



universität  
wien

# DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Relativitätstheorie auf rein mechanischer Grundlage.  
Unterrichtskonzepte und didaktische Analyse“

verfasst von / submitted by

Tobias Sütterlin

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree  
of

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt / degree  
programme code as it appears on the student  
record sheet:

A 190 412 406

Studienrichtung lt. Studienblatt / degree  
programme as it appears on  
the student record sheet:

Lehramtsstudium UF Physik UF Mathematik

Betreut von:

Univ.-Prof. i.R. Dr. Romano Rupp

<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2. Der übliche Zugang zur Relativitätstheorie</b>	<b>5</b>
2.1 Sexl Physik 8	5
2.2 Physik Compact 8	6
2.3 Big Bang 8	7
2.4 Conceptual Physics	9
<b>3. Unterrichtsplanung</b>	<b>12</b>
3.1 Theoretische Grundlage	12
3.2 Didaktische Analyse	16
3.2.1 Schlüsselbegriffe	16
3.2.2 Grobziele	16
3.2.3 Warum sollen Schülerinnen und Schüler das lernen?	17
3.2.4 Elementare Grundideen	18
3.2.5 Sachstruktur und Unterrichtsideen	19
3.2.6 Mit welchen Lernendenvorstellungen ist zu rechnen?	19
3.2.7 Welche Interessen könnten SchülerInnen zu diesem Thema haben?	20
<b>4. Unterrichtsplanung</b>	<b>20</b>
4.1 Erste Einheit: Einführung	20
4.2 Zweite Einheit: Der Raum	24
4.3 Dritte Einheit: Die Zeit	31
4.4 Vierte Einheit: Galileisches Äquivalenzprinzip	36
4.5 Fünfte Einheit: Die Raum/Zeit-Konstante	40
4.6 Sechste Einheit: Lorentzgleichungen	48
4.7 Siebte Einheit: Zeitdilatation	51
<b>5. Lehrerfeedback</b>	<b>57</b>
5.1 Methode	57
5.2 Kann man die SRT so an der Schule unterrichten?	58
5.3 Verhilft dieser Ansatz zu einem tieferen Verständnis der SRT?	59
5.4 Vorteile darin die SRT nach diesem Ansatz zu unterrichten?	59
5.5 Ist das Thema gut strukturiert?	60
5.6 Ist die verwendete Mathematik zu kompliziert?	60
5.7 Ist die Aufbereitung des Themas zu abstrakt?	60
5.8 Wo sehen Sie noch Verbesserungsbedarf?	61
<b>6. Schlusswort</b>	<b>61</b>
<b>7. Literaturverzeichnis</b>	<b>64</b>
<b>8. Anhang</b>	<b>65</b>
8.1 Zusammenfassung	65
8.2 Abstract	65

## Danksagung

Ich möchte Barbara und Gregor für ihre Geduld, Fürsorge und Unterstützung beim Schreiben dieser Arbeit danken. Weiters natürlich auch meinem Betreuer Univ.-Prof. i.R. Dr. Romano Rupp für dessen freundliche Unterstützung und MMag. Amr Eldib, ohne dessen Feedback diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

# 1. Einleitung

Bei der Speziellen Relativitätstheorie handelt es sich didaktisch gesehen um einen besonderen Problemfall: Für viele Schülerinnen und Schüler ist es das erste Mal, dass der Inhalt des Physikunterrichts praktisch nicht mehr mit ihren Alltagserfahrungen übereinstimmt. Das Atom-Modell ist zwar im Alltag auch nicht sichtbar, bietet aber dennoch zumindest Antworten auf Fragen, die sich junge Menschen bereits stellen können: Wenn man einen Tropfen Wasser immer wieder in zwei Hälften spaltet, erhält man irgendwann einen unteilbaren Tropfen Wasser oder kann man, die entsprechenden Werkzeuge vorausgesetzt, beliebig kleine Wassertropfen erzeugen?

Diese besondere Stellung der Speziellen Relativitätstheorie mag ein Grund dafür sein, dass es bis jetzt noch keine vorgefertigten Unterrichtssequenzen zu diesem Thema gibt. Dies ist eine der Lücken, die ich mit dieser Diplomarbeit zumindest anfangen möchte zu schließen. Um mir einen Überblick über die üblichen Zugänge zur Relativitätstheorie zu verschaffen, habe ich zuerst recherchiert, wie vier verschiedene, repräsentative Oberstufen-Schulbücher das Thema aufbauen. Insbesondere geht es mir darum sicherzustellen, dass der besondere Ansatz, mit dem ich die Spezielle Relativitätstheorie erläutern möchte, nicht bereits von jemand anderem ausgearbeitet wurde. Bei den untersuchten Büchern handelt es sich um drei Werke des ÖBV-Verlags, die gemeinsam einen Großteil der in Österreich verwendeten Physikbücher darstellen. Die Bücherreihe "Sextl Physik 8" wird auf der Homepage des ÖBV-Verlags als "motivierend historisch-philosophisch"<sup>1</sup> bezeichnet. Es handelt sich um das Physikbuch aus der gegebenen Auswahl, das wohl am ehesten dem Bild eines klassischen Physikbuches gerecht wird. Der fachliche Anspruch ist relativ hoch und die Autoren scheuen auch vor langen, erläuternden Textpassagen nicht zurück. "Physik compact" hingegen wird als "verständlich, übersichtlich, kompetenzorientiert"<sup>2</sup> beschrieben und soll Physik möglichst

---

<sup>1</sup> Sextl Physik, Physik im größeren Zusammenhang, online unter <<https://www.oebv.at/sextl>> (10.07.2019)

<sup>2</sup> Physik compact, Physik compact und übersichtlich, online unter <<https://www.oebv.at/lehrwerke/physik-compact/information-0>> (abgerufen am 10.07.2019)

komprimiert und übersichtlich präsentieren, ohne auf philosophische oder historische Hintergründe einzugehen. Es handelt sich eher um ein Begleitbuch, das Themen zusammenfasst, als um ein eigenständiges Lehrbuch, mit dem sich Schülerinnen und Schüler im Zweifelsfall ein Thema selbstständig erarbeiten könnten. So ist es als Quelle für Gruppenarbeiten, Referate oder um verpasste Physikstunden nachzuholen, gänzlich ungeeignet. Beim letzten aufgelisteten ÖBV-Buch handelt es sich um "Big Bang", ein Physikbuch, das vor allem durch "Erklärungen in einfacher und verständlicher Sprache"<sup>3</sup>, sowie durch viele Beispiele aus den Bereichen Medizin und Sport überzeugen soll. Als viertes Werk analysiere ich "Conceptual Physics", von Paul G. Hewitt. Hierbei handelt es sich um ein amerikanisches Buch, das jedoch auch hierzulande ein hohes Ansehen genießt und in diversen fachdidaktischen Kursen der Universität Wien als Referenzwerk verwendet wird.

Dabei interessiert mich vor allem, wie verschiedene Grundideen eingeführt werden: Existenz einer Höchstgeschwindigkeit, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Zeitdilatation und Längenkontraktion. Wird das Galileische Äquivalenzprinzip eingeführt, das besagt, dass alle Bezugssysteme, die sich geradlinig und gleichförmig zueinander bewegen, zur selben Galilei-Klasse gehören? Auf der Grundlage welcher Axiome bzw. Postulate wird die Spezielle Relativitätstheorie hergeleitet?

Anschließend werde ich eine eigene Unterrichtssequenz vorstellen, die stark von der üblichen Herangehensweise abweichen sollte. Anstatt die Spezielle Relativitätstheorie in ihrer historischen Entwicklung zu betrachten, beabsichtige ich, sie konsequent aus der Mechanik heraus herzuleiten. Insbesondere soll klar werden, dass es sich bei der Speziellen Relativitätstheorie um eine mechanische Theorie handelt, in der dem Licht keine so herausragende Stellung zukommt, wie dies in einigen Lehrbüchern den Anschein erweckt. Außerdem soll betont werden, dass nur drei Annahmen reichen, um die Relativitätstheorie sauber herzuleiten: Die Homogenität des Raumes, die Homogenität der Zeit, sowie das Galileische Äquivalenzprinzip, welches besagt, dass alle Inertialsysteme gleichberechtigt sind. Die Grundlage dieses Konzepts ist das Skriptum zur Vorlesung "Physik-1" von

---

<sup>3</sup>Big Bang Oberstufe, Big Bang reloaded!, online unter <<https://www.oebv.at/big-bang-os>> (abgerufen am 10.07.2019)

Univ.-Prof. i.R. Dr. Romano Rupp. Der von mir vorgestellte Zugang mag etwas abstrakter sein als der übliche Zugang, die verwendete Mathematik kann aber von Schülerinnen und Schülern der entsprechenden Altersstufe durchaus verstanden werden.

Anschließend habe ich meine Arbeit einem derzeit im Beruf tätigen Physiklehrer vorgelegt, um in Erfahrung zu bringen, wie realistisch meine Ausarbeitungen sind, ob man sie im Unterricht verwenden kann und wo Verbesserungsbedarf besteht.

## 2. Der übliche Zugang zur Relativitätstheorie

### 2.1 Sexl Physik 8

Das Buch Sexl Physik 8 wird dem versprochenen historisch-philosophischen Ansatz gerecht: Die Einführung in die Spezielle Relativitätstheorie geschieht über die Äthertheorie. Es wird der Stand der Physik um 1900 dargelegt und es werden mehrere verschiedene Experimente erklärt, die durchgeführt wurden, um den Äther nachzuweisen. Das Michelson-Morley-Experiment wird im Detail erläutert. Es wird sogar eine Art modernes Michelson-Morley-Experiment anhand der internationalen Atomzeitskala TAI vorgestellt, indem gezeigt wird, dass Ätherwind-Effekte bei der weltweiten Synchronisation von Atomuhren ins Gewicht fallen müssten, was natürlich nicht der Fall ist. Auf Grundlage dieser Experimente tauchen nun die ersten beiden Postulate auf. Das Relativitätsprinzip, hier definiert als "Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt. Die Naturgesetze werden in allen Inertialsystemen durch dieselben Gleichungen beschrieben."<sup>4</sup>, sowie das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: "Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum hat stets den Wert  $c = 299792458$  m/s, unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters."<sup>5</sup> Es wird nicht erwähnt, dass die Lichtgeschwindigkeit die Maximalgeschwindigkeit für massebehaftete Teilchen, beziehungsweise für die Übertragung von Energie oder Information darstellt. Es folgt ein weitere historische Erläuterung darüber, dass Einsteins Zugang eigentlich die Elektrodynamik war und

---

<sup>4</sup> Sexl Physik 8, S. 10

<sup>5</sup> Sexl Physik 8, S. 10

nicht die Mechanik. Als Nächstes widmet sich das Buch dem Thema Zeit, sowie der Bedeutung von Gleichzeitigkeit. Darauf folgt, was man vermutlich als klassischen Aufbau der Relativitätstheorie bezeichnen kann: Synchronisation von Uhren, Zeitdilatation anhand einer Lichtuhr und schließlich Längenkontraktion, hergeleitet durch ein Gedankenexperiment, bei dem Beobachter mit synchronisierten Uhren die Länge eines vorbeifahrenden Bahnwaggon bestimmen sollen. Als Beispiel für die beiden Effekte werden die Myonen aus der Höhenstrahlung erläutert. Erst nun tauchen Galilei- und Lorentz-Transformationen auf, dabei werden ihnen zwei Seiten gewidmet - eine Seite weniger als dem Michelson-Morley-Experiment.

## 2.2 Physik Compact 8

Physik Compact 8 beginnt das Thema Relativitätstheorie ebenfalls historisch mit einem Zitat von Lord Kelvin über den Zustand der Physik im Jahre 1901. Das Buch ist jedoch deutlich kürzer gehalten, so wird das Michelson-Morley-Experiment erwähnt, jedoch nicht erläutert. Albert Einsteins Spezielle Relativitätstheorie wird als jene Theorie vorgestellt, welche die Beobachtungen des Michelson-Morley-Experiments als erste erklären konnte.

Statt auf lange, erläuternde Texte wie in Sexl Physik zu setzen, sind die Texte deutlich kürzer gehalten. Dafür gibt es viele Aufgaben für die Schülerinnen und Schüler. So werden sie dazu aufgefordert, das Michelson-Morley-Experiment zu beschreiben und das Versuchsergebnis zu interpretieren, obwohl das Experiment im Buch nicht erläutert wird. Die Schülerinnen und Schüler müssen also selber recherchieren. Es werden die beiden Prinzipien "Relativitätsprinzip" und "Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit" an den Anfang der Erläuterung der Relativitätstheorie gestellt. Das "Relativitätsprinzip" wurde in diesem Buch wie folgt formuliert: "Die Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen die gleiche mathematische Form an. Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt."<sup>6</sup> Das "Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit" wird formuliert als: "Die Geschwindigkeit des Lichts hat im Vakuum unabhängig vom Bewegungszustand von Quelle und Beobachter immer den selben (sic!) Wert  $c_0$ ."<sup>7</sup> Die Konsequenzen dieser beiden

---

<sup>6</sup> Physik Compact 8, S.15

<sup>7</sup> Physik Compact 8, S.15

Annahmen werden anschließend aufgelistet: Relativität der Gleichzeitigkeit, bewegte Uhren gehen langsamer, bewegte Maßstäbe sind kürzer, usw. Es folgt ein Kapitel über die Gleichzeitigkeit, das sich jedoch ebenfalls nur über eine Seite erstreckt und hauptsächlich aus Aufgaben, einem Gedankenexperiment und nur wenig Erläuterungen besteht. Darauf folgen zwei Seiten über Längenkontraktion und Zeitdilatation, als Beispiel dient wiederum die Myonenlebensdauer. Anders als in Sexl-Physik wird der relativistische Doppler-Effekt ebenfalls erläutert, wenn auch nur auf einer halben Seite. Den Lorentz-Transformationen werden dafür anschließend zwei Seiten gewidmet, wobei eine dieser Seiten fast zur Gänze aus erläuterndem Text und Formeln besteht. Das ist eine Seltenheit in diesem Buch, die möglicherweise der fundamentalen Stellung der Lorentz-Transformationen geschuldet ist. Allerdings werden sie auch hier erst relativ spät eingeführt und werden aus dem Relativitätsprinzip und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hergeleitet. Hierbei handelt es sich um die mathematisch anspruchsvollste Stelle in den bisher untersuchten Büchern. Nun folgt die Äquivalenz von Masse und Energie. Diese wird zu Beginn einfach postuliert und mit einem Beispiel unterfüttert. Auf einer weiteren Seite wird die Äquivalenz aus einem Gedankenexperiment hergeleitet, allerdings ist diese Herleitung als besonders schwer markiert. Nun werden noch die dynamische Masse, die relativistische Energie-Impuls-Relation und der Impuls von Photonen erläutert. Die verwendeten Herleitungen werden nur angedeutet, dennoch werden die Schülerinnen und Schüler dazu aufgefordert, sie selber nachzurechnen.

