnis des Prinzips der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme ist ab dem dritten Unterrichtsdurchgang höher als in den Unterrichtsdurchgängen zuvor (siehe Punkt 6.6.3), ebenso das Verständnis der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (siehe Punkt 6.6.4) sowie deren Rolle für die Relativität der Gleichzeitigkeit (siehe Punkt 6.6.5). Im Verlauf des Unterrichtsversuchs lässt sich jedoch aus den Ausführungen der SchülerInnen in der Unterrichtssequenz „Die Lösung“ ein tieferes Verständnis dieser physikalischen Grundlagen nicht nachweisen. Der Grad des Verständnisses für die physikalischen Grundlagen wird in dieser Unterrichtssequenz durch die Antworten der SchülerInnen nicht abgebildet. Es lässt sich in dieser Unterrichtssequenz nicht unterscheiden, ob die SchülerInnen die Argumente aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] und den vorangegangenen Unterrichtssequenzen lediglich wiederholen oder einsichtig anwenden.

Für den Unterricht bedeutet das, dass es vor dem Unterricht der Sequenz „Die Lösung“ ausreichend Hinweise geben muss, dass die physikalischen Grundlagen von den SchülerInnen so weit verstanden wurde, dass sie mit ihnen richtig operieren können. Des Weiteren sollten die SchülerInnen die Relativität der Gleichzeitigkeit in einer Fragestellung erklären müssen, die in einer völlig neuen Umgebung spielt. Damit soll getestet werden, ob die SchülerInnen die physikalischen Grundlagen verständlich anwenden und mit ihnen die Relativität der Gleichzeitigkeit herleiten können. Die Fragestellung soll so gestaltet sein, dass die SchülerInnen die Aufgabe nicht durch reine Ähnlichkeitsüberlegungen lösen können. Vorausschauend wird eine solche Aufgabe nach dem zweiten

Unterrichtsdurchgang am Ende des Unterrichtskonzepts als „Beispiel“ eingefügt.

6.6.7. Beispiel

Die Unterrichtssequenz „Beispiel“ wird nach dem zweiten Unterrichtsdurchgang in das Unterrichtskonzept eingefügt.

Im dritten Unterrichtsdurchgang wird der Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung wiederholt. Dadurch wird der Unterschied zwischen einem Ereignis und dem Wahrnehmen des Ereignisses noch einmal thematisiert. Die SchülerInnen wenden das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme zur Lösung des Beispiels an. Dieses Prinzip wird so weit akzeptiert, dass die Erde nicht mehr nur als bevorzugtes Bezugssystem betrachtet wird, sondern auch samt Aufbauten und Personen als bewegt. Die SchülerInnen können die Sichtweise, in der sich die Erde bewegt, mit den Planeten und den Raumschiffen in einen richtigen Zusammenhang bringen. Als Entsprechung zur Voyager wird offenbar ein virtuelles Konstrukt gesehen, das sich in der Mitte zwischen den Sirenen befindet und den Alarm auslöst. Die SchülerInnen können das Beispiel richtig lösen, indem sie die Argumente aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] verwenden, und akzeptieren die Gleichzeitigkeit als relativen Begriff.

Im vierten Unterrichtsdurchgang zeigt sich, dass die SchülerInnen zwischen dem Zeitpunkt der Signalausendung und dem Zeitpunkt der Signalmessung unterscheiden können. Die SchülerInnen verwenden das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, um das Beispiel zu lösen. Dabei betrachten die SchülerInnen die Erde samt Personen und Aufbauten auch als bewegt und können eine sinnvolle Verbindung zwischen dieser Sichtweise und den Raumschiffen und Planeten herstellen. Anstelle der Voyager denken sich die SchülerInnen offensichtlich in der Mitte zwischen den Sirenen eine Signalquelle platziert, die den Alarm auslöst. Mit Hilfe der Argumentation aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] lösen die SchülerInnen das Beispiel. Außerdem akzeptieren sie die Gleichzeitigkeit als relativen Begriff.

Im fünften Unterrichtsdurchgang können die SchülerInnen im Zuge einer Diskussion eine Beziehung zwischen dem Beispiel und der Situation mit den Planeten und den Raumschiffen herstellen. Die SchülerInnen wenden das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme an, um das Beispiel zu lösen. Dabei betrachten sie die Erde samt Aufbauten und Personen auch als bewegt. Die Sirenen denken sich die SchülerInnen anscheinend durch Signale ausgelöst, die aus der Mitte zwischen den Sirenen kommen und konstante Geschwindigkeit haben. Anhand der Argumentationsweise aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] finden die SchülerInnen die Lösung für das Beispiel. Darüber hinaus erkennen

sie die Gleichzeitigkeit als relativen Begriff an.

In allen drei Unterrichtsdurchgängen, in denen die Unterrichtssequenz „Beispiel“ erprobt wurde, können sich die SchülerInnen von der Vorstellung des bevorzugten Bezugssystems Erde lösen und sie samt Aufbauten und Personen auch als bewegt betrachten. Die SchülerInnen können die reale Situation, die auf der Erde stattfindet, sinnvoll mit der fiktiven Weltraumgeschichte des einführenden Beispiels in Verbindung bringen. Sie wenden die Strategie, die zur Klärung eines unerwarteten Sachverhalts in der Weltraumgeschichte entwickelt wurde, auf die neue Situation, die auf der Erde spielt, an. Ein Schüler dürfte dabei explizit auf die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hinweisen. Dadurch, dass die Aufgabenstellungen in der Unterrichtssequenz „Beispiel“ nicht vorstrukturiert sind, ergeben sich Diskussionen, in denen die neuen Begriffe und Konzepte reflektiert werden können.

Es zeigt sich im Laufe des Unterrichtsversuchs, dass die SchülerInnen in der Lage sind, die physikalischen Grundlagen der Relativität der Gleichzeitigkeit in einer neuen Situation sinnvoll anzuwenden und damit eine Fragestellung zu beantworten. Das deutet darauf hin, dass die SchülerInnen die wesentlichen physikalischen Ideen des Unterrichts im Großen und Ganzen verstanden haben.

6.7. Begriffsnetz in der Vorstellung der SchülerInnen

In Abschnitt 6.6 wurde dargelegt, dass mit Hilfe der Begriffe des echten und scheinbaren Bewegungszustandes, der echten und scheinbaren Geschwindigkeit sowie der Abhängigkeit bzw. Unabhängigkeit vom Bezugssystem der Lernfortschritt der SchülerInnen gut erklärt werden kann. In diesem Abschnitt fasse ich zusammen, durch welche Interventionen sich diese Begriffe zu einem physikalisch tragfähigen Netz zusammenfügen lassen.

Die Zustände Ruhe und Bewegung eines Körpers bezüglich eines als bevorzugt betrachteten Bezugssystems nenne ich den echten Bewegungszustand des Körpers. Die Geschwindigkeit eines Körpers bezüglich eines solchen Bezugssystems nenne ich die echte Geschwindigkeit des Körpers. In [Mac82] wird nachgewiesen, dass SchülerInnen der 10. Schulstufe fast stets den Erdboden als bevorzugtes Bezugssystem betrachten. Eine solche Wahl ist auch bei den SchülerInnen der 8. Schulstufe im teaching experiment nachweisbar. Der Erdboden ist dasjenige Bezugssystem, auf das im Alltag meistens die Geschwindigkeit und damit auch die Zustände Ruhe und Bewegung bezogen werden. Echter Bewegungszustand und echte Geschwindigkeit beziehen sich damit im Alltag

fast immer auf den Erdboden. Da das Bezugssystem Erdboden weder als solches noch dessen als bevorzugt betrachtete Rolle ins Bewusstsein der SchülerInnen dringt, betrachten sie den echten Bewegungszustand und die echte Geschwindigkeit eines Körpers als alleinige Eigenschaften dieses Körpers selbst. Es zeigt sich im Laufe des teaching experiment, dass das als bevorzugt betrachtete Bezugssystem nicht notwendigerweise die Erde sein muss. Es genügt, dass die SchülerInnen ein Bezugssystem erkennen, auf das sie in der gegebenen Situation alles „in natürlicher Weise“ beziehen können und das damit dieselbe Rolle spielt wie die Erde im Alltag. Deshalb betrachten die SchülerInnen auch in diesen Situationen den echten Bewegungszustand und die echte Geschwindigkeit als alleinige Eigenschaften des Körpers.

Die Vorstellungen eines echten Bewegungszustandes und einer echten Geschwindigkeit von Gegenständen erweisen sich im teaching experiment als so dominant, dass diese Vorstellungen nicht durch einen physikalisch korrekten Bewegungs- bzw. Geschwindigkeitsbegriff ersetzt werden können. Es wird aber nachgewiesen, dass SchülerInnen die Möglichkeit eröffnet werden kann, ein weiteres Konzept von Geschwindigkeit bzw. Bewegungszustand zu entwickeln, welches dem physikalisch korrekten Bewegungs- bzw. Geschwindigkeitsbegriff entspricht.

Anhand einer Situation, die im Weltall weit weg von Himmelskörpern spielt, erkennen die SchülerInnen, dass der Begriff eines echten Bewegungszustandes für Gegenstände nicht sinnvoll ist. In dieser Situation akzeptieren die SchülerInnen schnell, dass man zur Angabe des Bewegungszustandes eines Körpers ein Bezugssystem braucht. Die Zustände Ruhe und Bewegung eines Körpers bezüglich eines Bezugssystems, das nicht als bevorzugt betrachtet wird, nenne ich den scheinbaren Bewegungszustand des Körpers. Die Geschwindigkeit eines Körpers bezüglich eines solchen Bezugssystems nenne ich die scheinbare Geschwindigkeit des Körpers. Da beim scheinbaren Bewegungszustand und bei der scheinbaren Geschwindigkeit das Bezugssystem erkannt und dessen Rolle bewusst wird, ist den SchülerInnen klar, dass scheinbarer Bewegungszustand und scheinbare Geschwindigkeit vom Bezugssystem abhängen. Darüber hinaus lässt sich im teaching experiment nachweisen, dass die scheinbare Geschwindigkeit mit der Abstandsänderung von Objekten in Verbindung gebracht wird, was dem physikalischen Geschwindigkeitsbegriff entspricht und dadurch anschlussfähig ist. Sobald Situationen beschrieben werden, in denen die SchülerInnen ein Bezugssystem entdecken, das sie als bevorzugt betrachten, tritt ein Konflikt zwischen den Konzepten des echten und des scheinbaren Bewegungszustandes auf.

In den sich dabei ergebenden Diskussionen über Bewegung erweist sich das Argument, im Weltall bewege sich alles und es lasse sich daher kein fixer Punkt

finden, als sehr hilfreich. Der echte Bewegungszustand von Körpern ist aber ein so dominantes Konzept, dass es von den SchülerInnen nicht fallen gelassen wird. Im teaching experiment lässt sich aber nachweisen, dass die SchülerInnen dazu gebracht werden können, den echten Bewegungszustand von Gegenständen als nicht messbar und damit als irrelevant zu betrachten. Zusätzlich greifen die SchülerInnen im Unterrichtsverlauf vermehrt auf das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes zurück, um Sachverhalte zu beschreiben und Aufgaben zu lösen. Die Dominanz des Erdbodens als Bezugssystem, das als bevorzugt betrachtet wird, lässt sich dabei so weit zurückdrängen, dass die SchülerInnen von selbst Lösungswege finden, in denen der Erdboden samt Aufbauten und Personen als bewegt betrachtet wird.

Es zeigt sich im Verlauf des teaching experiment, dass nur nach intensiven Diskussionen über den Bewegungsbegriff physikalisch tragfähige Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand entwickelt werden. Die unterrichtliche Intervention muss also darauf abzielen, einen veritablen kognitiven Konflikt zwischen diesen beiden Bewegungsbegriffen zu verursachen, damit in den sich dadurch ergebenden Denkprozessen aufbaufähige Konzepte entwickelt werden können.

Haben die SchülerInnen das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes in einer physikalisch anschlussfähigen Weise akzeptiert, fällt es ihnen nicht sehr schwer, auch das Konzept einer scheinbaren Geschwindigkeit anzunehmen. Das spricht dafür, dass die Konzepte von scheinbarem Bewegungszustand und scheinbarere Geschwindigkeit sowie von echtem Bewegungszustand und echter Geschwindigkeit eng zusammenhängen dürften. Das erscheint auch logisch, da in beiden Fällen die jeweiligen Bezugssysteme eine ähnliche Rolle spielen. Die Intervention, durch die das Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit entwickelt werden soll, dürfte erfolgreicher sein, wenn im selben Beispiel die Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit auf einmal thematisiert werden. Zeichnungen dürften den Lernprozess ebenfalls unterstützen.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist für die SchülerInnen überraschend, wird aber schnell akzeptiert, wenn zuvor anschlussfähige Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit entwickelt wurden. Mit Hilfe dieser Konzepte formuliert lautet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit so: Gegenstände haben eine echte und eine scheinbare Geschwindigkeit, Licht nur eine echte Geschwindigkeit. Anhand der Vorstellungen von echter und scheinbarer Geschwindigkeit lässt sich die gute Akzeptanz der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erklären. Nach den Präkonzepten der SchülerInnen haben alle Gegenstände nur eine echte Geschwindigkeit, von der sich das Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit nur mit Mühe absetzt. Es kann daher von den SchülerInnen durchaus als erleichternde Überraschung empfunden werden, dass Licht deren Präkonzept von

einer alleinigen echten Geschwindigkeit erfüllt. Ebenso hat Licht nur einen echten Bewegungszustand, da es sich in allen Inertialsystemen bewegt. Die Intervention muss also darauf abzielen, vor dem Unterricht der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit anschlussfähige Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand sowie von echter und scheinbarer Geschwindigkeit in der Vorstellung der SchülerInnen zu entwickeln.

Da die scheinbare Geschwindigkeit eine Abhängigkeit vom Bezugssystem ausdrückt, dürften die SchülerInnen die Vorstellung entwickeln, Gegenstände seien abhängig vom Bezugssystem, was sich dadurch äußert, dass sie von diesem Schwung mitnehmen können, was ansatzweise der klassischen Geschwindigkeitsaddition nahekommen dürfte. Diese Vorstellung entspricht im Ansatz dem klassischen Grenzfall bzw. der klassischen Physik und ist daher anschlussfähig.

Da Licht nur eine echte Geschwindigkeit hat, dürfte sich bei den SchülerInnen die Anschauung herausbilden, Licht bewege sich unabhängig vom Bezugssystem. Eine Abhängigkeit vom Bezugssystem würde eine vom Bezugssystem abhängige Geschwindigkeit, eine scheinbare Geschwindigkeit, implizieren. Durch die Unabhängigkeit vom Bezugssystem kann das Licht auch keinen Schwung von diesem mitnehmen. Diese Vorstellung entspricht im Ansatz dem hochrelativistischen Grenzfall bzw. der relativistischen Physik und ist daher anschlussfähig.

Für eine unterrichtliche Intervention bedeutet das, dass es möglicherweise den Lernprozess unterstützt, in der Sequenz zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit durch eine entsprechende Wortwahl zu suggerieren, Licht bewege sich unabhängig von den BeobachterInnen. Damit könnte die Vorstellung stimuliert werden, Licht bewege sich im Gegensatz zu Gegenständen unabhängig vom Bezugssystem und nehme im Gegensatz zu Gegenständen vom Bezugssystem keinen Schwung mit.

Die SchülerInnenvorstellungen, die im teaching experiment nachgewiesen werden konnten, sowie deren Zusammenspiel sind in Abbildung 6.34 auf der nächsten Seite zusammengefasst.

Die beiden Blöcke in der Vorstellung der SchülerInnen, die der klassischen bzw. der relativistischen Physik entsprechen, sind über die physikalisch falsche Vorstellung einer nur vom Gegenstand abhängigen echten Geschwindigkeit bzw. eines nur vom Gegenstand abhängigen echten Bewegungszustandes miteinander verbunden. Diese Verbindung ist so dominant, dass es unrealistisch erscheint, sie beseitigen zu wollen. Das Ziel des Unterrichts kann es also nicht sein, die Vorstellungen einer echten Geschwindigkeit und eines echten Bewegungszustandes von Gegenständen auszutreiben, sondern geschickt zu benützen. Die unterrichtliche Intervention muss also darauf abzielen, bei den SchülerInnen Konzepte von scheinbarem Bewegungszustand und scheinbarer Geschwindigkeit zu etablieren und gegen die Konzepte von echtem Bewegungszustand und

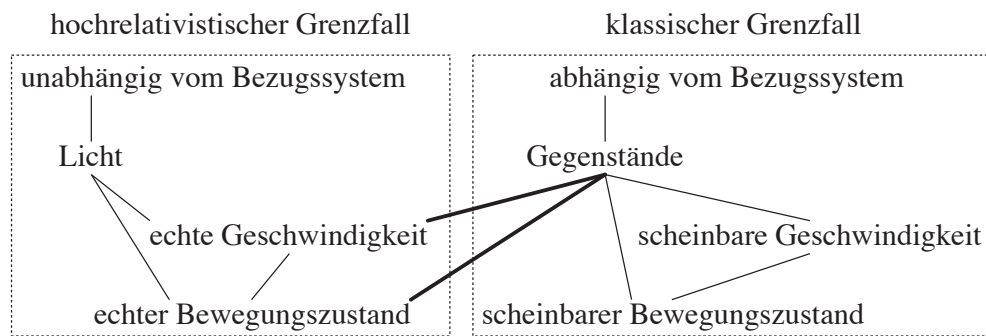


Abbildung 6.34.: Begriffsnetz

echter Geschwindigkeit abzugrenzen. Das konzeptuell Neue für SchülerInnen dürfte nicht die echte Geschwindigkeit von Licht, sondern die scheinbare Geschwindigkeit von Gegenständen sein. Schlussendlich sollen die SchülerInnen bei Gegenständen auf die Konzepte der scheinbaren Geschwindigkeit und des scheinbaren Bewegungszuständen zurückgreifen können und bei Licht auf die Konzepte von echter Geschwindigkeit und echtem Bewegungszustand.

Um den SchülerInnen den begrifflichen Unterschied zwischen klassischem und hochrelativistischem Grenzfall nahebringen zu können, muss die unterrichtliche Intervention also bei den Konzepten zum Geschwindigkeits- und Bewegungsbegriff ansetzen.

7. Endversion des Unterrichtskonzepts

In diesem Kapitel fasse ich den Kapitel 6 überarbeiteten Prototyp als Endversion eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit zusammen.

7.1. Einführendes Beispiel

In einer Sequenz Frontalunterricht wird den SchülerInnen die Geschichte aus Punkt 7.1.1 mit Hilfe der Abbildung 7.1 auf der nächsten Seite vorgetragen. Dann bekommen die SchülerInnen die Aufgabe aus Punkt 7.1.2 vorgelegt. Nach der Bearbeitung dieser Aufgabe wird ihnen der Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] vorgeführt (Punkt 7.1.3), ohne vorher den Grund für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zu verraten. Anschließend sollen die SchülerInnen die Aufgaben aus Punkt 7.1.4 lösen.

