



Relativitätstheorie in der Schule

FLORIAN BERGER
flo.berger304@gmail.com

Zusammenfassung

Die Relativitätstheorie, als Kapitel der Physik, wird in der Schule und auf der Universität oft vernachlässigt. Wie Studien zeigen, bestehen bei vielen Schülerinnen und Schülern und auch Lehramtsstudentinnen und -studenten (Selçuk, 2010) erhebliche konzeptionelle Verständnisprobleme. In dieser Arbeit werden Argumente für die Notwendigkeit des Themas in der Schule vorgestellt. Zudem werden bekannte Schülervorstellungen und didaktische Empfehlungen für den Unterricht aufgezeigt, wobei die Literatur diesbezüglich dünn gesät ist. Mangels Studienergebnissen für die allgemeine Relativitätstheorie konzentriert sich die Arbeit vor allem auf Aspekte der speziellen Relativitätstheorie, die anhand von vier Schulbüchern hinsichtlich ihres Umfangs und Inhalts zu dem Thema untersucht werden.

1 Einleitung

Die Relativitätstheorie zählt zur „modernen“ Physik und ist daher gemeinsam mit der Quantenphysik und weiteren Erkenntnissen und Entdeckungen des 20. und 21. Jahrhunderts jener Bereich der Physik, der dadurch vergleichsweise spät Einzug in Schulen gehalten hat. Der vor rund 100 Jahren stattgefundenen Umbruch in der Physik war nicht zuletzt durch eine gewisse „Erschöpfung“ der Inhalte der klassischen Physik bedingt. Die Physik, die relativ direkt mit unseren Sinnen erfahrbar ist, wurde soweit adäquat beschrieben, dass sich damalige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dazu hinreißen ließen, die Physik als abgeschlossen zu erklären. Umgekehrt bedeutet das für die moderne Physik eine Verschiebung in eine theoretischere Beschreibung der Natur oder in Labore. Daraus resultiert jedoch eine gewisse Unnahbarkeit der Physik für Nichtphysiker und -physikerinnen. Dazu kommt, dass die gewonnenen Erkenntnisse der Relativitätstheorie oder auch der Quantenphysik in starkem Widerspruch zur Intuition stehen (z.B. Zeitdilatation). Zusätzlich zur erschwerenden Rechtfertigung der Alltagsrelevanz tritt dadurch auch noch eine neue kognitive Hürde beim Lernen auf.

Wie mit nachfolgenden Argumente aufgezeigt werden soll, lohnt sich eine Auseinandersetzung mit der Relativitätstheorie, da sie eben fundamental für das Verständnis der Natur ist.

2 Warum Relativitätstheorie?

Eine Begründung, warum Relativitätstheorie in der Schule gemacht werden sollte, muss auch klären, warum diesem Thema der Vorzug gegenüber einem anderen Thema gegeben werden

sollte. Da die Summe der Unterrichtseinheiten konstant bleibt, müssen Einsparungen in anderen Teilgebieten der Physik daher ein vertretbares Ausmaß annehmen.

Ein erstes Argument für die Wichtigkeit der Relativitätstheorie bezieht sich auf das Naturverständnis selbst, da diese Theorie einen Teil der Wirklichkeit beschreibt. Um zu verstehen, warum das Universum genau so ist, wie es ist, ist diese Theorie notwendig, andernfalls würden sich Widersprüche im Naturverständnis auftun. Leider reduziert sich der Wirkungsbereich der Theorie im Zusammenhang mit der Mechanik oder Elektrodynamik oft auf relativistische Korrekturen (d.h. man erachtet das Verständnis von Raum und Zeit im Sinne der Galilei-Transformation als richtig genug, um sich Abweichungen davon leisten zu können.) Für viele Beispiele ist das ein pragmatischer Ansatz, allerdings wird dabei auf ein anderes Verständnis von Raum und Zeit verzichtet. Ebenso wichtig wie die Quantenphysik im Mikrokosmos geworden ist, ist auch die Relativitätstheorie wichtig, um zu verstehen, welche Naturgesetze im Universum vorherrschen. Eine entsprechende Reduktion der klassischen Physik im Unterricht ist daher meist durch eine Reduktion von Inhalten machbar, wobei konzeptionell wenig verloren geht. Im Gegensatz dazu, eröffnet die Relativitätstheorie die Möglichkeit, neben Inhalten auch neue Denkweisen zu vermitteln.