## 2.3 Big Bang 8

Big Bang 8 beginnt mit einem sehr ausführlichen Abschnitt über das Weltbild vor 1905. Angefangen beim geozentrischen Weltbild, zum heliozentrischen Weltbild und Keplers Planetenbahnen. Das galileische Äquivalenzprinzip wird über eine komplette Seite eingeführt, jedoch hier als "Klassisches Relativitätsprinzip" bezeichnet und wie folgt beschrieben: "Bei unbeschleunigten Bewegungen laufen mechanische Experimente normal ab."<sup>8</sup> Schließlich kommt das Buch zur Jagd nach dem Äther und

---

<sup>8</sup> Big Bang. Physik 8 (S. 39)

dem Michelson-Morley-Experiment. Insgesamt werden sieben Seiten darauf verwendet, nochmals zu wiederholen, wie sich das Weltbild bis 1905 entwickelt hat, bevor man zur Relativitätstheorie kommt. Interessanterweise wird in dem Buch argumentiert, dass Einstein in seinem Artikel zum photoelektrischen Effekt die Teilcheneigenschaften des Lichts zeigen konnte. Stellt man sich das Licht als Teilchen vor, ist es auch nicht mehr notwendig, den Äther zu verwenden, um zu erklären, wie das Licht das Vakuum durchqueren kann.

Die Relativitätstheorie wird hier als besonders elegant bezeichnet, da sie nur auf zwei Annahmen basiert: dem sogenannten "modernen Relativitätsprinzip" und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Ersteres wird in diesem Buch formuliert als: "Bei unbeschleunigten Bewegungen laufen alle Experimente normal ab."<sup>9</sup> Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird folgendermaßen erläutert: "Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist immer gleich groß. Sie ist unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle oder der Beobachters und beträgt rund  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ."<sup>10</sup> Es folgt ein kurzes Kapitel über optische Verzerrungen bei hohen Geschwindigkeiten. Schließlich geht es weiter mit Gleichzeitigkeit. Dabei werden altbewährte Beispiele verwendet: Uhrensynchronisation zwischen sich bewegenden Raumschiffen und fallengelassene Holzstäbe. Danach geht es, ganz wie in den anderen Büchern, weiter mit Zeitdilatation und Längenkontraktion, auch wenn in diesem Buch von "Zeitdehnung und Raumschrumpfung" die Rede ist. Obwohl die Bezeichnungen ungewöhnlich sind, ist die Herleitung durchaus typisch: Beide Effekte werden anhand einer bewegten Lichtuhr hergeleitet. An ebendiesem Beispiel wird bei dieser Gelegenheit auch hergeleitet, dass man Objekte nicht auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann und dass Photonen sich immer mit Lichtgeschwindigkeit bewegen müssen. Es werden sogar Tachyonen als Teilchen erwähnt, die sich theoretisch immer mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen, auch wenn die Existenz dieser Teilchen unwahrscheinlich ist.

In einem kurzen Abschnitt wird auf das Zwillingsparadoxon eingegangen. Die Erläuterung beschränkt sich jedoch darauf, dass in diesem Fall der Effekt der Zeitdilatation nicht symmetrisch ist, da der zurückkehrende Zwilling sich nicht in

---

<sup>9</sup> Big Bang. Physik 8 (S. 11)

<sup>10</sup> Big Bang. Physik 8 (S. 11)

einem Inertialsystem befindet, denn schließlich musste er irgendwann umkehren. Nun wird nochmals die Längenkontraktion erläutert, wie üblich werden Myonen als Beispiel herangezogen.

Das vorletzte Kapitel zum Thema Spezielle Relativitätstheorie lautet "Relativistische Masse und Energie". Hier wird die relativistische Massenzunahme am Beispiel eines gegen eine Wand fliegenden Raumschiffes hergeleitet. Der Effekt muss für einen stationären Beobachter derselbe sein wie für einen, der sich sehr schnell bewegt und für den sich die Uhren auf dem Raumschiff infolgedessen langsamer bewegen. Daraus wird geschlossen: "Bewegt sich ein Objekt relativ zu dir, so ist von dir aus gesehen seine Masse größer als in Ruhe. Diesen Effekt nennt man relativistische Massenzunahme."

In einem letzten Kapitel namens "Vertiefendes zur Speziellen Relativitätstheorie" werden relativistischer Dopplereffekt, relativistische Geschwindigkeitstransformation (hier unter dem Namen Geschwindigkeitsaddition) und Lorentz-Transformationen behandelt. Interessanterweise wird der wirkliche Kern der Speziellen Relativitätstheorie also eher wie ein Anhängsel an den Lehrstoff behandelt.

## 2.4 Conceptual Physics

Das Buch Conceptual Physics leitet das Thema Spezielle Relativitätstheorie auch mit dem Michelson-Morley-Experiment ein, jedoch etwas anders als die deutschsprachigen Bücher. Zu Beginn wird wiederholt, dass Bewegung relativ ist. Eine Person, die durch einen Zugwaggon geht, bewegt sich mit einem Kilometer pro Stunde relativ zum Zug aber vielleicht mit 100 Kilometern pro Stunde relativ zum Bahnhof. Das Michelson-Morley-Experiment wird dargestellt als der Versuch, ein absolutes Bezugssystem zu finden. Der Äther wird kurz erwähnt, aber spielt nicht ansatzweise dieselbe prominente Rolle wie zum Beispiel im Physikbuch von Sexl. Nun wird erläutert, dass Einsteins Theorie das Experiment erklären konnte. Es wird jedoch auch erwähnt, dass nicht klar ist, ob dieser überhaupt vom Michelson-Morley-Experiment beeinflusst wurde. Immerhin ging es bei Einsteins Überlegungen vorrangig um die Diskrepanz zwischen Newtonscher Mechanik und

den Maxwellgleichungen. Nun werden die üblichen zwei Postulate der Speziellen Relativitätstheorie vorgestellt, das Relativitätsprinzip: "All laws of nature are the same in all uniformly moving frames of reference."<sup>11</sup> und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: "The speed of light in free space has the same measured value for all observers, regardless of the motion of the source or the motion of the observer, that is, the speed of light is a constant."<sup>12</sup> Die Postulate werden hier einfach präsentiert, ohne tiefer auf ihre Herleitung einzugehen. Wie in den anderen Büchern auch, folgt ein Abschnitt über Gleichzeitigkeit. Der Effekt wird hier am Beispiel der Lichtausbreitung in einem Raumschiff besprochen, einmal von einem Beobachter im Raumschiff aus, dann von einem Beobachter, in dessen Bezugssystem sich das Raumschiff sehr schnell bewegt.

Nun folgt ein kurzes Kapitel über Raumzeit, in dem erläutert wird, dass jedem Objekt für eine vollständige Beschreibung vier Koordinaten zugewiesen werden müssen: Drei Raumkoordinaten und eine Zeitkoordinate. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass zwei Beobachter, welche sich relativ zueinander bewegen, durch Vergleich ihrer Messungen die Konstante  $c$  bestimmen können. Dabei wird jedoch nicht näher auf die Vorgehensweise eingegangen. Generell ist zu bemerken, dass bis hierhin keinerlei Formeln verwendet wurden. Es wurden Konzepte praktisch nur qualitativ anhand von Gedankenexperimenten vermittelt.

Das nächste Kapitel widmet sich der Zeitdilatation, die wie üblich anhand der Lichtuhr hergeleitet wird. Bei der Herleitung des  $\gamma$ -Faktors werden das erste Mal in diesem Abschnitt des Buches Formeln verwendet. Als dramatisches Beispiel für die Zeitdilatation dient das Zwillingsparadoxon, das hier sehr ausführlich, über mehrere Seiten hinweg, erläutert wird. Es folgt ein Kapitel über relativistische Geschwindigkeitstransformation (auch hier als Geschwindigkeitsaddition bezeichnet), die nicht hergeleitet, sondern einfach postuliert wird. In einem angehängten Kapitel wird erläutert, wie sich Zeitdilatation in ferner Zukunft auf die Raumfahrt auswirken könnte.

---

<sup>11</sup> Conceptual Physics, Tenth Edition, S. 689

<sup>12</sup> Conceptual Physics, Tenth Edition, S. 689

Erst danach wird die Längenkontraktion eingeführt, deutlich später als in den deutschsprachigen Büchern. Der gesamte Abschnitt ist erstaunlich kurz, die Längenkontraktion wird postuliert und mit drei Bildern sowie einem Limerick erörtert.

Dann folgt ein Kapitel über den relativistischen Impuls. Anders als in den deutschsprachigen Büchern wird ausgeführt, dass relativistische Teilchen einen höheren Impuls haben, als die Newtonsche Mechanik das voraussagt, nicht dass ihre Masse zunimmt. Dennoch ist der Abschnitt kurz: Der Effekt wird postuliert und es wird darauf hingewiesen, dass man ihn in Teilchenbeschleunigern beobachten kann. An dieser Stelle wird erläutert, dass der Impuls eines Teilchens gegen Unendlich strebt, wenn sich die Geschwindigkeit des Teilchens der Lichtgeschwindigkeit nähert. Anhand dieser Überlegung wird gezeigt, dass man ein massebehaftetes Teilchen nicht auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann.

Das vorletzte Kapitel widmet sich der Äquivalenz von Masse und Energie. Diese wird jedoch wiederum nur postuliert und anschließend werden die Konsequenzen der Gleichung erläutert. Es folgt ein letztes Kapitel über das Korrespondenzprinzip, in dem nochmals gezeigt wird, dass sich die relativistischen Gleichungen für kleine Geschwindigkeiten wie die Formeln der Newtonschen Mechanik verhalten.

Der Abschnitt über die Spezielle Relativitätstheorie schließt mit einem geschichtlichen Abschnitt über das Leben von Albert Einstein und einer Fragensammlung sowie Literaturvorschlägen für eine Vertiefung des Themas.

# 3. Unterrichtsplanung

## 3.1 Theoretische Grundlage

In meiner geplanten Unterrichtssequenz möchte ich die Konzepte der Speziellen Relativitätstheorie konsequent aus der Mechanik heraus entwickeln. Als theoretische Grundlage für dieses Konzept verwende ich das Skriptum "Romanos Physikkurs I" von Univ.-Prof. i.R. Dr. Romano Rupp. Um den eigentlich Ablauf der Unterrichtssequenz zu planen, erstelle ich zuerst eine didaktische Analyse des Themas "Spezielle Relativitätstheorie". Diese soll vor allem die Fragen beantworten:

- Warum soll das gewählte Thema unterrichtet werden?
- Was macht den Inhalt wichtig für die Schülerinnen und Schüler?
- Was können Schülerinnen und Schüler anhand der Inhalte innerfachlich lernen?
- Was können sie lernen, das über die Grenzen des Physikunterrichts hinaus weist?
- Welche Lernschwierigkeiten, besonders welche Alltagsvorstellungen, habe ich zu erwarten?
- Wie kann ich das Stoffgebiet geeignet in elementare Ideen aufbrechen und diese dann sinnvoll strukturieren?
- Welche konkreten Ziele für den Unterricht kann ich bestimmen?

Das Konzept des Aufbrechens eines Stoffgebiets in elementare Ideen entnehme ich dem "Modell der Didaktischen Rekonstruktion"<sup>13</sup>. Dabei handelt es sich um ein Modell zur Unterrichtsplanung: Ein Stoffgebiet soll in einer Sachanalyse in elementare Ideen (oder auch: tragende Grundbegriffe) zerlegt werden, die jeweils eine möglichst einfach formulierte, wichtige Aussage des Stoffgebiets enthalten.

---

<sup>13</sup>Reinfried, S., Mathis, C., Kattmann, U. (2009): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht - In: Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung 27 3, S. 404-414

Nachdem ein Stoffgebiet so aufgebrochen wurde, kann man sich überlegen, wie man den Ablauf des Unterrichts am besten strukturiert, um möglichst alle elementaren Ideen abzudecken.

Ich beabsichtige, auf diese Weise einzelne Einheiten herauszuarbeiten, die in der Unterrichtspraxis zwischen einer und drei Schulstunden umfassen und nach Möglichkeit jeweils ein bis zwei Ziele behandeln. Diese sollen konkret und überprüfbar sein, damit Lernerfolge auch festgestellt werden können. Die einzelnen Einheiten werde ich mithilfe der sogenannten 5E<sup>14</sup>- und 7E<sup>15</sup>-Konzepte planen. Innerhalb einer Einheit soll jeweils ein 5 bzw. 7E-Zyklus durchlaufen werden.

Ich möchte das 5E- beziehungsweise 7E Modell hier kurz erläutern: Es handelt sich um ein didaktisches Grundgerüst, das dabei helfen soll, eine Schuleinheit zu planen. Dabei wird der Aufbau eines Themas im einfachsten Fall in fünf Phasen eingeteilt, die alle eine bestimmte Funktion haben.

Eine Unterrichtssequenz beginnt mit einer Engage-Phase. Bei dieser soll die Aufmerksamkeit und Neugier der Schülerinnen und Schüler geweckt werden. Sie sollen aus ihren Pausengesprächen herausgeholt und in den Physikunterricht gebracht werden. Unter Umständen können in Engage-Phasen auch bereits Fehlvorstellungen der Schülerinnen und Schüler festgestellt werden. Typischerweise sind Engage-Phasen kurz, im Allgemeinen sollten sie nicht länger als fünf Minuten dauern. Üblich wäre zum Beispiel eine Demonstration, ein Bild oder Video oder ein kurzer Text, den die Schülerinnen und Schüler lesen sollen.

Es folgt die Explore-Phase. Hier soll Schülerinnen und Schülern eine Gelegenheit gegeben werden zu entdecken. Sie können also zum Beispiel einen Effekt untersuchen, ein gedankliches Modell entwerfen, Daten sammeln, Vorhersagen machen oder überprüfen. Dabei sollen eher Ideen und Konzepte gesammelt werden, als dass auf formale Korrektheit geachtet wird. In dieser Phase sollten eigentlich vor

---

<sup>14</sup> Bybee, R.W. (2009): The BSCS 5E instructional model and 21st century skills. CO: BSCS, Colorado Springs

<sup>15</sup> Eisenkraft, A. (2013): Expanding the 5E model: A proposed 7E model emphasizes “transfer of learning” and the importance of eliciting prior understanding. In: The Science Teacher, 70, 56-59.

allein die Schülerinnen und Schüler aktiv sein und die Lehrperson am besten nur betreuen bzw. begleiten.

In der nun folgenden Explain-Phase kommt die Lehrperson zum Zug. Sie kann in dieser Phase direkt Konzepte, Prozesse oder Ideen einfügen. Auch Fachtermini können an dieser Stelle von der Lehrperson eingebracht werden. Sie sollte richtige Vorstellungen bei den Schülerinnen und Schülern stärken und klarstellen. Fehlvorstellungen können in dieser Phase direkt angesprochen und korrigiert werden. Dabei sollte natürlich immer ein Zusammenhang mit den Aktivitäten aus der Engage- und Explore-Phase bestehen.