7.1.1. Die galaktischen Spiele mögen beginnen

Das sind die Planeten Aldubian und Garcus (SchülerInnen bekommen Abbildung 7.1a auf der nächsten Seite vorgelegt.). Sie tragen dieses Jahr die galaktischen Spiele, so etwas wie die Olympischen Spiele, gemeinsam aus, so wie Österreich und die Schweiz die Fußball-EM 2008 gemeinsam ausgetragen haben. Es wurde vereinbart, dass jeder der Planeten eine eigene Eröffnungszeremonie bekommt und dass diese Zeremonien gleichzeitig starten.

Da es sich bei Aldubian und Garcus zufällig um zwei Planeten handelt, deren Abstand sich nie ändert, wird der Startvorgang folgendermaßen bewerkstelligt: Das Raumschiff USS Voyager unter der erfahrenen Kapitänin Kathryn Janeway wird sich genau in der Mitte zwischen Aldubian und Garcus platzieren (SchülerInnen bekommen Abbildung 7.1b auf der nächsten Seite vorgelegt). An der Voyager ist außen eine Lichtquelle angebracht (Eine Lichtquelle wird außen an die Voyager gezeichnet in Abbildung 7.1b auf der nächsten Seite.), die man sich wie eine riesige Glühbirne vorstellen kann. Diese wird kurz zum Aufleuchten gebracht. Dadurch sendet sie in alle Richtungen Lichtstrahlen aus (Es werden

Aldubian

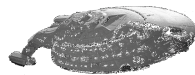


Garcus



(a) Aldubian und Garcus

Aldubian

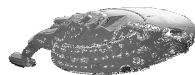


Garcus



(b) Aldubian, Garcus und Voyager

Aldubian



Garcus



(c) Aldubian, Garcus, Voyager und Enterprise

Abbildung 7.1.: Eröffnung der galaktischen Spiele⁴⁵

radial Lichtstrahlen von der Lichtquelle weg gezeichnet in Abbildung 7.1b.). Einer dieser Lichtstrahlen trifft auf Aldubian und einer auf Garcus (Es wird je ein Lichtstrahl von der Lichtquelle zu Aldubian und einer zu Garcus gezeichnet in Abbildung 7.1b.). Sobald das Licht bei den Planeten ankommt, löst es einen Mechanismus aus, der die jeweilige Zeremonie startet. Alle Vorgänge werden auf der Voyager genau aufgezeichnet und analysiert. Zur Freude der gesamten Mannschaft hat der Vorgang geklappt: Die Spiele begannen auf beiden Planeten gleichzeitig.

Zufällig kommt die USS Enterprise unter dem Kommando von Kapitän James T. Kirk vorbei, die mit sehr hoher Geschwindigkeit, nämlich mit halber Lichtgeschwindigkeit, unterwegs ist (SchülerInnen bekommen Abbildung 7.1c

⁴⁵Siehe Fußnoten 3 und 4 auf Seite 129

vorgelegt.). Aus Interesse lässt auch Kirk den Startvorgang der galaktischen Spiele aufzeichnen und analysieren. Zum Erstaunen seiner Mannschaft stellt er fest, dass die Spiele auf Garcus früher gestartet wurden als auf Aldubian. Kirk teilt Janeway seine Analyse mit. Er ersucht sie, ihre Daten noch einmal zu prüfen. Er werde das mit seinen ebenfalls tun. Doch die neuerliche Prüfung bringt keine Änderung: Janeway behauptet, die Spiele hätten gleichzeitig begonnen. Kirk behauptet hingegen, die Spiele hätten zuerst auf Garcus und dann auf Aldubian begonnen.

7.1.2. Aufgabe für die SchülerInnen

1. Wie lassen sich die unterschiedlichen Standpunkte von Kirk und Janeway erklären?

7.1.3. Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]

Den SchülerInnen wird der Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* gezeigt, ohne ihnen vorher den Grund für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zu sagen.

7.1.4. Aufgaben für die SchülerInnen

1. Für den Astronauten, der dieselbe Geschwindigkeit hat wie das Raumschiff und die zwei Shuttles, kommen die Lichtstrahlen bei den Shuttles gleichzeitig an. Für die BeobachterInnen auf der Erde kommt der Lichtstrahl beim hinteren Shuttle früher an als beim vorderen. Wer hat Recht? Begründung!
2. Kommen die Lichtstrahlen für den Astronauten, der sich gleich schnell wie das Raumschiff und die Shuttles bewegt, wirklich gleichzeitig an oder misst er das nur? Kommen die Lichtstrahlen für die BeobachterInnen auf der Erde wirklich beim hinteren Shuttle früher an als beim vorderen oder messen sie das nur?
3. Was hat der Film mit der Geschichte des einführenden Beispiels zu tun?
4. Hilft uns der Film, Aufgabe 1 aus Punkt 7.1.2 zu beantworten? Wenn ja, wie? Wenn nein, warum nicht?

7.2. Die physikalischen Grundlagen

Die SchülerInnen bekommen ein Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ ausgehändigt, das aus dem Text aus Punkt 7.2.1 und den Aufgaben aus Punkt 7.2.2 besteht. Anschließend an die Bearbeitung dieser Aufgaben erhalten die SchülerInnen ein Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“, das aus dem Text aus Punkt 7.2.3 samt den Abbildungen 7.2 auf Seite 362 und 7.3 auf Seite 363 und den Aufgaben aus Punkt 7.2.4 besteht. Nach der Bearbeitung dieser Aufgaben wird den SchülerInnen ein Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ gegeben, das aus dem Text aus Punkt 7.2.5 samt den Abbildungen 7.4 auf Seite 364, 7.5 und 7.6 auf Seite 365 und den Aufgaben aus Punkt 7.2.6 besteht.

7.2.1. Inertialsysteme

Die Erdoberfläche und ein Zug, der erschütterungsfrei mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus fährt, haben etwas gemeinsam. Wir können in diesem Zug genau so bequem auf einem Sessel sitzen wie auf einem Sessel, der auf der Erdoberfläche steht. Wir spüren nicht, dass der Zug fährt. Bremsst der Zug, so gilt das nicht mehr. Wir spüren, dass der Zug bremst. Ebenso spüren wir, wenn der Zug schneller wird oder durch eine Kurve fährt.

Wenn wir in einem Zug sitzen, der erschütterungsfrei mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus fährt, spüren wir nicht, dass er fährt. Spüren wir es deshalb nicht, weil wir keine Sinnesorgane dafür haben, oder kann man überhaupt nicht feststellen, dass der Zug fährt? Um das herauszufinden, kann man folgendes Experiment machen.

In zwei Eisenbahnwaggons werden dieselben Physiklaboratorien eingebaut. Bei beiden Waggons werden die Fenster verklebt, sodass man nicht nach außen sehen kann. In beide Waggons wird jeweils eine Gruppe von PhysikerInnen eingeschlossen. Ein Waggon bleibt ruhig auf der Erdoberfläche stehen, der andere wird an einem Zug angehängt, der erschütterungsfrei geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Die PhysikerInnen erfahren nicht, in welchem der Waggons sie sich befinden. Sie bekommen die Aufgabe, mit Hilfe von Versuchen festzustellen, ob ihr Labor auf der Erdoberfläche steht oder an den Zug angehängt wurde. Egal, welche Experimente die PhysikerInnen durchführen, es ist ihnen nicht möglich, das herauszufinden. Alle Versuche laufen in beiden Laboratorien gleich ab. Insbesondere kann man in beiden Waggons genau so bequem auf einem Sessel sitzen wie auf einem Sessel, der auf der Erdoberfläche steht. Bezugssysteme, in denen man sich genau so fühlt wie auf der Erdoberfläche, nennt man Inertialsysteme. Beide Laboratorien in unserem Beispiel sind Inertialsysteme.

7.2.2. Aufgaben für die SchülerInnen

1. Erkläre, woran man merkt, dass ein Flugzeug, das mit konstanter Geschwindigkeit erschütterungsfrei geradeaus fliegt, ein Inertialsystem ist.
2. Erkläre, woran man merkt, dass ein bremsender Zug kein Inertialsystem ist.
3. Erkläre, woran man merkt, dass ein Ringelspiel, das sich dreht, kein Inertialsystem ist.
4. Finde ein weiteres Beispiel für ein Inertialsystem und erkläre, warum es eines ist.
5. Finde ein weiteres Beispiel für ein Bezugssystem, das kein Inertialsystem ist, und erkläre, warum es keines ist.

7.2.3. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme

Im Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ waren zwei Laboratorien auf Waggonen beschrieben, in denen man nicht feststellen konnte, ob der Waggon fährt oder auf der Erde steht. Du wirst vielleicht denken, wenn man aus den Waggonen hinausschaut, kann man trotzdem sehen, welcher sich bewegt oder nicht. Aber bewegt sich der Waggon, der auf der Erde steht, wirklich nicht? Du hast sicher schon gehört, dass sich die Erde um ihre Achse dreht und sich auf ihrer Bahn um die Sonne bewegt. Wenn wir weit weg von der Erde sind und keine Sterne sehen, an denen wir uns orientieren könnten, kann man dann entscheiden, ob sich ein Inertialsystem bewegt oder nicht? Um das zu klären, betrachten wir einen Vermessungsversuch der Raumstation Deep Space Nine.

Kosmische Nebel sind aufgezogen, sodass man von Deep Space Nine aus keine Sterne mehr sehen kann. Die Shuttles Galileo und Columbus wurden ausgesandt, um zu vermessen, ob sich die Raumstation bewegt oder nicht. Während die Galileo noch unterwegs ist, ist die Columbus bereits bei Deep Space Nine eingetroffen und hält konstanten Abstand zu ihr (Abbildung 7.2 auf der nächsten Seite). Darauf hin funkt die Mannschaft der Columbus zur Galileo: „Wir sind bereits angekommen und bewegen uns nicht neben Deep Space Nine. Also bewegt sich auch Deep Space Nine nicht. Die Mission ist erfüllt. Ihr könnt umkehren.“

Die Mannschaft der Galileo antwortet: „Wir sehen euch bereits. Ihr seid im Irrtum. Ihr bewegt euch auf uns zu, und somit bewegt sich auch Deep Space Nine.“

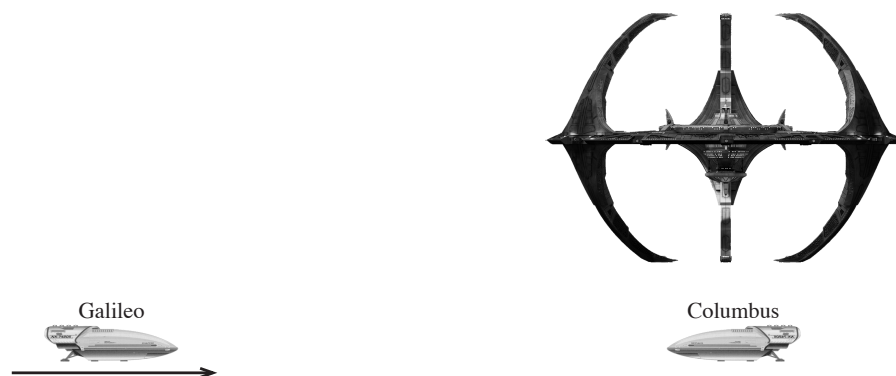


Abbildung 7.2.: Bewegt sich Deep Space Nine?⁴⁶

Die Mannschaft der Columbus stimmt nicht zu: „Bei uns können alle ruhig auf ihren Sesseln sitzen; wie auf der Erde. Alle Versuche laufen wie in einem Laboratorium ab, das auf der Erde steht. Die Columbus ist ein Inertialsystem. Wir ruhen. Also ruht Deep Space Nine.“

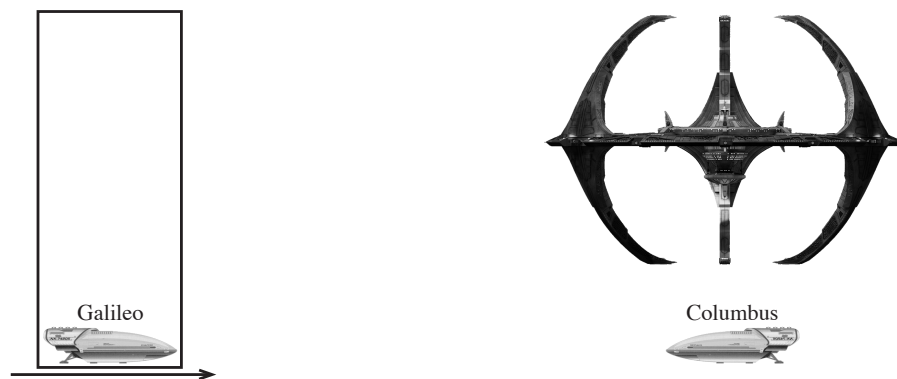
Die Antwort von der Galileo kommt prompt: „Bei uns können auch alle ruhig auf ihren Sesseln sitzen; wie auf der Erde. Alle Versuche laufen auch bei uns wie in einem Laboratorium ab, das auf der Erde steht. Also ist die Galileo ein Inertialsystem. Wir ruhen, ihr bewegt euch auf uns zu, also auch Deep Space Nine.“

Nach einem langen Hin und Her können sich die beiden Mannschaften zwar darauf einigen, dass beide Shuttles Inertialsysteme sind. Welches ruht, bleibt aber strittig.

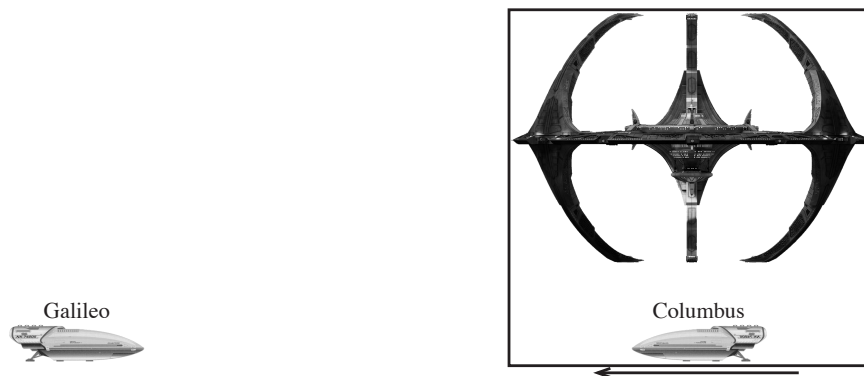
In der Physik hat man herausgefunden, dass man nicht sagen kann, ob ein Inertialsystem ruht oder nicht. Die Frage selbst hat keinen Sinn. Im Weltraum bewegt sich alles irgendwie. Bewegung kann es immer nur aus der Sicht von jemand anderem geben. Die Galileo bewegt sich aus der Sicht der Columbus und Deep Space Nine. Die Columbus ruht aus der Sicht von Deep Space Nine. Deep Space Nine ruht aus der Sicht der Columbus. Deep Space Nine und die Columbus bewegen sich aus der Sicht der Galileo. Es ist physikalisch völlig gleichwertig, von welchem Inertialsystem aus man eine Situation beschreibt. Alle Inertialsysteme sind völlig gleichwertig. Deep Space Nine bewegt sich aus der Sicht der Galileo und ruht aus der Sicht der Columbus. Bewegung oder Ruhe *an sich* gibt es nicht und ist daher auch nicht feststellbar. Die Frage danach ist physikalisch sinnlos.

Die Ansichten der Mannschaften der Galileo und der Columbus sind absolut

⁴⁶Siehe Fußnote 6 auf Seite 134



(a) Galileo bewegt sich nach rechts, Deep Space Nine und Columbus ruhen.



(b) Galileo ruht, Deep Space Nine und Columbus bewegen sich nach links.

Abbildung 7.3.: Zwei äquivalente Situationen⁴⁷

gleichwertig (Abbildung 7.3). Man kann entweder Deep Space Nine und die Columbus als ruhend und die Galileo als sich nach rechts bewegend betrachten (Abbildung 7.3a) oder die Galileo als ruhend und Deep Space Nine und die Columbus als sich nach links bewegend betrachten (Abbildung 7.3b). Diese beiden Ansichten sind nicht unterscheidbar. In der Physik nennt man das die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme.

7.2.4. Aufgaben für die SchülerInnen

1. Die Besatzung der Columbus behauptet, sie würde ruhen. Die Besatzung der Galileo behauptet, sie würde ruhen. Wer hat Recht? Begründung!
2. Die Shuttles Columbus und Galileo bewegen sich zueinander. Beide be-

⁴⁷Siehe Fußnote 6 auf Seite 134



Abbildung 7.4.: Moritz entfernt sich von Max.

trachten die Welt aus ihrer Sicht. Welche Sicht auf die Welt, die sich dabei ergibt, beschreibt die Natur richtiger? Begründung!

3. Die Galileo betrachtet sich einmal als ruhend und einmal als bewegt und betrachtet dabei jeweils die Welt. Welche Sicht auf die Welt, die sich dabei ergibt, beschreibt die Natur richtiger? Begründung!
4. Ein Zug fährt mit konstanter Geschwindigkeit auf gerader Strecke. Ein anderer Zug steht in einem Bahnhof. Kann man sagen, welcher dieser beiden Züge sich nicht bewegt? Begründung!
5. Erkläre anhand eines selbst gewählten Beispiels, was man unter der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme versteht.

7.2.5. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Max steht auf der Straße. Moritz geht geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit von Max weg (Abbildung 7.4). Max kann hinter Moritz hergehen. Von Max aus gesehen ist Moritz dann langsamer. Max kann so schnell gehen, dass er Moritz einholt und überholt.

Auch eine Radfahlerin (Abbildung 7.5a auf der nächsten Seite), ein Auto (Abbildung 7.5b auf der nächsten Seite), eine fliegende Gewehr­kugel (Abbildung 7.5c auf der nächsten Seite) oder eine Rakete (Abbildung 7.5d auf der nächsten Seite) ist von Max aus gesehen langsamer, wenn er ihnen nachläuft. Wenn Max ein genügend schnelles Fahrzeug hat, ist es ihm sogar möglich, diese einzuholen und zu überholen. Für einen beliebigen Gegenstand gilt: Wenn Max diesem Gegenstand nachläuft, ist dieser Gegenstand von Max aus gesehen langsamer. Wenn Max ein genügend schnelles Fahrzeug hat, kann er den Gegenstand einholen und überholen.