Ein zweites Argument, das für den Einsatz der Relativitätstheorie im Schulunterricht spricht, hängt mit dem Verständnis von (Natur-)Wissenschaft zusammen. Neben der Vermittlung von Fachinhalten gebietet der österreichische Lehrplan auch eine Vermittlung des Modelldenkens

der Physik und ein Entwickeln von eigenen Modellvorstellungen (RIS, 2021). Der bereits angesprochene Umbruch zur Zeit der Jahrhundertwende bietet dafür eine ideale Gelegenheit, zu demonstrieren, wie neue Modellvorstellungen zu einem Aufschwung in der Wissenschaft geführt haben und die bekannte Physik erweitert wurde. Diesen Konzeptwechsel anhand einer neuen Theorie zu veranschaulichen, die Unzulänglichkeiten der alten Theorie aufzeigt und deren Gültigkeitsbereich einschränkt bzw. klar definiert, lässt sich selten so gut beschreiben wie mit der Relativitätstheorie. Der Modellcharakter der Wissenschaft kann dabei gut herausgearbeitet werden.

Ein drittes Argument für die Notwendigkeit einer Auseinandersetzung mit der Relativitätstheorie ist eine doch vorhandene Alltagsrelevanz. Diese meint einerseits technische Errungenschaften wie beispielsweise das GPS, andererseits aber auch den Bereich der Science-Fiction, der insofern alltagsrelevant ist, als dass im Medienkonsum dieses Genre bei Jugendlichen durchaus eine Rolle spielt. Wie auch die Newtonsche Mechanik oft nicht in vollem Ausmaß berücksichtigt wird, so lässt sich das noch mehr für die Relativitätstheorie feststellen. Um interstellare Strecken zu durchqueren, muss beispielsweise auf Wurmlöcher, Zeitreisen o.ä. zurückgegriffen werden, da die menschliche Lebensspanne hierfür nicht ausreicht. Dies führt zu Fehlvorstellungen über Raum und Zeit und der Beschaffenheit des Universums. Wenn der Physikunterricht diese Themen nicht aufgreift, so ist nicht die Wissenschaft prägend für die Vorstellungen über das Universum, sondern man überlässt das Feld ausschließlich Romanen und Science-Fiction-Filmen.

In allen Studien, die hier angeführt werden, berichteten die Schülerinnen und Schüler über ein außerordentlich hohes Interesse an den Themen der modernen Physik, insbesondere auch der Relativitätstheorie. Diesem Interesse entgegenzukommen mag auch ein weiteres Argument dafür sein, diese Themen stärker in den Fokus des Unterrichts zu rücken.

3 Relativitätstheorie in Schulbüchern

Der österreichische Lehrplan gibt über die Intensität bzw. Tiefe der Vermittlung der einzelnen Inhalte in Physik wenig Auskunft. So lautet die Vorgabe für die 12. Schulstufe des Realgymnasiums: „Konzepte der speziellen Relativitätstheorie, Grundidee der allgemeinen Relativitätstheorie“ und die des Gymnasiums nur: „Grundideen der

speziellen Relativitätstheorie“ (RIS, 2021). Innerhalb dieser groben Orientierung liegt eine tiefergehende Auseinandersetzung im Ermessen der jeweiligen Lehrkraft. Um abschätzen zu können, welcher Bedeutung diesem Thema beigemessen wird, wurden in vorliegender Arbeit vier Physikschulbücher der AHS-Oberstufe auf Inhalt und Umfang untersucht.

Folgende Titel wurden ausgewählt: Physik compact Basiswissen 8 (Nussbaumer, Nussbaumer & Zunzer, 2019), Big Bang Physik 8 (Apolin, 2019), Faszination Physik (Putz & Jahn, 2019) und Physik 8 (Sextl et al., 2019). Die Auswahl der Bücher erfolgte aufgrund ihrer Verfügbarkeit und Aktualität (d. h. Version) auf der Plattform Digi4school (Digi4School Bücherregal, 2021). Dort sind diese für jedermann, jederzeit zugänglich. Die Bücher sind sowohl für das Gymnasium als auch für das Realgymnasium geeignet; die BHS wurde in der Auswahl nicht berücksichtigt, um Vergleichbarkeit zu schaffen. Da zudem in vielen BHS Physik nicht als Einzelfach, sondern in Kombination mit anderen Naturwissenschaften unterrichtet wird, ist es schwierig abzuschätzen, welche Bedeutung der Relativitätstheorie in diesen Schulen beizumessen ist.