In der Elaborate-Phase sollen nun die Konzepte aus den vorangegangenen Phasen aus einem anderen Blickwinkel betrachtet werden. Schülerinnen und Schüler können das Gelernte so verallgemeinern und erhalten eine weitere Möglichkeit, eventuell noch immer vorhandene Fehlvorstellungen zu korrigieren. Die neue Situation soll im Optimalfall die Schülerinnen und Schüler dazu bringen, ihre Sichtweise zu erweitern und ihnen Möglichkeit bieten, ihr Verständnis zu vertiefen.

Die anschließende Evaluate-Phase dient der Sicherung des Lernertrags. Die Lehrperson kann auf verschiedene Arten formal oder informell testen, wie gut die Schülerinnen und Schüler verschiedene Konzepte verstanden haben. In dieser Phase kann überprüft werden, ob die jeweiligen Ziele der Lerneinheit erreicht wurden. Außerdem bietet die Evaluate-Phase eine Möglichkeit für die Schülerinnen und Schüler, selbst ihr Wissen und Können zu testen.

Bei dem 7E Modell handelt es sich um eine Erweiterung der 5E Modells. Einerseits wird die Engage-Phase aufgeteilt in die Elicit- und Engage-Phase, andererseits wird nach der Elaborate-Phase noch die Extend-Phase eingeführt.

In der Elicit-Phase soll vorhandenes Wissen aktiviert beziehungsweise wiederholt werden. Da Schülerinnen und Schüler neues Wissen auf Grundlage des bereits Bekannten konstruieren, ist es wichtig vor Beginn eines neuen Themas festzustellen, was die Schülerinnen und Schüler wissen. Diese Funktion ist eigentlich schon in der ursprünglichen Definition der Engage-Phase enthalten. Die Aufspaltung dieser sehr kurzen Phase in zwei gesonderte Phasen soll die Wichtigkeit der zwei Funktionen unterstreichen. Wenn in der Elicit-Phase das Vorwissen der Schülerinnen und

Schüler festgestellt wurde, kann die Engage-Phase vollständig dafür genutzt werden, ihre Aufmerksamkeit und Neugier zu wecken.

Die sogenannte Extend-Phase soll Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit geben, das Gelernte auch auf andere Wissensgebiete zu transferieren. In dieser Phase sind also vor allem fächerübergreifende Aufgaben anzusiedeln oder Aufgaben, in denen sie das in der Schule Gelernte auf Alltagssituationen transferieren müssen.

Obwohl diese Phasen einen "Standardablauf" besitzen, also Elicit, Engage, Explore, Explain, Elaborate, Extend, Evaluate, muss dieser nicht zwingend eingehalten werden, sondern kann an das Thema angepasst werden. So wird bei Eisenkraft 2003 eine Beispielstunde zum Thema Sicherheitsgurt vorgestellt, deren Ablauf wie folgt angegeben ist: Elicit, Engage, Explore, Explain, Engage, Explore, Explain, Elaborate, Evaluate, Extend.

Etwas problematisch ist in diesem Zusammenhang, dass das 5E Modell eher für die Sekundarstufe I entwickelt wurde. In diesen Schulstufen gibt es noch viele Möglichkeiten für Schülerinnen und Schüler, um tatsächlich selbst aktiv zu werden. Sie können sich zum Beispiel selbstständig kleinere Experimente ausdenken, sie durchführen oder anderweitig Daten sammeln. Solche Aktivitäten eignen sich besonders gut für die Explore-Phase, können jedoch ebenfalls in den anderen Phasen eingesetzt werden. Bei der Speziellen Relativitätstheorie handelt es sich jedoch um ein Oberstufenthema par excellence, das erst in der achten Klasse, also der 12. Schulstufe unterrichtet wird. Es gibt zu diesem Thema nur wenige Experimente oder andere Möglichkeiten für die Schülerinnen und Schüler praktisch zu arbeiten. Ich werde dennoch versuchen, die Vorgaben des 5E Modells so gut wie möglich zu befolgen.

## 3.2 Didaktische Analyse

### 3.2.1 Schlüsselbegriffe

Inertialsystem, Bezugssystem, Existenz einer Höchstgeschwindigkeit, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Zeitdilatation, Längenkontraktion, Galileisches Äquivalenzprinzip, Gleichzeitigkeit, Raumzeit, relativistische Geschwindigkeitstransformation

### 3.2.2 Grobziele

1. Die Schülerinnen und Schüler (im weiteren SuS) sollen erklären können, was ein Bezugssystem ist, sowie Beispiele für verschiedene Bezugssysteme nennen können.
2. Die SuS sollen erläutern können, was es bedeutet, dass der Raum homogen ist.
3. Die SuS sollen erläutern können, was es bedeutet, dass die Zeit homogen ist.
4. Die SuS können eine Definition dafür angeben, was "die Zeit" ist.
5. Die SuS sollen Effekte der Existenz einer Höchstgeschwindigkeit im Universum beschreiben können.
6. Die SuS sollen erläutern können, was es bedeutet, dass die Raum/Zeit-Konstante in allen Bezugssystemen denselben Wert annimmt.
7. Die SuS sollen den Effekt der Zeitdilatation in eigenen Worten erläutern können.
8. Die SuS sollen Beispiele nennen können, wo man Zeitdilatation beobachten kann.
9. Die SuS sollen das Galileische Äquivalenzprinzip erläutern können.
10. Die SuS sollen Beispiele dafür nennen können, wo man das Galileische Äquivalenzprinzip beobachten kann.
11. Die SuS sollen erklären können, was die Raumzeit ist.
12. Die SuS sollen den Wert der Raum/Zeit-Konstanten nennen können.

13. Die SuS sollen erklären können, wie das Meter sowohl früher als auch heutzutage definiert ist bzw. wurde.

### 3.2.3 Warum sollen Schülerinnen und Schüler das lernen?

- Gegenwart: Ohne Berücksichtigung der Speziellen Relativitätstheorie könnten Handys und Navigationsgeräte ihre Position anhand von GPS Satelliten nicht zuverlässig bestimmen. So spielt sie im Leben von uns allen, für viele unbemerkt, eine wichtige Rolle.
- Zukunft: Die Existenz einer Maximalgeschwindigkeit wird in Zukunft eine noch größere Rolle spielen. Raumsonden müssen autonom werden, da die Lichtlaufzeit zur Erde zu lange ist, um heikle Manöver von hier aus zu steuern.
- Wissenschaft: In der Wissenschaft ist die Spezielle Relativitätstheorie unter anderem als Vorstufe zur allgemeinen Relativitätstheorie wichtig, bei der es sich noch immer um ein aktives Forschungsgebiet handelt. Auch in der Elementarteilchenphysik spielt sie eine wichtige Rolle.
- Gesellschaft: Gesellschaftlich betrachtet ist die Spezielle Relativitätstheorie vielleicht besonders als ein Beispiel für einen klassischen Paradigmenwechsel interessant. Die Newtonsche Mechanik, die jahrhundertlang äußerst gut die Welt erklären konnte, stellte sich als ein Spezialfall der relativistischen Mechanik heraus. Erwarten uns in Zukunft noch weitere Paradigmenwechsel?
- Lehrplaneinordnung: 8. Klasse - Kompetenzmodul 7 <sup>16</sup>  
Relativitätstheorie: Konzepte der Speziellen Relativitätstheorie, Grundidee der allgemeinen Relativitätstheorie

---

<sup>16</sup> Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 29.04.2019, online unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568> (abgerufen am 01.09.2019)

### 3.2.4 Elementare Grundideen

- Die physikalischen Gesetze sind überall im Universum gleich.
- Die physikalischen Gesetze verändern sich nicht im Laufe der Zeit.
- Alle Bezugssysteme, die sich geradlinig und gleichförmig zueinander bewegen, sind relativ zueinander unbeschleunigt. Physikalische Phänomene laufen in ihnen ununterscheidbar gleich ab.
- Bei der nicht-relativistischen Geschwindigkeitsaddition von Galilei handelt es sich um einen Spezialfall des relativistischen Gesetzes der Geschwindigkeitstransformation für sehr geringe Geschwindigkeiten.
- Die Raum/Zeit Konstante besitzt einen Wert von  $c \approx 3,00 \cdot 10^8 m/s$ .
- Der genaue Wert der Raum/Zeit-Konstante wurde per Definition festgelegt.
- Die Längeneinheit Meter ergibt sich umgekehrt durch den per Definition festgelegten Wert von  $c$ .
- Die Raum/Zeit-Konstante hat in allen relativ zueinander unbeschleunigten Inertialsystemen denselben Wert.
- Die Raum/Zeit-Konstante ist eine Beschränkung für alle Geschwindigkeiten im Universum.
- Bewegte Uhren gehen langsamer.
- Ob zwei Ereignisse gleichzeitig geschehen oder nicht, hängt vom Beobachter ab. Es gibt keine allgemeingültige Antwort.
- Auf diesem Niveau reicht es festzuhalten, dass der Raum eine Art Behälter ist, in dem sich alle physikalischen Vorgänge abspielen.

### 3.2.5 Sachstruktur und Unterrichtsideen

#### 1. Einheit: Einführung

Was ist die Relativitätstheorie? Was sind ihre Grundideen? Wie ist das kommende Kapitel aufgebaut?

#### 2. Einheit: Der Raum

Der Raum ist homogen und isotrop. Was bedeutet das und was können wir daraus ableiten?

#### 3. Einheit: Die Zeit

Auch die Zeit ist homogen, was bedeutet das?  
Lokale Zeit, Uhrensynchronisation, Gleichzeitigkeit

#### 4. Einheit: Relativitätsprinzip

Was besagt das Relativitätsprinzip?

#### 5. Einheit: Die Raum/Zeitkonstante $c$

Axiome der Speziellen Relativitätstheorie, Geschwindigkeitstransformationen, Raum/Zeitkonstante  $c$

#### 6. Einheit: Lorentzgleichungen

Was sind die Lorentzgleichungen? Was sind Ereignisintervalle?

#### 7. Einheit - Zeitdilatation

Was ist Zeitdilatation?

### 3.2.6 Mit welchen Lernendenvorstellungen ist zu rechnen?

- „Es gibt einen absoluten Raum, absolute Längen und eine absolute Zeit.“
- „Relativistische Effekte sind optische Täuschungen.“<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Schecker, H., Duit, R., Wilhelm, T., Hopf, M. (2018): Schülervorstellungen Und Physikunterricht. Ein Lehrbuch Für Studium, Referendariat Und Unterrichtspraxis. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer Spektrum

### 3.2.7 Welche Interessen könnten SchülerInnen zu diesem Thema haben?

Die Spezielle Relativitätstheorie nimmt einen besonderen Platz in der Physik ein: Sie und die Quantenphysik läuten die moderne Physik ein.

## 4. Unterrichtsplanung

### 4.1 Erste Einheit: Einführung

Ziele dieser Einheit

- Die SuS sollen einen Überblick über das bevorstehende Thema erhalten, sowie eine Übersicht darüber, wie das Thema aufgebaut sein wird.

Elementare Grundideen

- Die Spezielle Relativitätstheorie befasst sich mit der Natur des Raumes und der Zeit.
- Albert Einstein ist der "Vater" der Speziellen Relativitätstheorie.

Unterrichtsvoraussetzungen

Die Schülerinnen und Schüler müssen praktisch keine Voraussetzungen für diese Einheit mitbringen. Es geht in ihr hauptsächlich darum, ihnen einen Überblick über das Thema zu verschaffen. Da sie in der Explore-Phase jedoch recherchieren sollen, ist es wichtig, dass sie ausreichend Material für die Recherche haben. Ihnen sollten also ihre Handys, eine Auswahl an Physikbüchern oder die Schulbibliothek zur Verfügung stehen. Wenn die gesamte Klasse im selben Schulbuch "recherchiert", erfüllt das schließlich nicht den Anspruch einer Recherche-Aufgabe. Auch werden die Schülerinnen und Schüler so andere Herangehensweisen als die hier vorgeschlagenen vorfinden. Dadurch bietet sich eine Gelegenheit, zu lernen mit Quellen kritisch umzugehen, sei es aus dem Internet oder der Schulbibliothek.

## Phasenverlauf

Phase	Thema	Dauer
Engage	Albert Einstein	~10 Minuten
Explore	Recherche: Was ist die Spezielle Relativitätstheorie	~30 Minuten
Explain	Wie werden die kommenden Stunden strukturiert sein?	~10 Minuten

### Engage

Dauer: Ungefähr 10 Minuten

Ablauf: Der Sinn einer Engage-Sequenz ist es, die Aufmerksamkeit und Neugierde der Schülerinnen und Schüler zu erregen. Da es sich um die erste Einheit handelt, nutzen wir sie auch, um die Schülerinnen und Schüler generell auf das Thema "Spezielle Relativitätstheorie" vorzubereiten, sowie ihr Vorwissen zu erkunden. Zu Beginn zeigen wir den Schülerinnen und Schülern ein Bild von Albert Einstein<sup>18</sup>. Anschließend stellen wir den Schülerinnen und Schülern Fragen, deren Antworten wir nach Möglichkeit an der Tafel sammeln:

Wer ist das? (Albert Einstein)

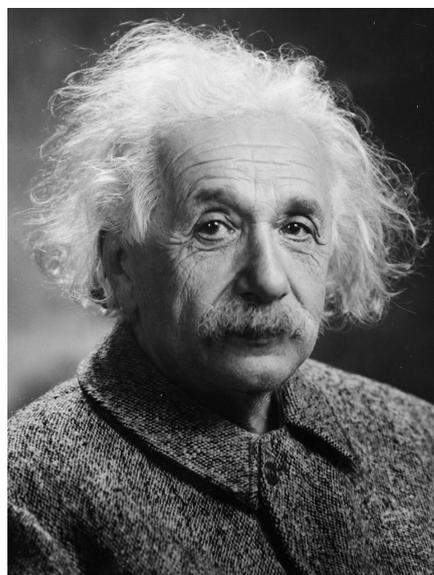
Wann hat er gelebt? (1879 - 1955)

Wofür ist er bekannt? (Relativitätstheorie)

Was wisst ihr über die Relativitätstheorie?

Was glaubt ihr, warum er so bekannt ist?

In dieser Sequenz möchten wir herausfinden, was die Schülerinnen und Schüler bereits wissen, sowie herausarbeiten, dass es sich bei



<sup>18</sup> Photograph by Orren Jack Turner, Princeton, N.J., No known restrictions.

der Speziellen Relativitätstheorie um eine der wichtigsten Theorien der modernen Physik handelt. Sie ist so wichtig, dass sogar jedes Schulkind weiß, wer Albert Einstein ist. Ein derartiger Unterrichtseinstieg wäre zum Beispiel mit Niels Bohr oder Max Planck nicht möglich.

Wir können auch thematisieren, wie alt Albert Einstein war, als er die Spezielle Relativitätstheorie gefunden hat. Eigentlich war er verhältnismäßig jung, etwa acht Jahre älter als die Schülerinnen und Schüler in der Klasse. Dennoch zeigen ihn die bekanntesten Bilder als alten Mann. Bedeutet dies, dass wir eine Person nur dann als Autorität und somit für den Physikunterricht glaubwürdiger wahrnehmen, wenn es sich bei seinem Foto anstatt des Bildes eines jungen Mannes um das eines älteren, seriös wirkenden Herren handelt?