Licht ist anders (Abbildung 7.6 auf der nächsten Seite). Das hat man am Beginn des 20. Jahrhunderts herausgefunden. Wenn Max einem Lichtstrahl

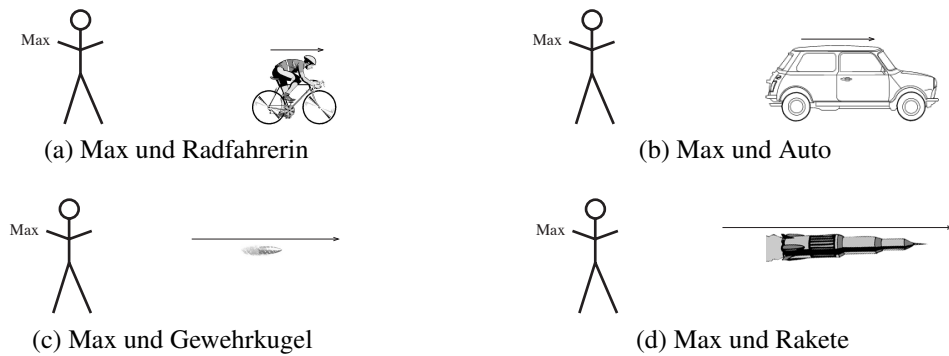


Abbildung 7.5.: Max kann das alles einholen und überholen.⁴⁸



Abbildung 7.6.: Lichtstrahl ist immer gleich schnell.

nachläuft, ist dieser von Max aus gesehen nicht langsamer. Auch wenn er die schnellstmögliche Rakete nimmt, ist der Lichtstrahl von Max aus gesehen nicht langsamer. Daher kann Max den Lichtstrahl auch nicht einholen oder überholen.

Geht Max auf der Straße in die entgegengesetzte Richtung zu Moritz, zur Radfahlerin, zum Auto, zur fliegenden Gewehr-kugel oder zur Rakete, so sind diese vom Max aus gesehen schneller. Für einen beliebigen Gegenstand gilt: Wenn Max in die entgegengesetzte Richtung geht als sich dieser Gegenstand bewegt, ist dieser von Max aus gesehen schneller.

Licht ist anders: Geht Max in die entgegengesetzte Richtung zur Richtung eines Lichtstrahls, ist dieser von Max aus gesehen nicht schneller. Auch wenn Max die schnellstmögliche Rakete nimmt, ist der Lichtstrahl von Max aus gesehen nicht schneller.

Es gilt allgemein: Jeder Lichtstrahl ist für alle gleich schnell. Licht bewegt sich unabhängig von denjenigen, die es beobachten.

⁴⁸Siehe Fußnote 16 auf Seite 175

7.2.6. Aufgaben für die SchülerInnen

1. Max steht auf der Straße. Eine Radfahlerin fährt von Max weg. Moritz läuft der Radfahlerin nach. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen die Radfahlerin dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist sie langsamer? Begründung!
2. Max steht auf der Straße. Eine Gewehrku­gel fliegt von Max weg. Moritz läuft der Gewehrku­gel nach. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen die Gewehrku­gel dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist sie langsamer? Begründung!
3. Max steht auf der Straße. Ein Auto fährt von Max weg. Moritz läuft in die entgegengesetzte Richtung als die, in die das Auto fährt. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen das Auto dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist es langsamer? Begründung!
4. Max steht auf der Straße. Eine Rakete fliegt von Max weg. Moritz läuft in die andere Richtung als die, in die die Rakete fliegt. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen die Rakete dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist sie langsamer? Begründung!
5. Max steht auf der Straße. Ein Lichtstrahl fliegt von Max weg. Moritz läuft dem Lichtstrahl nach. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen der Lichtstrahl dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist er langsamer? Begründung!
6. Max steht auf der Straße. Ein Lichtstrahl fliegt von Max weg. Moritz läuft in die andere Richtung als die, in die der Lichtstrahl fliegt. Zeichne die Situation auf. Hat von Moritz aus gesehen der Lichtstrahl dieselbe Geschwindigkeit wie von Max aus gesehen? Begründung! Wenn nein, von wem aus gesehen ist er langsamer? Begründung!

7.3. Folgerungen aus den physikalischen Grundlagen

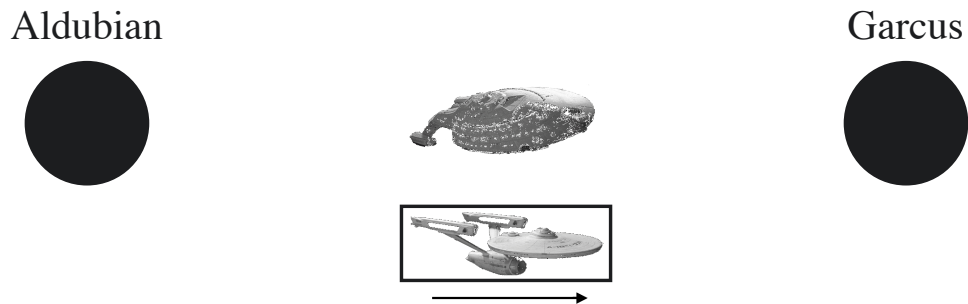
Die SchülerInnen sollen die Aufgaben aus Punkt 7.3.1 bearbeiten. Da sich diese Fragen auf den Lehrfilm (Punkt 7.1.3) beziehen, wird den SchülerInnen die Möglichkeit geboten, den Film noch einmal zu sehen, wenn sie das wünschen. Nach dem Bearbeiten dieser Aufgaben bekommen die SchülerInnen ein Arbeitsblatt „Die Lösung“ ausgehändigt, das aus dem Text aus Punkt 7.3.2 samt der Abbildung 7.7 auf der nächsten Seite und den Aufgaben aus Punkt 7.3.3 besteht.

7.3.1. Aufgaben für die SchülerInnen

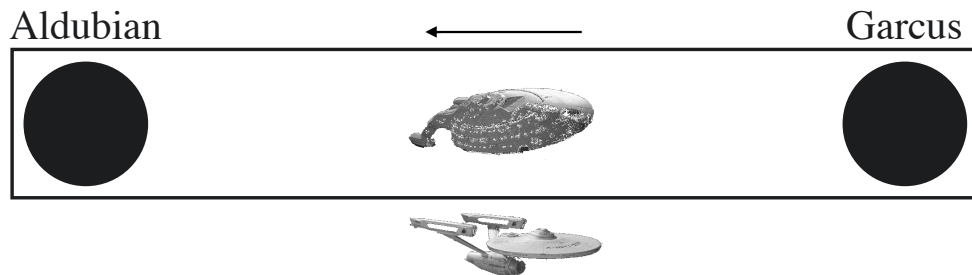
1. Die Lichtstrahlen, die das Raumschiff aussendet, sind für alle gleich schnell. Das ist wichtig, denn nur so kann man begründen, dass die Lichtstrahlen von der Erde aus gesehen bei den Shuttles nicht gleichzeitig ankommen. Erkläre mit Hilfe einer Zeichnung, wieso die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bei der Begründung wichtig ist.
2. Beschreibt die Situation, wenn der Konvoi von rechts nach links an der Erde vorbei fliegt. Kommt das Licht von der Erde aus gesehen bei den Shuttles gleichzeitig an? Wenn nein, wo kommt es früher an? Begründet euren Standpunkt mit Hilfe einer Zeichnung.
3. Nehmen wir an, der Konvoi bewegt sich mit einer Geschwindigkeit, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist, an der Erde vorbei, nämlich mit 100 km/h. Wird dann der Zeitunterschied, mit dem die Lichtsignale von der Erde aus betrachtet bei den Shuttles ankommen, größer, kleiner oder bleibt er gleich? Begründe mit Hilfe einer Zeichnung.
4. Wieso merkt man es im Alltag nicht, dass zwei Ereignisse für einen gleichzeitig stattfinden und für den anderen nicht? (Hinweis: Frage 3)

7.3.2. Die Lösung für das einführende Beispiel

Nach dem Relativitätsprinzip gibt es keinen physikalischen Unterschied zwischen den beiden Situationen aus Abbildung 7.7 auf der nächsten Seite. Man kann es entweder so sehen, dass die Enterprise an Aldubian, der Voyager und an Garcus nach rechts vorbeifliegt (Abbildung 7.7a auf der nächsten Seite), oder so, dass Aldubian, die Voyager und Garcus an der Enterprise nach links vorbeifliegen (Abbildung 7.7b auf der nächsten Seite). Das bedeutet, dass auf



(a) Enterprise bewegt sich mit halber Lichtgeschwindigkeit nach rechts



(b) Voyager, Aldubian und Garcus bewegen sich mit halber Lichtgeschwindigkeit nach links

Abbildung 7.7.: Zwei äquivalente Situationen⁴⁹

der Enterprise dieselben Effekte gemessen werden, egal, ob man die Situation mit Hilfe von Abbildung 7.7a oder Abbildung 7.7b beschreibt.

7.3.3. Aufgaben für die SchülerInnen

1. Nach welchem Prinzip sind die Situationen aus Abbildung 7.7a und Abbildung 7.7b gleichwertig?
2. Vergleiche die Darstellung aus Abbildung 7.7b mit der Situation, wenn im Film der Konvoi von rechts nach links fliegen würde. Was entspricht im Film der Enterprise? Was entspricht im Film der Voyager? Was entspricht im Film Aldubian? Was entspricht im Film Garcus? In welcher Reihenfolge sieht die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten ankommen?
3. Die Situationen aus den Abbildungen 7.7a und 7.7b sind nicht unterscheidbar. In welcher Reihenfolge kommen nach Aufgabe 2 für die Enterprise die Lichtsignale bei den Planeten an, wenn man es so sieht, dass die Enterprise an Aldubian, der Voyager und an Garcus nach rechts vorbeifliegt?

⁴⁹Siehe Fußnoten 3 und 4 auf Seite 129

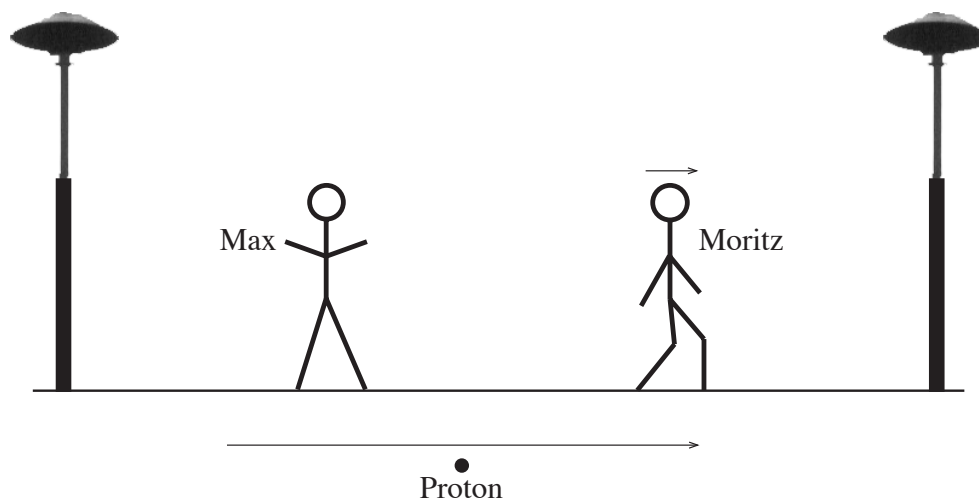


Abbildung 7.8.: Feuersirenen beim CERN⁵⁰

7.4. Abschließendes Beispiel

Die SchülerInnen bekommen ein Arbeitsblatt „Beispiel“ ausgehändigt, das aus dem Text aus Punkt 7.4.1 samt der Abbildung 7.8 und den Aufgaben aus Punkt 7.4.2 besteht.

7.4.1. Feuersirenen beim CERN

Im europäischen Kernforschungszentrum CERN werden Protonen in Experimenten fast auf Lichtgeschwindigkeit gebracht. Plötzlich wird ein Feuersirenen ausgelöst. Feuerwehrlöcher Max steht auf der Straße, Feuerwehrlöcher Moritz geht (Abbildung 7.8). Die Sirenen sind so geschaltet, dass sie von Max aus gesehen gleichzeitig losheulen.

7.4.2. Aufgaben für die SchülerInnen

1. Heulen die Sirenen auch vom Proton aus gesehen gleichzeitig los? Begründung! Wenn nein, welche heult für das Proton zuerst los? Begründung!
2. Heulen die Sirenen auch von Moritz aus gesehen gleichzeitig los? Begründung! Wenn nein, welche heult für ihn zuerst los? Begründung!

⁵⁰Siehe Fußnote 27 auf Seite 214

8. Interpretation

Die Fragestellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, ist, ob ein Unterrichtskonzept entwickelt werden kann, das SchülerInnen der Unterstufe (fünfte bis achte Schulstufe) in die Lage versetzt, die Relativität der Gleichzeitigkeit als Folgerung allgemeiner physikalischer Grundprinzipien zu akzeptieren. In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass dies unter günstigen Bedingungen möglich ist. Diese günstigen Bedingungen resultierten daraus, dass erstens sich die SchülerInnen freiwillig für das teaching experiment meldeten, wodurch sich eine Selektion nach Interessen und Motivation ergab, und zweitens das teaching experiment in einer Kleingruppe mit jeweils zwei SchülerInnen abgehalten wurde, was eine sehr intensive Betreuung ermöglichte.

Das erstellte Unterrichtskonzept zur Relativität der Gleichzeitigkeit besteht aus mehreren Unterrichtssequenzen. Einige dieser stellen eigenständige Unterrichtskonzepte zu kleineren, in sich abgeschlossenen Themenbereichen dar.

In einer dieser Unterrichtssequenzen wird den SchülerInnen unter den günstigen Bedingungen des teaching experiment ein physikalisch korrekter Bewegungs- und Geschwindigkeitsbegriff eröffnet. In einer weiteren Unterrichtssequenz werden die SchülerInnen im teaching experiment in die Lage versetzt, das Relativitätsprinzip zu akzeptieren. Thematisch auf den physikalisch korrekten Geschwindigkeitsbegriff folgend inkludiert diese Arbeit eine weitere Unterrichtssequenz, durch die die SchülerInnen unter den günstigen Bedingungen des teaching experiment die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verstehen können.

Ich gebe hier einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsarbeiten und Überlegungen, die auf den Resultaten dieser Arbeit basierend durchgeführt werden können.

8.1. Erprobung alternativer Erklärungsmodelle

8.1.1. Relativitätsprinzip

Ein hoher Anteil der SchülerInnen in den Interviews aus Kapitel 4 ist bei den Beantwortung der Fragen 4 auf Seite 28, 3 auf Seite 84 und 3 auf Seite 103 der Meinung, die jeweiligen Geräte könnten nicht feststellen, ob sie sich auf dem Boden oder dem Waggon befänden. In Punkt 6.6.3 wird das damit erklärt,

dass die SchülerInnen in der gegebenen Situation jeweils kein Bezugssystem vorfinden, das sie als bevorzugt betrachten können.

Es könnte untersucht werden, ob es für die SchülerInnen auch andere Gründe gibt, warum die Geräte nicht feststellen können, ob sie sich auf dem Boden oder dem Waggon befinden. So ist auf den Abbildungen 4.2 auf Seite 28, 4.3 auf Seite 29, 4.5 und 4.6 auf Seite 83 sowie 4.7 und 4.8 auf Seite 103 ersichtlich, dass die Geräte, die nicht feststellen können, ob sie sich auf dem Boden oder dem Waggon befinden, jeweils auf einer gemeinsamen Unterlage stehen, welche entweder der Erdboden oder der Waggonboden ist. Dadurch ist bei den SchülerInnen möglicherweise die Idee entstanden, diese Objekte würden „ruhen“, was dazu führt, dass sich die SchülerInnen gedanklich von der Geschwindigkeit trennen können. Auf dem Boden oder dem Waggon stehende Dinge befinden sich danach in unterschiedlichen Zuständen der „Ruhe“, die sich aber physikalisch nicht unterscheiden.

Es könnte untersucht werden, ob es den Lernprozess beeinflusst, wenn die Gegenstände, anhand deren Betrachtung das Relativitätsprinzip erklärt werden soll, auf einer gemeinsamen, unmittelbaren Unterlage stehen. Sollte diese den Lernprozess fördern, sollte eine Unterrichtssequenz zum Relativitätsprinzip entwickelt werden, in der eine solche Unterlage angeboten wird.

In den Abbildungen 4.2 auf Seite 28, 4.3 auf Seite 29, 4.5 und 4.6 auf Seite 83 sowie 4.7 und 4.8 auf Seite 103 ist jeweils die gemeinsame Unterlage gewissermaßen „natürlich“ vorgegeben. Um bezüglich der Erde zwei bewegte, aber zueinander ruhende Geräte nicht auf einer gemeinsamen Unterlage zu platzieren, müsste man sie auf verschiedene Züge oder zumindest auf verschiedene Waggons desselben Zuges stellen. Es ist zu erwarten, dass diese Situation als gekünstelt empfunden wird und vor allem Diskussionen über die technische Realisierung der gegenseitigen Ruhe provoziert und somit den Lernprozess bezüglich des Relativitätsprinzips stört.

Obwohl es für Deep Space Nine und die Columbus in Abbildung 5.2 auf Seite 134 keine gemeinsame Unterlage gibt, werden deren relative Ruhe und damit in Zusammenhang das Relativitätsprinzip gut akzeptiert, solange keine anderen Bezugssysteme erkannt werden, die als bevorzugt betrachtet werden können. Hier würde wahrscheinlich eine gemeinsame Unterlage gekünstelt erscheinen und deshalb störend wirken.

Ich vermute, dass eine gemeinsame Unterlage in Situationen hilfreich ist, in denen sie „in natürlicher Weise“ auftritt wie in den Fällen, in denen das Relativitätsprinzip anhand von auf der Erde bewegten Objekten, die mit Inertialsystemen identifiziert werden, erklärt wird. Wenn jedoch die gemeinsame Unterlage gekünstelt erscheinen muss wie im Weltraum weitab von Himmelskörpern, erwarte ich, dass sie störend wirkt.

8.1.2. Berücksichtigung der Lichtlaufzeit

Im erarbeiteten Prototyp des Unterrichtsvorschlages wird die Lichtlaufzeit dadurch berücksichtigt, dass „intelligente Beobachter“ ([SSV01], [SSV02]) verwendet werden. Eine alternative Methode zur Berücksichtigung der Lichtlaufzeit ist der Aufbau eines globalen Messnetzes, wie es in [TW00] verwendet wird. Dabei werden von einem Nullpunkt ausgehend in regelmäßigen Abständen Uhren aufgestellt. Die Uhr am Nullpunkt wird auf Null gestellt. Jede Uhr wird um die Zeit vorgestellt, die Licht braucht, um vom Ursprung zu ihr zu gelangen. Mit dem Starten der Uhr im Nullpunkt sendet diese in jede Richtung einen Lichtstrahl aus. Erreicht der Lichtstrahl eine Uhr, startet er diese. Auf diese Art erhält man für ein Inertialsystem einen Satz synchron laufender Uhren. Ort und Zeit von Ereignissen werden an der nächstgelegenen Uhr, also lokal gemessen. Der Beobachter ist so etwas wie ein universeller Buchhalter, der im Nachhinein alle Daten auswertet.