Die behandelten Aspekte der Relativitätstheorie sind in den gewählten Schulbüchern weitgehend ident und unterschieden sich vor allem im Grad der Tiefe.

In der speziellen Relativitätstheorie werden

- beide Postulate
- Zeitdilatation
- Längenkontraktion
- Relativität der Gleichzeitigkeit
- und das Verhalten von Masse

thematisiert. Vorangestellt werden in allen vier Schulbüchern historische Ansichten, die über die Äthertheorie und das Michelson-Morley-Experiment zur Entwicklung der Relativitätstheorie hinführen. Die Einbettung in den historischen Kontext greift dadurch das Modelldenken auf und bietet Möglichkeiten über den Charakter der Wissenschaft zu reden.

Aus der allgemeinen Relativitätstheorie, die in den Schulbüchern deutlich kürzer ausfällt, sind

- Äquivalenzprinzip
- Frequenzverschiebung im Gravitationsfeld
- Zeitmessung im Gravitationsfeld
- und Raumkrümmung

die relevantesten Aspekte, die von den Büchern aufgegriffen werden.

Auf Herleitungen wird hier allerdings verzichtet und die Mathematik findet nur durch präsentierte Formeln statt. Die Physik wird dabei vor

allem konzeptionell und phänomenologisch behandelt, was aber aufgrund der ansonsten notwendigen mathematischen Kenntnisse unumgänglich scheint. Bei der speziellen Relativitätstheorie hingegen wird die Mathematik auch z.B. bei der Herleitung der Zeitdilatation aus der Lichtuhr bemüht.

Bei den ausgewählten Büchern wurden jeweils die Anzahl der Seiten (S.) gezählt, die sich mit spezieller Relativitätstheorie (SRT) und allgemeiner Relativitätstheorie (ART) befassen. Die jeweiligen Werte werden dann ins Verhältnis zur jeweiligen Gesamtseitenzahl (% gesamt) der Buchinhalte gesetzt. Siehe dazu **Tab. 1**.

| Buch | SRT | ART | % gesamt |
|--------------------|-------|-------|----------|
| Big Bang Physik 8 | 34 S. | 16 S. | 39% |
| Faszination Physik | 30 S. | 10 S. | 29% |
| Physik 8 | 22 S. | 10 S. | 28% |
| Physik compact | 17 S. | 5 S. | 23% |

Tab. 1 – Anteil der Relativitätstheorie am Gesamtstoff der Schulbücher

Wie die Auswertung (**Tab. 1**) zeigt, nimmt die Relativitätstheorie einen gewichtigen Anteil in den Schulbüchern ein, teilweise als größtes Einzelkapitel. Innerhalb der Relativitätstheorie liegt der Schwerpunkt klar auf der speziellen Relativitätstheorie (SRT). In der 12. Schulstufe stehen reifepfungsbedingt weniger Wochenstunden zur Verfügung als in anderen Schulstufen. Trotzdem lässt sich bei 2h/Woche in der Maturaklasse ein ungefähres Stundenausmaß von 50 Gesamtschulstunden Physik ausmachen. Legt man die Inhalte der Bücher auf die Unterrichtseinheiten um, so können dem Thema, je nach Buch, rund 11-20 Unterrichtseinheiten gewidmet werden. Auch wenn diese direkte Umlegung aus verschiedenen Gründen nicht praxistauglich sein mag, so zeigt sie doch, dass genügend aufbereiteter Stoff aus den Schulbüchern zur Verfügung steht, um viele Stunden damit zu füllen. Wie viel Zeit tatsächlich in dieses Thema investiert wird, ist nicht bekannt. Die Praxiserfahrung aus dem schulischen Umfeld zeigt, dass zu bezweifeln ist, dass dieses Stundenausmaß auch ausgereizt wird.