Möglicherweise fallen bereits Fachbegriffe, die wir betonen und darauf verweisen können, dass die Schülerinnen und Schüler später lernen werden, was diese genau bedeuten. Sehr wünschenswert wäre es, wenn Begriffe wie Raum oder Raumzeit fallen, aber es ist nicht notwendig.

## Explore

Dauer: Ungefähr 30 Minuten

Ablauf: Die Schülerinnen und Schüler erhalten nun den Auftrag in Zweierteams zu recherchieren, was die Kernaussagen der Relativitätstheorie sind. Sie können dafür Bücher, die Schulbibliothek oder ihre Handys benutzen. Der Ausflug in die Schulbibliothek unterstreicht den Entdeckungs-Charakter dieser Phase, kann aber natürlich viel Zeit kosten. Das Internet hingegen ist zwar eine Quelle, mit denen die Schülerinnen und Schüler sehr vertraut sind, die jedoch nicht immer fachlich korrekt ist. Daher würde es sich anbieten, dass die Lehrperson eine Auswahl an unterschiedlichen Lehrbüchern mit in die Klasse bringt, welche die Schülerinnen und Schüler verwenden können.

Nachdem sie ungefähr zehn Minuten Zeit für die Recherche hatten, müssen die Zweierteams ihre Erkenntnisse nacheinander vortragen. Dabei sollen sie die wichtigsten Aussagen, die sie gefunden haben, an die Tafel schreiben.

Anschließend werden die so gesammelten Aussagen der Schülerinnen und Schüler in die folgenden Kategorien eingeteilt:

Raum Hier zum Beispiel Aussagen wie: "Der Raum ist unendlich weit ausgedehnt."
Zeit Hier zum Beispiel: "Die Zeit ist unendlich." oder "Alle Zeitpunkte sind gleichberechtigt."
Äquivalenz von Bezugssystemen Hier zum Beispiel: "Alle Bezugssysteme sind gleichberechtigt."
Die Raum/Zeit-Konstante $c$ Hier zum Beispiel: "Die Raum/Zeit-Konstante hat in allen Bezugssystemen denselben Wert." oder " $c$ ist die größtmögliche Geschwindigkeit."
Koordinatentransformation Hier zum Beispiel: "Mithilfe der Lorentz-Transformation kann man die Betrachtungsweise zwischen verschiedenen Bezugssystemen wechseln."
Beobachtbare Effekte der Speziellen Relativitätstheorie Hier zum Beispiel: "Bewegte Uhren gehen langsamer."

## Explain

Dauer: Ungefähr 10 Minuten

Ablauf: Nun kann die Lehrperson einige Anmerkungen zu den gesammelten Aussagen treffen. Es ist zu beachten, dass die Schülerinnen und Schüler mit Sicherheit herausfinden werden, dass  $c$  häufig "Lichtgeschwindigkeit" genannt wird. Oder dass es sich bei der Aussage "Die Lichtgeschwindigkeit ist in allen Bezugssystemen gleich." um ein Postulat der Speziellen Relativitätstheorie handelt. Die Lehrperson sollte an dieser Stelle direkt festhalten, dass wir  $c$  die

Raum/Zeit-Konstante nennen werden und dass es sich bei  $c$  um keine Geschwindigkeit handelt, da Geschwindigkeiten vektorielle Größen sind,  $c$  jedoch ein Skalar ist. Außerdem werden wir zeigen, dass man auf das Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verzichten kann. Sie ergibt sich von selbst aus der Annahme, dass alle Bezugssysteme gleichberechtigt sind.

Die Schülerinnen und Schüler sollen die so entstandene Tabelle in ihr Heft übertragen, sie wird als Überblick für das kommende Thema fungieren.

## 4.2 Zweite Einheit: Der Raum

Ziele dieser Einheit:

- Die SuS sollen erläutern können, was es bedeutet, dass der Raum homogen ist.
- Die SuS können eine Definition dafür angeben, was "der Raum" ist.

Elementare Grundideen

- Die physikalischen Gesetze sind überall im Universum gleich.
- Auf diesem Niveau reicht es festzuhalten, dass der Raum eine Art Behälter ist, in dem sich alle physikalischen Vorgänge abspielen.

Unterrichtsvoraussetzungen

Da es sich um eines der Einführungskapitel handelt, sind nur wenige Voraussetzungen für die ersten Phasen nötig. Für die Elaborate-Phase ist es notwendig, dass die Schülerinnen und Schüler verstehen was ein Fadenpendel ist, wie man die Schwingungsdauer eines Fadenpendels berechnet und, damit verbunden, wovon diese abhängt. In diesem Zusammenhang muss natürlich auch bekannt sein, was die Erdbeschleunigung ist und wovon sie abhängt. Das heißt, dass es sich um einen Sonderfall der Fallbeschleunigung handelt, die

näherungsweise auf der Erdoberfläche überall gleich ist, auf anderen Planeten jedoch einen anderen Wert annehmen wird.

Schwingungsdauer eines Fadenpendels:

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

## Phasenverlauf

Phase	Thema	Dauer
Engage	Beobachtungen von weit entfernten Sternen: Können wir voraussetzen, dass die Naturgesetze Lichtjahre von uns entfernt dieselben sind wie hier auf der Erde?	~15 Minuten
Explore	Was ist der Raum?	~15 Minuten
Explain	Der Raum als Behälter für physikalische Vorgänge	~15 Minuten
Elaborate	Der Raum ist homogen.	~30 Minuten
Evaluate	SuS sollen beschreiben was Homogenität bedeutet.	~10 Minuten

## Engage

Dauer: Ungefähr 15 Minuten

Ablauf: Den Schülerinnen und Schülern wird, zum Beispiel mithilfe eines Beamers, folgendes Bild gezeigt:



Nachdem den Schülerinnen und Schülern etwa eine Minute Zeit gegeben wurde, um das Bild zu studieren, besprechen wir es in der Klasse. Was sehen die Schülerinnen und Schüler? Offensichtliche Antworten sind zum Beispiel: Ein Satellit, ein Raumschiff, Sterne, ein Planet, die Erde. Es ist unwahrscheinlich, aber nicht unmöglich, dass einer der Schülerinnen und Schüler den Satelliten anhand seiner charakteristischen Form erkennt. Es handelt sich um das Kepler Weltraumteleskop. Falls eine Schülerin oder ein Schüler den Satelliten erkennt, kann er oder sie vielleicht auch sagen, wofür er bekannt ist, ansonsten sagt es die Lehrperson: Mit Hilfe des Kepler Weltraumteleskops wurden über 2500 Exoplaneten entdeckt. Also Planeten, die um andere Sterne als die Sonne kreisen.

Kepler beobachtet dafür einen Stern über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Wenn dieser plötzlich dunkler wird, kann man davon ausgehen, dass ein Planet die Sichtlinie zwischen Satellit und Stern kreuzt. Aus der Abnahme der Helligkeit können Wissenschaftler berechnen, wie groß der Planet sein muss. Indem man das Licht

---

<sup>19</sup> Seite „Kepler space telescope“. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia.. Bearbeitungsstand: 15. September 2019, 12:45 UTC. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kepler\\_space\\_telescope](https://en.wikipedia.org/wiki/Kepler_space_telescope) (Abgerufen: 15.11.2019)

untersucht, das die Atmosphäre des Planeten durchquert hat, kann man sogar feststellen, ob sich in dieser vielleicht Wasserdampf oder andere interessante Substanzen befinden.

Nun sollte die Lehrperson die entscheidende Frage stellen: Können wir das wirklich? Wer sagt uns eigentlich, dass die Naturgesetze sich in mehreren Lichtjahren Entfernung genauso verhalten wie hier auf der Erde? Vielleicht funktionieren so weit entfernte Sterne ganz anders? Wer sagt uns, dass sich diese Planeten genauso auf Ellipsenbahnen bewegen wie die die Planeten in unserem Sonnensystem? Genau damit wollen wir uns in dieser Einheit beschäftigen.

## Explore

Dauer: Ungefähr 15 Minuten

Ablauf: Wir wollen erkunden was die Spezielle Relativitätstheorie ist. Dafür wollen wir uns mit den Überlegungen vertraut machen, welche die Grundlage für die Spezielle Relativitätstheorie bilden. Die erste Frage, die es zu klären gilt lautet: Was ist "Der Raum"?

Während der Explore-Phase sollen Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit erhalten, gemeinsam zu arbeiten, kreativ zu denken, sowie Aufzeichnungen über ihre Ideen und Beobachtungen zu machen. Ihr Arbeitsauftrag lautet, sich zu überlegen, wie sie die Frage "Was ist 'Der Raum'?" beantworten würden. Diese Aufgabe wird nach der Think-Pair-Share-Methode bearbeitet: Die Schülerinnen und Schüler erhalten erst einige Minuten, um alleine über die Aufgabe nachzudenken, dann sollen sie in kleinen Gruppen von 2-3 Schülerinnen und Schülern ihre Antworten besprechen und sich auf eine Gruppenantwort einigen. Anschließend werden die Gruppenantworten geteilt, also laut vorgelesen und an der Tafel gesammelt.

## Explain

Dauer: Ungefähr 15 Minuten

Ablauf: Es folgt eine Erläuterung durch die Lehrkraft an der Tafel, dabei sollten zumindest die hier hervorgehobenen Textstellen von den Schülerinnen und Schülern notiert werden.

**Der Raum ist eine Art Behälter in dem sich alle physikalischen Vorgänge abspielen.** Sowohl in der Physik als auch in der Mathematik beschreiben wir den Raum durch Koordinatensysteme. Durch Koordinaten wird beschrieben, wo im Raum sich ein bestimmtes Objekt befindet. In einfachen Fällen kann eine einzelne Koordinate reichen, für kompliziertere Fälle verwenden wir zwei- oder dreidimensionale Koordinatensysteme.

**Eines der grundlegenden Postulate der Physik ist, dass der Raum homogen ist. Das bedeutet, dass es physikalische Gesetze gibt, die überall im Universum genauso gelten wie in unserem Klassenraum.** Das erscheint plausibel, aber ob die Gesetze der Physik wirklich auf jedem Planeten in jeder noch so weit entfernten Galaxie genauso sind wie hier auf der Erde, konnte natürlich bisher noch nicht überprüft werden. Man könnte also sagen, dass es sich bei der Annahme der Homogenität um eine Art Glaubensaussage der Physik handelt.

## Elaborate

Dauer: Ungefähr 30 Minuten

Ablauf: In der nächsten Phase führen wir mit den Schülerinnen und Schülern zusammen ein Gedankenexperiment durch. Dies sollte im Optimalfall in Gruppenarbeit geschehen, kann bei leistungsschwächeren Klassen aber auch

gemeinsam mit der Lehrkraft als Klassengespräch durchgeführt werden, falls sich die Schülerinnen und Schüler sonst überfordert fühlen.

Die Aufgabenstellung lautet wie folgt:

Wir betrachten zwei identische Fadenpendel, bestehend jeweils aus einem Massestück an einem 1 m langen Faden. Eines der beiden Pendel steht auf der Erde, das andere auf dem Mars. Unabhängig von der Auslenkung beträgt die Schwingungsdauer des Pendels auf der Erde 2,01 s. Das identische Pendel auf dem Mars schwingt jedoch mit einer Periodendauer von 3,26 s. Wie lässt sich das erklären, wenn die Pendel identisch sind und wir doch angenommen haben, dass es keinen Unterschied macht, wo im Raum wir ein Experiment durchführen?

Den Schülerinnen und Schülern haben fünf Minuten Zeit, um das Problem in der Gruppe zu besprechen. Anschließend folgt eine gemeinsame Besprechung: Wovon hängt die Periodendauer eines Pendels ab?

Vereinfacht hängt die Periodendauer eines Fadenpendels nur von der Länge des Fadens sowie der Schwerebeschleunigung ab. Die Formel für die Schwingungsdauer eines Fadenpendels haben die Schülerinnen und Schüler schon gelernt, aber man kann wohl nicht davon ausgehen, dass sie diese abrufbereit haben. Daher können die Schülerinnen und Schüler die entsprechende Formel recherchieren, so sie es noch nicht selbständig in den fünf Minuten, die sie zum Besprechen des Problems hatten, erledigt haben. Ihre Unterlagen, Physikbücher, aber auch das Internet, so die Schülerinnen und Schüler ihre Handys im Unterricht benutzen dürfen, sind legitime Quellen. Die gesuchte Formel lautet:

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Sobald diese Formel bekannt ist, muss wiederholt werden, wofür es sich bei  $g$  handelt: offensichtlich um die Erdbeschleunigung. Der Wert von  $9,81 \frac{m}{s^2}$

sollte bekannt sein, kann aber wahrscheinlich nicht vorausgesetzt werden. Doch wie verhält es sich mit  $g$  auf dem Mars? Eine kurze Recherche im Internet zeigt: Die Fallbeschleunigung auf dem Mars, sozusagen die Marsbeschleunigung, beträgt  $3,72 \frac{m}{s^2}$ .<sup>20</sup> An dieser Stelle sollte man nochmals kurz wiederholen, wovon diese Zahl abhängt. Also warum ist  $g_2 < g_1$ ? Und was kann uns das über die Größe des Mars im Vergleich zur Erde sagen?

Überprüfen wir die jeweilig angegebenen Zahlen auf der Tafel:

Pendel 1:

$$l_1 = 1 \text{ m}, m_1 = 1 \text{ kg}, g_1 = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

Periodendauer auf der Erde:

$$t_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l_1}{g_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{1 \text{ m}}{9,81 \frac{m}{s^2}}} = 2,01 \text{ s}$$

Pendel 2:

$$l_2 = 1 \text{ m}, m_2 = 1 \text{ kg}, g_2 = 3,72 \frac{m}{s^2}$$

Periodendauer auf dem Mars:

$$t_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l_2}{g_2}} = 2\pi \sqrt{\frac{1 \text{ m}}{3,72 \frac{m}{s^2}}} = 3,26 \text{ s}$$

Wie verträgt sich das mit der Homogenität des Raumes?

**Die Homogenität des Raumes besagt nicht, dass alle Experimente dasselbe Ergebnis liefern, egal wo sie durchgeführt werden, sondern dass die Gesetze der Natur überall im Universum dieselben sind.**

Unser Gedankenexperiment widerspricht der Homogenität also nicht. Im Gegenteil, denn wir sehen: Sowohl auf der Erde als auch auf dem Mars kann die Bewegung des Pendels durch dieselbe Formel beschrieben werden.

---

<sup>20</sup> Hirt, C., Claessens, S. J., Kuhn, M., Featherstone, W. E. (2012): Kilometer-resolution gravity field of Mars: MGM2011 In: Planetary and Space Science. 67 (1): 147–154.

## Evaluate

Dauer: Ungefähr 10 Minuten

Ablauf: Die Schülerinnen und Schüler sollen jeweils auf einem Zettel zusammenfassen: Was ist der Raum und was bedeutet, dass er homogen ist?