Es könnte verglichen werden, welche der beiden Methoden, die des intelligenten Beobachters oder die des globalen Messnetzes, den Lernprozess besser unterstützt bzw. für eine Weiterentwicklung des Unterrichtskonzeptes die bessere Tragfähigkeit aufweist.

Die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit ist für die SchülerInnen mit keinen Problemen verbunden, auch wenn nicht im Detail thematisiert wird, wie diese Berücksichtigung technisch realisiert wird. Die Herstellung eines Satzes synchronisierter Uhren stellt einen gewissen technischen Aufwand dar, ist aber lediglich ein Hilfsmittel. Ich befürchte, dass dieser technische Aufwand zu sehr in den Vordergrund rückt, wenn er gleich anfangs vorgenommen wird, und damit den Blick auf den wesentlichen physikalischen Inhalt verstellt.

Daher vermute ich, dass es günstiger ist, bei der Relativität der Gleichzeitigkeit zunächst „intelligente Beobachter“ zu verwenden. Für die Erklärung weiterer relativistischer Effekte (siehe Punkt 8.3.1) erscheint mir jedoch ein Satz synchronisierter Uhren hilfreich. Dieser sollte dann in einem nächsten Schritt eingeführt werden.

8.2. Erprobung graphischer Ausdrucksmittel

Im dritten Unterrichtsdurchgang müssen die SchülerInnen zum ersten Mal im teaching experiment Sachverhalte zu Geschwindigkeiten in Aufgaben aufzeichnen. Ebenfalls im dritten Unterrichtsdurchgang wird die Rolle, die die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für die Relativität der Gleichzeitigkeit spielt, erstmals wesentlich besser verstanden als davor. Es ist nicht klar, ob es sich dabei um

eine Konsequenz oder eine Koinzidenz handelt. Jedenfalls habe ich mich entschlossen, auch bei anderen Aufgaben Erklärungen mit Hilfe von Zeichnungen erläutern zu lassen, was zumindest zur Klarheit beigetragen haben dürfte.

Es könnte untersucht werden, in welcher Weise es den Lernprozess zu unterstützt, SchülerInnen Zeichnungen anfertigen zu lassen, und ob diese Zeichnungen zu einer größeren Klarheit in der Argumentation führen.

8.3. Weiterentwicklung des Unterrichtskonzepts

8.3.1. Einbeziehung weiterer relativistischer Effekte

Es könnte untersucht werden, ob, und wenn ja, wie weitere relativistische Effekte als Folgerungen grundlegender physikalischer Prinzipien akzeptiert werden. Die SchülerInnenvorstellungen zu zeitlichen und räumlichen Abständen, die in Punkt 4.3 und Punkt 4.4 erhoben wurden, können als Grundlage für Unterrichtskonzepte zur Zeitdilatation und zur Längenkontraktion dienen. Diese beiden Effekte lassen sich als direkte Konsequenz der Relativität der Gleichzeitigkeit unterrichten.

Der Synchronisationsprozess eines Satzes von Uhren ergibt bezüglich eines anderen Inertialsystems S' als eines Ruhesystems S der Uhren aufgrund der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit einen Satz nicht synchron laufender Uhren. Daraus ergibt sich qualitativ die Zeitdilatation. Der asynchrone Lauf der Uhren bezüglich eines Inertialsystems, das nicht Ruhesystem der Uhren ist, lässt sich auf die gleiche Art herleiten wie die Relativität der Gleichzeitigkeit im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]. Deshalb könnte eine gute Chance bestehen, dass dieser Effekt als Folgerung grundlegender physikalischer Prinzipien akzeptiert wird.

Führt man nach der Relativität der Gleichzeitigkeit einen Satz synchronisierter Uhren als globales Messnetz ein (siehe Punkt 8.1.2), wäre der für die Erklärung der Zeitdilatation benötigte, in S synchronisierte Uhrensatz bereits vorhanden.

Die Länge einer Stange bezüglich eines Inertialsystems wird gemessen, indem die Koordinaten der beiden Stangenenden in diesem Inertialsystem *gleichzeitig* abgelesen werden. Die Länge ergibt sich aus der Differenz der Messwerte. Aus der Relativität der Gleichzeitigkeit folgt damit qualitativ die Längenkontraktion. Ist die Gleichzeitigkeit als relativer Begriff akzeptiert, könnte man versuchen, die Länge eines Gegenstandes ebenfalls als relativen Begriff zu präsentieren.

Filmische Visualisierungen oder interaktive Applets zur Erklärung dieser Effekte könnten erarbeitet bzw. verwendet und getestet werden.

Weiters könnte untersucht werden, ob die Verwendung von Raumzeit-Dia-

grammen das Verständnis vertieft oder den Lernprozess unterstützt. Raumzeit-Diagramme könnten analog zu Graphen von Weg-Zeit-Funktionen eingeführt werden.

Darüber hinaus könnte erhoben werden, wie weit die Aussagen experimenteller Tests zur relativistischen Kinematik verstanden werden und ob die Kenntnis dieser Tests den Lernerfolg beeinflusst.

8.3.2. Adaption für den Unterricht in einer Unterstufenklasse

Es könnte untersucht werden, wie weit sich das Konzept aus Kapitel 7 für den Unterricht einer ganzen Schulklasse der Unterstufe (fünfte bis achte Schulstufe) eignet und wie es gegebenenfalls adaptiert werden muss. In einer Klasse kann aufgrund der SchülerInnenzahl nicht eine so intensive Betreuung durch die Lehrkraft stattfinden wie in einem teaching experiment. Andererseits ergeben sich durch die größere SchülerInnenzahl Möglichkeiten zum Einsatz anderer Unterrichtsformen (Gruppenarbeiten, Gruppendiskussionen, Präsentationen, etc.). Auch ist damit zu rechnen, dass in einer Schulklasse im Gegensatz zu Freiwilligen bei einem teaching experiment nicht alle SchülerInnen bereits von vornherein motiviert sind, sich mit diesem Thema zu befassen.

Da in den österreichischen Lehrplänen der Unterricht der Relativitätstheorie für die Unterstufe nicht vorgesehen ist, kann dies wahrscheinlich nur im Rahmen eines Projekts mit einer kooperationsbereiten Schule und einer engagierten Lehrkraft geschehen.

Es wäre aber auch möglich, nur die Teile des Unterrichtskonzepts, die sich mit dem Bewegungs- und Geschwindigkeitsbegriff sowie dem Relativitätsprinzip befassen, in einer Unterstufenklasse zu erproben. Im Zuge der Mechanik oder bei der Bewegung der Himmelskörper könnte versucht werden, die Unterrichtssequenzen zur Relativität des Bewegungs- oder des Geschwindigkeitsbegriffs zu erproben und zu adaptieren.

8.3.3. Adaption für den Unterricht in einer Oberstufenklasse

Wie für die Unterstufe wäre es auch in der Oberstufe (neunte bis zwölfte Schulstufe) möglich, nur Teile des Unterrichtskonzepts, wie die Unterrichtssequenzen zum Bewegungs- und Geschwindigkeitsbegriff sowie zum Relativitätsprinzip zu erproben.

In den Lehrplänen für die Oberstufe der österreichischen AHS ist der Unterricht der speziellen Relativitätstheorie für die 11. oder 12. Schulstufe vorgese-

hen. Es könnte untersucht werden, ob sich das Konzept aus Kapitel 7 für den Einsatz in einer Oberstufenklasse eignet bzw. wie es dafür adaptiert werden kann. In einer vergleichenden Studie könnte erhoben werden, ob, und wenn ja, wie sich der Lernerfolg bei Verwendung dieses Konzepts gegenüber dem Einstieg in die Relativitätstheorie über die Geschwindigkeitsaddition, wie er in einer Reihe von Schulbüchern ([SKSJ99a], [SKSJ99b], [JNN02], [BBD⁺07], [SKS⁺07]) gewählt wird, ändert. Durch die größere Anzahl der SchülerInnen als im teaching experiment bietet sich in der Klasse die Möglichkeit des Einsatzes unterschiedlicher Unterrichtsformen (Gruppenarbeiten, Gruppendiskussionen, Präsentationen, etc.). Auch ist damit zu rechnen, dass in einer Schulklasse im Gegensatz zu Freiwilligen bei einem teaching experiment nicht alle SchülerInnen bereits von vornherein motiviert sind, sich mit diesem Thema zu befassen.

Ich habe schon öfters in 8. Klassen der AHS (12. Schulstufe) die spezielle Relativitätstheorie unterrichtet, wobei ich dabei jedes Mal den Einstieg über die Geschwindigkeitsaddition gewählt habe. Über diesen Einstieg war ich immer sehr unzufrieden, weil er nach meinem Eindruck sehr technisch und sperrig ist und bei den SchülerInnen auf wenig Begeisterung und wenig Verständnis gestoßen ist. Darum habe ich aus persönlichem Interesse Ende Jänner/Anfang Februar 2012 in einer 8. Klasse des naturwissenschaftlichen Zweig des Realgymnasiums (25 SchülerInnen) den Einstieg in die Relativitätstheorie nach dem Konzept aus Kapitel 7 unterrichtet.

Ich berichte hier am Ende meiner Arbeit über diesen Unterricht, der fünf Unterrichtsstunden zu je 50 Minuten umfasste. Die Unterrichtsstunden wurden videographiert. Die SchülerInnen verschriftlichten ihre Antworten und Lösungen zu den Aufgaben. Am Ende der fünften Unterrichtsstunde ersuchte ich die SchülerInnen um eine anonyme, schriftliche Rückmeldung. Dieser Bericht ist keine detaillierte Analyse oder systematische Auswertung, sondern eine Beschreibung meiner Eindrücke des Unterrichts und einiger Reaktionen der SchülerInnen.

Abbildung 7.1 auf Seite 358 zur Geschichte des einführenden Beispiels projizierte ich über einen Beamer. Danach forderte ich die SchülerInnen auf, Aufgabe 1 aus Punkt 7.1.2 in Gruppen zu diskutieren und die Lösungsvorschläge zu verschriftlichen. Da die meisten Lösungsansätze zu dieser Aufgabe die unterschiedlichen Abstände der Raumschiffe zu den Planeten enthielten, fasste ich anschließend für die ganze Klasse den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung zusammen. Dann zeigte ich den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05]. Daraufhin gab ich einen Ausblick auf das folgende Programm und teilte ein Arbeitsblatt „Zum Film“ aus, das die Aufgaben aus Punkt 7.1.4 enthielt, und forderte die SchülerInnen auf, in den bereits gebildeten Gruppen weiterzuarbeiten. Die restlichen Arbeitsblätter hielt ich bereit. Sobald

eine Gruppe die Bearbeitung eines Arbeitsblattes beendet hatte, händigte ich den SchülerInnen dieser Gruppe das darauf folgende Arbeitsblatt aus.

In den Gruppen ergaben sich zum Teil intensive Diskussionen. Ich ging während des gesamten Unterrichts von einer Gruppe zur anderen, beteiligte mich an den Diskussionen, gab Tipps, wenn die SchülerInnen Hilfe brauchten, und beobachtete den Lernprozess.

Die Geschichte des einführenden Beispiels und die sich daraus ergebende Fragestellung werden gut verstanden. Als Gründe für die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise nennen die SchülerInnen einen wegen der Bewegung falschen Blickwinkel der Enterprise auf die Lichtstrahlen, die nähere Position der Enterprise bei Garcus, Ausdehnung des Universums, eine andere Sichtweise der Enterprise aufgrund der Bewegung, Raumverzerrung, Messfehler, Krümmung des Raumzeit-Kontinuums, Atmosphäre oder Größe der Planeten, unterschiedliches Vergehen der Zeit oder einen nicht näher spezifizierten Effekt aufgrund der Bewegung.

Die SchülerInnen akzeptieren in weiterer Folge die Berücksichtigung der Positionen aller beteiligten Objekte bei der Messung und somit den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung. Die Existenz exakt arbeitender Messgeräte bereitet keine gedanklichen Probleme.

Das Arbeitsblatt „Zum Film“ bereitet keine Verständnisprobleme. Für die SchülerInnen sind die Sichtweisen aus beiden Inertialsystemen gleichwertig und beide Messergebnisse im Großen und Ganzen gleichermaßen aussagekräftig. Die SchülerInnen können einen Zusammenhang zwischen der Geschichte des einführenden Beispiels und dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* herstellen. Sie finden, dass der Film zu erklären hilft, wie die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise zustande kommen, weil die gezeigten Phänomene im Prinzip dieselben sind, der Begriff der Systeme nähergebracht wird, die Abhängigkeit eines Messergebnisses vom System thematisiert wird bzw. ein Erklärungsansatz geboten wird.

Das Arbeitsblatt „Inertialsysteme“ bereitet den SchülerInnen keine Probleme. Der Begriff des Inertialsystems wird gut verstanden, die Aufgaben können ohne Schwierigkeiten gelöst werden.

Das Arbeitsblatt „Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme“ wird gut verstanden. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme und die Relativität des Bewegungsbegriffs werden erstaunlich schnell und ziemlich problemlos akzeptiert. Es treten zwar kognitive Konflikte mit der Vorstellung einer absoluten Bewegung auf, diese sind aber bei weitem nicht so stark wie die kognitiven Konflikte, die im teaching experiment aufgetreten sind, und können wesentlich schneller gelöst werden. Das Argument, im Weltall bewegt sich alles, weshalb sich kein fixer Punkt finden lässt, bewährt sich wieder. Es wäre sicherlich interessant, in einer

Studie die Lernprozesse achtzehnjähriger und vierzehnjähriger SchülerInnen beim Lernen der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme und der Relativität des Bewegungsbegriffs zu vergleichen um herauszufinden, ob sich dabei zwischen diesen Altersgruppen signifikante Unterschiede feststellen lassen. Sollte es sich erweisen, dass sich das Erlernen eines physikalisch korrekten Bewegungsbegriffs und die Akzeptanz des Relativitätsprinzips für Achtzehnjährige wesentlich einfacher gestalten als für Vierzehnjährige, wäre das ein Argument dafür, den Unterricht der Relativitätstheorie eher für Achtzehnjährige vorzusehen.

Das Arbeitsblatt „Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ ist für die SchülerInnen verständlich. Sie können die Aufgaben richtig lösen. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird gut akzeptiert.

Vor der Befassung mit dem Arbeitsblatt „Fragen zum Film“ wollten die SchülerInnen den Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* kein zweites Mal sehen.

Die SchülerInnen haben keine Verständnisprobleme mit dem Arbeitsblatt „Fragen zum Film“. Die Rolle, die die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit spielt, wird im Großen und Ganzen verstanden. Im Prinzip lassen sich zwei Argumentationslinien erkennen. Die eine lautet, dass ohne Konstanz der Lichtgeschwindigkeit das nach vorne abgeschossene Licht bezüglich der Erde schneller wäre und somit bezüglich der Erde die Strahlen gleichzeitig bei den Shuttles ankämen. Diese Vorstellung könnte der klassischen Geschwindigkeitsaddition nahe kommen. Die andere Argumentation lautet, dass bezüglich der Erde das Licht mit seiner konstanten Geschwindigkeit unterschiedlich lange Wegstrecken zurücklegt und daher für den Weg vom Raumschiff zu den Shuttles verschieden lange Zeiten benötigt. Ohne die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ließe sich diese Argumentation nicht aufrechterhalten.

Die SchülerInnen können die Argumentationsweise aus dem Film auf den Fall anwenden, wenn der Konvoi nach links fliegt, und erklären, warum man die Relativität der Gleichzeitigkeit im Alltag nicht beobachten kann.

Das Arbeitsblatt „Die Lösung“ bereitet keine Schwierigkeiten. Die SchülerInnen können einen Zusammenhang mit dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* und der Situation des einführenden Beispiels herstellen und mit Hilfe der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme die unterschiedlichen Messergebnisse auf der Voyager und der Enterprise erklären.

Das Arbeitsblatt „Beispiel“ ist für die SchülerInnen verständlich. Für einige musste allerdings zunächst geklärt werden, dass nicht der Zeitpunkt relevant ist, in dem der Schall beim Proton oder den Personen eintrifft, sondern der Zeitpunkt, in dem die Sirenen zu heulen beginnen. Die SchülerInnen verstehen diesen Unterschied. Sie argumentieren zum Teil aus der Sicht des ruhenden Protons und einer samt Personen und Aufbauten bewegten Erdoberfläche. Die Antworten sich im Großen und Ganzen richtig, die Begründungen aber teilweise

sehr oberflächlich. In einigen Einzelgesprächen nach dem Unterrichtsdurchgang überzeugte ich mich, dass die SchülerInnen eine Verbindung zwischen der Situation der Geschichte des einführenden Beispiels, der Situation im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* und Abbildung 7.8 auf Seite 369 herstellen können. Damit können die SchülerInnen die Argumentation aus dem Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* verwenden, um zu erklären, welche Sirene zuerst losheult. Für den Einsatz in einer Klasse sollte das Arbeitsblatt „Beispiel“ dahingehend umgestaltet werden, dass die Antworten zu den Aufgaben detaillierter und tiefergehender begründet werden müssen.

Den SchülerInnen hat der Unterricht im Großen und Ganzen gut gefallen. Er wird als interessant, lustig, kreativ, aufschlussreich und gelungen bezeichnet. Viele neue Inhalte werden nähergebracht und erläutert. Schwierige Sachverhalte werden nach Ansicht der SchülerInnen vergleichsweise einfach präsentiert. Sie sind der Meinung, den Inhalt schnell verstanden und insgesamt einen guten Überblick über das Thema bekommen zu haben. Die Darstellung wird als gut aufbereitet, gut nachvollziehbar und informativ bezeichnet. Der Film zu Beginn schafft eine gute Basis für das Folgende und wird als informativ gesehen. Die Beispiele mit den Raumschiffen werden als sehr anschaulich empfunden. Die Arbeitsblätter werden gut bewertet. Sie enthalten jeweils die richtige Informationsmenge. Die Abbildungen werden gut beurteilt. Die Beispiele werden als gut verständlich und unterhaltsam, die Aufgabenstellungen als interessant gewertet. Die ansehnliche Anzahl der Beispiele wird von den einen gut empfunden, da dadurch mehr Gelerntes behalten werde, von anderen werden die Wiederholungen als zu viel angesehen. Positiv wird von den SchülerInnen beurteilt, dass sie sich die Lösung selbst erarbeiten konnten. Für eineN wirkt die Darstellung nicht als für die 8. Klasse ausgelegt (wegen Max und Moritz, galaktischer Spiele). Dieser Punkt könnte in einer Adaption des Unterrichtskonzepts für die Oberstufe ebenso beachtet werden wie die Relevanz dieses Themas für den Alltag, nach der gefragt wird.

Meiner Meinung nach ist der Einstieg in die Relativitätstheorie nach dem Unterrichtskonzept aus Kapitel 7 bei den SchülerInnen viel besser angekommen als der Einstieg über die Geschwindigkeitsaddition, den ich bislang gewählt hatte. Ich bin mit dem Ergebnis, das dieses Konzepts im Unterricht einer 8. Klasse geliefert hat, sehr zufrieden.