4 Schülervorstellungen

Untersuchungen von Schülervorstellungen zum Zweck der besseren Schülerorientierung und Anpassen der didaktischen Aufbereitung im Unterricht sind für verschiedene Themen in der Physik verfügbar. Für die Relativitätstheorie

existiert bezüglich Schülervorstellungen allerdings sehr wenig Fachliteratur, und diese behandelt fast ausschließlich Aspekte der speziellen Relativitätstheorie, während man für die allgemeine Relativitätstheorie kein vielfältiges Angebot ausmachen kann. Würde man die Relevanz des Themas durch didaktische Materialien und Untersuchungen abschätzen wollen, so scheint die Abschätzung von 11-20 Unterrichtseinheiten zu hoch gegriffen. Diese Diskrepanz wirft die Frage auf, ob die Schulbücher ein nicht wahrgenommenes „Überangebot“ darstellen oder, ob der Stellenwert der Relativitätstheorie in der Didaktik nicht erkannt bzw. entsprechend gewürdigt wird. Wenn die Lehrkräfte dieses Angebot kaum wahrnehmen, so stellt sich die Frage, aus welchen Gründen sie das tun. Da in der universitären (Lehramts-)Ausbildung die Relativitätstheorie nur ein Randthema ist, liegt die Vermutung nahe, dass Lehrkräfte in Bezug auf dieses Thema nicht sicher und kompetent genug sind, um darin viel Zeit zu investieren (Villani & Pacca, 1987; Selçuk, 2010; Scherr, Shaffer & Vokos, 2002).

Schecker et al. (2018, S. 239) beschreiben zwei Fehlvorstellungen zur Relativitätstheorie:

- „Es gibt einen absoluten Raum, absolute Längen und eine absolute Zeit.“
- „Relativistische Effekte sind optische Täuschungen.“

Die Annahme der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als absolute Größe führt daher nicht zu einem prinzipiellen Akzeptanzproblem bei Schülerinnen und Schülern, allerdings die daraus folgende Zeitdilatation oder Längenkontraktion. Dass es kein ausgezeichnetes Inertialsystem gibt, ist auch leicht akzeptierbar, solange man die Physik nicht aus Sicht des anderen Bezugssystems erklären muss. Dass in einem bewegten System aus Sicht eines ruhenden Beobachters die Zeit langsamer vergeht, ist eigenartig genug. Wechselt man die Position in das bewegte System, ist die Situation ident und man muss eine Erklärung liefern, wie die Zeit aus Sicht von beiden beim jeweils anderen langsamer vergehen kann. Dabei kann die Relativität der Inertialsysteme geopfert werden, um die Frage zu stellen, wie die Zeit „wirklich“ vergeht und wer von den beiden Recht hat.

Führt man das Gedankenexperiment auf der Erde aus, wählen Schülerinnen und Schüler, wie auch Machold (1982) beschreibt, gern den Erdboden als absoluten Bezugspunkt. Bei konkreten Beispielen neigen Schülerinnen und Schüler daher dazu, die vorher leicht akzeptierten Postulate zugunsten einer absoluten Sicht aufzugeben

und einem der Beobachter „seine“ Physik abzu-erkennen. Eine andere Möglichkeit zur Lösung des Problems ist für Schüler und Schülerinnen, die relativistischen Effekte als optische Täuschungen abzutun, oder als nur die Messinstrumente (hier Uhren) betreffende Störungen zu erkennen, denn „in Wirklichkeit“ verginge die Zeit ja wie immer gleich.

Villani & Pacca (1987) untersuchten Vorstellungen über einige Aspekte der Relativitätstheorie auch bei Studenten, die mindestens einen BSc in Physik oder eine vergleichbare Ausbildung hatten. Dabei konnten auch Fehlvorstellungen festgestellt werden, beispielsweise die Wahl eines absoluten Bezugssystems oder die Reduktion der Ergebnisse zu Scheineffekten. Die Daten legen nahe, dass viel früher angesetzt werden müsste, um die Idee absoluter Bezugssysteme aus den Köpfen zu bringen: in der Mechanik. Auch in der Newtonschen Mechanik muss durch Wahl verschiedener Bezugssysteme die gleiche Physik gewährleistet sein, wobei meist das mathematisch einfachste Bezugssystem gewählt wird. Dies ist im Grunde aber eine willkürliche Wahl, die offenbar zu selten betont wird. Die Wahl unterschiedlicher Bezugssysteme zur Beschreibung der Physik, ist keine Erfindung Einsteins, jedoch werden in der Relativitätstheorie Fehlvorstellungen leichter offenbart. Bereits bei der Mechanik anzusetzen, kann Lernenden helfen, in der Relativitätstheorie weniger oft in Fallen zu tappen.