### 4.3 Dritte Einheit: Die Zeit

#### Ziele dieser Einheit

- Die SuS sollen erläutern können, was es bedeutet, dass die Zeit homogen ist.
- Die SuS können eine Definition dafür angeben, was "die Zeit" ist.

#### Elementare Grundideen

- Zeit ist das, was Uhren messen.
- Die Zeit ist homogen.
- Die Homogenität der Zeit bedeutet, dass es egal ist, wann eine Uhr gestartet wurde, sie funktioniert unter denselben äußeren Umständen immer gleich.

#### Unterrichtsvoraussetzungen

Wieder ist für die ersten Phasen wenig Vorwissen der Schülerinnen und Schüler notwendig. Für die Elaborate-Phase sollten die Schülerinnen und Schüler jedoch wissen, dass es in anderen Ländern andere Kalender gibt, insbesondere dass es in China einen traditionellen Kalender gibt, der über viele Jahrhunderte verwendet wurde.

## Phasenverlauf

Phase	Thema	Dauer
Engage	Verschiedene Arten von Uhren.	~5 Minuten
Explore	Zeit ist das, was Uhren messen.	~15 Minuten
Explain	Auch die Zeit ist homogen.	~15 Minuten
Elaborate	Uhrensynchronisation	~20 Minuten
Evaluate	Rechenbeispiel Uhrensynchronisation: Reise nach Vulkan	~20 Minuten

### Engage

Dauer: Ungefähr 5 Minuten

Ablauf: Zu Beginn des nächsten 5E-Zyklus werden den Schülerinnen und Schülern drei Objekte vorgelegt: Ein Pendel oder Metronom, eine brennende Kerze, eine Sanduhr und eine Armbanduhr.

Die Frage an die Schüler lautet nun: Was haben diese drei Objekte gemeinsam?

Die Antworten der Schülerinnen und Schüler werden gesammelt und nach Möglichkeit kurz besprochen. Im Optimalfall sollten die Schülerinnen und Schüler darauf kommen, dass man mit allen drei Objekten die Zeit messen kann.

### Explore

Dauer: Ungefähr 15 Minuten

Ablauf: Ähnlich wie in der Explore-Phase zum Thema Raum sollen die Schülerinnen und Schüler sich diesmal überlegen: "Was ist Zeit?". Dafür erhalten sie wieder, nach

der Think-Pair-Share-Methode zuerst 2 Minuten um sich alleine Gedanken zu machen, dann jeweils 3 Minuten um das Thema erst zu zweit und anschließend in Vierergruppen zu besprechen. Zum Abschluss dieser Phase soll aus jeder Gruppe eine Schülerin oder ein Schüler die Erkenntnisse der jeweiligen Gruppe vortragen.

Anschließend werden die Ergebnisse besprochen. Für dieses Niveau ist es vorerst ausreichend abschließend festzuhalten: **“Zeit ist das, was Uhren messen.”** Es sollten dennoch abweichende Vorschläge der Schülerinnen und Schüler besprochen und lobend erwähnt werden. Es ist wichtig, dafür zu sorgen, dass bei den Schülerinnen und Schülern nicht das Gefühl entsteht, dass die Lehrperson die richtige Antwort besitzt und sie ihnen nach Ablauf der Phase schon verraten wird, während ihr Input ignoriert wird.

## Explain

Dauer: Ungefähr 15 Minuten

Ablauf: “Die Zeit ist homogen.”

Mit diesem Satz an der Tafel kann die nächste E-Phase begonnen werden. Wir befragen die Schülerinnen und Schüler was sie vermuten, was das bedeutet. Im Zweifelsfall bekommen sie den Tipp, an unsere Überlegungen bezüglich des Raumes zurückzudenken.

Die Antworten der Schülerinnen und Schüler werden wieder gesammelt und besprochen. Schließlich kann festgehalten werden:

**Dass die Zeit homogen ist, bedeutet, dass sich physikalische Gesetze im Laufe der Zeit nicht verändern**, beziehungsweise dass ein physikalischer Vorgang immer gleich abläuft, egal zu welcher Zeit er gestartet wird. Sich wiederholende Abläufe sind der Kern jeder Uhr: Sei es die Erde, die sich um die Sonne beziehungsweise um sich selber dreht, ein schwingendes Pendel oder ein schwingender Quarzkristall.

**Die Homogenität der Zeit bedeutet, dass es egal ist, wann eine Uhr gestartet wurde, sie funktioniert unter denselben äußeren Umständen immer gleich.**

Wie zuvor sollte zumindest die hier hervorgehobenen Textabschnitte von den Schülerinnen und Schülern notiert werden. Der Rest sollte zumindest im Unterricht erwähnt werden. Wieder ist zu beachten, dass die Antworten der Schülerinnen und Schüler besprochen, gute Ideen gelobt, und im Optimalfall die hervorgehobenen Sätze aus den SchülerInnenideen heraus entwickelt werden sollten.

## Elaborate

Dauer: Ungefähr 20 Minuten

Ablauf: So ähnlich wie jedes Koordinatensystem einen Ursprungspunkt benötigt, auf den man sich bezieht, wenn man die Position eines Objektes im Raum beschreiben möchte, benötigt man einen Zeitpunkt, auf den man sich bezieht, wenn man beschreiben will, wann ein Ereignis eingetreten ist. So haben wir hier in Europa z.B. das Jahr 2019 nach der angeblichen Geburt von Jesus Christus.

Anschließend erhalten die Schülerinnen und Schüler folgende Aufgabe, die sie wieder im Rahmen des Think-Pair-Share-Systems bearbeiten sollen:

Angenommen ein Reisender startet am 1. Januar 1800 eine Reise nach China. Er kann keine Uhr mitnehmen und stellt bei seiner Ankunft in China fest, dass man hier anscheinend einen anderen Zeitpunkt gewählt hat, um zu beschreiben welches Jahr jetzt ist. Wie kann er herausfinden wie lange die Reise gedauert hat und was der Unterschied zwischen dem europäischen Kalender und dem chinesischen Kalender ist?

Die Einzelarbeitsphase sollte ungefähr 2 Minuten dauern, die Paararbeitsphase etwa 3 Minuten. Nach Ablauf der Zeit soll von jeder Gruppe ein Schüler an die Tafel kommen und ihre Methode erläutern. Die verschiedenen Methoden können nun

verglichen und besprochen werden. Anschließend wird von der Lehrkraft folgende Methode vorgestellt:

Eine Möglichkeit besteht darin, dass der Reisende, der zum Zeitpunkt  $t_1$  in Europa losgefahren ist, wieder umkehrt. Erreicht er Europa wieder zum Zeitpunkt  $t_2$ , kann er nun berechnen, wie lange eine Reise gedauert hat:

$$\Delta t = (t_2 - t_1)/2$$

Wichtig ist hier natürlich die Annahme, dass der Rückweg genauso lange dauert wie der Hinweg. Ist dies gegeben und hat sich der Reisende gemerkt zu welchem Zeitpunkt er im chinesischen Kalender in China war, kann er nun die beiden Kalender synchronisieren. Er kann also beliebig zwischen den beiden Kalendern hin und her rechnen und so zum Beispiel bestimmen, zu welchem Zeitpunkt im europäischen Kalender er in China war oder welches das aktuelle Datum im chinesischen Kalender ist.

## Evaluate

Dauer: Ungefähr 20 Minuten

Ablauf: Die Schülerinnen und Schüler erhalten folgende Aufgabe:

Jonathan fliegt mit seinem Raumschiff zum fernen Planeten Vulkan. Er startet im Jahr 2151. Nach einem langen Flug landet Jonathan auf Vulkan und fragt nach dem Datum. Ein ortsansässiger Vulkanier sagt ihm, dass es das Jahr 1828 nach Surak ist. Mit dieser Information steigt Jonathan wieder in sein Raumschiff und fliegt zurück zur Erde, wo er nach langem Flug im Jahr 2193 ankommt.

- a) Wie lange dauert eine Reise nach Vulkan?
- b) Was für ein Jahr ist heute auf Vulkan?
- c) In welchem Jahr starb Surak?

Die korrekten Antworten sind:

a)  $\Delta t = (\text{Abflug Erde} - \text{Ankunft Erde})/2 = (2193 - 2151)/2 = 21$

Die Reise in eine Richtung dauert 21 Jahre.

b) Zuerst muss die Differenz der beiden Kalender plus Flugzeit berechnet werden:

$$(\text{Abflug Erde} + \text{Flugzeit} - \text{Ankunft Vulkan}) = 2151 + 21 - 1828 = 344$$

Mit diesem Summand kann man direkt in den vulkanischen Kalender umrechnen:

$$(\text{Aktuelles Jahr} - \text{Kalenderdifferenz}) = 2020 - 344 = 1676$$

Das Jahr 2020 n.Chr. entspricht dem Jahr 1676 n.S.

c)  $(\text{Vulkanisches Jahr } 0 + \text{Kalenderdifferenz}) = 0 + 344 = 344$

Surak starb im Jahr 344 n.Chr.

Anschließend sollte die Aufgabe natürlich besprochen und die Ergebnisse verglichen werden. Insbesondere sollte darauf eingegangen werden, dass es sich hier natürlich um eine Beispielrechnung zur Lösung des China-Kalender-Problems handelt. Außerdem sollte darauf eingegangen werden, dass je nachdem, ob man vom vulkanischen Kalender in den Erdkalender umrechnet oder umgekehrt, die Kalenderdifferenz in einem Fall addiert und im anderen Fall subtrahiert wird.

## 4.4 Vierte Einheit: Galileisches Äquivalenzprinzip

Ziele dieser Einheit

- Die SuS sollen das Galileische Äquivalenzprinzip erläutern können.
- Die SuS sollen Beispiele dafür nennen können, wo man das Galileische Äquivalenzprinzip beobachten kann.

Elementare Grundideen

- Alle physikalischen Vorgänge laufen in sich zueinander in Ruhe oder in gleichförmig-geradliniger Bewegung befindlichen Bezugssystemen ununterscheidbar gleich ab.

## Unterrichtsvoraussetzungen

Da die Schülerinnen und Schüler einen relativ langen Text verstehen und zusammenfassen sollen, der noch dazu in eher veraltetem Deutsch geschrieben ist, müssen wir an dieser Stelle vor allem Deutsch- bzw. Lesekompetenzen als Voraussetzung für diese Unterrichtseinheit nennen. Ebenfalls wird vorausgesetzt, dass die Schülerinnen und Schüler wissen, was ein Inertialsystem ist. Ist das nicht bekannt, sollte eine entsprechende Elicit-Phase vor der Engage-Phase stattfinden.

## Phasenverlauf

Phase	Thema	Dauer
Engage	Untersuchen eines Textes von Galileo Galilei	~20 Minuten
Explore	Text mit eigenen Worten zusammenfassen.	~20 Minuten
Explain	Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt.	~10 Minuten
Elaborate/Evaluate	Der senkrechte Wurf in einem Flugzeug, mit einem Beobachter im Flugzeug und einem am Boden.	~15 Minuten

## Engage

Dauer: Ungefähr 20 Minuten

Ablauf: Den Schülerinnen und Schülern wird folgender Text ausgehändigt oder anderweitig zur Verfügung gestellt.

„Schließt Euch in Gesellschaft eines Freundes in einen möglichst großen Raum unter dem Deck eines großen Schiffes ein. Verschafft Euch dort Mücken, Schmetterlinge und ähnliches fliegendes Getier; sorgt auch für ein Gefäß mit Wasser und kleinen Fischen darin; hängt ferner oben einen kleinen Eimer auf, welcher

tropfenweise Wasser in ein zweites enghalsiges darunter gestelltes Gefäß tröpfeln läßt. Beobachtet nun sorgfältig, solange das Schiff stille steht, wie die fliegenden Tierchen mit der nämlichen Geschwindigkeit nach allen Seiten des Zimmers fliegen. Man wird sehen, wie die Fische ohne irgend welchen Unterschied nach allen Richtungen schwimmen; die fallenden Tropfen werden alle in das untergestellte Gefäß fließen. Wenn Ihr Euerem Gefährten einen Gegenstand zuwerft, so braucht Ihr nicht kräftiger nach der einen als nach der anderen Richtung zu werfen, vorausgesetzt, daß es sich um gleiche Entfernungen handelt. Wenn Ihr, wie man sagt, mit gleichen Füßen einen Sprung macht, werdet Ihr nach jeder Richtung hin gleichweit gelangen. Achtet darauf, Euch aller dieser Dinge sorgfältig zu vergewissern, wiewohl kein Zweifel obwaltet, daß bei ruhendem Schiffe alles sich so verhält. Nun laßt das Schiff mit jeder beliebigen Geschwindigkeit sich bewegen: Ihr werdet – wenn nur die Bewegung gleichförmig ist und nicht hier- und dorthin schwankend – bei allen genannten Erscheinungen nicht die geringste Veränderung eintreten sehen. Aus keiner derselben werdet Ihr entnehmen können, ob das Schiff fährt oder stille steht. [...] Die Ursache dieser Übereinstimmung aller Erscheinungen liegt darin, daß die Bewegung des Schiffes allen darin enthaltenen Dingen, auch der Luft, gemeinsam zukommt. Darum sagte ich auch, man solle sich unter Deck begeben, denn oben in der freien Luft, die den Lauf des Schiffes nicht begleitet, würden sich mehr oder weniger deutliche Unterschiede bei einigen der genannten Erscheinungen zeigen.“<sup>21</sup>

Die Schülerinnen und Schüler sollen den Text erst in Einzelarbeit lesen und dann mit ihrem Sitznachbarn besprechen. Insbesondere sollten eventuelle Unklarheiten besprochen werden. Sind alle Worte verständlich? Gibt es Sätze, bei denen nicht klar ist, was sie bedeuten? Für diese Phase bekommen die Schülerinnen und Schüler, je nach Leseniveau in der Klasse, 10 bis 15 Minuten. Anschließend können Unklarheiten, die nicht aufgelöst werden konnten, in der Klasse besprochen werden, damit sichergestellt wird, dass alle Schülerinnen und Schüler den Text verstehen können.

---

<sup>21</sup> Galileo Galilei: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische. B.G. Teubner, Leipzig 1891, S. 197–198

## Explore

Dauer: Ungefähr 20 Minuten

Ablauf: Die Schülerinnen und Schüler sollen in Kleingruppen versuchen, mit eigenen Worten zusammenzufassen, was Galileo mit diesen Beobachtungen beschreiben möchte. Anschließend kann ein Repräsentant jeder Gruppe deren Zusammenfassung vortragen. Die Ergebnisse werden wiederum stichpunktartig an der Tafel gesammelt und besprochen.

## Explain

Dauer: Ungefähr 10 Minuten

Ablauf: Wiederum ausgehend von den Vorschlägen der Schülerinnen und Schüler formuliert die Lehrperson nun das Galileische Äquivalenzprinzip:

**“Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt. Die Naturgesetze werden in allen Inertialsystemen durch die dieselben Gleichungen beschrieben”**

Die Formulierung wird von den Schülerinnen und Schülern als Merksatz bzw. Definition notiert. An dieser Stelle sollte wiederholt werden, was ein Inertialsystem ist.