8.4. Relativitätstheorie für die Unterstufe

Es hat sich in letzter Zeit in der schulpolitischen Diskussion gezeigt, dass der Trend für die Entwicklung der Oberstufe zunehmend in Richtung schulautonome

Gestaltung der Stundentafel und Modularisierung mit umfassender Wahlmöglichkeit für die SchülerInnen geht. Dadurch ergeben sich eine immer stärker werdende Spezialisierung und eine immer geringere werdende Generalisierung in der Ausbildung der SchülerInnen. Das bedeutet, dass die SchülerInnen, die ihre Schwerpunkte nicht im naturwissenschaftlichen Bereich wählen, mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Oberstufe höchstens eine minimale physikalische Ausbildung erhalten, in der die moderne Physik aus Zeitgründen nicht enthalten sein kann.

Aus diesem Grund könnte man in die bildungspolitische Diskussion die Idee einfließen lassen, die Relativitätstheorie bei einer entsprechenden Erhöhung der Wochenstundenzahl für Physik in den Lehrplan der Unterstufe einzubeziehen, wenn es sich erweist, dass sich das Unterrichtskonzept aus Kapitel 7 für den Unterricht einer ganzen Unterstufenklasse adaptieren lässt. In diesem Fall bekämen alle SchülerInnen trotz Ausdünnung des allgemeinen Physikunterrichts in der Oberstufe einen Einblick in zumindest einen Bereich der modernen Physik.

9. Zusammenfassung

Die Fragestellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, ist, ob ein Unterrichtskonzept entwickelt werden kann, das es bereits SchülerInnen der Unterstufe (fünfte bis achte Schulstufe) ermöglicht, die Relativität der Gleichzeitigkeit als logische Folgerung allgemeiner physikalischer Grundprinzipien zu akzeptieren. Diese Grundprinzipien sind die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

In problemzentrierten Interviews wurden die Vorstellungen von elf 13- und 14jährigen SchülerInnen der Wiener AHS, an der ich als Lehrer unterrichtete, zu den Themen Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Gleichzeitigkeit, Zeitdilatation sowie Längenkontraktion erhoben und die Bereitschaft getestet, relativistische Effekte zu akzeptieren. Einige der interviewten SchülerInnen wurden von mir selbst in Physik unterrichtet, einige nicht. Die Interviews wurden auf Tonträger aufgezeichnet, in literarischer Umschrift transkribiert und quantitativ ausgewertet. Der verwendete Interviewleitfaden findet sich in Anhang A. Ich fasse im Folgenden die wesentlichen Erkenntnisse aus den Interviews in Kurzform zusammen.

Das Thema Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wurde nach den Aspekten „Die Messbarkeit des gefragten Werts“, „SchülerInnenvorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition für Alltagsgeschwindigkeiten“, „SchülerInnenvorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition unter Einbeziehung der Lichtgeschwindigkeit“, „SchülerInnenvorstellungen zum Relativitätsprinzip im Kontext der Geschwindigkeit des Lichts“ und „Reaktionen der SchülerInnen auf die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ ausgewertet.

Eine Mehrheit der SchülerInnen hat zunächst Bedenken, ob durch den Versuchsaufbau die gefragte Größe gemessen werden könne. Es ist aber möglich, diese Zweifel im Gespräch auszuräumen.

Die Beträge der Geschwindigkeiten einer Person, gemessen in zwei Bezugssystemen, miteinander in Verbindung zu bringen, bereitet vielen SchülerInnen Probleme. Es deutet vieles darauf hin, dass die klassische Geschwindigkeitsaddition nicht gut verstanden wird. Für den Zusammenhang der Beträge der Lichtgeschwindigkeit, gemessen in zwei Bezugssystemen, lässt sich bei den SchülerInnen keine eindeutige Vorstellung erkennen. Die meisten SchülerInnen zeigen sich von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht verwundert.

Niemand lehnt diese Konstanz explizit ab.

Die meisten SchülerInnen haben im Kontext der Geschwindigkeitsmessung in der gegebenen Situation eine brauchbare Vorstellung vom Relativitätsprinzip.

Das Thema Gleichzeitigkeit wurde nach den Aspekten „Die Verwendung von Messgeräten“, „Die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit“, „SchülerInnenvorstellungen zur Gleichzeitigkeit“ und „Reaktionen der SchülerInnen auf die Relativität der Gleichzeitigkeit“ ausgewertet.

Ein paar SchülerInnen haben Zweifel, ob die verwendeten Geräte scharf messen können. Diese Bedenken können aber ausgeräumt werden. Die Verwendung exakter Messgeräte für die Ermittlung der Gleichzeitigkeit wird gut angenommen.

Einige SchülerInnen thematisieren Effekte der Lichtlaufzeit. Insgesamt wird nach einer entsprechenden Erklärung der Messprozess bei der Gleichzeitigkeit als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung gut akzeptiert.

Es zeigt sich, dass die interviewten SchülerInnen wahrscheinlich einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff haben. Nicht alle SchülerInnen sehen einen Sinn darin, die Gleichzeitigkeit bezüglich verschiedener Bezugssysteme zu messen.

Für die SchülerInnen dürften die Messergebnisse zur Gleichzeitigkeit ebenso glaubwürdig sein wie andere Messergebnisse, die den SchülerInnen bekannt sind.

Die Reaktionen auf die Relativität der Gleichzeitigkeit sind unterschiedlich, keine ist jedoch ablehnend.

Das Thema Zeitdilatation wurde nach den Aspekten „Die Verwendung von Messgeräten“, „Die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit“, „SchülerInnenvorstellungen zum Zeitbegriff“, „SchülerInnenvorstellungen zum Relativitätsprinzip im Kontext der Zeitmessung“ und „Reaktionen der SchülerInnen auf die Zeitdilatation“ ausgewertet.

Manche SchülerInnen vermuten, die verwendeten Geräte könnten unscharf messen oder nicht den gesamten Messprozess erfassen. Diese Zweifel können aber im Gespräch beseitigt werden. Einige SchülerInnen thematisieren Effekte der Lichtlaufzeit. Insgesamt werden im Kontext der Zeitmessung die Existenz idealer Messgeräte, die den gesamten Versuchsablauf dokumentieren, und der Messprozess als Sammlung von Daten mit späterer Auswertung gut akzeptiert.

Der Zeitbegriff der interviewten SchülerInnen ist mit ziemlicher Sicherheit ein absoluter.

Fast alle der interviewten SchülerInnen dürften im Kontext der Zeitmessung in der gegebenen Situation eine Vorstellung vom Relativitätsprinzip haben, auf die man aufbauen kann.

Für viele der interviewten SchülerInnen ist die Zeitdilatation seltsam, unerwartet oder kompliziert. Eine Mehrzahl der interviewten SchülerInnen fragt nach

einer Begründung dafür. Einige versuchen sogar, selbst eine Erklärung zu finden. Es besteht offenbar Interesse an einer Erklärung dieses Phänomens.

Das Thema Längenkontraktion wurde nach den Aspekten „Die Verwendung von Messgeräten“, „SchülerInnenvorstellungen zum Längenbegriff“, „SchülerInnenvorstellungen zum Relativitätsprinzip im Kontext der Längenmessung“ und „Reaktionen der SchülerInnen auf die Längenkontraktion“ ausgewertet.

Einige SchülerInnen haben zunächst Bedenken zur Messgenauigkeit der verwendeten Geräte. Diesen Einwänden kann man aber im Zuge einer Diskussion begegnen. Alle akzeptieren im Kontext der Längenmessung die Existenz exakter Messgeräte und den Messprozess als Sammlung aller relevanten Daten mit anschließender Auswertung.

Alle der interviewten SchülerInnen haben wahrscheinlich einen absoluten Längenbegriff.

Die SchülerInnen dürften die Messergebnisse zur Längenmessung für genau so glaubwürdig halten wie andere Messergebnisse, die den SchülerInnen geläufig sind.

Sie dürften im Kontext der Längenmessung in der gegebenen Situation kaum Schwierigkeiten mit dem Relativitätsprinzip haben.

Manche finden die Längenkontraktion seltsam. Die SchülerInnen dürften an einer Beschäftigung mit ihr interessiert sein.

These 1. Die klassische Geschwindigkeitsaddition von Alltagsgeschwindigkeiten und die dahinterstehende Physik werden von den meisten SchülerInnen wahrscheinlich nicht verstanden. Das führt offenbar dazu, dass sie sich nicht über die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wundern und den Bruch mit der klassischen Physik nicht erkennen. KeineR lehnt die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit explizit ab.

These 2. Es dürfte für die SchülerInnen wichtig sein, dass ihnen die vorgestellte Versuchsanordnung realistisch und zweckmäßig erscheint. Außerdem dürfte es den Lernprozess unterstützen, wenn die SchülerInnen einen Sinn darin sehen, warum *ein* Prozess von *zwei* verschiedenen Bezugssystemen aus beschrieben wird.

These 3. Insgesamt wird die Existenz exakt arbeitender Messgeräte im Großen und Ganzen gut akzeptiert. Die Verwendung solcher Messgeräte hat wahrscheinlich den Vorteil, dass man sich Diskussionen über die Unvollkommenheit der menschlichen Wahrnehmung und die Psychologie der Sinnestäuschungen erspart und nicht der Eindruck entsteht, die relativistischen Effekte kämen aufgrund der menschlichen Wahrnehmung zustande. Die SchülerInnen akzeptieren im Wesentlichen, dass bei der Messung die Lichtlaufzeit berücksichtigt werden muss. Damit akzeptieren sie den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung. Die gemessenen relativistischen Effekte dürften die SchülerInnen für genauso vertrauenswürdig halten und ebenso akzeptieren wie andere, ihnen geläufigere Messergebnisse.

These 4. Die interviewten SchülerInnen haben wahrscheinlich einen absoluten Gleichzeitigkeits-, einen absoluten Zeit- und einen absoluten Längenbegriff. Die meisten sind offenbar von den relativistischen Effekten überrascht und dürften an einer Beschäftigung mit ihnen interessiert sein.

These 5. Die SchülerInnen dürften in der jeweils gegebenen Situation eine Vorstellung vom Relativitätsprinzip haben, die physikalisch tragfähig ist.

Aufgrund der erfassten SchülerInnenvorstellungen und der erhobenen Bereitschaft, relativistische Effekte zu akzeptieren, ergibt sich, dass sich ein Unterrichtskonzept zur Relativität der Gleichzeitigkeit an den folgenden Punkten orientieren sollte:

- Die SchülerInnen müssen zunächst erkennen, dass Sinn macht, ein und dasselbe Naturgeschehen in verschiedenen Bezugssystemen zu beschreiben. Dies könnte mit Hilfe eines einführenden Beispiels erfolgen, dessen Ausfall im Widerspruch zur klassischen Physik steht.
- Da das Relativitätsprinzip in den jeweils dargebotenen Situationen gut akzeptiert wird, sollte es möglich sein, dieses den SchülerInnen als allgemeines physikalisches Prinzip nahezubringen.
- Das Unterrichtskonzept kann nicht mit der klassischen Geschwindigkeitsaddition beginnen, da diese wahrscheinlich nicht gut verstanden wird.

-
- Das Geschehen sollte von idealen Messgeräten aufgezeichnet werden. Diese werden von SchülerInnen in den Interviews gut akzeptiert. Die Verwendung von Messgeräten hat den Vorteil, dass man sich Diskussionen über die Unvollkommenheit der menschlichen Wahrnehmung und die Psychologie der Sinnestäuschungen erspart. Diese Themen sollte man bei einem Einstieg in die Relativitätstheorie meiden, da sonst der falsche Eindruck entstehen könnte, die relativistischen Effekte kämen aufgrund der menschlichen Wahrnehmung zustande.
 - Die SchülerInnen dürften verstehen, was es heißt, die Lichtlaufzeit in den Messprozess mit einzubeziehen und welche Bedeutung das für die Messergebnisse hat. Daher sollte es möglich sein, im Unterrichtskonzept „intelligente Beobachter“ ([SSV01], [SSV02]) zu verwenden, welche die Effekte der Lichtlaufzeit berücksichtigen.
 - Der Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung wird von den SchülerInnen in den Interviews offenbar gut akzeptiert. Daher sollte der Messprozess auf diese Art eingeführt werden. Dadurch sollen sich die SchülerInnen von der Vorstellung lösen, die Messung sei ein Vorgang, den man unmittelbar betrachten kann und von dem man sofort einen persönlichen Eindruck hat. Damit wird den SchülerInnen eine weitere Möglichkeit geboten, zwischen Messung und menschlicher Wahrnehmung zu unterscheiden.
 - KeineR lehnt die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit explizit ab. Daher kann man erwarten, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gut akzeptiert wird.
 - Praktisch alle SchülerInnen dürften das Konzept absoluter zeitlicher Abstände und absoluter räumlicher Ausdehnungen mitbringen. Die meisten Interviewten erkennen aber in der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit offenbar keinen Widerspruch zu diesen Präkonzepten, wahrscheinlich, weil die klassische Geschwindigkeitsaddition, die im Widerspruch zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steht, nicht gut verstanden wird. Um den Konzeptwechsel von der klassischen zur relativistischen Mechanik zu unterstützen, muss also der Bruch mit der klassischen Physik auf eine andere Art als mit Hilfe der Geschwindigkeitsaddition präsentiert werden, sodass die SchülerInnen einen Widerspruch erkennen und damit bei ihnen eine Unzufriedenheit mit ihren Konzepten ausgelöst wird.
 - Bei vielen SchülerInnen dürfte ein Interesse an relativistischen Effekten bestehen. Daher sollte es möglich sein, SchülerInnen die Relativität der

Gleichzeitigkeit als logische Konsequenz des Relativitätsprinzips und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit näherzubringen.

- Die SchülerInnen halten die Messergebnisse offenbar für ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die die SchülerInnen kennen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit auf die gleiche Akzeptanz stößt wie andere gemessene Effekte, die den SchülerInnen geläufig sind.

Aufgrund der Ergebnisse der Interviews mit SchülerInnen und den Erkenntnissen aus der fachdidaktischen Literatur entwickelte ich auf dem Ansatz des Konzeptwechsels einen auf konstruktivistischen Lerntheorien beruhenden Prototyp eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit. Dieser Prototyp weist folgende Gliederung auf:

- Einführendes Beispiel mit einem unerwarteten Effekt
- Präsentation der physikalischen Grundlagen: Inertialsystem, Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
- Unter der Verwendung des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* [Gle05] Anwendung der physikalischen Grundlagen zur Erklärung des unerwarteten Effekts des einführenden Beispiels

An der Realisierung des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* war ich selbst maßgeblich beteiligt. Als für die didaktische Beratung Zuständiger begleitete ich intensiv den Entstehungsprozess dieses Filmes. Darüber hinaus erstellte ich als Begleitmaterial für den Film Begleittexte, Unterrichtsvorschläge und Arbeitsblätter mit Lösungen, die neben dem Film auf der DVD [Ein05] zu finden sind.

Die Wirksamkeit des Prototyps wurde in einem teaching experiment untersucht. Dieses bestand aus fünf Unterrichtsdurchgängen, bei denen ich jeweils eine Schülerin und einen Schüler der achten Schulstufe einer Wiener AHS, an der ich nicht tätig bin, gemeinsam unterrichtete. Die SchülerInnen, die ich vor dem teaching experiment nicht kannte, meldeten sich freiwillig.

Alle Unterrichtsdurchgänge wurden videographiert und in literarischer Umschrift transkribiert. Nach jedem Unterrichtsdurchgang beurteilte ich aufgrund der Ausführungen der SchülerInnen die Wirksamkeit des Unterrichts und die Akzeptanz der gegebenen Erklärungsangebote. Weiters identifizierte ich die Vorstellungen und Konzepte der SchülerInnen und analysierte, wie und durch welche Interventionen sich diese Vorstellungen und Konzepte im Verlauf des jeweiligen Unterrichtsdurchganges veränderten. Auf den gewonnenen Daten

basierend wurde das Unterrichtskonzept für den nächsten Unterrichtsdurchgang revidiert. Am Ende des teaching experiment ergibt sich damit die Endversion des Unterrichtskonzepts, welches folgende Gliederung aufweist:

- Einführendes Beispiel mit einem unerwarteten Effekt und anschließende Vorführung des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* [Gle05]
- Präsentation der physikalischen Grundlagen: Inertialsystem, Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
- Unter der Verwendung des Lehrfilmes *Gleichzeitigkeit* [Gle05] Anwendung der physikalischen Grundlagen zur Erklärung des unerwarteten Effekts des einführenden Beispiels
- Fragestellung zur Relativität der Gleichzeitigkeit in einer neuen Situation

Ich fasse im Folgenden die einzelnen Unterrichtssequenzen der Endversion des Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit und die wesentlichen Erkenntnisse aus dem teaching experiment in Kurzform zusammen.

Das einführende Beispiel beginnt mit einem für die SchülerInnen überraschenden Effekt. Dabei bewähren sich die Folgerungen, die aus den Interviews hergeleitet wurden, und die Erkenntnisse aus ihnen erweisen sich als nützlich. So zeigt sich, dass der Gleichzeitigkeitsbegriff der SchülerInnen im teaching experiment wahrscheinlich ein absoluter ist. Darüber hinaus dürften die SchülerInnen im einführenden Beispiel verstehen, was es bedeutet, die Lichtlaufzeit in den Messprozess miteinzubeziehen, und „intelligente Beobachter“ ([SSV01], [SSV02]) akzeptieren, die die Lichtlaufzeit berücksichtigen. Die SchülerInnen begreifen damit den Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung.

Der Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] ist am Ende des einführenden Beispiels offenbar gut eingesetzt. Die SchülerInnen reflektieren anhand dieses Filmes das einführende Beispiel. Darüber hinaus stellt der Film einen Ausblick dar und motiviert auf das Weitere.

Im nächsten Schritt wird der Begriff der Inertialsysteme eingeführt. Dabei wird die Erdoberfläche in guter Näherung als Inertialsystem betrachtet.

Die Identifikation von Bezugssystemen mit den Objekten, mit denen diese Bezugssysteme fix verbunden sind, dürfte dem Lernprozess nicht hinderlich sein. Formulierungen wie „Das Shuttle ist ein Inertialsystem.“ statt „Ein Bezugssystem, das fix mit dem Shuttle verbunden ist, ist ein Inertialsystem.“ werden offenbar gut akzeptiert. Vorstellungen, die Aussagen bezüglich eines Bezugssystems hätten etwas mit dem Inneren eines Transportmittels zu tun, kann man offensichtlich leicht begegnen.

Der Begriff des Inertialsystems bereitet den SchülerInnen keine nennenswerten Probleme.

These 6. Der Begriff des Inertialsystems dürfte ausgehend von auf dem Boden stehenden und fahrenden Zügen, aus denen man nicht nach außen sehen kann, gut verstanden werden. Inertialsysteme werden als solche Bezugssysteme, in denen man sich so fühlt wie auf der Erdoberfläche, anscheinend gut akzeptiert.