Borghi, De Ambrosis & Ghisolfi (1993), die ebenso dem Verständnis der klassischen Mechanik eine hohe Bedeutung zuweisen, machten auch Fehlvorstellungen zur relativistischen Masse fest, die aber nicht selten populärwissenschaftlich ebenso transportiert werden. Den Schülerinnen und Schülern dieser Studie fiel es schwer, zwischen der invarianten Ruhemasse und der relativistischen Energie zu unterscheiden und sie hatten Probleme das Bild einer geschwindigkeitsabhängigen Masse loszuwerden. Der deutsche Begriff der „relativistischen Masse“ ist hier insofern irreführend, als dass die Ruhemasse konstant bleibt, sich aber die Energie durch Wahl des Bezugssystems ändert. Fasst man „Masse“ intuitiv allerdings als bezugssystemunabhängiges Konzept auf (im Sinne einer Stoffmenge), gerät man in einen Konflikt, wenn sich die Masse alleine durch die Wahl des Bezugssystems ändern soll. Ebenso erstaunt waren die Schüler und Schülerinnen aus der Studie, dass sich Massen in der Relativitätstheorie nicht additiv verhalten.

In der Literatur zeigen manche Ergebnisse ein schnelles Akzeptieren von relativistischen Effekten, die aber auch daraus resultieren könnten, dass diese als Scheineffekte gesehen werden (Wittmann, 2012). Scherr, Shaffer & Vokos (2001) stellten beispielsweise bei Studentinnen und Studenten fest, dass sie die Relativität der Gleichzeitigkeit durch unterschiedlich lange Signallaufzeiten erklärten. Somit konnten sie ihren Anspruch an absoluter Gleichzeitigkeit der Ereignisse mit der Relativitätstheorie konsistent halten.

Selçuk (2010) fand in einer Untersuchung unter Lehramtsstudentinnen und -studenten bei einem Viertel Probleme beim Verständnis der Zeitdilatation. Auch wurde die Auffassung, dass die Längenkontraktion in allen drei Dimensionen und nicht nur in Ausbreitungsrichtung stattfindet, vertreten.

Dass Fehlvorstellungen nicht nur auf Schülerseite vorherrschen, mag ein Grund dafür sein, als Lehrperson dieses Thema zu meiden und im Wissen um die eigene Unsicherheit lieber andere Kapitel der Physik zu unterrichten. Wie Scherr et al. (2002) beschreiben, wurde bei vielen Lehramtsstudenten und -studentinnen nach der Begegnung mit Relativitätstheorie in Einführungskursen wenig funktionales Verständnis aufgebaut. Es scheinen also die erwähnten Schulbücher hinsichtlich der Menge an Inhalt, die sie der Relativitätstheorie im Vergleich zu anderen Themen der 12. Schulstufe einräumen, ein optimistisches Angebot zu stellen.

5 Unterrichtsansätze

Gerade bei einem Thema, das stark auf die Erklärungsqualität von Vortragenden setzen muss, weil die nicht intuitiven Inhalte kaum selbst so erarbeitet werden können, dass ein tieferes und vor allem korrektes Verständnis gewährleistet ist, ist eine selbstsichere Anwendung der Inhalte der Lehrpersonen notwendig. Da die Literatur Zweifel aufkommen lässt, ob diese sichere Anwendung von einem Großteil der Lehrpersonen bewältigt werden kann, ist die fachliche Ausbildung der wichtigste Ansatzpunkt. Es kann nämlich nicht davon ausgegangen werden, dass sich die betreffenden Personen die Inhalte im Selbststudium neben ihrer Unterrichtstätigkeit aneignen. Ebenso wäre es wünschenswert, wenn es in didaktischer Hinsicht mehr Untersuchungen gäbe. Da sich die hier untersuchte Literatur außerdem auf die spezielle Relativitätstheorie bezog, sollte die nicht weniger schwierig zu unterrichtende allgemeine Relativitätstheorie im

Schulunterricht auch etwas mehr Aufmerksamkeit bekommen, da Lehrpersonen, die gewillt sind, diese auch im Unterricht einzubauen, auf Materialien zurückgreifen können sollten. Die Schulbücher können angesichts der etwas stiefmütterlichen Behandlung der Relativitätstheorie als durchaus fortschrittlich betrachtet werden.

