universität wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Relativistische Massenzunahme oder Masseninvarianz? Die Frage der korrekten Umsetzung für den praktischen Schulunterricht“

verfasst von / submitted by

Claudia Sommer

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

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2020 / Vienna, 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt / degree programme code as it appears on the student record sheet:	UA 190 299 412
Studienrichtung lt. Studienblatt / degree programme as it appears on the student record sheet:	Lehramtsstudium UniStG UF Psychologie und Philosophie UF Physik
Betreut von / Supervisor:	Univ. –Prof. i.R. Dr. Romano Rupp

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG (FRAGEKAPITEL) 5

2 METHODENKAPITEL 9

3 RELATIVISTISCHE UND INVARIANTE MASSE 12

3.1 KONZEPTE DER MASSE 12

3.1.1 Träge Masse nach Newton 13

3.1.2 Elektrodynamische Masse 14

3.1.3 Longitudinale und transversale Masse 16

3.1.4 Relativistische Masse 18

3.1.5 Masse in der modernen Physik 19

3.2 EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DER MASSE 21

3.3 URSPRUNG DER RELATIVISTISCHEN MASSE 24

3.4 MASSE IN DER SPEZIELLEN RELATIVITÄTSTHEORIE 27

3.5 HISTORISCHER KONTEXT 30

3.6 VORTEILE UND NACHTEILE DER RELATIVISTISCHEN MASSE 32

3.6.1 Vorteile 33

3.6.2 Nachteile 34

3.7 RELATIVISTISCHE MASSE IM SCHULUNTERRICHT 36

3.7.1 Physik 8 Sexl 37

3.7.2 Big Bang Physik 8 42

3.7.3 Physik compact Basiswissen 8 46

3.7.4 Vergleich der Schulbücher 50

3.8 FORSCHUNGSSTAND PHYSIKDIDAKTIK 52

3.8.1 Unterrichtskonzepte aus Fachartikeln 53

3.8.2 SchülerInnenvorstellungen 57

4 UNTERRICHTSKONZEPT 62

4.1 NOTWENDIGE VORAUSSETZUNGEN 62

4.2 PRINZIPIEN DER SPEZIELLEN RELATIVITÄTSTHEORIE 64

4.3 LORENTZTRANSFORMATION IN DER SCHULE 65

4.4 ERHALTUNGSGRÖßEN 67

4.5 MASSENBESTIMMUNG DURCH VERGLEICHSVERFAHREN 68

4.6 PRAKTISCHER SCHULUNTERRICHT 70

4.6.1 Schulische Rahmenbedingungen 71

4.6.2 Stundenplanung auf Basis des Unterrichtskonzeptes 72

5 DISKUSSIONSKAPITEL 86

5.1.1 Vorteile und Nachteile des erstellten Unterrichtskonzeptes 86

5.1.2 Vorteile und Nachteile aktueller Unterrichtskonzepte 88

5.1.3 Kritik an der Lehre der relativistischen Masse 93

6 FORSCHUNGSAUSBLICK 98

7 ZUSAMMENFASSUNG 100

8 ABSTRACT 101

1 Einleitung (Fragekapitel)

Die Relativitätstheorie ist eine der bekanntesten physikalischen Theorien weltweit. Ob Physiker oder nicht, beinahe jeder hat schon etwas von der Relativitätstheorie und seinem Begründer, Albert Einstein, gehört. Im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie wird oft die relativistische Massenzunahme genannt. Darunter versteht man, dass bei zunehmender Geschwindigkeit die Masse eines Objekts zunimmt. Dabei werden die Begriffe „relativistische Massenzunahme", „relativistische Masse" und „dynamische Masse" oft als Synonym füreinander verwendet. Die relativistische Masse, als physikalisches Konzept, lässt sich in Schulbüchern und Physikbüchern für die Hochschule finden. Darin wird die relativistische Massenzunahme im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie, meistens im Namen von Albert Einstein, gelehrt. In einigen Fachbüchern, vor allem in Schulbüchern, wird die relativistische Massenzunahme als Konsequenz der Relativitätstheorie oder gar einer der Kernaussagen der Relativitätstheorie gehandhabt. Die Frage ist, inwieweit die Lehre der relativistischen Massenzunahme im praktischen Schulunterricht zu einem Verständnis der speziellen Relativitätstheorie beiträgt und welche alternativen Konzepte der Masse, im Rahmen der Relativitätstheorie, unterrichtet werden können. Da es methodisch nicht notwendig ist, die spezielle Relativitätstheorie mittels der relativistischen Masse zu unterrichten, kann auf dieses physikalische Konzept verzichtet werden. Die Masse ist eine Invariante und kann auch als solche innerhalb der Relativitätstheorie gelehrt werden.

Daraus ergibt sich die Frage, wieso die relativistische Masse eingeführt wurde, wenn sie der Lehre der speziellen Relativitätstheorie entbehrlich ist. Dazu müssen der historische Kontext, in dem die Relativitätstheorie entwickelt wurde, und die vormals bzw. parallel existierenden Theorien durchleuchtet werden. Die Massenzunahme als Theorie gab es bereits vor den ersten Arbeiten von Albert Einstein zur speziellen Relativitätstheorie. Auf Basis der Experimente von Kaufmann an beschleunigten Elektronen wurde die Massenzunahme als Erklärung für die damaligen Versuchsergebnisse herangezogen. Es ist der Frage nachzugehen, wie die relativistische Massenzunahme, als eigentlich veraltete Theorie, sich bis heute im deutschsprachigen schulischen bzw. hochschulischen Raum durchsetzen konnte. Im

Sinne des fachdidaktischen Nutzens ist zu hinterfragen, ob diese Theorie einen fachdidaktischen Mehrwert bzw. sonstigen Vorteil hat. Dazu muss der aktuelle Forschungsstand in der Physikschuldidaktik herangezogen werden.

Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt in der Fachdidaktik der Physik sind Lernendenvorstellungen, welche meist Fehlvorstellungen sind. Im Rahmen der fachdidaktischen Forschung werden Fehlvorstellungen von Schüler und Schülerinnen zu den zentralen Konzepten der Physik, z.B. dem Kraftbegriff, erhoben. Ausgehend von diesen Lernendenvorstellungen können Unterrichtskonzepte erstellt werden, welche sich an verschiedenen fachdidaktischen Strategien orientieren. In bekannten Physik-Fachdidaktik-Werken spielen Fehlvorstellungen zur speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie eine untergeordnete Rolle. Noch bedeutender für meine Forschungsfrage ist, dass es keinerlei Forschungsarbeiten im Rahmen der Physikschuldidaktik zum Thema „relativistische Masse" gibt. Daraus ergibt sich die weiterführende Frage, inwieweit die Lehre der relativistischen Massenzunahme Fehlvorstellungen bzw. Konflikte zwischen bestehenden physikalischen Konzepten bei den Lernenden indiziert. Die Relevanz der Frage „Relativistische Massenzunahme oder Masseninvarianz" ist somit für den praktischen Schulunterricht eine bedeutende, da sie den Lernfortschritt der Schüler und Schülerinnen maßgeblich beeinflussen kann. Daher ist es wichtig die Vorteile und Nachteile der jeweiligen Konzepte auf Basis fachdidaktischer allgemeiner Prinzipien zu analysieren.