In der nächsten Unterrichtssequenz wird die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme behandelt. Offensichtlich widersprechen Präkonzepte der SchülerInnen zu Bewegung und Geschwindigkeit dieser Gleichwertigkeit.

Die SchülerInnen bringen wahrscheinlich die Vorstellung eines als bevorzugt betrachteten Bezugssystems in den Unterricht mit, auf das sie die Begriffe Ruhe und Bewegung bzw. Geschwindigkeit beziehen. Dieses Bezugssystem dürfte meist der Erdboden sein. Situationsbedingt können auch andere Bezugssysteme als bevorzugt betrachtet werden. Ruhe oder Bewegung bzw. die Geschwindigkeit eines Körpers bezüglich dieses Bezugssystems nenne ich den echten Bewegungszustand bzw. die echte Geschwindigkeit dieses Körpers. Ruhe oder Bewegung bzw. die Geschwindigkeit eines Körpers bezüglich eines nicht als bevorzugt betrachteten Bezugssystems nenne ich den scheinbaren Bewegungszustand bzw. die scheinbare Geschwindigkeit dieses Körpers.

Das als bevorzugt betrachtete Bezugssystem wird aber vermutlich weder als solches erkannt noch dringt dessen Rolle ins Bewusstsein der SchülerInnen. Darum werden der echte Bewegungszustand und die echte Geschwindigkeit wahrscheinlich als alleinige Eigenschaften der betrachteten Körper angesehen.

Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme wird in einer Situation vorgestellt, in der keine Objekte, die als bevorzugte Bezugssysteme betrachtet werden könnten, vorkommen. In dieser Situation dürfte die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme schnell akzeptiert werden und sich der Begriff des scheinbaren Bewegungszustandes entwickeln, der in Zusammenhang mit der Abstandsänderung von Körpern gebracht wird, was offenbar dem physikalischen Bewegungsbegriff entspricht.

In den darauf folgenden Aufgaben müssen die SchülerInnen das Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme in Situationen anwenden, in der Bezugssysteme vorgefunden werden, die die SchülerInnen als bevorzugt betrachten können. Damit kommt es zu einem kognitiven Konflikt zwischen dem Konzept der SchülerInnen von echtem Bewegungszustand und dem zuvor in einer speziellen Situation akzeptierten Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme.

Durch diesen Konflikt gelingt es den SchülerInnen offenbar, die Begriffe von echtem Bewegungszustand und scheinbarem Bewegungszustand gegeneinander abzugrenzen und in gegebenen Situationen bewusst auf den scheinbaren Bewegungszustand zuzugreifen und damit das Relativitätsprinzip richtig anzuwenden.

These 7. Die Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme dürfte in einer Situation, in der keine Bezugssysteme vorkommen, die die SchülerInnen als bevorzugt betrachten könnten, schnell akzeptiert werden. Es ist offenbar günstig, den Unterricht zur Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme mit einer solchen Situation zu beginnen. Dabei entwickeln die SchülerInnen wahrscheinlich die Vorstellung des scheinbaren Bewegungszustandes, der mit der Abstandsänderung der betrachteten Körper in Zusammenhang stehen dürfte. Diese Vorstellung kommt dem physikalisch korrekten Bewegungsbegriff nahe und ist wahrscheinlich anschlussfähig. Der echte Bewegungszustand wird in dieser Situation offenbar als nicht messbar oder irrelevant betrachtet.

Tritt das Konzept von echtem Bewegungszustand mit dem zuvor in einer speziellen Situation akzeptierten Prinzip der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme in Konflikt, ist dem Lernprozess wahrscheinlich das Argument dienlich, im Weltall bewege sich alles, wodurch kein fixer Punkt zu finden sei, auf den sich eine Bewegung beziehen könnte. Dadurch dürfte das Konzept des echten Bewegungszustandes in der Vorstellung der SchülerInnen geschwächt werden. Dieses Bewegungskonzept ist aber offenbar so stabil, dass es nicht restlos durch einen physikalisch korrekten Bewegungsbegriff ersetzt werden kann, sodass die Konzepte von echtem und scheinbarem Bewegungszustand nebeneinander koexistieren. Das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes kann aber in der Vorstellung der SchülerInnen so weit gestärkt werden, dass diese offensichtlich in konkreten Situationen bewusst darauf zurückgreifen können.

Mit These 7 lässt sich erklären, warum die SchülerInnen in den Interviews größtenteils der Ansicht waren, die jeweiligen Geräte könnten in der gegebenen Situation nicht feststellen, ob sie sich auf dem Boden oder dem Waggon befänden. In den Fragen 4 auf Seite 406, 13 auf Seite 409 und 17 auf Seite 410 ist enthalten, dass die Geräte nur sich selbst und einander, aber nicht den Rest der Welt sehen könnten. Damit finden die SchülerInnen offenbar kein Bezugssystem vor, das sie als bevorzugt betrachten könnten, weswegen sie den echten Bewegungszustand wahrscheinlich als nicht messbar oder irrelevant betrachten.

In der folgenden Unterrichtssequenz wird die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eingeführt, indem die Geschwindigkeiten von Gegenständen und Lichtstrah-

len aus der Sicht von auf der Erde stehenden und laufenden Personen verglichen werden. Die SchülerInnen dürften so erkennen, was die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit aussagt. Dabei lassen sich bei ihnen Hinweise auf die Konzepte von echter und scheinbarer Geschwindigkeit nachweisen. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bereitet den SchülerInnen offensichtlich keine großen Probleme, obwohl manche davon überrascht sind.

Der Bewegungs- und der Geschwindigkeitsbegriff sind in der Vorstellung der SchülerInnen wahrscheinlich nicht unabhängig. Daher dürfte der vorherige kognitive Konflikt zwischen echtem Bewegungszustand und der zuvor in einer speziellen Situation akzeptierten Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme die Herausbildung des Begriffs der scheinbaren Geschwindigkeit erleichtern. Dieser Geschwindigkeitsbegriff wird in Zusammenhang mit der Abstandsänderung von Körpern gebracht, was offenbar dem physikalischen Geschwindigkeitsbegriff entspricht.

Es hat sich im Laufe des teaching experiment gezeigt, dass das Aufzeichnen von Sachverhalten zu einem besseren Verständnis führen könnte. Möglicherweise wird die Herausbildung der Vorstellungen von echter und scheinbarer Geschwindigkeit in höherem Maße unterstützt, wenn die SchülerInnen in *einer* Zeichnung *beide* Geschwindigkeiten graphisch darstellen.

These 8. Die SchülerInnen zeigen sich zum Teil überrascht von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Offensichtlich verstehen sie den Gegensatz zwischen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und den möglichen Geschwindigkeiten von Körpern. Dieses Verständnis bildet sich wahrscheinlich besser heraus, wenn die SchülerInnen im Unterricht zuvor die Begriffe von scheinbarer und echter Geschwindigkeit herausbilden können und zweckmäßig anwenden lernen. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird sichtlich problemlos akzeptiert, was vielleicht über die in den Unterricht mitgebrachte Vorstellung einer echten Geschwindigkeit geschieht. Möglicherweise können die SchülerInnen für Gegenstände auf das Konzept der scheinbaren und für das Licht auf das Konzept der echten Geschwindigkeit zugreifen. Dass Licht nur eine echte, aber keine scheinbare Geschwindigkeit hat, könnte als überraschende Erleichterung aufgefasst und daher gut angenommen werden.

Es lassen sich Hinweise finden, dass sich das Konzept einer scheinbaren Geschwindigkeit besser entwickelt, wenn sich zuvor das Konzept eines scheinbaren Bewegungszustandes in der Vorstellung der SchülerInnen aufgebaut hat. Für den Unterricht bedeutet das, dass es möglicherweise günstig ist, vor dem Konzept der scheinbaren Geschwindigkeit das Konzept des scheinbaren Bewegungszustandes zu thematisieren.

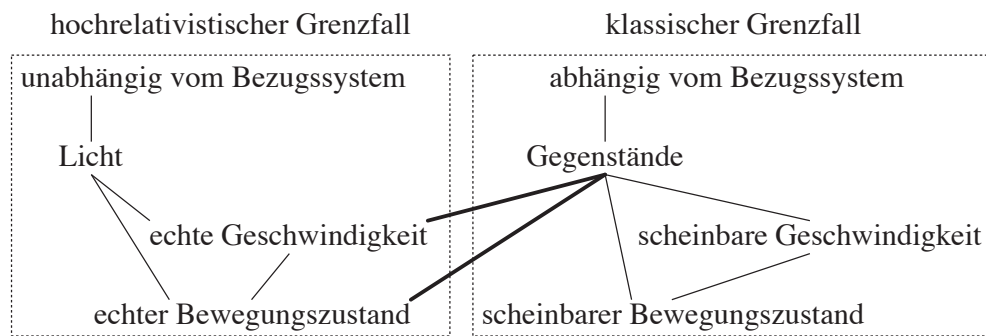


Abbildung 9.1.: Begriffsnetz

In der nächsten Unterrichtssequenz sollen die SchülerInnen die soeben gelernten physikalischen Grundlagen auf das Geschehen im Lehrfilm *Gleichzeitigkeit* [Gle05] anwenden. Die SchülerInnen können im teaching experiment den im Film dargestellten Sachverhalt im Großen und Ganzen mit Hilfe des Relativitätsprinzips und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erklären. Dabei zeigt sich, dass die Vorstellungen zu Licht, zu Gegenständen und zu Bezugssystemen wahrscheinlich miteinander verknüpft sind.

These 9. Es lassen sich Hinweise finden, SchülerInnen könnten die Vorstellung haben, Licht sei unabhängig vom Bezugssystem. Das impliziert einerseits, dass Licht von diesem keinen Schwung mitnehmen kann, und andererseits, dass Licht keine scheinbare Geschwindigkeit haben kann, welche eine Abhängigkeit von einem Bezugssystem ausdrückt. Aus beidem ergibt sich die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Es könnte daher den Lernprozess unterstützen, die Vorstellung zu stimulieren, Licht bewege sich unabhängig von jedem Bezugssystem.

Es gibt Belege dafür, SchülerInnen könnten die Vorstellung haben, Gegenstände seien abhängig vom Bezugssystem. Das äußert sich darin, dass sie von diesem Schwung mitnehmen können und dass sie eine scheinbare Geschwindigkeit haben, die eine Abhängigkeit vom Bezugssystem ausdrückt.

Es gibt Anzeichen dafür, dass manche SchülerInnen für Gegenstände eine Vorstellung entwickeln, die der klassischen Physik entspricht, und für Licht eine Vorstellung, die der relativistischen Physik entspricht.

Die Vorstellungen der SchülerInnen zu Licht, zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und zu Gegenständen mit deren scheinbaren Geschwindigkeiten dürften in ein ganzes Begriffsnetz (Abbildung 9.1) eingebettet sein. Daraus ergeben sich Folgerungen für den Ablauf des Unterrichts.

These 10. Die SchülerInnen haben möglicherweise in ihrer Vorstellung ein Begriffsnetz aufgebaut, wie es in Abbildung 9.1 auf der vorherigen Seite dargestellt ist. Die beiden Blöcke in der Vorstellung der SchülerInnen, die der klassischen bzw. der relativistischen Physik entsprechen, sind über die physikalisch falsche Vorstellung einer nur vom Gegenstand abhängigen echten Geschwindigkeit bzw. eines nur vom Gegenstand abhängigen echten Bewegungszustandes miteinander verbunden. Diese Verbindung dürfte so dominant sein, dass es unrealistisch erscheint, sie beseitigen zu wollen. Das Ziel des Unterrichts kann es also nicht sein, diese Vorstellungen auszutreiben, sondern geschickt zu benützen. Die unterrichtliche Intervention sollte also darauf abzielen, bei den SchülerInnen Konzepte von scheinbarem Bewegungszustand und scheinbarer Geschwindigkeit zu etablieren und gegen die Konzepte von echtem Bewegungszustand und echter Geschwindigkeit abzugrenzen. Das konzeptuell Neue für SchülerInnen dürfte nicht die echte Geschwindigkeit von Licht, sondern die scheinbare Geschwindigkeit von Gegenständen sein.

In der folgenden Unterrichtssequenz sollen die SchülerInnen den unerwarteten Effekt des einführenden Beispiels mit dem bisher Gelernten erklären, was ihnen im teaching experiment gelingt, indem sie konsequent und richtig die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und das Relativitätsprinzip verwenden.

In der letzten Unterrichtssequenz der Endversion des Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit müssen die SchülerInnen das Gelernte auf eine Aufgabe in einer neuen Situation anwenden. Dabei zeigt sich im teaching experiment, dass sie sich von der Vorstellung des bevorzugten Bezugssystems Erdboden lösen können und bereit sind, diesen samt Aufbauten und Menschen auch als bewegt zu betrachten. Damit können die SchülerInnen die Aufgabe richtig lösen.

Es konnte im teaching experiment gezeigt werden, dass SchülerInnen der achten Schulstufe einer Wiener AHS unter günstigen Bedingungen in die Lage versetzt werden können, die Relativität der Gleichzeitigkeit als Folgerung allgemeiner physikalischer Grundprinzipien zu akzeptieren. Diese günstigen Bedingungen resultierten daraus, dass erstens sich die SchülerInnen freiwillig für das teaching experiment meldeten, wodurch sich eine Selektion nach Interessen und Motivation ergab, und zweitens das teaching experiment in einer Kleingruppe mit jeweils zwei SchülerInnen abgehalten wurde, was eine sehr intensive Betreuung ermöglichte.

Ich unterrichtete probeweise in einer Klasse der 12. Schulstufe die Relativität der Gleichzeitigkeit nach der Endversion des Unterrichtskonzepts. Aufgrund der Erfahrungen, die ich dabei machte, gehe ich davon aus, dass eine Übertrag-

barkeit der Endversion auf den Unterricht sowohl für die 8. als auch für die 12. Schulstufe gegeben ist.

10. Kurzfassung

Die Fragestellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, ist, ob ein Unterrichtskonzept entwickelt werden kann, das es bereits SchülerInnen der Unterstufe (fünfte bis achte Schulstufe) ermöglicht, die Relativität der Gleichzeitigkeit als logische Folgerung allgemeiner physikalischer Grundprinzipien (Relativitätsprinzip, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) zu akzeptieren.

In problemzentrierten Interviews wurden die Vorstellungen von elf 13- und 14jährigen SchülerInnen zu den Themen Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Gleichzeitigkeit, Zeitdilatation sowie Längenkontraktion erhoben und die Bereitschaft getestet, relativistische Effekte zu akzeptieren. Es stellt sich heraus, dass sich bei fast allen interviewten SchülerInnen Konzepte zu absoluter Gleichzeitigkeit, absoluten zeitlichen Abständen und absoluten räumlichen Ausdehnungen finden lassen. Die meisten Interviewten erkennen aber in der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, die nicht abgelehnt wird, keinen Widerspruch zu diesen Präkonzepten, wahrscheinlich, weil die klassische Geschwindigkeitsaddition, die im Widerspruch zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steht, nicht gut verstanden wird. Das Relativitätsprinzip in den jeweils dargebotenen Situationen, ideale Messgeräte, die das Geschehen aufzeichnen, und der Messprozess als Sammeln von Daten mit anschließender Auswertung werden gut akzeptiert. Die SchülerInnen halten die Messergebnisse für ebenso glaubwürdig wie andere Messergebnisse, die die SchülerInnen kennen. Sie verstehen, was es bedeutet, die Lichtlaufzeit in den Messprozess mit einzubeziehen und welche Bedeutung das für die Messergebnisse hat. Es besteht ein Interesse an einer logischen Erklärung für relativistische Effekte.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Interviews wurde auf der Basis des Konzeptwechsels im naturwissenschaftlichen Unterricht und konstruktivistischer Lerntheorien der Prototyp eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit entwickelt. Die Wirksamkeit des Prototyps und die Akzeptanz von Erklärungsangeboten wurden in einem teaching experiment untersucht. Dieses bestand aus fünf Unterrichtsdurchgängen, in denen ich jeweils eine Schülerin und einen Schüler der achten Schulstufe gemeinsam unterrichtete. Nach jedem Unterrichtsdurchgang beurteilte ich aufgrund der Ausführungen der SchülerInnen die Wirksamkeit des Unterrichts und die Akzeptanz der gegebenen Erklärungsangebote. Weiters identifizierte ich die Vorstellungen und Konzepte der

SchülerInnen und analysierte, wie und durch welche Interventionen sich diese Vorstellungen und Konzepte im Verlauf des jeweiligen Unterrichtsdurchganges veränderten. Auf den gewonnenen Daten basierend wurde das Unterrichtskonzept für den nächsten Unterrichtsdurchgang revidiert. Nach fünf Unterrichtsdurchgängen ergibt sich damit die Endversion eines Unterrichtskonzepts zur Relativität der Gleichzeitigkeit.

Im Zuge des teaching experiment konnten bei den SchülerInnen Hinweise zu Vorstellungen eines echten und eines scheinbaren Bewegungszustandes sowie einer echten und scheinbaren Geschwindigkeit gefunden werden. Echter Bewegungszustand und echte Geschwindigkeit sind Bewegungszustand bzw. Geschwindigkeit eines Körpers bezüglich eines als bevorzugt betrachteten Bezugssystems. Dieses dürfte aber weder als solches erkannt werden noch dringt dessen Rolle ins Bewusstsein der SchülerInnen. Darum werden der echte Bewegungszustand und die echte Geschwindigkeit wahrscheinlich als alleinige Eigenschaften der betrachteten Körper ansehen. Scheinbarer Bewegungszustand und scheinbare Geschwindigkeit sind Bewegungszustand bzw. Geschwindigkeit eines Körpers bezüglich eines anderen Bezugssystems. Es lassen sich Hinweise auf die Koexistenz beider Bewegungs- und Geschwindigkeitsbegriffe in der Vorstellung der SchülerInnen finden. Weiters gibt es Anzeichen auf die Vorstellung, Körper seien abhängig vom Bezugssystem, was dazu führt, dass diese neben der echten eine scheinbare Geschwindigkeit haben und vom Bezugssystem Schwung bekommen können. Für Licht gibt es Belege für die Vorstellung, dieses sei unabhängig vom Bezugssystem, was dazu führt, dass Licht nur eine echte, aber keine scheinbare Geschwindigkeit hat und vom Bezugssystem keinen Schwung bekommen kann.

Da die SchülerInnen mit hoher Wahrscheinlichkeit mit den Konzepten von echtem Bewegungszustand und echter Geschwindigkeit in den Unterricht kommen, ist es für das Erlernen des Relativitätsprinzips und damit für das Erlernen der Grundlagen der Relativitätstheorie notwendig, zunächst die Begriffe von scheinbarem Bewegungszustand und scheinbarer Geschwindigkeit in der Vorstellung der SchülerInnen zu etablieren. Es dürfte zweckmäßig sein, in weiterer Folge die Vorstellung zu stimulieren, Licht bewege sich im Gegensatz zu Körpern unabhängig von allen, die es beobachten. Dass Licht anders als Körper nur eine echte, aber keine scheinbare Geschwindigkeit hat, wird möglicherweise als erleichternde Überraschung aufgenommen.