Was bedeutet das? Anhand einiger Beispiele sollte im Klassengespräch erklärt werden, was dieser Merksatz bedeutet. Der Weg eines Balls, der unter einem bestimmten Winkel, mit einer bestimmten Geschwindigkeit geworfen wird, wird eine bestimmte Wurfparabel beschreiben. Dabei ist es egal, ob die werfende Person stillsteht, sich in einem Zug befindet, welcher 120 km/h fährt oder einem Flugzeug, das 300 km/h schnell fliegt. Für einen Beobachter, der im Vergleich zum Werfer ruht, sieht die Parabel immer gleich aus.

## Elaborate/Evaluate

Dauer: Ungefähr 15 Minuten

Ablauf: Die Schülerinnen und Schüler sollen paarweise die folgende Aufgabe bearbeiten. Ich wähle als Sozialform die Zweierarbeit, da die Aufgabe so einerseits etwas leichter zu bearbeiten ist und andererseits um die Schülerinnen und Schüler dazu zu ermutigen, untereinander zu diskutieren.

Eine Passagierin in einem Flugzeug wirft auf einer Flughöhe von 13.000 Metern einen Ball einen Meter in die Höhe. Das Flugzeug fliegt mit einer Geschwindigkeit von 900 km/h. Überlege dir, wie die Flugbahn aus Sicht der Passagierin aussieht und wie sie aus der Sicht eines Beobachters am Boden aussieht. Muss die Passagierin ihren Wurf irgendwie anpassen, abhängig davon, wie schnell das Flugzeug fliegt? Erstelle eine Zeichnung der beobachteten Flugbahn, sowohl aus Sicht der Passagierin, als auch aus Sicht des Beobachters am Boden.

Die Aufgabe sollte wieder zu Beginn der nächste Unterrichtseinheit besprochen und verglichen werden.

## 4.5 Fünfte Einheit: Die Raum/Zeit-Konstante

### Ziele

- Die SuS sollen den Wert der Raum/Zeit-Konstante nennen können.
- Die SuS sollen erklären können, wie das Meter sowohl früher als auch heutzutage definiert ist bzw. wurde.

### Elementare Grundideen

- Die Raum/Zeit Konstante besitzt einen Wert von  $c \approx 3,00 \cdot 10^8 m/s$ .
- Der genaue Wert der Raum/Zeit-Konstante wurde per Definition festgelegt.
- Die Längeneinheit Meter ergibt sich umgekehrt durch den per Definition festgelegten Wert von  $c$ .

## Unterrichtsvoraussetzungen

Es muss relativ wenig Vorwissen der Schülerinnen und Schüler vorausgesetzt werden, da es sich um einen der mathematisch anspruchsvollen Teile handelt, sollten die Schülerinnen und Schüler jedoch die entsprechenden Mathematikkompetenzen mitbringen.

## Phasenverlauf

Phase	Thema	Dauer
Elicit	Wortliste mit den wichtigsten bis jetzt gefallenen Begriffen.	~10 Minuten
Explain	Herleitung der Existenz der Raum/Zeit-Konstante.	~40 Minuten
Elaborate	Die moderne Definition des Meters.	~20 Minuten

## Elicit

Dauer: Ungefähr 10 Minuten

Ablauf: Zu Beginn der Stunde sollen die Schülerinnen und Schüler jeweils eine Wortliste mit den wichtigsten bis jetzt verwendeten Begriffen anfertigen.

Anschließend werden die Begriffe an der Tafel gesammelt. Die Schülerinnen und Schüler können selber an die Tafel kommen und die Begriffe an die Tafel schreiben. Alle Schülerinnen und Schüler erhalten den Auftrag, dass sie ihre Listen ergänzen, falls Wörter genannt werden, die sie noch nicht auf ihrer Liste hatten. Die so an der Tafel gesammelten Wörter werden noch einmal besprochen.

## Explain

Dauer: Ungefähr 40 Minuten

Ablauf: Er handelt sich um eine der zentralen Stellen in der gesamten Unterrichtssequenz, daher sollte sie besonders sorgfältig vorgetragen werden. Da es ein sehr komplexes Thema ist, lässt sich ein Tafelvortrag nur schwer umgehen. Das Vorgetragene sollte jedoch eingehend diskutiert werden. Zumindest die hervorgehobenen Sätze sowie die Tabelle sollten von den Schülerinnen und Schülern in ihre Hefte übertragen werden.

**Wir betrachten drei verschiedene Bezugssysteme:  $S$ ,  $S'$  und  $S''$  (gesprochen:  $S$ ,  $S$ -Strich und  $S$ -Zwei-Strich).** Die Apostrophe dienen zur Unterscheidung der unterschiedlichen Systeme. Genauso wie in unserem Abschnitt über die Zeit Europa und China unterschiedliche Kalender hatten, sollen nun auch unsere Bezugssysteme unterschiedliche Zeiten besitzen. Diese nennen wir  $t$  wenn sie in  $S$  gemessen wurden,  $t'$  wenn sie in  $S'$  gemessen wurden und so weiter. Genauso verhält es sich mit allen anderen Größen: **Eine Objekt, das in  $S$  die Geschwindigkeit  $v$  hat, wird aufgrund der Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Bezugssystem im System  $S'$  eine andere Geschwindigkeit besitzen. Wir nennen die sie dort also  $v'$ . Im System  $S''$  respektive  $v''$ .**

Anstelle der drei Bezugssysteme können wir uns zum Beispiel für  $S$  einen Fußgänger, der entlang einiger Bahngleise geht, vorstellen, für  $S'$  einen Passagier in einem Zug auf ebendiesen Gleisen und für  $S''$  einen Passagier in einem Flugzeug, welches ebenfalls in die gleiche Richtung fliegt.

Aus Sicht des Fußgängers bewegt sich der Zug mit einer positiven Geschwindigkeit, also nach vorne, von ihm weg. Aus Sicht von  $S''$ , also dem Passagier im Flugzeug, bewegt sich der Zug auch, jedoch mit negativer Geschwindigkeit, also nach hinten. Wir wollen diese Geschwindigkeiten  $q$ ,  $v$  und  $w$  nennen.

Zur besseren Übersicht stellen wir die Geschwindigkeiten in einer Tabelle da.

	Relativ zu S	Relativ zu S'	Relativ zu S''
Geschwindigkeit von S (Fußgänger)	$q=0$	$q'=-v$	$q''$
Geschwindigkeit von S' (Passagier im Zug)	$v$	$v' 0$	$v''=-w'$
Geschwindigkeit von S'' (Passagier im Flugzeug)	$w$	$w'$	$w''=0$

Die Tabelle ist recht kompliziert und sollte mit den Schülern besprochen werden, damit wirklich klar ist, was sie bedeutet.

Nach diesem Vortrag sollte man das Besprochene nochmal langsam durcharbeiten. Ein paar Fragen, welche die Schülerinnen und Schüler beantworten können sollten:

- Warum ist die Geschwindigkeit  $q=0$  relativ zu S, egal wie schnell der Fußgänger vielleicht läuft?
- Warum ist  $q'=-v$  relativ zu S'?
- Was bedeutet, dass die Geschwindigkeit von S' relativ zu S'' gegeben ist durch  $v''=-w'$ ?

Erst wenn alle Fragen geklärt sind und der Vortrag bis hierhin von den Schülerinnen und Schülern gut verstanden wurde, sollte fortgesetzt werden:

**Wir versuchen den eben dargestellten Zusammenhang grafisch darzustellen. Dazu stellen wir uns das Problem eindimensional vor. Als Vereinfachung nehmen wir an, dass zum Zeitpunkt  $t=0$  die Bezugspunkte zusammenfallen.** Also dass genau in dem Moment in dem der Zug am Fußgänger vorbeifährt, das Flugzeug sowohl Zug als auch Fußgänger überholt.

**Wir gehen davon aus, dass sämtliche Bewegungen in S unbeschleunigt sind, weder Fußgänger, Zug oder Flugzeug beschleunigen oder bremsen ab. Zeichnen wir ihre Wege also in ein s-t Diagramm ein, beschreiben diese also Geraden, nur mit unterschiedlicher Steigung. Aus dem Äquivalenzprinzip folgt, dass, wenn wir so ein Diagramm nun aus Sicht von S' zeichnen wollen, die entstehenden sogenannten Weltlinien ebenfalls Geraden sein müssen.** Aus Sicht des Zugs fliegt das Flugzeug langsamer und der Fußgänger bewegt sich in die andere Richtung, doch auch diese Bewegungen müssen gleichförmig sein.

**Angenommen wir befinden uns im Bezugssystem S und wollen nun sowohl  $t'(t,x)$  und  $x'(t,x)$  berechnen, also Ort und Position aus Sicht des Zuges, müssen wir eine sogenannte Koordinatentransformation durchführen. Die allgemeinste derartige Transformation, die wir durchführen können und sicherstellt dass Gerade wieder in Gerade transformiert wird kann man folgendermaßen schreiben:**

$$t' = \alpha(v)t + \delta(v)x$$

$$x' = \gamma(v)x + \varepsilon(v)t$$

**Betrachten wir die Geschwindigkeiten  $u=x/t$ , sowie  $u'=x'/t'$  erhalten wir:**

$$u' = \frac{\gamma(v)u + \varepsilon(v)}{\delta(v)u + \alpha(v)}$$

Setzt man  $u=v$ , so ergibt sich  $u'=v'=0$ . Wenn man  $q'=-v$  einsetzt, so muss sich  $u=q=0$  ergeben. Daraus folgt:  $\varepsilon = -v\gamma$  sowie  $\alpha = \gamma$ . Durch Einsetzen in die vorherige Gleichung ergibt sich also:

$$u' = \frac{u-v}{1+h(v)u}$$

mit  $h(v) = \frac{\delta(v)}{\gamma(v)}$ .

Wegen des Äquivalenzprinzips muss die Transformation für ein weiteres System  $S''$ , das sich mit Geschwindigkeit  $w$  relativ zu  $S$  bewegt, natürlich genauso aussehen:

$$u'' = \frac{u-w}{1+h(w)u}$$

Setzt man nun in die Gleichung für  $u'$   $u=w$  ein, so ergibt sich  $w'$ . Setzt man in die Gleichung für  $u''$   $u=v$  ein, ergibt sich  $v''=-w'$ . So muss gelten:

$$\frac{w-v}{1+h(v)w} = -\frac{v-w}{1+h(w)v}$$

Es muss also gelten:  $h(v)w=h(w)v$ . Das bedeutet, dass  $h(v)$  eine lineare Funktion der Form  $h(v)=Kv$  sein muss. Damit erhalten wir:

$$u' = \frac{u-v}{1+Kvu}$$

Bemerkenswert ist hier, dass sich  $K$  nicht ändert, wenn man das Bezugssystem wechselt. Man bezeichnet  $K$  daher als eine Invariante. Und man kann  $K$  messen: Wenn man die letzte Gleichung nach  $K$  umstellt erhält man:

$$K = \frac{u-v-u'}{vuu'}$$

**Man muss also die Geschwindigkeit eines Teilchens  $u$  und  $u'$  in zwei verschiedenen Inertialsystemen messen sowie die Relativgeschwindigkeit der beiden Systeme zueinander  $v$ .**

**Egal in welcher Kombination von Inertialsystem man misst, man findet für  $K$  immer einen Wert von  $\approx -1 \cdot 10^{-17} \frac{m^2}{s^2}$ .**

**Es hat sich jedoch eingebürgert, eine weitere Größe  $c$  zu definieren mit  $K = -1/c^2$ .**

**$c$  hat die Dimension einer Geschwindigkeit und wird als Raum/Zeit-Konstante bezeichnet. Sie ist eine der wichtigsten Konstanten in der Physik. Ihr Zahlenwert beträgt  $c \approx 3.00 \cdot 10^8 m/s$**

Es handelt sich um den zentralen Punkt der Unterrichtssequenz und sollte daher noch einige Male mit den Schülerinnen und Schülern durchgegangen werden.

Es sollte nochmal erwähnt werden welche Annahmen in die eben durchgeführte Rechnung eingeflossen sind: Lediglich die Homogenität des Raums, die Homogenität der Zeit, sowie das Galileische Äquivalenzprinzip.

Elaborate

Dauer: Ungefähr 20 Minuten

Ablauf: Es stellt sich die Frage, was diese lange Rechnung bringt: zum Beispiel das Meter.

Die Schülerinnen und Schüler erhalten den Auftrag, ein bis zwei Minuten zu überlegen, wie wohl festgelegt wird, wie lang ein Meter nun wirklich ist, anschließend werden ihre Ideen gesammelt. Wenn als Antwort "mit einem Maßband", "mit einem Zollstock" oder Ähnliches vorgeschlagen wird, sollte die Lehrkraft die Frage

aufwerfen: Was, wenn sich zwei Maßbandhersteller streiten? Sie haben zwei unterschiedlich lange Meter und nun stellt sich die Frage, wer von beiden recht hat.

Sie müssen es mit einem "offiziellen" Meter vergleichen, ihre Maßbänder also eichen. Wo findet man solch einen "offiziellen" Meter? In Österreich zum Beispiel beim Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), in Deutschland bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Was wenn sich das BEV und die PTB darüber streiten, welcher Meter nun der richtige ist? Mit wem vergleichen sie ihre Meter?

Anschließend können die Überlegungen der Schülerinnen und Schüler vorgestellt und diskutiert werden. Schließlich zeigt die Lehrkraft vor, wie es sich in der Wirklichkeit verhält:

**Von 1791 bis 1960 wurde ein Referenzmeter verwendet. In dieser Zeit war das Meter über ein sogenanntes "Urmeter" definiert, einen Platin-Iridium-Stab.** Doch solch eine Methode hat offensichtliche Nachteile: Was wenn das Urmeter beschädigt oder gar zerstört wird? Oder wenn man feststellen will, wie lang ein Meter ist, ohne nach Paris zu fahren, wo dieses Urmeter über viele Jahre aufbewahrt wurde?

Zu diesem Zweck wird das Meter heutzutage anders bestimmt. **Statt des Meters haben die Physiker und Physikerinnen die Raum/Zeit-Konstante  $c$  definiert - als exakt 299 792 458 m/s. Nun kann man mit Hilfe der Gleichung**

$$u' = \frac{u-v}{1-uv/c^2}$$

**die Länge eines Meters bestimmen, solange man nur Sekunden möglichst genau messen kann.**

## 4.6 Sechste Einheit: Lorentzgleichungen

### Unterrichtsziele:

- Die SuS können die Lorentzgleichungen nennen und in eigenen Worten erläutern.
- Die SuS können die Lorentzgleichungen anwenden.
- Die SuS können erläutern, wie Ereignisintervalle definiert sind und was es bedeutet, dass sie Invarianten der Transformation sind.

### Elementare Grundideen:

- Ereignisintervalle sind unveränderliche Größen bzw. Invarianten der Transformation
- Mit Hilfe der Lorentzgleichungen kann man berechnen, wie sich bewegte Uhren verhalten.