Ausgehend von meiner eigenen Erfahrung, dass ich der Fehlvorstellung der relativistischen Massenzunahme bis in das 3. Semester Physikstudium aufgesessen bin und meiner fast schon trivialen Erkenntnis in der Vorlesung „Prinzipien der modernen Physik", halte ich es für außerordentlich wichtig sich dieser Forschungsfrage anzunehmen. Ein Verständnis der Postulate der speziellen Relativitätstheorie sowie der Masse als Invariante löste alle Konflikte innerhalb meiner Fehlvorstellungen zur speziellen Relativitätstheorie. Daher ist es mir ein Anliegen in dieser Arbeit mögliche alternative Unterrichtskonzepte, auf Basis des Vorlesungsskriptums zu „Romanos Physikkurs 1" von Professor Romano Rupp, zu entwickeln. Dieses Skriptum enthält alle wichtigen Eckpunkte zur Vermittlung der speziellen Relativitätstheorie sowie der experimentellen Bestimmung der Masse. Insbesondere werden die Kapitel zu Kinematik und Dynamik für die Arbeit herangezogen. Eine angemessene Umsetzung

der Lehrinhalte kann durch Verwendung von weiteren fachdidaktischen Werken realisiert werden.

Da die Bestimmung der Masse zwangsweise mit der Frage „relativistische Massenzunahme oder Masseninvarianz" verbunden ist, sind ausgewählte Konzepte der Masse und die Definitionen des Urkilogramms als Grundlage für die Entwicklung eines Unterrichtskonzeptes heranzuziehen. Es ist anzumerken, dass seit dem 20.5.19 die neue Bestimmung des Urkilogramms in Kraft getreten ist. Im praktischen Schulunterricht wird die Masse zunächst in Verbindung mit der Dichte und anschließend im Zusammenhang mit dem Newtonschen Trägheitsgesetz gelehrt. Auf diese Gegebenheiten ist beim Erstellen eines Unterrichtskonzepts einzugehen.

Ich möchte anmerken, dass die unscheinbare Frage „relativistische Massenzunahme oder invariante Masse" eine Vielzahl von weiterführenden Fragen aufwirft, welche Anlass zu weiteren Forschungsarbeiten gibt. Ein mir persönlich wichtiges Anliegen wäre eine Forschungsarbeit, welche sich mit den Fehlvorstellungen zum Thema „relativistische Massenzunahme" empirisch auseinandersetzt. Weiter möchte ich feststellen, dass es bei dieser Forschungsfrage um mehr als eine formale Richtigstellung geht. Es geht um entscheidende Kernaussagen der Relativitätstheorie, welche durch die Lehre der „relativistischen Massenzunahme" schlichtweg verloren gehen oder zumindest verdeckt werden. Diese Thematik ist von gesellschaftlicher Relevanz, weil Grundzüge der allgemeinen sowie speziellen Relativitätstheorie Teil des Oberstufen-Lehrplans sind und die Schüler und Schülerinnen ein Recht auf dessen bestmögliche Umsetzung haben.

Um auf meine persönlichen Erfahrungen zurückzugreifen, möchte ich folgende Gedanken wiedergeben. Es war in meinen Vorstellungen ein Teilchen, das immer schneller und schwerer wurde. Ich dachte mir wohin mit der Masse, wird das Teilchen immer dicker? Woher kommt überhaupt die zusätzliche Masse? Und warum hat das Photon keine Masse, weil es sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt? Ich dachte mir, das macht doch alles keinen Sinn, aber wiedergeben habe ich es trotzdem. Innerhalb meines Nachhilfeunterrichts muss ich oft die „relativistische Massenzunahme" unterrichten, da sie auch so im Schulunterricht gelehrt wird. In mir sträubt sich etwas dagegen, aber die Verwirrung ist komplett, wenn ich von der invarianten Masse

spreche. Es ist mir also auch ein persönliches Anliegen ein professionelles Unterrichtskonzept zu entwickeln.

Durch die Analyse von aktuellen Unterrichtskonzepten zur relativistischen Masse und die Abwägung ihrer Vorteile und Nachteile, sowie die Entwicklung alternativer Konzepte kann ein Beitrag zur Fachdidaktik geleistet werden. In diesem Sinne stellt die Frage „relativistische Massenzunahme oder Masseninvarianz" einen Mehrwert für die Wissenschaft dar.

2 Methodenkapitel

Infolge meiner Recherchearbeiten musste ich feststellen, dass es zu meiner Forschungsfrage keine Forschungsarbeiten in der Physikdidaktik gibt. Ausgehend von den spärlich vorhanden wissenschaftlichen Artikeln und Büchern zur Frage „relativistische Massenzunahme oder invariante Masse" im deutschsprachigen und angloamerikanischen Raum halte ich eine Diplomarbeit, welche den praktischen Schulunterricht untersucht, für derzeit ausgeschlossen. Die Kapazitäten, welche für eine empirische Studie zu den Vorbereitungen und Umsetzungen eines Unterrichtskonzeptes notwendig sind, können im Rahmen meiner Forschungsarbeit nicht aufgebracht werden. Daher wird auf die Methode Literaturarbeit zurückgegriffen.

Eine Literaturarbeit zu ausgewählten spezifischen Fachwerken dient als Grundlage für das zu erstellende Unterrichtskonzept. Zunächst wurde die Universitätsbibliothek auf die Schlagworte „relativistische Massenzunahme", „dynamische Masse", „apperant mass", „spezielle Relativitätstheorie", „invariante Masse", „scheinbare Masse" und „Bestimmung der Masse" durchsucht. Bücher und Artikel die sich nur am Rande mit meiner Forschungsfrage beschäftigen, oder keine neuen Erkenntnisse brachten, wurden nicht weiter studiert. Auf Basis der ausgewählten Fachliteratur zu den erwähnten Schlagworten konnte genügend Forschungsmaterial gesammelt werden. Nachdem eine Vielzahl renommierter und größtenteils aktueller wissenschaftlicher Literatur zum Thema „relativistische Masse" gesichtet wurde, wurde die Suche abgebrochen um die Literaturanalyse in Grenzen zu halten. Anschließend wurden ausgewählte Kapitel der Literatur gelesen und exzerpiert. Es ergaben sich teilweise weiterführende Fragen, welche über die Forschungsfrage hinausgehen. Dies machte eine erneute Fokussierung auf den Kernbereich „dynamische Masse" im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie immer wieder notwendig.

Um den chronologischen sowie historischen Kontext näher zu durchleuchten, wurden Originalwerke von Albert Einstein, Walter Kaufmann und Richard C. Tolman gelesen sowie sozialhistorische Fachliteratur herangezogen. Es gestaltet sich als überaus schwierig, sozialhistorische Fachliteratur explizit zu meiner Forschungsfrage, bzw. zu der Frage „wie die Idee der relativistischen Massenzunahme Einzug in die Fachliteratur fand", zu finden. Die ausgewählte Fachliteratur, welche sich mit der Physik unter dem

Nationalsozialismus beschäftigt, dient zur Darlegung der historischen Begebenheiten. Originalwerke von Albert Einstein werden zur Aufarbeitung der Forschungsfrage herangezogen um ursprüngliche Konzepte der Masse in der speziellen Relativitätstheorie aufzeigen zu können.

Um ein Bild von der Situation im österreichischen Physikunterricht zu bekommen, werden drei häufig in Österreich verwendete Schulbücher analysiert, welche in der Fachbibliothek für Physik aufliegen. Es werden Aufbau und Inhalte der Kapitel zu „Relativitätstheorie" in den Schulbüchern untersucht. Die ausgewählten Schulbücher geben die fachdidaktische Umsetzung der Masse, im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie, in der Oberstufe wieder. Wie die einzelnen Lehrkräfte die spezielle Relativitätstheorie lehren kann innerhalb meiner Forschungsarbeit nicht beantwortet werden. Offiziell anerkannte und verwendete Lehrbücher im österreichischen Physikunterricht können aber als Hinweis dafür dienen.