Unter den günstigen Bedingungen des teaching experiment ist es gelungen, 14jährigen SchülerInnen die Relativität der Gleichzeitigkeit als Folgerung allgemeiner physikalischer Grundprinzipien (Relativitätsprinzip, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) zu vermitteln. Diese günstigen Bedingungen resultierten daraus, dass erstens sich die SchülerInnen freiwillig für das teaching experiment

meldeten, wodurch sich eine Selektion nach Interessen und Motivation ergab, und zweitens das teaching experiment in einer Kleingruppe mit jeweils zwei SchülerInnen abgehalten wurde, was eine sehr intensive Betreuung ermöglichte.

Ich unterrichtete probeweise in einer Klasse der 12. Schulstufe die Relativität der Gleichzeitigkeit nach der Endversion des Unterrichtskonzepts. Aufgrund der Erfahrungen, die ich dabei machte, gehe ich davon aus, dass eine Übertragbarkeit der Endversion auf den Unterricht sowohl für die 8. als auch für die 12. Schulstufe gegeben ist.

11. Abstract

This paper is based on the question of whether or not it is possible to develop a teaching concept that enables even students from grades five to eight to accept the relativity of simultaneity as a logical consequence of general physical principles (principle of relativity, invariance of the speed of light).

The conception of 13- and 14-year-old students concerning the addition of velocities, the invariance of the speed of light, simultaneity, time dilatation, and length contraction has been determined in problem-centered interviews. Furthermore, it has been determined throughout the course of these interviews to what extent the students accepted relativistic effects. It is apparent that the concepts of absolute simultaneity, absolute time intervals, and absolute space intervals could be identified in the conceptual understanding of almost all of the interviewed students. Most of the students have not rejected the invariance of the speed of light, but have not recognized a contradiction between this invariance and their preconceptions. This might have been caused by a lack of understanding of the classical addition of velocities that contradicts the invariance of the speed of light. In the situations discussed during the interviews, the principle of relativity as well as ideal measuring devices for recording the observations, and the measuring process as a collection and subsequent analysis of data have been well accepted. The students have considered the measuring results as reliable as other measuring results the students are familiar with in their everyday lives. They understood what it means to include the travel time of light into the measuring process and how this affects the measuring results. The students showed interest in a logical explanation of the relativistic effects.

Starting from the results of the interviews, a prototype of a teaching concept for the relativity of simultaneity has been developed on the basis of conceptual change in science education and constructivist learning theories. The effectiveness of the prototype and the acceptance of the proposed explanations have been evaluated in a teaching experiment. This teaching experiment consisted of five teaching episodes in each of which one male and one female eighth-grade-student were instructed. After each teaching episode, I evaluated the effectiveness of the instruction based on the students' responses and the acceptance of the proposed explanations. Furthermore, I identified the conceptions of the students, analyzed the influence of different teaching techniques, how these techniques affected the

students' conceptions, and how these conceptions changed during the teaching episode. Based on the collected data, the teaching concept has been revised for the next teaching episode. After five teaching episodes, I developed the final version of a teaching concept for the relativity of simultaneity.

During the teaching experiment, I could find evidence for conceptions of a real and an apparent state of motion, as well as conceptions of a real and an apparent velocity. The real state of motion and the real velocity are the state of motion or the velocity of a body with respect to a reference frame that is considered to be preferred. This reference frame might not have been recognized as such by the students. They might also not have realized the role of this reference frame. That is the reason why the students probably regard the real state of motion of a body and the real velocity of a body to be a property of the body itself. The apparent state of motion and the apparent velocity are the state of motion or the velocity of a body with respect to another reference frame. I could find evidence for the co-existence of both concepts of motion and velocity in the conceptions of the students. Furthermore, I could find clues that the students have held the conception that bodies are dependent upon frames of reference. This implies that in addition to the real velocity, a body also has an apparent velocity and can gain momentum from a frame of reference. I could identify indications for the conception that light is independent of frames of reference. That implies that light has a real, but not an apparent velocity and cannot get momentum from a frame of reference.

Since it is highly probable that students hold the conceptions of a real state of motion and a real velocity before receiving instruction, it is necessary for the learning of the principle of relativity, and hence for the learning of the foundation of relativity theory, to first establish the concepts of the apparent state of motion and apparent velocity. It might be appropriate to stimulate the idea that light moves independently of all observers. The fact that light, as opposed to other bodies, only has a real but no apparent motion, might be accepted by the students as a relieving surprise.

Under the advantageous conditions of the teaching experiment, it was possible to convey the relativity of simultaneity as a consequence of general physical principles (principle of relativity, invariance of the speed of light) to 14-year-old students. On the one hand, these advantageous conditions resulted from the fact that the students volunteered for the teaching experiment. This created a sample group of interested and motivated students. On the other hand, the teaching experiment was carried out in small groups (two students in each teaching episode) with close supervision.

For testing purposes I taught the relativity of simultaneity in a 12th-grade class according to the final version of the teaching concept. Based on what I

experienced there, I assume that it is possible to implement this final version in classroom instruction in grades eight and 12.

Anhang

A. Interviewleitfaden

Ich dokumentiere in diesem Anhang den gesamten Interviewleitfaden, den ich bei der Erhebung der SchülerInnenvorstellungen in Kapitel 4 verwendete.

A.1. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

1. In Abbildung A.1 siehst du einen Zug mit einem offenen Waggon. Ein Mensch geht auf diesem Waggon Richtung Lokomotive. Auf dem Boden und dem Waggon steht je ein Radar zur Geschwindigkeitsmessung. Das Radar auf dem Boden misst für den Zug eine Geschwindigkeit von 50 km/h. Das Radar auf dem Waggon misst für den Menschen eine Geschwindigkeit von 4 km/h. Was misst das Radar auf dem Boden für die Geschwindigkeit des Menschen? Begründung! Welche Geschwindigkeit misst das Radar auf dem Boden für den Menschen, wenn dieser Richtung Zugende geht und das Radar auf dem Waggon 4 km/h misst?
2. In Abbildung A.2 auf der nächsten Seite steht auf dem Waggon ein Tisch, auf dem eine Taschenlampe liegt, die Richtung Lokomotive leuchtet. Das Radar auf dem Boden misst als Geschwindigkeit für den Zug 50 km/h. Das Radar auf dem Waggon misst für das Licht eine Geschwindigkeit von 1 080 000 000 km/h. Was misst das Radar auf dem Boden für die

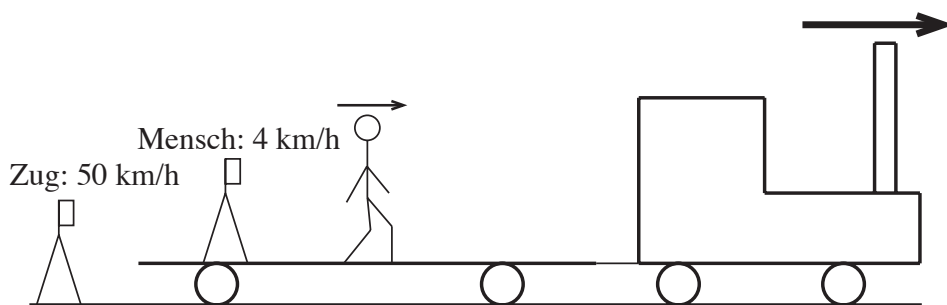


Abbildung A.1.: Zu Frage 1

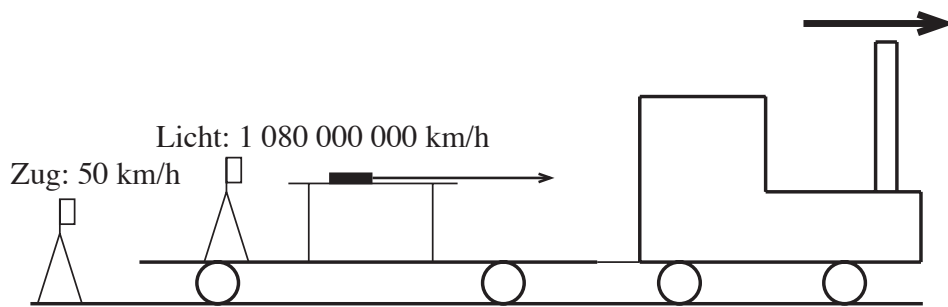


Abbildung A.2.: Zu Frage 2 auf der vorherigen Seite

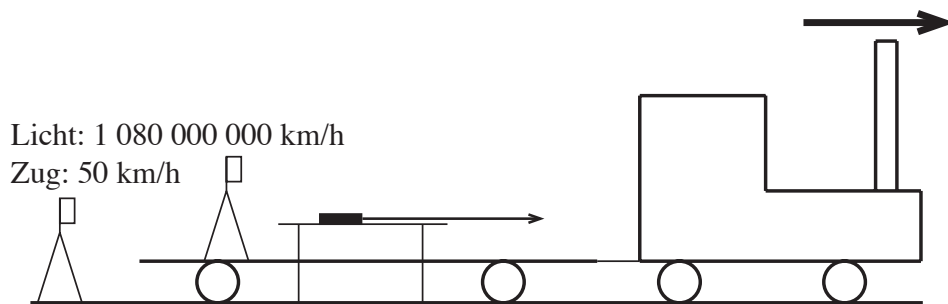


Abbildung A.3.: Zu Frage 3

Geschwindigkeit des Lichts? Begründung! Welche Geschwindigkeit misst das Radar auf dem Boden für das Licht, wenn die Taschenlampe Richtung Zugende leuchtet und das Radar auf dem Waggon für die Geschwindigkeit des Lichts 1 080 000 000 km/h misst?

3. In Abbildung A.3 steht der Tisch samt Taschenlampe auf dem Bahndamm. Das Radar auf dem Boden misst für die Geschwindigkeit des Zuges 50 km/h und für die Geschwindigkeit des Lichts 1 080 000 000 km/h. Was misst das Radar auf dem Waggon für die Geschwindigkeit des Lichts, wenn die Taschenlampe in Fahrtrichtung des Zuges leuchtet? Begründung! Was misst das Radar auf dem Waggon für die Geschwindigkeit des Lichts, wenn die Taschenlampe gegen die Fahrtrichtung des Zuges leuchtet? Begründung!
4. In Abbildung A.2 ändert sich der Abstand zwischen der Taschenlampe und dem Radar auf dem Waggon nicht. Der Abstand zwischen dem Radar auf dem Boden und der Taschenlampe ändert sich ständig. In Abbildung A.3 ändert sich der Abstand zwischen der Taschenlampe und dem Radar auf dem Boden nicht. Der Abstand zwischen der Taschenlampe und dem

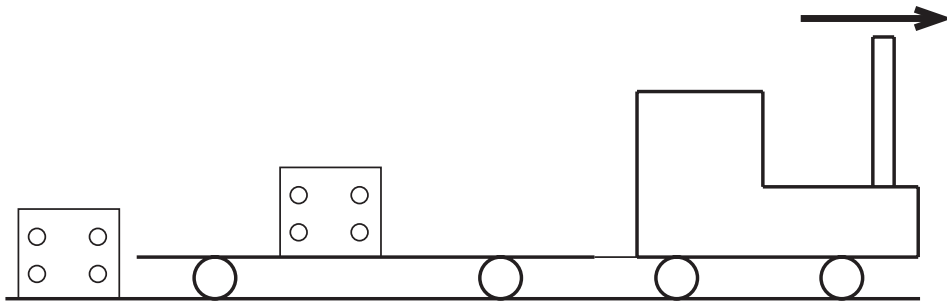


Abbildung A.4.: Zu Frage 7

- Radar auf dem Waggon ändert sich ständig. Nehmen wir an, die beiden Radargeräte und die Taschenlampe könnten nur sich selbst, einander und das ausgesandte Licht „sehen“ und nicht den Rest der Welt. Könnten dann die Taschenlampe und das Radar, dessen Abstand zur Taschenlampe sich nicht ändert, feststellen, ob sie sich beide auf dem Boden oder auf dem Waggon befinden? Begründung!
5. In Wirklichkeit misst man für die Geschwindigkeit des Lichts immer 1 080 000 000 km/h. Was sagst du dazu?
 6. Wie können die Taschenlampe und das Radar, dessen Abstand zur Taschenlampe sich nicht ändert, nun feststellen, ob sie sich auf dem Zug oder auf dem Boden befinden? Begründung!

A.2. Gleichzeitigkeit

7. In Abbildung A.4 steht auf dem Boden und dem Waggon je ein Apparat, der messen kann, ob zwei Dinge gleichzeitig geschehen oder nicht. Der Zug fährt in der Nacht an einer Siedlung vorbei. In zwei Häusern, *A* und *B*, wird das Licht aufgedreht. Der Apparat, der auf dem Boden steht, misst, dass das Licht in beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde. Misst der Apparat, der auf dem Waggon steht ebenfalls, dass das Licht in den beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde, oder kann es sein, dass er misst, dass zuerst das Licht in Haus *A* aufgedreht wurde und später in Haus *B* bzw. zuerst in Haus *B* und später im Haus *A*? Begründung!
8. Würde es dir seltsam vorkommen, wenn der Apparat auf dem Waggon in Abbildung A.4 messen würde, dass zuerst das Licht in Haus *A* aufgedreht

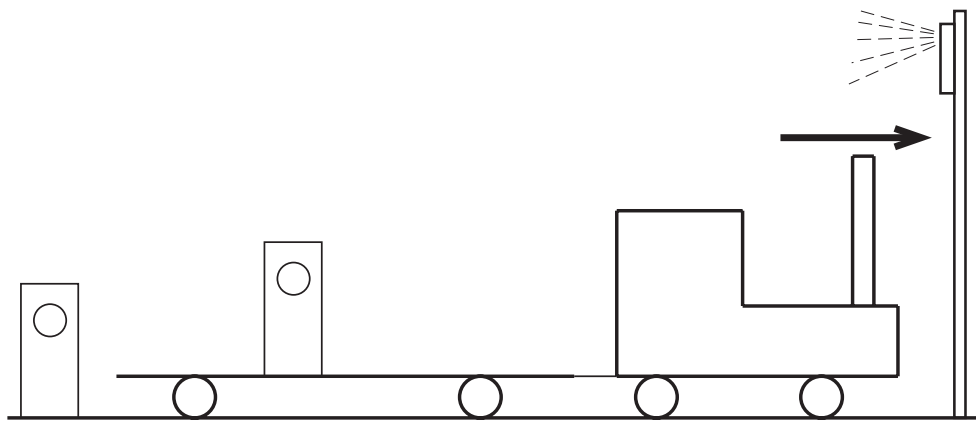


Abbildung A.5.: Zu Frage 11

wurde und später in Haus *B* bzw. zuerst in Haus *B* und später im Haus *A*? Begründung!

9. Während der Zug in Abbildung A.4 auf der vorherigen Seite an der Siedlung vorbei fährt, wird das Licht in zwei Häusern, *C* und *D*, aufgedreht. Der Apparat, der auf dem Waggon steht, misst, dass das Licht in beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde. Misst der Apparat, der auf dem Boden steht ebenfalls, dass das Licht in den beiden Häusern zum gleichen Zeitpunkt aufgedreht wurde, oder kann es sein, dass er misst, dass zuerst das Licht in Haus *C* aufgedreht wurde und später in Haus *D* bzw. zuerst in Haus *D* und später im Haus *C*? Begründung!
10. Würde es dir seltsam vorkommen, wenn der Apparat auf dem Boden in Abbildung A.4 auf der vorherigen Seite messen würde, dass zuerst das Licht in Haus *C* aufgedreht wurde und später in Haus *D* bzw. zuerst in Haus *D* und später im Haus *C*? Begründung!

A.3. Zeitdilatation

11. In Abbildung A.5 siehst du eine blinkende Signallampe, die am Bahndamm steht. Auf dem Boden und dem Waggon steht je ein Apparat, der die Zeit misst, die zwischen zwei Mal Aufblinker der Signallampe vergeht. Der Apparat auf dem Boden misst, dass zwischen zwei Mal Aufblinker der Signallampe eine Zeit von drei Sekunden vergeht. Misst der Apparat auf dem Waggon zwischen zwei Mal Aufblinker ebenfalls drei Sekunden

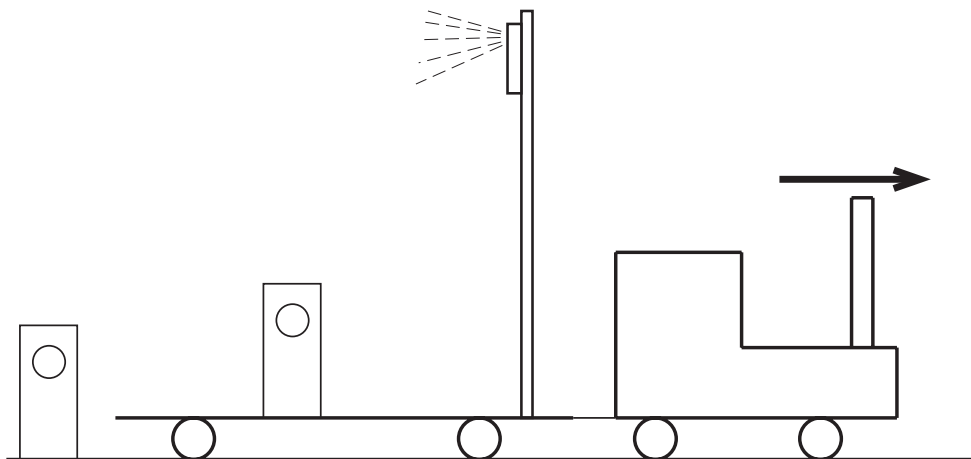


Abbildung A.6.: Zu Frage 12

oder kann es sein, dass er eine kürzere bzw. längere Zeitspanne misst? Begründung!

12. In Abbildung A.6 wurde die Signallampe auf den Waggon montiert. Der Apparat auf dem Waggon misst, dass zwischen zwei Mal Aufblinken der Signallampe eine Zeit von drei Sekunden vergeht. Misst der Apparat auf dem Boden zwischen zwei Mal Aufblinken ebenfalls drei Sekunden oder kann es sein, dass er eine kürzere bzw. längere Zeitspanne misst? Begründung!
13. In Abbildung A.5 auf der vorherigen Seite ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und der Signallampe nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und dem Apparat auf dem Boden bzw. der Signallampe ändert sich ständig. In Abbildung A.6 ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und der Signallampe nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und dem Apparat auf dem Waggon bzw. der Signallampe ändert sich ständig. Nehmen wir an, die beiden Apparate und die Signallampe könnten nur sich selbst und einander „sehen“ und nicht den Rest der Welt. Könnten dann die Signallampe und der Apparat, dessen Abstand zur Signallampe sich nicht ändert, feststellen, ob sie sich beide auf dem Boden oder auf dem Waggon befinden? Begründung!
14. In Wirklichkeit misst der Apparat, dessen Abstand zur Signallampe sich ändert, zwischen zwei Mal Aufblinken ein kleines bisschen mehr Zeit vergeht als drei Sekunden. Was sagst du dazu?