Durch die innere Logik der Theorie ist die Reihenfolge der einzelnen Inhalte in den Schulbüchern relativ ähnlich. Nichtsdestotrotz gibt es auch konkrete Empfehlungen der Literatur für einige Aspekte des Unterrichts, die das Verständnis erleichtern können. Borghi et al. (1993) entwickelten ein Unterrichtskonzept, das Schülerinnen und Schülern über zwei Jahre hinweg Relativitätstheorie vermittelte. Auf den durchschnittlichen Unterricht ist dies aufgrund der Zeitmenge so nicht übertragbar. Neben der fachlichen Expertise der Lehrkraft betonen die Autoren eine lebhaftige Diskussion und einen Austausch der Ideen und Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler in der Klasse. Da im Zuge dieses Unterrichts Elektrodynamik erst nach der Relativitätstheorie behandelt wurde, scheint es nicht unbedingt notwendig zu sein, dass das Thema in der letzten Schulstufe behandelt wird. Bei den Schülerinnen und Schülern, die zwischen 16 und 19 Jahre alt waren, war die Mechanik als Voraussetzung viel wesentlicher für das Verständnis. Um Schülern und Schülerinnen einen Grund zu geben sich auf die Relativitätstheorie einzulassen, scheint es zweckmäßig, einen überraschenden Widerspruch zu ihren klassischen Vorstellungen zu erzeugen, um die Notwendigkeit einer neuen Theorie zu erkennen. Dabei ist wichtig, darauf zu achten, dass diese Widersprüche nicht als Scheineffekte (z. B. optische Täuschung) abgetan werden können. Villani & Arruda (1998) betonen, dass man Unterschiede zwischen klassischer und relativistischer Physik unbedingt klar machen muss; ein historischer Bezug zum damaligen Konzeptwechsel in der Physik ist dafür sinnvoll. Hier ist wiederum gesichertes Wissen aus der Mechanik notwendig, denn wenn dieses nicht verinnerlicht ist, fällt es schwer, den Widerspruch und den Wert einer neuen Theorie zu erkennen (Wittmann, 2012).

Die oben erwähnte relativistische Masse, die zu Verständnisschwierigkeiten führen kann, lässt sich im Grunde auf die Behandlung der Trägheit in der Relativitätstheorie zurückführen. Über das zweite Newtonsche Axiom wird die Masse als Proportionalitätskonstante zu einer Bewegungsänderung ausgemacht und fungiert als Maß für die Trägheit des Körpers. Rückt man in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit, so ist eine

Bewegungsänderung, die die Trägheit eines Körpers überwinden muss, nicht mit der Ruhemasse allein verargumentierbar. Anstatt nun eine bezugssystemabhängige relativistische Masse einzuführen, kann alternativ mit der Energie oder dem Impuls argumentiert werden. Diese Größen enthalten beide den „Korrekturterm“

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

es leuchtet durch die enthaltene Geschwindigkeit aber deutlicher ein, dass sich Energie und Impuls mit Wahl des Bezugssystems verändern. Dies ist dann auch leichter begreifbar, wenn Schülerinnen und Schüler die Masse als Stoffmenge interpretieren, denn diese nimmt auch in der Relativitätstheorie nicht zu (Müller, 2013). Es kann, wie bei Hewson (1982) vorgeschlagen wird, auch hilfreich sein, den Fokus auf Ereignisse zu legen, die in allen Bezugssystemen dieselben sind, und daraus veränderte Abstände und Zeiten, je nach Betrachter, zu erhalten, statt die Physik von Beziehungen zwischen Objekten her zu denken.