Wichtig ist, dass auf die Bestimmung bzw. Messung der Masse auf Grund von wissenschaftlich anerkannten Methoden eingegangen wird. Dazu werden im Rahmen der Forschungsfrage relevante Methoden zur empirischen Bestimmung der Masse vorgestellt. Es wird kurz auf den Umstand einzugehen sein, dass eine neue Definition des Urkilogramms beschlossen wurde. Die experimentelle Bestimmung der Masse basiert auf der physikalischen Definition der Masse.

Ausgangspunkt für das zu erstellende Unterrichtskonzept stellt das Vorlesungsskript „Romanos Physikkurs 1", vor allem die Kapitel „Kinematik" und „Dynamik", dar. Die Struktur des Vorlesungsskripts dient zur Orientierung für die fachdidaktische Umsetzung eines Konzepts basierend auf der invarianten Masse. Mittels ausgewählter Literatur werden allgemein gültige fachdidaktische Anforderungen innerhalb des zu erstellenden Unterrichtskonzeptes umgesetzt. Weiter dient die fachdidaktische Literatur zur Abwägung der Vorteile und Nachteile der Lehre der „relativistischen Massenzunahme" bzw. „invarianten Masse". Somit kann eine Validität der Vorteile und Nachteile meines zu erstellenden Unterrichtskonzeptes auf dem Gebiet der Physikdidaktik gewährleistet werden. Die Gültigkeit beschränkt sich auf den österreichischen Schulraum in einer theoretischen Literaturarbeit.

Die Inhalte der ausgewählten Fachliteratur eignen sich für die Erhebung der Vorteile und Nachteile der jeweiligen Konzepte der Masse. Ausgehend von der allgemeinen Bestandsaufnahme zur relativistischen Masse in der Fachliteratur wird zur Erstellung des Unterrichtskonzepts fachdidaktische Literatur herangezogen. Die bereits diskutierten Vorteile und Nachteile werden vor dem Hintergrund der praktischen Umsetzung im Schulunterricht erneut analysiert. Fachdidaktisch allgemeine Prinzipien und Strategien im Physikunterricht werden bei der Erstellung des Unterrichtskonzeptes angewendet. Meine Hypothese lautet, dass eine Lehre der speziellen Relativitätstheorie ohne relativistische Massenzunahme im praktischen Schulunterricht möglich und von Vorteil für das physikalische Verständnis ist. Untermauern werde ich meine Hypothese mit der ausgewählten Fachliteratur und der Darlegung des historischen Hintergrunds. Eine Objektivität wird mittels renommierter Fachliteratur und klarer Trennung von Interpretation und Diskussion angestrebt. Ein Verlust von weiterführender bzw. bedeutender Literatur zur Forschungsfrage ist nicht auszuschließen, da tausendfach Werke zu den Schlagwörtern existieren. Die Reliabilität der Forschungsarbeit ist insoweit gewährleistet, da der Forschungsfrage konsistent und nachvollziehbar nachgegangen wird.

3 Relativistische und invariante Masse

Die Masse ist eine der bedeuteten Größen der Physik. „Die Kinematik beschäftigt sich mit der Bewegung von Objekten in Raum und Zeit, und wie diese beschrieben werden können." (Rupp, 2018, p. 65) „Die Dynamik befasst sich mit der Klärung des Phänomens der Bewegungsänderung." (Rupp, 2018, p. 92) Die Dynamik benötigt dazu ein weiteres Konzept neben Raum und Zeit. Dieses zusätzliche Konzept ist das der Masse bzw. das der Kraft. In der Geschichte der Physik gibt es eine Reihe von Konzepten der Masse, einige davon sind heute obsolet. Unter den aktuellen Konzepten sind die relativistische und invariante Masse zu finden.

Die relativistische Masse stellt, im Gegensatz zur weitläufigen Annahme, keine Konsequenz der speziellen, auch nicht der allgemeinen, Relativitätstheorie dar. Um den Ursprung bzw. die Entstehung des Begriffs „relativistische Masse" nachvollziehen zu können, werden ausgewählte Konzepte der Masse beschrieben. Auf die experimentelle Bestimmung der Masse wird kurz eingegangen, da dies wichtig für die Interpretation der Konzepte und das Wissen über messtechnischen Gegebenheiten ist. Dabei werden nur ausgewählte Methoden in Bezug auf die Forschungsfrage hin beschrieben. Die Masse in der speziellen Relativitätstheorie wird in einem eigenen Kapitel dargelegt, dadurch können Unterschiede und Gemeinsamkeiten mit den zuvor genannten Massenkonzepten auf die Forschungsfrage hin analysiert werden. Der historische Kontext in dem Albert Einstein seine Relativitätstheorie entwarf wird kurz umrissen, um mögliche Einflüsse auf die Lehre der speziellen Relativitätstheorie zu untersuchen.

Um eine Grundlage für den fachdidaktischen Teil der Arbeit zu schaffen, werden mögliche Vorteile und Nachteile der relativistischen Masse als Konzept erläutert. Anschließend werden die aktuellen Schulbücher in Hinblick auf die relativistische Masse untersucht, dies dient zur Bestandaufnahme. Abschließend wird der Forschungsstand der Physikdidaktik dargelegt, dieser soll als Vergleich für die vorgefunden Massenkonzepte in den Schulbüchern dienen.

3.1 Konzepte der Masse

Die Masse ist ein theoretischer Begriff, weil dieser nicht alleine durch die Kinematik definiert werden kann. (Jammer, 2000, p. 24) Es gibt üblicherweise drei Ansätze um

die Masse zu definieren. Als Quantität der Materie, als Widerstand gegen eine Bewegungsänderung und als Ursache für die Gravitationswechselwirkung. (Hecht, 2011, p. 40) Die Masse als Quantität ist ein metaphysischer Zugang, welcher aus der Zeit des Mittelalters stammt und nicht mehr zeitgemäß ist. (Hecht, 2011, p. 40)

In der Gravitationsmasse ist die träge Masse implizit enthalten, jedoch wurde in der Historie die Gravitationsmasse vor der trägen Masse definiert. (Jammer, 2000, p. 7) Auf die Gravitationsmasse wird hier nicht eingegangen, da diese durch die allgemeine Relativitätstheorie (ART) obsolet wurde und das Konzept der Masse in der ART eine eigene Geschichte ist. (Silagadze, 2014, p. 1650) Der Fokus liegt auf den Konzepten der Masse als Widerstand gegen eine Bewegungsänderung, der sogenannten trägen Masse. Newton war der Erste, der die träge Masse mittels des zweiten Newtonschen Axioms definierte.

3.1.1 Träge Masse nach Newton

In der newtonschen Mechanik ist die träge Masse eine Eigenschaft eines Körpers und unabhängig von äußeren Umständen, welche auf den Körper einwirken. (Adler, 1987, p. 740) Newton postulierte das zweite newtonsche Axiom mit dem sogenannten Impulssatz. Eine zeitliche Änderung des Impulses bewirkt eine dazu proportionale Geschwindigkeitsänderung:

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\,\frac{d\vec{v}}{dt} \qquad (3.0)$$

Wobei F die einwirkende Kraft ist, t die Zeit und p der Impuls. Der Impuls ist in der nichtrelativistischen Physik gegeben durch p=mv, wobei m die Masse und v die Geschwindigkeit des Körpers ist. Durch die Ableitung nach der Zeit erhält man das Kraftgesetz. Das bekannte Kraftgesetz (3.1) wurde zuerst von Euler formuliert:

$$\vec{F} = m\,.\,\vec{a} \qquad (3.1)$$

Beide Formulierungen sind in der Literatur zu finden, in österreichischen Schulbüchern wird häufig die Formulierung nach Euler verwendet. Wirkt auf einen Körper mit der Masse m eine Kraft F, dann erhält dieser die Beschleunigung a. Die Masse ist der Proportionalitätsfaktor zwischen einwirkender Kraft F und resultierender Beschleunigung a:

$$m = \frac{|\vec{F}|}{|\vec{a}|} \qquad (3.2)$$

Bei gleicher einwirkender Kraft wird ein Körper mit größerer Masse geringer beschleunigt als ein Körper mit kleinerer Masse. Die Masse eines Körpers ist ein Maß für den Widerstand gegen eine Bewegungsänderung, die sogenannte Trägheit.