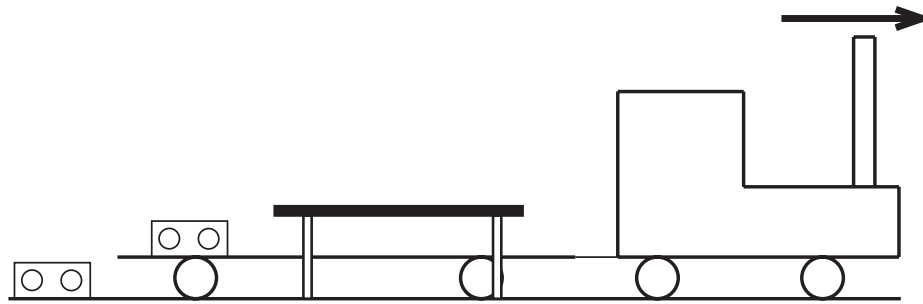


Abbildung A.7.: Zu Frage 15

A.4. Längenkontraktion

15. In Abbildung A.7 befindet sich am Bahndamm ein Holz balken, der waagrecht auf zwei Stehern liegt. Auf dem Boden und dem Waggon steht je ein Apparat, der die Länge von Gegenständen messen kann. Der Apparat auf dem Boden misst für den Holz balken eine Länge von fünf Metern. Misst der Apparat auf dem Waggon für den Holz balken ebenfalls eine Länge von fünf Metern oder kann es vorkommen, dass eine kleinere bzw. größere Länge gemessen wird? Begründung!
16. In Abbildung A.8 auf der nächsten Seite wurde der Holz balken samt Stehern auf den Waggon montiert. Der Apparat auf dem Waggon misst für den Holz balken eine Länge von fünf Metern. Misst der Apparat auf dem Boden für den Holz balken ebenfalls eine Länge von fünf Metern oder kann es vorkommen, dass eine kleinere bzw. größere Länge gemessen wird? Begründung!
17. In Abbildung A.7 ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und dem Holz balken nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und dem Apparat auf dem Boden bzw. dem Holz balken ändert sich ständig. In Abbildung A.8 auf der nächsten Seite ändert sich der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Waggon und dem Holz balken nicht. Der Abstand zwischen dem Apparat auf dem Boden und dem Apparat auf dem Waggon bzw. dem Holz balken ändert sich ständig. Nehmen wir an, die beiden Apparate und der Holz balken könnten nur sich selbst und einander „sehen“ und nicht den Rest der Welt. Könnten dann der Holz balken und der Apparat, dessen Abstand zum Holz balken sich nicht ändert, feststellen, ob sie sich beide auf dem Boden oder auf dem Waggon befinden? Könnte der Apparat, dessen Abstand zum Holz balken

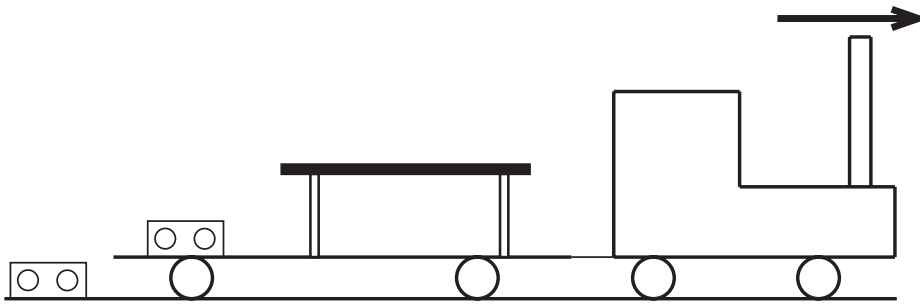


Abbildung A.8.: Zu Frage 16 auf der vorherigen Seite

- sich ständig ändert, feststellen, ob er sich auf dem Boden oder auf dem Waggon befindet? Begründung!
18. In Wirklichkeit misst der Apparat, dessen Abstand zum Holzbalken sich ändert, für die Länge dieses Balkens ein kleines bisschen weniger als fünf Meter. Was sagst du dazu?

B. Lebenslauf

13. 4. 1966	Geboren in Wien Alsergrund
1972–1976	Besuch der Volksschule in Wien 16, Landsteiner-gasse 4
1976–1984	Besuch des Bundesgymnasiums Wien 16, Maroltin-gergasse 69–71
14. 6. 1984	Ablegung der Reifeprüfung mit ausgezeichnetem Erfolg
1. 10. 1984–6. 8. 1996	Studium der Studienrichtung Physik, Studien-zweig Physik (Lehramt an Höheren Schulen), und Mathe-matik, Studien-zweig Mathematik (Lehramt an Höhe-ren Schulen), an der Universität Wien
29. 4. 1997	Sponsion zum Magister der Naturwissenschaften
25. 8. 1997–24. 8. 1998	Absolvierung des Unterrichtspraktikums am Bundes-gymnasium und Bundesrealgymnasium Wien 17, Ge-blergasse 56-58, mit erheblicher Überschreitung des Arbeitserfolges durch besondere Leistungen
17. 9. 1998–31. 8. 1999	Lehrer am Bundesgymnasium und Bundesrealgym-nasium Wien 12, Rosasgasse 1–3
7. 9. 1999–31. 8. 2000	Lehrer an der Evander Childs High School, 800 East Gun Hill Road, Bronx, New York 10467, USA
Schuljahr 1999/2000	Teilnahme am Professional Teacher Development Program, welches von der Austrian-American Educa-tional Cooperation Association gemeinsam mit dem Bundesministerium für Unterricht und kulturelle An-gelegenheiten durchgeführt wurde
Studienjahr 1999/2000	Studium des Postgtaduiertenstudiums „English as a Working Language“ am City College of the City University of New York

B. Lebenslauf

Sommersemester 2000	Teilnahme am Seminar „English Composition“ am Lehman College of the City University of New York
Seit Schuljahr 2000/2001	Lehrer am Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Wien 12, Rosasgasse 1–3
Seit 1. 3. 2009	Doktoratsstudium der Naturwissenschaften, Dissertationsgebiet Physik, an der Universität Wien
Studienjahr 2009/2010	Lehrbeauftragter an der Fakultät für Physik der Universität Wien für das Seminar „SchülerInnenversuche im Physikunterricht“
Schuljahr 2010/2011	Ausbildung zum Betreuungslehrer für die schulpraktische Ausbildung

C. Publikationen

WITTMANN, Herbert: Sonnenbahnen im Physiksaal. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 60 (2011), Nr. 3, S. 5–8

INSTITUT FÜR FILM UND BILD IN WISSENSCHAFT UND UNTERRICHT FWU (Hrsg.): *Quantenphysik*. Grünwald : DVD 46 02375, 2006. – Didaktische Beratung, Begleittexte, Unterrichtsvorschläge, Arbeitsblätter mit Lösungen

INSTITUT FÜR FILM UND BILD IN WISSENSCHAFT UND UNTERRICHT FWU (Hrsg.): *Einstein Basics: Die Allgemeine Relativitätstheorie*. Grünwald : DVD 46 02325, 2005. – Didaktische Beratung, Begleittexte, Unterrichtsvorschläge, Arbeitsblätter mit Lösungen

INSTITUT FÜR FILM UND BILD IN WISSENSCHAFT UND UNTERRICHT FWU (Hrsg.): *Einstein Basics: Die Spezielle Relativitätstheorie*. Grünwald : DVD 46 02324, 2005. – Didaktische Beratung, Begleittexte, Unterrichtsvorschläge, Arbeitsblätter mit Lösungen

BAJONS, P. ; WITTMANN, H. ; DONEUS, M. ; FRIESINGER, H.: Determination of the Local PV Potential. In: *Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna 6-10 July 1998, Austria* Bd. 3. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 1998, S. 3429–3432

WITTMANN, H. ; BAJONS, P. ; DONEUS, M. ; FRIESINGER, H.: Identification of Roof Areas Suited for Solar Energy Conversion Systems. In: *Renewable Energy* 11 (1997), Nr. 1, S. 25–36

BAJONS, P. ; WITTMANN, H. ; DONEUS, M. ; FRIESINGER, H.: Ermittlung des solaren Flächenpotentials von Wien-Josefstadt. In: *VEÖ-Journal* 10 (1996), S. 53–59

WITTMANN, Herbert: *Lokales solares Potential auf den Dachflächen des achten Wiener Gemeindebezirks*, Universität Wien, Diplomarbeit, 1996

Literaturverzeichnis

- [AV95] ARRUDA, S. ; VILLANI, A.: Conceptual Change in Special Relativity Theory: Contributions of the History of Science. In: FINLEY, F. (Hrsg.) ; ALLCHIN, D. (Hrsg.) ; RHEES, D. (Hrsg.) ; FIFIELD, S. (Hrsg.): *Proceedings of the Third International History, Philosophy, and Scienceteaching Conference*. Minneapolis, MN : University of Minnesota, 1995, S. 53–61

- [Bac01] BACKHAUS, Udo: Das 3. Newton'sche Gesetz und der physikalische Kraftbegriff. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik* 12 (2001), Nr. 65, S. 7–10

- [BBD⁺07] BADER, Franz ; BERGOLD, Helmut ; DREHMANN, Peter ; HABERKANT, Erwin-Klaus ; KRETSCHMER, Bernd ; OBERHOLZ, Heinz-Werner ; PETERS, Thomas ; PHILIPP, Wolfgang ; WEGNER, Werner ; EISENZOPF, Wolfgang ; BADER, Franz (Hrsg.) ; DORN, Friedrich (Hrsg.): *Physik 3*. 5. Auflage. Wien : E. Dorner GmbH, 2007

- [BDAG93] BORGHI, L. ; DE AMBROSIO, A. ; GHISOLFI, E.: Teaching special relativity in high school. In: NOVAK, J. (Hrsg.): *The Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, NY : Misconceptions Trust, 1993, S. 444–460

- [BDJ⁺99] BLEICHROTH, Wolfgang ; DAHNCKE, Helmut ; JUNG, Walter ; KUHN, Wilfried ; MERZYN, Gottfried ; WELTNER, Klaus: *Fachdidaktik Physik*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Köln : Aulis Verlag Deubner & Co KG, 1999

- [DT09] DUIT, Reinders H. ; TREAGUST, David F.: Conceptual change – Still a powerful framework for improving the practice of science instruction. In: KIM, M. (Hrsg.) ; HWANG, S. (Hrsg.) ; TAN, A-L. (Hrsg.): *Proceedings of the International Science Education Conference 2009: Science Education: Shared Issues, Common Future*.

- Singapore : National Institute of Education, 24 to 26 November 2009, S. 725–744
- [DTW08] DUIT, Reinders ; TREAGUST, David F. ; WIDODO, Ari: Teaching Science for Conceptual Change – Theory and Practice. In: AL., S. V. (Hrsg.): *Handbook on Conceptual Change*. Mahwah, New Jersey : Lawrence Erlbaum, 2008, S. 629–646
- [ECOR04] ENGELHARDT, Paula V. ; CORPUZ, Edgar G. ; OZIMEK, Darryl J. ; REBELLO, N. S.: The Teaching Experiment – What it is and what it isn't. In: *AIP Conference Proceedings* 720 (2004), Nr. 1, S. 157–160
- [Ein05] INSTITUT FÜR FILM UND BILD IN WISSENSCHAFT UND UNTER- RICHT GEMEINNÜTZIGE GMBH FWU (Hrsg.): *Einstein Basics. Die Spezielle Relativitätstheorie*. Grünwald : DVD 46 02324, 2005
- [EP] EMBACHER, Franz ; PITZL, Robert: . – Persönliche Mitteilung
- [Fli03] FLIESSBACH, Torsten: *Mechanik. Lehrbuch zur Theoretischen Physik I*. 4. Auflage. Heidelberg, Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 2003
- [Gle05] Gleichzeitigkeit. In: [Ein05]
- [Goe04] GOENNER, Hubert: *Spezielle Relativitätstheorie und die klassische Feldtheorie*. 1. Auflage. München : Spektrum Akademischer Verlag, 2004
- [Gol85] GOLDSTEIN, Herbert: *Klassische Mechanik*. 8. unveränderte Auf- lage. Wiesbaden : Aula-Verlag, 1985. – Aus dem Englischen übersetzt von Prof. Dr. Günter Gliemann
- [GS93] GIL, D. ; SOLBES, J.: The introduction of modern physics: over- coming a deformed vision of science. In: *International Journal of Science Education* 15 (1993), Nr. 3, S. 255–260
- [Hew82] HEWSON, Peter W.: A Case Study of Conceptual Change in Special Relativity: The Influence of Prior Knowledge in Learning. In: *European Journal of Science Education* 4 (1982), Nr. 1, S. 61–78
- [HR93] HONERKAMP, Josef ; RÖMER, Hartmann: *Klassische Theoretische Physik. Eine Einführung*. 3., durchges. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1993

- [JNN02] JAROS, Albert ; NUSSBAUMER, Alfred ; NUSSBAUMER, Peter: *Basiswissen 4*. 1. Auflage. Wien : öbv&hpt VerlagsgmbH &Co. KG, 2002
- [Mac82] MACHOLD, A.: Schülervorstellungen vor und während des Unterrichts in spezieller Relativitätstheorie. In: *physica didactica* 9 (1982), S. 175–189
- [May02] MAYRING, Philipp: *Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken*. 5., überarbeitete und neu ausgestattete Auflage. Weinheim und Basel : Beltz Verlag, 2002 (Beltz Studium)
- [MO98] MANSFIELD, Michael ; O’SULLIVAN, Colm: *Understanding Physics*. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Ontario : John Wiley & Sons Ltd, 1998
- [PZ99] PIETROCOLA, Maurício ; ZYLBERSZTAJN, Arden: The use of the Principle of Relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students. In: *International Journal of Science Education* 21 (1999), Nr. 3, S. 261–276
- [Rei08] REICH, Kersten: *Konstruktivistische Didaktik. Lehr- und Studienbuch mit Medienpool*. 4., durchgesehene Auflage. Weinheim, Basel : Beltz Verlag, 2008 (Pädagogik und Konstruktivismus)
- [Sar96] SARTORI, Leo: *Understanding Relativity. A Simplified Approach to Einstein’s Theories*. Berkeley, Los Angeles, London : University of California Press, 1996
- [Sch94] SCHECK, Florian: *Mechanik. Von den Newtonschen Gesetzen zum deterministischen Chaos*. Vierte, verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest : Springer-Verlag, 1994
- [SCJ95] SLOTTA, James D. ; CHI, Michelene T. H. ; JORAM, Elana: Assessing Students’ Misclassifications of Physics Concepts: An Ontological Basis for Conceptual Change. In: *Cognition and Instruction* 13 (1995), Nr. 3, S. 373–400
- [Sel11] SELÇUK, Gamze S.: Addressing pre-service teachers’ understandings and difficulties with some core concepts in the special theory

- of relativity. In: *European Journal of Physics* 32 (2011), Nr. 1, S. 1–13
- [SKS⁺07] SEXL, Roman U. ; KÜHNELT, Helmut ; STADLER, Helga ; JAKESCH, Peter ; SATTLBERGER, Eva: *Physik 8 (2. Teil)*. 1. Auflage. Wien : Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, 2007
- [SKSJ99a] SEXL, Roman U. ; KÜHNELT, Helmut ; STADLER, Helga ; JAKESCH, Peter: *Physik 4*. 3. Auflage. Wien : öbv&htp GmbH & Co. KG, 1999
- [SKSJ99b] SEXL, Roman U. ; KÜHNELT, Helmut ; STADLER, Helga ; JAKESCH, Peter: *Physik 4*. 4. Auflage. Wien : öbv&htp Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 1999
- [SSV01] SCHERR, Rachel ; SHAFFER, Peter ; VOKOS, Stamatis: Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames. In: *American Journal of Physics* 69 (2001), Nr. S1, S. S24–S35
- [SSV02] SCHERR, Rachel ; SHAFFER, Peter ; VOKOS, Stamatis: The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. In: *American Journal of Physics* 70 (2002), Nr. 12, S. 1238–1248
- [Ste08] STEINER, Gerhard: *Lernen. 20 Szenarien aus dem Alltag*. 4., unveränderte Auflage, 1. Nachdruck. Bern : Verlag Hans Huber, 2008
- [SU92] SEXL, Roman U. ; URBANTKE, Helmuth K.: *Relativität, Gruppen, Teilchen. Spezielle Relativitätstheorie als Grundlage der Feld- und Teilchenphysik*. Dritte, neubearbeitete Auflage. Wien, New York : Springer-Verlag, 1992
- [SV07] STATHOPOULOU, Christina ; VOSNIADOU, Stella: Conceptual Change in Physics and Physics Related Epistemological Beliefs: A Relationship Under Scrutiny. In: VOSNIADOU, Stella (Hrsg.) ; BALTAS, Aristides (Hrsg.) ; VAMVAKOSSI, Xenia (Hrsg.): *Reframing the Conceptual Change Approach in Learning and Instruction*. Oxford, Amsterdam : Elsevier Science Ltd, 2007 (Advances in Learning and Instruction Series), S. 145–165

- [TD08] TREAGUST, David ; DUIT, Reinders: Conceptual change: a discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education. In: *Cultural Studies of Science Education* 3 (2008), Nr. 2, S. 297–328
- [Tre97] TREITZ, Norbert: *Brücke zur Physik*. 2., überarb. und erw. Aufl. Thun, Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch, 1997
- [TW92] TAYLOR, Edwin F. ; WHEELER, John A.: *SPACETIME – Introduction to Special Relativity*. Second edition. New York : Freeman & Co., 1992
- [TW00] TAYLOR, Edwin F. ; WHEELER, John A.: *Exploring Black Holes. Introduction to General Relativity*. San Francisco, Boston, New York, Capetown, Hong Kong, London, Madrid, Mexico City, Montreal, Munich, Paris, Singapore, Sidney, Tokyo, Toronto : Addison Wesley Longman, 2000
- [VA98] VILLANI, Alberto ; ARRUDA, Sergio M.: Special Theory of Relativity, Conceptual Change and History of Science. In: *Science & Education* 7 (1998), S. 85–100
- [VP87] VILLANI, A. ; PACCA, J. L. A.: Students' spontaneous ideas about the speed of light. In: *International Journal of Science Education* 9 (1987), Nr. 1, S. 55–66
- [WW96] WIESNER, Hartmut ; WODZINSKI, Ruth: Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In: DUIT, Reinders (Hrsg.) ; VON RHÖNECK, Christoph (Hrsg.): *Lernen in den Naturwissenschaften*. Kiel : IPN Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, 1996, S. 250–274