### Unterrichtsvoraussetzungen

Für diese Einheit ist eigentlich nur das Verständnis der vorhergehenden Einheiten wichtig. Insbesondere sollten die Schülerinnen und Schüler verstanden haben, dass die Raum/Zeit-Konstante in jedem Bezugssystem denselben Wert besitzt.

### Phasenverlauf

Phase	Thema	Dauer
Elicit	Wiederholung: Die Raum/Zeit-Konstante nimmt in allen Bezugssystem denselben Wert an.	~10 Minuten
Explain	Herleitung der Lorentzgleichung	~20 Minuten
Elaborate	Ereignisintervalle	~20 Minuten

## Elicit

Dauer: Ungefähr 10 Minuten

Ablauf: In einer kurzen Wiederholungsphase wird nochmals besprochen, was die Raum/Zeit-Konstante ist und insbesondere welche Annahmen notwendig waren, um sie zu bestimmen. Namentlich die Homogenität des Raums, die Homogenität der Zeit, sowie das Galileische Äquivalenzprinzip.

## Explain

Dauer: Ungefähr 20 Minuten

Ablauf: Nun wollen wir uns noch einmal einem sehr wichtigem Thema widmen, dem Wechseln zwischen zwei verschiedenen Bezugssystemen. Dies geschieht wieder in einem Tafelvortrag, wie üblich sollten zumindest die hervorgehobenen Teile von den Schülerinnen und Schülern notiert werden:

Betrachten wir noch einmal die linearen Transformationsgleichungen zwischen verschiedenen Koordinatensystem:

$$t' = \alpha(v)t + \delta(v)x$$

$$x' = \gamma(v)x + \varepsilon(v)t$$

Setzen wir  $\alpha = \gamma$ ,  $\varepsilon = -v\gamma$ , sowie  $\delta = -v\gamma/c^2$ , erhalten wir die sogenannten Lorentzgleichungen:

$$t' = \gamma(v)(t - vx/c^2)$$

$$x' = \gamma(v)(x - vt)$$

**Sie wurden 1905 von Albert Einstein als grundlegende Gleichungen für die Mechanik erkannt. Die Einführung einer Funktion  $\gamma$  erscheint zuerst willkürlich, aber wie wir sehen werden, wird sie sich als äußerst nützlich erweisen.** Mit einigen mathematischen Tricks, ganz ähnlich wie wir sie im letzten Abschnitt verwendet haben, lässt sich bestimmen:

$$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

## Elaborate

Dauer: 20 Minuten

Ablauf: Ein weiteres, wichtiges Konzept sind die sogenannten Ereignisintervalle. Leider sind sie sehr abstrakt, weswegen sie sich schwer aus dem Alltagsleben heraus motivieren lassen.

Wir betrachten zwei verschiedene Ereignisse A und B.

Der zeitliche Abstand zwischen ihnen sei  $\Delta t = t_B - t_A$  bzw.  $\Delta t' = t'_B - t'_A$ .

Der Ortsabstand zwischen den Ereignissen sei  $\Delta x = x_B - x_A$  bzw.

$$\Delta x' = x'_B - x'_A$$

Nun schreiben wir diese Ausdrücke um:

$$\Delta x_1 = x_B - x_A \text{ bzw. } \Delta x_1' = x'_B - x'_A$$

Den zeitlichen Abstand können wir mithilfe der Formel  $x = c \cdot t$  umschreiben zu:

$$\Delta x_0 = ct_B - ct_A \text{ bzw. } \Delta x_0' = ct'_B - ct'_A$$

**Nun können wir mit Hilfe folgender Gleichungen eine Größe  $\tau$  definieren, die wir Ereignisintervall nennen,:**

$$c^2 \tau^2 = \Delta x_0^2 - \Delta x_1^2 \quad \text{bzw.} \quad c^2 \tau'^2 = \Delta x_0'^2 - \Delta x_1'^2$$

**Und wie man einfach nachrechnen kann, gilt**

$$\tau = \tau'$$

$$\Delta x_0^2 - \Delta x_1^2 = \Delta x_0'^2 - \Delta x_1'^2$$

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 = x^2 \Delta t'^2 - \Delta x'^2$$

**Es ist also irrelevant in welchem Bezugssystem wir uns befinden,  $\tau$  hat den gleichen Wert. Man sagt Ereignisintervalle sind unveränderliche Größen bzw. Invarianten der Transformation.**

## 4.7 Siebte Einheit: Zeitdilatation

### Unterrichtsziele

- Die SuS sollen erläutern können, was die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bedeutet.
- Die SuS sollen den Effekt der Zeitdilatation in eigenen Worten erläutern können.
- Die SuS sollen Beispiele nennen können, wo man Zeitdilatation beobachten kann.

## Elementare Grundvorstellungen

- Die Raum/Zeit-Konstante hat in allen unbeschleunigten Inertialsystemen denselben Wert.
- Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist die Maximalgeschwindigkeit im Universum. Nichts kann sich schneller bewegen oder ausbreiten als mit dieser Geschwindigkeit.
- Bewegte Uhren gehen langsamer.

## Unterrichtsvoraussetzungen

Wiederum ist hauptsächlich Verständnis der vorhergehenden Einheiten notwendig. Insbesondere finden die Ereignisintervalle nun Anwendung. Dadurch bietet diese Einheit auch Gelegenheit, diese nochmals zu wiederholen und das Wissen zu festigen.

## Phasenverlauf

Phase	Thema	Dauer
Engage	GPS Satelliten: Atomuhren im Weltraum	~10 Minuten
Explain	Bewegte Uhren gehen langsamer.	~15 Minuten
Elaborate	Rechenbeispiele: Zeitdilatation	~20 Minuten
Extend	Kein Geschwindigkeitsbetrag eines Signals oder Objekts kann die Raum/Zeit-Konstante $c$ übersteigen.	~15 Minuten

## Engage

Dauer: Ungefähr 10 Minuten

Ablauf: Die nächste Einheit beginnt mit dem folgenden Bild, das per Beamer projiziert oder den Schülerinnen und Schülern auf andere Weise zur Verfügung gestellt wird:



Zuerst kann mit den Schülerinnen und Schülern darüber diskutiert werden, was man hier sieht. Worum handelt es sich hier? Mögliche Antworten wären ein Satellit, Solarzellen oder Goldfolie.

Die Lehrperson sollte erklären, worum es sich hier handelt: Es ist ein GPS Satellit. Danach kann noch gefragt werden, ob die Schülerinnen und Schüler wissen, was GPS ist. Ein ganzes Netzwerk solcher Satelliten erlaubt es unseren Handys und Navigationssystemen jederzeit zu wissen, wo sie sich befinden. Um das zu bewerkstelligen, besitzt jeder GPS Satellit eine oder sogar mehrere hochpräzise Uhren an Bord. Doch sobald sie sich im Orbit befinden, gehen diese Uhren auf einmal mit jedem Tag mehrere Mikrosekunden nach. Das mag eine kleine Diskrepanz sein, ist aber für diese Verwendung und für diese Art von Uhr gewaltig. Anschließend wollen wir herausfinden, welcher physikalische Effekt für dieses Phänomen verantwortlich ist.

---

<sup>22</sup> Seite „Global Positioning System“. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.. Bearbeitungsstand: 26. November 2019, 21:30 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Global\\_Positioning\\_System&oldid=194408484](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Global_Positioning_System&oldid=194408484) (Abgerufen: 3. Dezember 2019, 19:55 UTC)

## Explain

Dauer: Ungefähr 15 Minuten:

Ablauf: Es folgt wieder ein Tafelvortrag:

Wir betrachten zwei Uhren  $C_A$  und  $C_B$ , die in einem Bezugssystem S ruhen. Dort haben sie den Abstand  $l = x_B - x_A$ . Nun stellen wir uns vor, dass eine Beobachterin sich an den beiden Uhren vorbei bewegt. Sie befindet sich also in einem anderen Bezugssystem S', das sich mit der Geschwindigkeit v relativ zu S bewegt. Die Beobachterin hat eine Uhr C' bei sich, die in S' ruht. A sei das Ereignis, dass C' und  $C_A$  aufeinandertreffen, B sei das Ereignis, dass C' und  $C_B$  aufeinander treffen.

Während die beiden Ereignisse in S den Abstand  $l = x_B - x_A$  haben, finden sie in S' an der gleichen Stelle statt: Bei der Uhr C'. Aus der Invarianz der Ereignisintervalle folgt nun:

$$c^2 \Delta t'^2(0) = c^2 \Delta t(l)^2 - l^2 = \Delta t(l)^2 (c^2 - v^2)$$
$$\Delta t(l) = \gamma(v) \Delta t'(0)$$

Also:

$$\Delta t(l) = \frac{\Delta t'(0)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Was bedeutet das? Auf der bewegten Uhr laufen Vorgänge langsamer ab als auf ruhenden Uhren. Das gilt natürlich nicht nur für Uhren, sondern für alle Vorgänge. Die Zeit läuft in dem Inertialsystem, in dem die Uhren ruhen, langsamer ab. Man könnte sagen, die Zeit ist gedehnt, oder dilatiert. Man spricht daher von Zeitdilatation.

Betrachten wir umgekehrt zwei in S' ruhende Uhren, die sich in einem Abstand von l' befinden und eine Uhr C, die im Inertialsystem S ruht, erhalten wir das Ergebnis:

$$\Delta t'(l') = \gamma(v)\Delta t(0).$$

Das würde man aufgrund der Relativität ja auch erwarten.

## Elaborate

Dauer: Ungefähr 20 Minuten

Ablauf: Die Beispiele dienen zur Illustration der Zeitdilatation bzw. als Rechenbeispiel und können von der Klasse gemeinsam bearbeitet werden.

### GPS

Kehren wir nochmal zu unserem GPS-Satelliten zurück. Die Zeitdilatation ist dafür verantwortlich, dass die Uhren in diesem Satelliten von der Erde aus betrachtet zu langsam laufen.

GPS Satelliten bewegen sich in einer Höhe von 20.000 km mit einer Geschwindigkeit von 3,87 km/s um die Erde. Sie bilden die Grundlage für die heutzutage allgegenwärtige Satellitenortung von Mobiltelefonen, Navigationssystemen und ähnlicher Geräte. Die Bestimmung des Ortes funktioniert über sehr präzise Zeitsignale von den Satelliten. Aus diesem Grund führt jeder GPS Satellit eine oder sogar mehrere extrem präzise Atomuhren mit sich. Als Faustregel unter Physikern gilt zwar, dass man erst relativistisch rechnen muss, sobald Geschwindigkeiten in der Größenordnung  $0.1 \cdot c$  auftreten und 3,87 km/s ist davon noch weit entfernt. Da es in diesem Fall jedoch um sehr präzise Messungen geht, muss man die Relativitätstheorie in Betracht ziehen. Täte man dies nicht, würden die Satellitenuhren mit jedem Tag im Orbit aufgrund der Zeitdilatation um 7 Mikrosekunden nachgehen, eine präzise Ortsbestimmung wäre so nicht mehr möglich.

## Reise zum Planeten Vulkan

Die Uhren auf der Erde und Vulkan sind mittlerweile synchronisiert worden. Jonathan fliegt mit einem Raumschiff am 01.01.2025 an der Erde vorbei in Richtung Vulkan. Der Abstand Erde-Vulkan betrage 10 Lichtjahre. Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.  $9,46 \cdot 10^{15} m$  entsprechen ungefähr einem Lichtjahr. Er fliegt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,8-facher Lichtgeschwindigkeit. Wie zu erwarten, können die Vulkanier ( $10 \text{ Lichtjahre} / (0,8 \cdot c) = 12,5 \text{ Jahre}$ ) seinen Vorbeiflug nach 12 Jahren und 6 Monaten beobachten. Doch als sie Kontakt mit Jonathan aufnehmen, stellt sich heraus, dass für ihn weniger Zeit vergangen ist.

$$12,5y = \gamma(0,8c) \cdot \Delta t' = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}}$$

$$\Leftrightarrow \Delta t' = 12,5y \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}} = 12,5y \cdot 0,6 = 7,5y$$

Für Jonathan hat die Reise also 6 Jahre weniger gedauert.

## Extend

Dauer: 15 Minuten

Ablauf: Viele der Schülerinnen und Schüler werden zweifelsohne schon gehört haben, dass sich "nichts schneller als das Licht bewegen kann". Wir wollen zu guter Letzt noch zeigen was das eigentlich bedeutet und wie man darauf kommt:

Angenommen, von einem Bezugssystem  $S'$  aus gesehen bewegt sich ein Objekt mit der Geschwindigkeit  $u'$  nach rechts. Von einem Bezugssystem  $S$  aus gesehen bewege sich  $S'$  ebenfalls nach rechts mit einer Geschwindigkeit  $v$ . Dann muss natürlich  $u$ , die Geschwindigkeit des Objekts von  $S$  aus gesehen sowohl größer als  $u'$  als auch größer als  $v$  sein. ( $u \geq u', v$ )

Diese Feststellung hat Konsequenzen, die uns vielleicht nicht sofort klar sind. Betrachten wir den Ausdruck  $c^2 - u^2$ , der uns sagt, wie stark der Betrag der Geschwindigkeit  $u$  von  $c$  abweicht.

Setzen wir diesen Ausdruck in die Formel  $u' = \frac{u-v}{1-\frac{uv}{c^2}}$ , die wir bereits kennen ein, erhalten wir:

$$c^2 - u'^2 = \frac{(c^2 - v^2)(c^2 - u^2)}{c^2(1 + uv/c^2)^2}$$

Der ist als Produkt von zwei Quadraten stets positiv. Wenn Geschwindigkeitsbeträge, die größer als  $c$  sind möglich wären, würde aus  $v, u' > c$  folgen, dass  $u < c$ . Das ist aber ein Widerspruch zu unserer Feststellung ( $u \geq u', v$ ).

Solange  $v, u' \leq c$  gilt, stimmt auch unsere Feststellung.

Daraus folgt, dass kein Geschwindigkeitsbetrag eines Signals oder Objekts die Raum/Zeit-Konstante  $c$  übersteigen kann.

## 5. Lehrerfeedback

### 5.1 Methode

Um einen gewissen Praxisbezug herzustellen, habe ich das hier präsentierte Unterrichtskonzept einem im Beruf tätigen Physiklehrer mit Praxiserfahrung vorgelegt und um sein Feedback gebeten. Das scheint mir eine sinnvolle Vorstufe zu einem Praxistest in der Schule zu sein. Insbesondere habe ich ihn um Feedback zu folgenden Fragen gebeten:

1. Denken Sie, dass man die Spezielle Relativitätstheorie so an der Schule unterrichten kann?
2. Denken Sie, dass dieser Ansatz zu einem tieferen Verständnis der Speziellen Relativitätstheorie verhilft?
3. Sehen Sie Vorteile in diesem Ansatz, die Spezielle Relativitätstheorie zu unterrichten?
4. Denken Sie, das Thema ist gut strukturiert?
5. Ist die verwendete Mathematik zu kompliziert für die Schülerinnen und Schüler?
6. Ist die Aufbereitung des Themas zu abstrakt?
7. Wo sehen Sie noch Verbesserungsbedarf?