Es ergeben sich hier Schwierigkeiten, da die Definition eine Zirkularität beinhaltet. (Jammer, 2000, p. 6) Die Zirkularität besteht darin, dass die Kraft mittels der Masse eines Körpers definiert wird und die Masse mittels einer Kraft. Weiter muss bedacht werden, dass das theoretische Konzept die Reibungskräfte außer Acht lässt. Eine Wechselwirkung mit der Umgebung ist unvermeidbar. Durch Reibungskräfte, welche nicht konstant sein müssen, kann die experimentell bestimmte Masse größer erscheinen. (Jammer, 2000, p. 32) Eine rein kinematische Theorie ist nicht möglich, da eine dynamische Theorie einen Kraftbegriff braucht und es somit zu einem zirkularen Schluss kommt. (Jammer, 2000, p. 143) Die Masse wird durch die Messung von kinematischen Größen bestimmt. Mach definierte das Massenverhältnis m_A/m_B, von zwei Körpern A und B, als das (negativ inverse) Verhältnis der Beträge der Beschleunigungen der Körper A und B. Somit hat der definierte Term Masse keine absolute Bedeutung, weil er eine Relation zu einem Objekt impliziert, welches als Einheit für die Masse dient. (Jammer, 2000, p. 143) Das heißt, dass ein Körper mit einer definierten Masseneinheit, z.B. ein Kilogramm, als Vergleichsmasse dient. Machs Kritik zeigt auf, dass die Definition der Masse nichts über die intrinsische Bedeutung der Masse aussagt. (Jammer, 2000, p. 143) Es handelt sich bei diesem Konzept der Masse um eine Beobachtung eines Verhaltens dem man Masse zuschreibt und keine Theorie der Masse selbst. (Jammer, 2000, p. 144)

3.1.2 Elektrodynamische Masse

Im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts war in der Physik die elektrodynamische Weltanschauung vorherrschend. Man ging davon aus, dass die Masse ein elektrodynamischer Effekt sei und versuchte die Mechanik aus der Elektrodynamik abzuleiten. (Jammer, 2000, p. 42) Die generelle Idee war es, ein elektrodynamisches Modell für das ausgedehnte, im Gegensatz zum punktförmigen, Elektron zu finden. (Adler, 1987, p. 741) Eine Vielzahl von namenhaften Physikern, wie Abraham,

Bucherer, Kaufman, von Laue, Lorentz, Planck, Poincare und viele mehr waren an dieser Idee beteiligt.

Abraham und Wien kamen zu dem Schluss, dass die gesamte Masse gleich ihrer elektromagnetischen Masse sei. Thomson bemerkte 1893, dass die Energie geladener Körper mit größerer Geschwindigkeit zunimmt, es war immer mehr Energie erforderlich um die Masse weiter zu beschleunigen. Dieser Umstand wurde teilweise als Zunahme der Masse gedeutet. Searle erstellte ausgehend von Thomsons Arbeiten eine Formel für die Energie dieser Körper. Kaufmann und Abraham leiteten 1902 aus dieser Formel die Masse für bewegte Körper ab. Abraham zeigte, dass die Formel nur für die longitudinale Richtung korrekt ist. Es wurde die longitudinale Masse eingeführt, d.h. die elektromagnetische Masse wurde als richtungsabhängig angesehen. Weiter leitete Abraham die transversale Masse ab und die Konzepte einer „longitudinalen und transversalen Masse" fanden Einzug in die Physik. (Wikipedia, 2020)

Andererseits hatte Lorentz 1899 angenommen, dass das Elektron in Bewegungsrichtung einer Längenkontraktion unterliegt. Lorentz stellte aus dieser Annahme eine Formel für die longitudinale und transversale Masse auf, welche von der Formel von Abraham abwich. Der Faktor $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ ist Bestandteil der von Lorentz aufgestellten Formeln für die transversale und longitudinale Masse. Dieser Faktor ist heute als der Lorentzfaktor γ bekannt. In Lorentz Theorie zur anisotropen Masse war die transversale Masse äquivalent zu $m_0\gamma$ und die longitudinale zu $m_0\gamma^3$. (Hecht, 2009, p. 337)

Kaufmanns und Bucherers Experimente sollten untersuchen ob Lorentz oder Abraham die richtige Formel für die geschwindigkeits- und richtungsabhängige Masse aufstellt hatten. Einige Experimente bestätigten Abrahams Theorie, andere Experimente wiederum Lorentz Theorie. Rückwirkend betrachtet waren die Experimente zu ungenau um eine der beiden Theorien zu falsifizieren. Erst viel später im Jahr 1957 konnte durch eine Analyse aller Experimente festgestellt werden, dass keine der beiden Theorien die Messergebnisse erklären konnte. Grund dafür ist, dass die Messergebnisse den Impuls als nichtlineare Funktion der Geschwindigkeit zeigen und nicht wie angenommen die geschwindigkeitsabhängige Masse. (Hecht, 2009, p. 339)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden eine Reihe von Experimenten durchgeführt um die aufgestellten Gleichungen für die Elektronen zu testen. (Okun, 1989, p. 35) Gemäß dem Standardklischee wurden diese Experimente durchgeführt um die geschwindigkeitsanhängige longitudinale und transversale Masse zu messen, tatsächlich wurde die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Impulses gemessen. (Okun, 1989, p. 35)

Die Notation, dass die Masse von der Geschwindigkeit abhängt, wurde 1899 von Lorentz eingeführt und von ihm weiterentwickelt. (Okun, 1989, p. 33) Die damalige Notation der longitudinalen und transversalen Masse ging davon aus, dass die Masse ein elektrodynamischer Effekt sei und die Mechanik aus der Elektrodynamik abzuleiten ist. (Jammer, 2000, p. 42). Die Konzepte der longitudinalen und transversalen Masse sind heute veraltet, die Konzepte einer geschwindigkeitsabhängigen bzw. relativistischen Masse sind dennoch heute in diversen Lehrbüchern präsent.

3.1.3 Longitudinale und transversale Masse

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt wurde im Rahmen der frühen Elektrodynamik die longitudinale und transversale Masse eingeführt. Diese Konzepte stellen einen Spezialfall der relativistischen Masse dar: „Diese obsoleten Begriffe ergeben sich in bestimmten Zusammenhängen anstelle der relativistischen Masse." (Fließbach, 2018, p. 45) In diesem Kapitel wird näher auf diese Konzepte eingegangen. Es sei gleich zu Beginn darauf hingewiesen, dass es sich um physikalisch falsche Konzepte handelt, welche bereits mehrfach widerlegt wurden. Jedoch hatten die Konzepte einer longitudinalen und transversalen Masse einen bedeutenden Einfluss auf das Konzept einer relativistischen Masse.