Wittmann (2012) hat untersucht, ob es möglich ist, auch Unterstufenschülerinnen und -schülern (13- bzw. 14-Jährige) Relativitätstheorie so weit beizubringen, dass sie die Relativität der Gleichzeitigkeit verstehen können. Darauf aufbauend hat er ein Unterrichtskonzept entwickelt. Ebenfalls wurden Schülerinnen und Schüler dafür paarweise und nicht die gesamte Klasse auf einmal unterrichtet. Seinen Ergebnissen zufolge ist dies prinzipiell sehr wohl möglich, auch wenn man in diesem Zusammenhang die Freiwilligkeit und das Eigeninteresse der Schüler und Schülerinnen betonen muss. Trotzdem zeigte sich, eine gewisse kognitive Reife, die notwendig ist, um abstrakten Gedankengängen folgen zu können. Als Einstieg wurde eine Situation im Weltraum gezeigt, die die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse in Frage stellt und die Schülerinnen und Schüler unzufrieden zurücklassen sollte. Diese akzeptierten das Relativitätsprinzip und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, auch wenn sie einen absoluten Zeitbegriff hatten. Für die geringe Verwunderung bei den Postulaten macht Wittmann das geringe Verständnis der klassischen Kinematik verantwortlich, sodass sie den Widerspruch zur Newtonschen Physik so nicht erkennen können. Bedenken kamen zur Messgenauigkeit der Zeitmessung und zur Signallaufzeit; die Zeitdilatation war nicht mehr so einfach hinzunehmen. Durch den Fokus auf exakte, ideale Messgeräte für Zeit bzw. Längen konnte das Argument der Wahrnehmungstäuschung bei relativistischen Effekten abgeschwächt werden.

Wittmann betont auch, dass es den Schülern und Schülerinnen zuallererst sinnvoll erscheinen muss, eine Situation durch zwei verschiedene Betrachter zu beobachten, beispielsweise durch eine Situation, die einen Widerspruch zur klassischen Erwartungshaltung und damit Unzufriedenheit erzeugt. Die Gleichwertigkeit von Inertialsystemen wird zudem leichter akzeptiert, wenn kein System offensichtlich bevorzugt werden kann, wie beim Erdboden. Für erste Beispielsituationen empfiehlt sich diesbezüglich beispielsweise der Weltraum.

Aslanides & Savage (2013) entwickelten ein Concept Inventory für die spezielle Relativitätstheorie. Dieses testet u.a. das konzeptuelle Verständnis zu den beiden Postulaten, der Zeitdilatation, Längenkontraktion, Relativität der Gleichzeitigkeit und Geschwindigkeitsaddition in Form von 24 Multiple-Choice-Fragen. Dieses Testinstrument wurde für Studentinnen und Studenten entwickelt, dabei wurde auch gefragt, wie sicher sie sich bei ihren Antworten sind, um Schlüsse auf Fehlkonzepte zu ziehen. In adaptierter Form können die Fragen allerdings auch in der Sekundarstufe 2 angewendet werden, um das Verständnis der Schülerinnen und Schüler auszutesten. Für eine Leistungsbeurteilung sind allerdings teilweise zu wenig Antwortmöglichkeiten gegeben, da der Ratefaktor in der Studie durch die Frage nach Sicherheit bei Beantwortung des Tests nicht relevant war. Ebenso können die Fragen auch als Selbsttest für Physiklehrkräfte dienen, die Relativitätstheorie unterrichten wollen, aber nicht sicher sind, ob sie die Konzepte tatsächlich verstanden haben.

Eine weitere Empfehlung für den Unterricht gilt dem Spiel „A Slower Speed of Light“ (MIT Game Lab, 2012). Die kostenlose, digitale Simulation zur Relativitätstheorie setzt die Lichtgeschwindigkeit auf ein Maß herab, bei dem relativistische Effekte in einer erfahrbaren Größenordnung des Menschen liegen. Man steuert dabei aus Sicht der ersten Person eine Figur, die durch Sammeln von Punkten die Lichtgeschwindigkeit immer weiter herabsetzt. Die augenscheinlichsten Auswirkungen auf der Spielwelt sind die Längenkontraktion, die relativistische Dopplerverschiebung und die Aberration. Eine Verwendung oder Empfehlung des Spiels im Unterricht setzt dabei natürlich voraus, dass die letztgenannten Aspekte zuvor bereits besprochen wurden. Angesichts von Konzepten wie Zeitdilatation oder Längenkontraktion sind die relativistische Dopplerverschiebung und die Aberration aber gut mit der Intuition vereinbar und es sollten keine Hem-

mungen bestehen, den Schülerinnen und Schülern die Relativitätstheorie auch auf diese Weise erfahrbar zu machen.