Nachdem MMag. Eldib, der Physiklehrer, der sich dankenswerterweise zur Verfügung gestellt hat, die Unterrichtsmaterialien durchgelesen hatte, habe ich mich mit ihm für ein Interview getroffen. Im Folgenden versuche ich seine Antworten so gut wie möglich zusammenzufassen.

## 5.2 Kann man die SRT so an der Schule unterrichten?

Im gegenwärtigen Zustand des Unterrichtsentwurfs nicht. Die ersten Einheiten sind verwendbar, die letzten beiden sind jedoch mathematisch zu anspruchsvoll und zu kompliziert. Nur wenige Schülerinnen und Schüler könnten diesen Ausführungen folgen. Bei der Erstellung des Unterrichtskonzepts wurde nicht bedacht, dass es in den meisten Schulen in Österreich ein Problem mit der Mathematik gibt. Die traurige Realität ist, dass es viele Schülerinnen und Schüler gibt, die fragen, wozu brauchen wir Mathematik? Wozu brauchen wir Physik? Von daher sollte es immer wichtig sein, im Physikunterricht physikalische Konzepte möglichst eingängig und einfach zu erklären. Das Unterrichtskonzept verzichtet bewusst auf die Verwendung der Integral- und Differentialrechnung, die mathematischen Methoden, die stattdessen Verwendung finden, sind für die Schülerinnen und Schüler jedoch nicht einfacher.

### 5.3 Verhilft dieser Ansatz zu einem tieferen Verständnis der SRT?

Ja, es ist ein interessanter Ansatz, die Spezielle Relativitätstheorie so herzuleiten und zu sehen, dass man auch auf die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Postulat verzichten kann. Dennoch ist es vielleicht nicht der beste Ansatz, um die Spezielle Relativitätstheorie einzuführen. Um die Theorie zu verstehen, sind viele Ansätze zu abstrakt. Jede Unterrichtsstunde benötigt eine Verankerung im Alltag der Schülerinnen und Schüler. Zum Beispiel sind Ereignisintervalle so abstrakt, dass sich die Schülerinnen und Schüler nichts darunter vorstellen können. Eine definierte Größe  $\tau$ , die ansonsten keine Anschauung besitzt, hilft den Schülern und Schülerinnen nicht weiter. Vielleicht ist der Ansatz besser in der Hochschule aufgehoben, wo die Studenten die bereits bekannte Theorie nun aus einem anderen Blickwinkel kennenlernen können.

### 5.4 Vorteile darin die SRT nach diesem Ansatz zu unterrichten?

Wenige. Sollten die Schülerinnen und Schüler wirklich zu einem tieferen Verständnis der Speziellen Relativitätstheorie gelangen, wäre das natürlich wünschenswert. Es gibt jedoch auch einige Nachteile, die noch nicht bedacht wurden. Die Schülerinnen und Schüler leben nicht im medialen Vakuum. Sie sehen sich YouTube-Videos an, in denen erläutert wird, dass es sich bei  $c$  um die Lichtgeschwindigkeit handelt. Sie lesen Bücher und reden mit älteren Schülerinnen und Schülern. Alle Schulbücher bezeichnen  $c$  jedoch als die Lichtgeschwindigkeit und verwenden die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Postulat der Speziellen Relativitätstheorie. Das führt zu Konflikten in den Köpfen der Schülerinnen und Schüler. Wie löst man diese auf? Und ist die Betonung der Tatsache, dass  $c$  keine Geschwindigkeit ist, den Mehraufwand, die Zeit und das Risiko, die Schülerinnen und Schüler noch mehr zu verwirren, wert? Oder ist diese Unterscheidung, die selbst in Büchern auf Universitätsniveau im Allgemeinen nicht getroffen wird, in den Hochschulen besser aufgehoben?

## 5.5 Ist das Thema gut strukturiert?

Der Unterrichtsverlauf springt etwas zu sehr hin und her, sowohl zeitlich als auch thematisch. Besser wäre vielleicht ein historischer Ablauf, den man ja nicht zwingend als solchen benennen muss. Warum nicht mit dem Inertialsystem anfangen, von da aus Galileisches Äquivalenzprinzip, dann die Betrachtung verschiedener relativ zueinander bewegter Systeme einführen. Anschließend betrachtet man Lorentztransformationen und zuletzt dann Einstein und die Relativitätstheorie. Verfolgt man einen derartigen Aufbau nicht, riskiert man den roten Faden zu verlieren und damit natürlich im Unterricht viele Schülerinnen und Schüler.

## 5.6 Ist die verwendete Mathematik zu kompliziert?

Ja, zumindest in den späteren Einheiten. Die Schülerinnen und Schüler einer achten Klasse werden den Umformungen und Argumentationen so nicht folgen können, selbst wenn, oder gerade weil auf Integral- und Differentialrechnung verzichtet wird. Die Schülerinnen und Schüler lernen in der achten Klasse Analysis, also warum nicht die Werkzeuge, welche die Mathematik hier bietet, auch nutzen?

## 5.7 Ist die Aufbereitung des Themas zu abstrakt?

Ja, jedoch hauptsächlich in den späteren Einheiten. So ist zum Beispiel die Herleitung der Zeitdilatation mithilfe der Ereignisintervalle extrem abstrakt. Im Vergleich dazu kann man den Effekt sehr einfach und anschaulich mit der Lichtuhr herleiten, wie es ja auch in den meisten Physikbüchern geschieht. Ein Photon, das zwischen zwei Spiegeln hin und her fliegt mag schon recht abstrakt erscheinen, ist jedoch noch immer deutlich anschaulicher als das hier verwendete Konzept. Und es kann noch anschaulicher gemacht werden: Ein Beobachter sitzt in einer Rakete. Er sitzt an einem Ende der Rakete und leuchtet mit einem Laserpointer an das andere Ende der Rakete. Ein zweiter, unbeschleunigter Beobachter bewegt sich relativ zu der Rakete, im rechten Winkel zum Laserstrahl. Aus diesem Szenario kann man,

wenn man die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen postuliert, den Effekt der Zeitdilatation mit dazugehöriger Formel herleiten. An mathematischen Werkzeugen werden lediglich der Satz des Pythagoras, der von den Schülern und Schülerinnen in der 8. Klasse gut verstanden wird, sowie Äquivalenzumformungen, die ebenfalls kein Problem darstellen, benötigt. Die Herleitung ist so viel klarer, anschaulicher und nachvollziehbarer, dass sie, zumindest in der Schule, die deutlich bessere Herleitung ist.

## 5.8 Wo sehen Sie noch Verbesserungsbedarf?

Wenn man die Spezielle Relativitätstheorie so in der Schule unterrichten möchte, muss noch einiges getan werden um den Inhalt mathematisch noch einfacher und physikalisch noch anschaulicher zu machen. Selbst dann bleibt das Problem, dass es keine passenden Schulbücher gibt, in denen die Schülerinnen und Schüler ja auch lesen, beziehungsweise daraus lernen. Da zumindest die Spezielle Relativitätstheorie einen gewissen Bekanntheitsgrad genießt, gibt es auch viele Quellen außerhalb der Schule, und damit außerhalb des Einflussbereiches der Lehrperson, durch welche die Schülerinnen und Schüler lernen, dass  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist. Von daher scheint es im Moment sinnlos, darauf zu beharren, dass  $c$  die Raum/Zeit-Konstante ist. Sollte ein Schulbuch erscheinen, in dem das Thema noch besser und verständlicher als hier vorgeschlagen aufbereitet ist, könnte man überlegen die Spezielle Relativitätstheorie so zu unterrichten. Bevorzugt jedoch auch dann als "zweite Perspektive", nicht um die Theorie das erste Mal kennenzulernen.

## 6. Schlusswort

Rückblickend denke ich, dass es mir durchaus gelungen ist zu zeigen, wie man die von Univ.-Prof. i.R. Dr. Rupp in seinem Skriptum "Romanos Physikkurs I" vorgeschlagene Methode, die Spezielle Relativitätstheorie aufzuarbeiten, für die Schule adaptieren kann. Dennoch gibt es gewisse Hürden, die einer tatsächlichen Anwendung dieses Konzepts im Weg stehen. Problematisch ist vor allem das Fehlen

von Physikbüchern, welche die entsprechende Herangehensweise unterstützen, sowie die Tatsache, dass die Schülerinnen und Schüler aus vielen anderen Quellen die gängige (um das Wort "klassisch" in diesem Zusammenhang zu vermeiden) Sichtweise auf die Spezielle Relativitätstheorie aufschnappen können.

Die Frage, welche die bessere Sichtweise ist, sollte vielleicht auch nicht im Klassenraum entschieden werden, wo es darum geht, dass alle Schülerinnen und Schüler ein möglichst allgemeines Verständnis von Physik erlangen sollen. So wird in der Schule eben auch die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik gelehrt, welche wohl auch die am weitesten verbreitete Interpretation ist, und nicht vielleicht die De-Broglie-Bohm-Theorie, obwohl beide Interpretationen gleichwertig sind. Sollten sich irgendwann ein Großteil der Physiker für die Bohmsche Mechanik aussprechen, also eine Art Paradigmenwechsel eintreten, wird diese Ansicht sicherlich auch früher oder später in den Schulunterricht einfließen. Ganz ähnlich sehe ich die Situation bei der von mir ausgearbeiteten Herangehensweise an die Spezielle Relativitätstheorie. Zuerst müssten sich wohl die Vorlesungen an den Universitäten verändern, und wenn genug Studenten die rein mechanische Herangehensweise an die Spezielle Relativitätstheorie verinnerlicht haben, kann diese Perspektive sich langsam in Büchern und anschließend auch im Schulunterricht verbreiten.

Was jedoch sicherlich auch jetzt schon möglich ist, wäre eine Verwendung in Wahlpflichtfächern oder für Gruppen- oder Projektarbeiten. Nicht als erster Kontakt mit der Speziellen Relativitätstheorie, sondern als zweite Perspektive. Schülerinnen und Schüler, die für Physik begeistert sind, sich also in das Wahlpflichtfach einschreiben, kann man sicherlich auch eher dafür interessieren, dass man auf das Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verzichten kann. Es reicht das Äquivalenzprinzip, sowie die Homogenität des Raums und der Zeit. Die letzten beiden Postulate werden in den meisten Schulbüchern implizit vorausgesetzt.

Der Verzicht auf eines der Postulate zeigt, dass die Spezielle Relativitätstheorie noch fundamentaler ist, als es den Anschein hat. Selbst ohne Licht und dessen

anscheinend so erstaunliche Eigenschaften gilt die Spezielle Relativitätstheorie. Die Schülerinnen und Schüler mögen vielleicht nicht glauben, dass sich ein Lichtteilchen immer mit derselben Relativgeschwindigkeit zu einem Beobachter bewegt, egal ob dieser sich auf das Teilchen zu oder davon weg bewegt und egal wie schnell er es tut. Dieses Postulat ist einigen Schülerinnen und Schülern vielleicht zu verrückt. Aber dem Postulat, dass alle Bezugssysteme gleichberechtigt sind, kann wohl kaum ein Schüler oder einer Schülerin widersprechen, da es auch ihren Alltagserfahrungen entspricht und im Kern reicht dieses Postulat aus, um die gesamte Speziellen Relativitätstheorie herzuleiten.

Die Abstraktheit scheint jedoch das Hauptproblem der hier vorgeschlagenen Herangehensweise zu sein. Wenn es irgendwie möglich ist, die Herleitungen noch verständlicher und anschaulicher zu machen, wäre das sicherlich eine bedeutende Verbesserung.

## 7. Literaturverzeichnis

Apolin, M., (2013): Big Bang. Physik 8. Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, Wien

Big Bang Oberstufe, Big Bang reloaded!, online unter <<https://www.oebv.at/big-bang-os>> (abgerufen am 10.07.2019)

Bybee, R.W. (2009): The BSCS 5E instructional model and 21st century skills. CO: BSCS, Colorado Springs

Eisenkraft, A. (2013): Expanding the 5E model: A proposed 7E model emphasizes “transfer of learning” and the importance of eliciting prior understanding. In: The Science Teacher, 70, 56-59.

Galileo Galilei: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische. B.G. Teubner, Leipzig 1891, S. 197–198

Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 29.04.2019, online unter <<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>> (abgerufen am 01.09.2019)

Hewitt, P. (2006): Conceptual Physics. Tenth Edition. Addison-Wesley, Boston

Hirt, C., Claessens, S. J., Kuhn, M., Featherstone, W. E. (2012): Kilometer-resolution gravity field of Mars: MGM2011 In: Planetary and Space Science. 67 (1): 147–154.

Jaros, A., Nussbaumer, A., Nussbaumer, P. (2013): Physik compact. Basiswissen 8. Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, Wien

Physik compact, Physik compact und übersichtlich, online unter <<https://www.oebv.at/lehrwerke/physik-compact/information-0>> (abgerufen am 10.07.2019)

Reinfried, S., Mathis, C., Kattmann, U. (2009): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht - In: Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung 27 3, S. 404-414

Rupp, R.A. (2020) (Vorabversion #550, in Vorbereitung): Romanos Physikkurs I

Schecker, H., Duit, R., Wilhelm, T., Hopf, M. (2018): Schülervorstellungen Und Physikunterricht. Ein Lehrbuch Für Studium, Referendariat Und Unterrichtspraxis. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer Spektrum

Sexl Physik, Physik im größeren Zusammenhang, online unter <<https://www.oebv.at/sexl>> (abgerufen am 10.07.2019)

Sexl, R. et al. (2013): Physik 8. Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, Wien

## 8. Anhang

### 8.1 Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit führe ich ein neuartiges Unterrichtskonzept für die Schule ein, welches die Relativitätstheorie konsequent aus der Mechanik heraus entwickelt. Meine Überlegungen basieren dabei auf einem von Univ.-Prof. i.R. Dr. Romano Rupp für die Hochschule entwickelten Konzept. Ich beginne damit mehrere gängige Physikbücher zu untersuchen, um festzustellen, wie die übliche Zugangsweise im Schulunterricht aufgebaut ist und um zu überprüfen, ob es sich bei meiner Arbeit tatsächlich um eine neuartige Idee handelt. Anschließend habe ich eine Unterrichtsplanung entwickelt, die sieben Unterrichtseinheiten umspannt. Jede Unterrichtseinheit benötigt zwischen einer und drei Schulstunden. Zuletzt habe ich einem derzeit im Beruf tätigen Physiklehrer meine Überlegungen vorgelegt, um sie auf ihre Alltagstauglichkeit zu überprüfen und sein Feedback dokumentiert. Er konnte noch einige Probleme mit dem Konzept aufzeigen, die man jedoch in weiterer Arbeit überwinden könnte.

### 8.2 Abstract

In this diploma thesis I'm introducing a new concept to teach the theory of special relativity in school, where the theory is strictly derived from mechanical considerations. I base my work on a university-level concept that was developed by university professor Romano Rupp. I start by reviewing several physics school books, to see how special relativity is usually taught and to check if my approach is truly original. I have planned a sequence spanning seven units that can be used to teach in school. After that I have presented my thoughts to an active physics teacher and documented his feedback. He was able to show a few problems with my concept that should, however, be fixable.