Die Bezeichnungen ergeben sich aus dem früheren Sprachgebrauch: „Die Adjektive longitudinal und transversal beziehen sich darauf, ob die Geschwindigkeit parallel oder senkrecht zur Kraft steht." (Fließbach, 2018, p. 45)

Die historischen Überlegungen gehen von folgender Bewegungsgleichung aus:

$$\frac{d}{dt}\frac{m\,v(t)}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = F_N \quad (3.3)$$

Die zeitliche Ableitung der Impulsgleichung ergibt die Newtonsche Kraft F_N. Diese Bewegungsgleichung ist korrekt für den Fall $v \parallel F_N$. Die Zeitableitung auf der linken Seite wirkt auf die Geschwindigkeit im Zähler und Nenner. Die zeitliche Ableitung der linken Seite ergibt:

$$\frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \frac{dv}{dt} + \frac{m\,v}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{v}{c^2} \frac{dv}{dt} \qquad (3.4)$$

Longitudinale Masse

Wir betrachten nun den Fall $v \parallel F_N$, die sogenannte longitudinale Bewegung. In diesem Fall gilt auch $v \parallel dv/dt$ und daher können die Beträge anstatt der Vektoren in der Gleichung 3.4 verwendet werden. Daraus folgt:

$$\left(\frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} + \frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{v^2}{c^2} \right) \frac{dv}{dt} \qquad (3.5)$$

Weiter ergibt der zusammengefasste Ausdruck in der Klammer:

$$\frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \qquad (3.6)$$

Dieser Ausdruck wird in die zu Beginn aufgestellte Bewegungsgleichung 3.3 eingesetzt:

$$\frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{dv}{dt} = F_N \qquad F_N \parallel v \qquad (3.7)$$

Die Gleichung 3.7 hat die Form einer Newtonschen Bewegungsgleichung mit der sogenannten longitudinalen Masse m_{long} anstatt der klassischen Masse m. Daraus folgt:

$$m_{long} = \frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \qquad (3.8)$$

Die longitudinale Masse hat sich hier anstatt bzw. aus der relativistischen Masse ergeben. (Fließbach, 2018, p. 47)

Transversale Masse

Im Fall der transversalen Bewegung ist $v \perp F_N$ und die Bewegungsgleichung 3.3 wird erneut für diesen Fall aufgestellt. Die Gleichung 3.4 wird wie zuvor in die Ausgangsgleichung 3.3 eingesetzt. Im transversalen Fall betrachten wir nur die Komponente parallel zur Kraft F_N. Der zweite Term in Gleichung 3.4 fällt daher weg und die Beschleunigung parallel zur Kraft wird mit $dv_{\parallel}/dt$ bezeichnet. Daraus folgt:

$$\frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \frac{dv_{\parallel}}{dt} = F_N \qquad (v \perp F_N) \qquad (3.9)$$

Es sei nochmal daran erinnert, dass in diesem Fall Formel 3.3 formal gar nicht gültig ist. (Fließbach, 2018, p. 47) Die Gültigkeit der Formel 3.9 ist außerdem auf den betrachteten Zeitpunkt (mit $v_{\parallel}=0$) beschränkt, denn durch die Kraft erhält die Geschwindigkeit im Laufe der Zeit eine Komponente in Richtung der Kraft. (Fließbach, 2018, p. 47) Wie bereits bei der longitudinalen Bewegung erhalten wir eine Formel mit der Form einer Newtonschen Bewegungsgleichung mit der transversalen Masse m_{trans}.

$$m_{trans} = \frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \qquad (3.10)$$

Diese Formel 3.10 für die transversale Masse stimmt mit der für die relativistische Masse m_{rel} überein. Die transversale Masse wurde alternativ auch als Impulsmasse bezeichnet. (Fließbach, 2018, p. 47) Die Begriffe longitudinale und transversale Masse (oder Impulsmasse) sind seit Mitte des 20. Jahrhunderts nicht mehr üblich. (Fließbach, 2018, p. 48)

3.1.4 Relativistische Masse

Werden die relativistischen Bewegungsgleichungen als Verallgemeinerung des zweiten Newtonschen Axioms aufgefasst, so entsteht dadurch das Konzept der relativistischen Masse m_{rel}. (Fließbach, 2018, p. v) Man ersetzt die Masse m in Anlehnung an das zweite Newtonsche Axiom durch die relativistische Masse m_{rel}:

$$m_{rel} = \frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} = m\gamma \qquad (3.11)$$

Wobei hier v die Geschwindigkeit des Teilchens bzw. eines Massenpunktes ist und c die Lichtgeschwindigkeit. Die Schreibweise $m\gamma$ ist häufig vorzufinden, wobei γ der Lorentzfaktor ist. Die Masse stellt in diesem Fall eine Funktion der Geschwindigkeit dar, dies wird manchmal durch den Ausdruck $m_{rel}(v)$ deutlich gemacht. Das Rezept sieht wie folgt aus: die Masse m wird durch die relativistische Masse m_{rel} ersetzt, dadurch erhält man die relativischen Bewegungsgleichungen. Dieses Rezept ist jedoch nicht allgemein gültig und stimmt nur für Spezialfälle, wie $F_N \parallel v$, mit den relativistischen Bewegungsgleichungen überein. Das Konzept ist so zu verstehen, dass die Zeitableitung auch auf die Masse m wirkt.

Das zweite Newtonsche Axiom lautet:

$$m \frac{dv}{dt} = F_N \qquad (3.12)$$

Formel 3.12 ist nichtrelativistisch und besitzt daher keine Gültigkeit in der speziellen (und allgemeinen) Relativitätstheorie. Im Inertialsystem IS bewegt sich das Teilchen mit der Geschwindigkeit v(t). Das Inertialsystem IS´ bewegt sich relativ zu IS mit $v(t_0)$, somit ruht das Teilchen in IS´ zum Zeitpunkt $t=t_0$. Masse und Kraft werden im relativ bewegten IS´ weiterhin im Newtonschen Sinn betrachtet, dieses Inertialsystem IS´ stellt das sogenannte Ruhesystem des Teilchens dar. Bei dieser Definition wird die Masse im Ruhesystem IS´ als Ruhemasse bezeichnet, oft als m_0 gekennzeichnet. In der Newtonschen Mechanik ist die Kraft unabhängig vom Bezugsystem. Das Newtonsche zweite Axiom gilt in der Relativitätstheorie für den Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten $v \ll c$ als Näherung.

Wenn wir Gleichung 3.11 betrachten, dann können wir sehen, dass die relativistische Masse für v=0 mit der sogenannten Ruhemasse m_0 bzw. der Masse m übereinstimmt. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die relativistische Masse asymptotisch linear ins Unendliche an. Erreicht das Teilchen Lichtgeschwindigkeit erhalten wir in Gleichung 3.11 eine Division durch Null. Dieser Umstand wird als Zunahme der effektiven Trägheit gedeutet und gibt die praktische Bedeutung des Konzepts der relativistischen Masse wieder. (Fließbach, 2018, p. 41) Weiter wird mit der Formel 3.11 argumentiert, dass massenbehaftete Körper keine Lichtgeschwindigkeit erreichen können. Die Beschreibung dieses Effekts wird häufig mit dem Begriff „relativistische Massenzunahme" umschrieben. Die Problematik besteht darin, dass der Begriff „relativistische Massenzunahme" eine tatsächliche Zunahme der Masse und somit eine Änderung der Struktur des Teilchens suggeriert. Es ist besser von der relativistischen Zunahme der effektiven Trägheit zu sprechen. (Fließbach, 2018, p. 44)

3.1.5 Masse in der modernen Physik

Die moderne Physik bietet ein Bild der Realität, welches vollkommen anders zum klassischen Newtonschen ist. Das Konzept der Masse in der modernen Physik ist völlig anders als das der Newtonschen Masse als Trägheit. Die moderne Physik ist allgemeiner und flexibel, und gibt den Kontext an in welchem es ziemlich sicher ist, die