6 Zusammenfassung

Aus den wenigen, vorhandenen Studien zur Relativitätstheorie geht klar hervor, dass nicht nur Schülerinnen und Schüler, sondern auch Lehrkräfte zum Teil wenig konzeptuelles Verständnis bei diesem Thema aufweisen. Es ist daher naheliegend, dass viele Lehrkräfte im Unterricht nur in geringem Ausmaß auf die Relativitätstheorie eingehen wollen und ihr andere Kapitel aus der Physik vorziehen. Die Schulbücher bieten viel Inhalt, aus dem man schöpfen kann. Durch den logischen Aufbau der Relativitätstheorie ist die Vorgehensweise und Reihenfolge der einzelnen Aspekte der Theorie unter den Schulbüchern weitgehend ident. Es ist nicht nur herausfordernd den Schülerinnen und Schüler die Inhalte zu vermitteln, sondern vor allem die Konzepte so zu erklären, dass sie sie tatsächlich verstehen können. Außerhalb der Schulbücher gibt es aber kaum weiteres didaktisches Material. Die allgemeine Relativitätstheorie wird innerhalb der Didaktikforschung nicht einmal in Ansätzen aufgegriffen. Da von Schülerseite außerdem ein hohes Interesse an der Relativitätstheorie vorhanden ist, ist es schade, dieses Feld weiterhin unbearbeitet zu lassen. Auch eine intensivere Auseinandersetzung in der Lehrerbildung mit dem Thema ist notwendig, um die nötige Festigung zu erreichen. Andernfalls ist zu erwarten, dass die Relativitätstheorie im Unterricht umgangen wird.

7 Literatur

- Apolin, M. (2019). *Big Bang Physik 8*. Wien: öbv.
- Aslanides, J. & Savage, C. (2013). Relativity concept inventory: Development, analysis, and results. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 9(1).
- Borghini, L., De Ambrosio, A., & Ghisolfi, E. (1993). *Teaching special relativity in high school*. In Third Misconceptions Seminar Proceedings.
- Digi4School Bücherregal. (2021). "Verein Schulbuch" zur Durchführung der Schulbuchaktion. <https://digi4school.at/openlibrary> (18.02.2021)
- Hewson, P. W. (1982). A case study of conceptual change in special relativity: The influence of prior knowledge in learning. *European journal of science education*, 4(1), 61-78.
- Machold, A. (1982). Schülervorstellungen vor und während des Unterrichts in spezieller Relativitätstheorie. *physica didactica*, 9(3/4), 175-189.
- MIT Game Lab (Entwickler). (2012). *A Slower Speed of Light* [Computerspiel].

- Müller, A. (2013). Relativistische Masse: Sinn oder Unsinn? *SciLogs*. <https://scilogs.spektrum.de/einsteins-kosmos/relativistische-masse-sinn-oder-unsinn/>. (18. 2. 2021)
- Nussbaumer, A., Nussbaumer, P. & Zunzer, S. (2019). *Physik compact Basiswissen 8*. Wien: öbv.
- Putz, B., Jahn, B. (2019). *Faszination Physik*. Linz: Veritas.
- RIS (2021). Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 08.03.2021. Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568> (18.02.2021)
- Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Berlin: Springer.
- Scherr, R. E., Shaffer, P. S., & Vokos, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics*, 69(S1), S. 24-S35.
- Scherr, R. E., Shaffer, P. S., & Vokos, S. (2002). The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70(12), 1238-1248.
- Selçuk, G. S. (2010). Addressing pre-service teachers' understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity. *European journal of physics*, 32(1).
- Sexl, R., Kühnelt, H., Stadler, H., Jakesch, P., & Sattlberger, E. (2019). *Physik 8*. Wien: öbv.
- Villani, A., & Arruda, S. M. (1998). Special Theory of Relativity, conceptual change and History of Science. *Science & Education*, 7(1), 85-100.
- Villani, A., & Pacca, J. L. D. A. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 9(1), 55-66.
- Wittmann, H. (2012). *Gleichzeitigkeit in der Relativitätstheorie – eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe I*. Dissertation, Universität Wien.