Masse als eine Messung der Trägheit anzunehmen. Das Problem besteht darin, wenn das Prinzip umgekehrt wird und die Newtonsche Physik als Basis und die moderne Physik als ein Sonderfall davon gesehen wird. Das Konzept der Masse in der modernen Physik lässt keinen Raum für eine geschwindigkeitsabhängige (relativistische) Masse. (Silagadze, 2014, p. 1643)

Die Postulate der speziellen Relativitätstheorie werden unter den Bedingungen der Lorentztransformation erfüllt. Es gibt physikalische Größen, welche unter der Lorentztransformation invariant sind, d.h. diese Größen ändern sich bei der Transformation in ein anderes Inertialsystem nicht. Physikalische Gesetze müssen in kovarianter Form formuliert werden, so dass sie unter Lorentztransformation forminvariant bleiben. Das entspricht dem sogenannten Äquivalenzpostulat nachdem alle Inertialsysteme äquivalent sind. (Nolting, 2012, p. 39) Die Newtonschen Gesetze der klassischen Physik sind lediglich forminvariant gegenüber der Galileitransformation, welche nur für $v \ll c$ gilt. Das hat zur Folge, dass die Grundgesetze der Mechanik und Elektrodynamik im relativistischen Bereich nicht mehr ihre gewohnte Form haben. (Nolting, 2012, p. 39) Man arbeitet mit dem vierdimensionalen Minkowski-Raum, dort entspricht die Lorentztransformation einer Drehung der Vierervektoren, welche deren Längenquadrat invariant lässt. (Nolting, 2012, p. 39) Forminvarianz gegenüber Lorentztransformation ist für ein physikalisches Gesetz genau dann gegeben, wenn das Gesetz in kovarianter vierdimensionaler Form vorliegt. Das ist dann gegeben, wenn alle Terme der Gleichung physikalischer Gesetze Vierer-Tensoren gleicher Stufe sind. (Nolting, 2012, p. 39) Ein Tensor nullter Stufe stellt einen Vierer-Skalar dar. Dabei handelt es sich um eine einzelne Größe, welche unter Lorentztransformation invariant bleibt.

Um das Newtonsche Kraftgesetz 3.0 zu verallgemeinern geht man wie folgt vor:

Die Geschwindigkeit v wird durch die Vierer-Geschwindigkeit u^μ ersetzt und die Zeit t durch die Eigenzeit τ. Daraus erhalten wir folgende Gleichung:

$$m \frac{d}{d\tau} u^\mu = K^\mu \quad (3.13)$$

Bei K^{μ} handelt es sich um die sogenannte Minkowski-Kraft. Die träge Masse m ist eine Lorentzinvariante, ein Vierer-Skalar. Die Masse unterliegt, im Gegensatz zu Raum und Zeit, in der speziellen Relativitätstheorie keiner Veränderung. (Nolting, 2012, p. 49)

Allgemeiner wird in der modernen Physik der Langrange-Formalismus für die Aufstellung von Bewegungsgleichungen verwendet. Darauf wird hier nicht näher eingegangen. Die Masse stellt auch beim Langrange-Formalismus eine Invariante dar. In der Quantenphysik kann mit der Bargmann-Darstellung die Masse als Invariante ausgemacht werden. Die Quanten-Chromodynamik kann bereits den Ursprung der Masse der meisten Bestandteile der gewöhnlichen Materie erklären. (Silagadze, 2014, p. 1650) Jedoch ist das Verständnis über den Ursprung der Masse bei weitem noch nicht abgeschlossen. (Silagadze, 2014, p. 1650)

Auf die Gravitationsmasse wird hier nicht weiter eingegangen, da diese unter die allgemeine Relativitätstheorie fällt. Das Newtonsche Konzept der Gravitationsmasse bleibt im Grenzfall erhalten und kann in einigen einfachen Situationen relativistisch generalisiert werden. Das Rezept der relativistischen Masse findet in solchen Spezialfällen vor allem in Schulbüchern Anwendung. Jedoch stellt sich auch hier die Problematik, dass es sich um kein allgemein gültiges Konzept handelt und somit um kein physikalisches Gesetz. Das Konzept der Masse in der allgemeinen Relativitätstheorie muss eigens behandelt werden.

3.2 Experimentelle Bestimmung der Masse

Alle Messungen in der Physik sind kinematischer Natur. (Jammer, 2000, p. 5) Daraus ergibt sich der Umstand, dass alle experimentellen Bestimmungen der Masse auf der Messung von kinematischen Größen beruhen. Die Masse ist eine extensive physikalische Größe, deren SI-Einheit das Kilogramm kg ist. Intensive Größen wie die Dichte und die molare Masse sind von der Masse abgeleitet. Von 1889 bis 2019 war der internationale Kilogrammprototyp, auch Urkilogramm genannt, das Referenznormal für die Maßeinheit Kilogramm. Das Urkilogramm besteht aus einer Platin-Iridium-Legierung, wobei die Problematik in der Massenänderung über die Zeit liegt. (wikipedia, 2020) Deswegen wurde im Rahmen der Sitzung der Generalkonferenz für Maß und Gewicht im November 2018 eine Neudefinition für die SI-Einheit Kilogramm gesucht. Die Neudefinition der Maßeinheit für die Masse lautet:

„Das Kilogramm, Einheitenzeichen kg, ist die SI-Einheit der Masse. Es ist definiert, indem für die Planck-Konstante h der Zahlenwert 6,626 070 15 × 10^{-34} festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit J s, die gleich kg m^2 s^{-1} ist, wobei der Meter und die Sekunde mittels c und Δv_{Cs} definiert sind." (Komission, 2019, p. L 196/8)

Auf die Definition der Sekunde und die des Meters wird hier nicht eingegangen. Die Neudefinition leitet das Kilogramm von einer Fundamentalgröße der Physik ab. Dabei handelt es sich um die Planck-Konstante h, welche eine ausreichende Genauigkeit der Messgröße ermöglicht. In der Definition für die Maßeinheit der Masse werden keine experimentellen Methoden vorgeschrieben. Das zuständige Beratungsgremium BIPM legt fest, welche Methoden in der Realisierung des Kilogramms anerkannt sind. Das sind zurzeit die Methoden der Watt-Waage und die XRCD-Methode. Die Methoden werden hinsichtlich ihres Prinzips kurz beschrieben. Es gibt weitere Möglichkeiten, welche aber vom Beratungsgremium nicht vorgeschlagen wurden und deswegen hier nicht erwähnt werden.

Wattwaage

Bei der Wattwaage wird über den Vergleich von elektrischer und mechanischer Leistung die Definition des Kilogramms realisiert. Bei der Wattwaage handelt es sich um eine Spule in einem Magnetfeld. Die experimentelle Bestimmung der Masse wird durch zwei Messungen durchgeführt, die Wägung und Bewegung. Bei der Wägung wird der Strom gemessen, welcher für die Kompensation der Gewichtskraft der Probemasse notwendig ist. Das heißt die Probemasse wird in Schwebe gehalten und der dazu notwendige Strom wird gemessen. Bei der Bewegung wird die Induktionsspannung gemessen, welche durch die vertikale Bewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit mittels der Probemasse erzeugt wird. Beide Werte miteinander multipliziert ergeben formal die elektrische Leistung, daher der Name Wattwaage. Die gemessene Spannung wird als Vielfaches der Josephson Spannung angegeben, welche mit der Planck-Konstante zusammenhängt. Zunächst diente die Wattwaage bis 2018 zur Bestimmung der Planck-Konstante. Seitdem die Planck-Konstante festgelegt wurde, kann die Wattwaage als Realisierung für die Einheit des Kilogramms herangezogen werden. (wikipedia, 2020)

XRCD-Methode

Bei der XRCD (x-ray-crystal-density-method) wird durch die Röntgenkristalldichtemessung, wie sie im Avogadroprojekt verwendet wurde, die Definition erfüllt. Das Ziel des Avogadroprojekts war die Bestimmung der Avogadrokonstante, aus der Masse und dem Volumen eines Materials mit bekannter Teilchendichte und molarer Masse. Die Definition der Avogadrokonstante war bis Mai 2019 die Teilchenmenge von 12 Gramm Kohlenstoff C^{12} Isotopen und daher abhängig vom Kilogramm. Die Avogadrokonstante ist seitdem auf einen exakten Wert festgelegt. Durch die Definition der Masse als eine bestimmte Anzahl an Atomen eines bestimmten Isotops, könnte das Kilogramm genauer als zuvor bestimmt werden. Für die ausreichend genaue Bestimmung der Teilchendichte ist ein Röntgenlaserinterferometer notwendig, welches ein monokristallines Material als Prüfmaterial voraussetzt. Derzeit kommt aus materialwissenschaftlichen Gründen nur hochreines, isotopenreines Silicium-28 in Frage. Es wurden bereits Kugeln aus Silicium-28 hergestellt, welche dem Kilogramm mit einer hinreichenden Genauigkeit entsprechen. Diese hergestellten Silicium-28 Kugeln wurden bereits mit dem Urkilogramm verglichen. Die Planck-Konstante fließt bei den Messungen mit ein, daher eignet sich die Methode laut Neudefinition. (wikipedia, 2020)

Direkte und indirekte Massenbestimmung

Bei der direkten und indirekten Massenbestimmung dient die Maßeinheit der Masse als Referenz zur experimentellen Bestimmung der Masse.

Bei der direkten Massenbestimmung wird ein ruhender Körper mit einer Referenzmasse verglichen. Zwei Massen sind gleich, wenn sie im selben Schwerefeld die gleiche Gewichtskraft haben. Die Stärke des Schwerefeldes spielt keine Rolle, diese muss lediglich von Null verschieden sein und für beide Körper gleich stark. Ein Beispiel dafür ist die Balkenwaage.

Bei der indirekten Massenbestimmung stellt die Masse einen Proportionalitätsfaktor zwischen Kraft und Beschleunigung dar. Bei Kenntnis der Kräfte und Beschleunigungen kann die Masse eines Körpers bestimmt werden.

3.3 Ursprung der relativistischen Masse

Entgegen der weitläufigen Meinung, hat Albert Einstein den Begriff der relativistischen Masse nicht geprägt. Die Idee, dass die Masse mit der Geschwindigkeit zunimmt wird üblicherweise Lorentz zugeschrieben. (Okun, 1989, p. 33) Der Begriff relativistische Masse wurde 1899 von Lorentz vorgestellt und von anderen Physikern weiterentwickelt, bereits in den Jahren vor Einsteins Formulierung der speziellen Relativitätstheorie 1905 als auch in späteren Jahren. (Okun, 1989, p. 33) Die Basis dieser Annahme war die Anwendung der nichtrelativistischen Formel p=mv in relativistischen Bereichen, in denen diese Formel nicht gültig ist. (Okun, 1989, p. 33)

In den ersten Schriften zu Relativität hat Einstein nicht den Begriff „Ruhemasse" verwendet, aber er erwähnte die transversale und longitudinale Masse. (Okun, 1989, p. 33) In Einsteins Schrift „Zur Elektrodynamik bewegter Körper" in „§10 Dynamik des (langsam beschleunigten) Elektrons" stellt Einstein eine Bewegungsgleichung für langsam bewegte Elektronen nach seinem Relativitätsprinzip auf. Aus der Notation geht hervor, dass die Masse eine Invariante darstellt. Zwar weist Einstein darauf hin, dass die Bewegungsgleichung nur für langsam bewegte Elektronen gilt, jedoch bezieht sich diese Anmerkung auf die mögliche Abstrahlung von Energie bei geladenen Teilchen. Einstein transformiert die allgemeingültigen Bewegungsgleichung des Elektrons in ein anderes beliebiges Bezugsystem nach dem von ihm zuvor aufgestellten Relativitätsprinzip. Die Transformation der Raum- und Zeitkoordinaten ergeben Faktoren, welche üblicherweise der longitudinalen und transversalen Masse zugeschrieben wurden. Einstein schreibt dazu: „Wir fragen nun in Anlehnung an die übliche Betrachtungsweise nach der ‚longitudinalen' und ‚transversalen' Masse des bewegten Elektrons." (Einstein, 1905, p. 918) Weiter schreibt Einstein die Gleichungen so an, dass man die Komponenten als die auf das Elektron wirkende ponderomotorische Kraft erkennt. Wird diese Kraft mit der Newtonschen Kraftgleichung „Kraftzahl = Massenzahl x Beschleunigungszahl" beschrieben, dann erhält man für das Ruhesystem die übliche Schreibweise für die longitudinale und transversale Masse. Einstein merkt an:

„Natürlich würde man bei anderer Definition der Kraft und der Beschleunigung andere Zahlen für die Masse erhalten; man ersieht daraus, daß man bei der Vergleichung

verschiedener Theorien der Bewegung des Elektrons sehr vorsichtig verfahren muß." (Einstein, 1905, p. 919)

Dies ist ein Hinweis dafür, dass Albert Einstein sich der Problematik der Definition der Masse bewusst war. Hier erwähnt Einstein weder etwas von einer relativistischen noch einer geschwindigkeitsabhängigen Masse. Weiter weist Einstein darauf hin, dass es sich bei der longitudinalen und transversalen Masse um die übliche Betrachtungsweise handelt.

Es handelt sich bei den genannten Gleichungen und Transformationen um jene für langsam bewegte Elektronen, dabei wendet er das Relativitätsprinzip an. Einstein nimmt in seinen Schriften an, dass die Resultate für die Masse auf weitere ponderable materielle Punkte ausgedehnt werden können, da jeder Punkt durch Zufügen einer beliebigen Ladung zu einem Elektron gemacht werden kann. (Einstein, 1905, p. 919)

Durch die Annahme von Einstein, dass die Kraft F durch F=ma gegeben sei kommt es zu dem Effekt einer anisotropen Masse. Jedoch konnte Einstein noch nicht wissen, dass die vollständig entwickelte Relativitätstheorie die Kraftgleichung F=ma widerlegen würde. Bei der Kraftgleichung F=ma handelt es sich um eine Näherung bei geringen Geschwindigkeiten. Hätte Einstein die korrekte Formulierung nach Newton F=dp/dt verwendet, dann hätte er keine richtungs- und geschwindigkeitsabhängigen Massen ableiten können. (Hecht, 2009, p. 338)

Um einen weiteren wichtigen Punkt zu klären, wird nochmals auf Einsteins Schriften eingegangen. Die Formulierung, dass ein massenbehafteter Körper keine Lichtgeschwindigkeit erreichen kann, weil er sonst unendlich viel Masse besäße, ist evident mit der weitläufigen Annahme einer relativistischen Massenzunahme. Diese Formulierung hat Albert Einstein nicht verwendet, korrekterweise hat er die kinetische Energie der Elektronen betrachtet. Dazu schreibt Einstein, dass bei Lichtgeschwindigkeit der Ausdruck für die kinetische Energie unendlich groß würde und dies auch für ungeladene ponderable Massen gelte. (Einstein, 1905, p. 920) Die Einstein zugeschriebene relativistische Massenzunahme hat ihren Ursprung in der Kinematik der speziellen Relativitätstheorie und nicht in der Struktur der Teilchen. (Adler, 1987, p. 741)

Die Herleitung der transversalen und longitudinalen Masse für langsam bewegte Elektronen bietet die Grundlage für die Debatte über die relativistische Massenzunahme. Die Schriften von Juni 1905 enthalten keinerlei Hinweise auf ein Konzept der relativistischen Masse, obwohl das fälschlicherweise in einiger Literatur behauptet wird. Tatsache ist, dass Albert Einstein niemals eine Gleichung für die „relativistische Masse" hergeleitet hat. (Hecht, 2009, p. 338)

Es waren Gilbert Lewis und Richard Tolman, welche bei der öffentlichen Meinungsbildung zur Relativitätstheorie teilweise eine wichtige Rolle spielten. Tolman begann 1912 ausgehend von der nichtrelativistischen Gleichung p=mv die Behauptung aufzustellen, dass die Masse m in dieser Gleichung $m=\gamma m_0$ entspricht. (Okun, 1989, p. 35) Wobei m_0 der sogenannten Ruhemasse entspricht und γ dem Lorentzfaktor. Tolman dazu in „Non-Newtionian Mechanics, The Mass of a Moving Body":

"An acceptance of the Einstein Theory of relativity necessitates a revision it is desirable to retain as many as possible of the simpler principles of Newton mechanics. […]; but to agree with the theory of relativity introduces an idea foreign to Newtonian mechanics by considering that both the mass and the velocity of a body are variable." (Tolman, 1909, p. 375)

Die Problematik besteht darin, dass Tolman einfache Prinzipien der Newtonschen Mechanik beibehalten will. Tolman macht die Annahme, dass Geschwindigkeit und Masse eines Körpers variabel sind, im Gegensatz zu der Masseninvarianz in der Newtonschen Mechanik. Tolman argumentiert, dass die Masse eine Erhaltungsgröße sei und deswegen nicht richtungsabhängig sein kann. In Anlehnung an Lewis behauptet Tolman, dass der Ausdruck $m_0/\sqrt{1-u^2/c^2}$, allgemein ohne Berücksichtigung der Richtung, die Masse eines bewegten Körpers am besten beschreibt. (Tolman, 1909, p. 376) Durch die Betrachtung von vertikalen und horizontalen elastischen Stoßprozessen und der Beibehaltung von Massen- und Impulserhaltungssatz, leitet Tolman den obigen Ausdruck für die geschwindigkeitsabhängige Masse her. (Tolman, 1909, p. 379) Tolman weist ausdrücklich darauf hin, dass die Masse eine Funktion der Geschwindigkeit sei und kennzeichnet dies auch mit einem f ( ). Zwar räumt Tolman ein, dass es die Möglichkeit für andere Lösungen der Funktion geben könnte, jedoch bezweifelt er dies. (Tolman,

1909, p. 380). Abschließend weist Tolman darauf hin, dass es sich bei seinen Überlegungen um ungeladene Teilchen handelt. Somit könne man die Annahme bei den Kaufmann-Bucherer Experimenten, dass sich die Ladung eines bewegten Teilchens erhöht, verwerfen. Die Messergebnisse der Kaufmann-Bucherer Experimente könnten alleine ausreichend durch die Annahme einer Massenzunahme erklärt werden. (Tolman, 1909, p. 380)

Max Born verwendete eine ähnliche Analyse wie Tolman und Lewis in seinem einflussreichen Buch zur Relativität (1920). 1921 veröffentlichte Wolfgang Pauli den bekannten Artikel „Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften". (Hecht, 2009, p. 340) Darin verwirft Pauli die longitudinale und transversale Masse, wie bereits Tolman und Lewis, behält aber die Ruhemasse m_0 und die Masse m, gegeben durch $m_0\gamma$, im Rahmen der Newtonschen Beziehung p=mv bei. (Okun, 1989, p. 35) Paulis Buch diente als Einführung in die Relativitätstheorie für viele Generationen von Physikern. (Okun, 1989, p. 35) Der Ursprung der gewohnheitsmäßigen Notation, dass die Masse von der Geschwindigkeit abhängt sowie der Begriff Ruhemasse ist diesen Umständen zuzuschreiben.

3.4 Masse in der speziellen Relativitätstheorie

Im vorherigen Kapitel wurde bereits deutlich, dass Albert Einstein niemals eine Formel für eine geschwindigkeitsabhängige Masse aufstellte. In seinem ersten Artikel zu Relativitätstheorie im Juni 1905 hat Albert Einstein die longitudinale und transversale Masse hergeleitet. In seiner Schrift „Zur Elektrodynamik bewegter Körper" stellt Albert Einstein seine Postulate nach dem Relativitätsprinzip auf. Anschließend gibt es einen „Kinematischen Teil" gefolgt von einem „Elektrodynamischen Teil", darunter ist der Teilbereich „Elektrodynamik des langsam beschleunigten Elektrons" zu finden. Das Relativitätsprinzip auf die Kinematik angewandt führt zu dem Lorentzfaktor γ. Es handelt sich hierbei um einen reinen kinematischen Effekt, der der Struktur der Raumzeit zugrunde liegt. Der anschließende dynamische Teil enthält das Konzept der Kraft, welche als die Ursache der Bewegung herangezogen wird. Albert Einstein hat wenig zitiert, man kann jedoch vermuten, dass er Abrahams Schriften gekannt hat. So wie Abraham verwendete Einstein die Ausdrücke für die longitudinale und transversale

Masse. (Hecht, 2009, p. 338) Die Masse selbst wird in „Zur Elektrodynamik bewegter Körper" nicht näher beschrieben.

Aus dem Relativitätsprinzip ergibt sich die berühmte Masse-Energie-Beziehung:

$$\Delta E_0 = \Delta m c^2 \quad (3.14)$$

Wobei E_0 die sogenannte Ruhenergie im Ruhesystem ist, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit. Albert Einstein hat in seiner zweiten Schrift zur Relativitätstheorie „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?" im Jahr 1905 diese Formel mit der damals üblichen Notation hergeleitet. Ein freier Körper, der zwei Lichtwellen in entgegengesetzte Richtungen emittiert, wird in seinem Ruhesystem und einem dazu gleichförmig relativ bewegten System betrachtet. Die Differenz der beiden Energien unterscheidet sich von der kinetischen Energie (welche aufgrund der Relativbewegung zustande kommt) nur um eine Konstante, die sogenannte Ruheenergie. Aus der Energieerhaltung und dem Relativitätsprinzip kann die Masse-Energie-Beziehung hergeleitet werden. Aus dieser ist zu folgern, dass die Masse eines Körpers ein Maß für dessen Energieinhalt ist. Ändert sich die Energie um ΔE eines Körpers so ändert sich die Masse um den Faktor $\Delta m = \Delta E/c^2$. Aus heutiger Sicht kann man sagen, dass die Absorption eines massenlosen Teilchens die Masse des absorbierenden Körpers verändert und dass Photonen keine Masse besitzen. (Okun, 1989, p. 34)

In weiterer Folge wurde die Energie-Masse-Beziehung mehrfach von anderen mit dem Konzept der relativistischen Masse verknüpft. Die eigentliche Energie-Masse-Beziehung, welche von der Ruheenergie eines Körpers herrührt, wird dadurch unkenntlich. Das Rezept in dem die Masse durch die relativistische Masse ersetzt wird führt zu folgender Formel:

$$E = m_{rel} c^2 = \frac{mc^2}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \quad (3.15)$$

Es handelt sich hier um die Gesamtenergie E und nicht um die Ruheenergie E_0. Das heißt ein Körper, der sich mit Geschwindigkeit v bewegt, besitzt die Energie E, bei einer Geschwindigkeit von v=0 reduziert sich die Formel 3.15 zu $E_0 = mc^2$. Die Problematik besteht darin, dass der Effekt der Zunahme der Gesamtenergie E mit höheren

Geschwindigkeiten in der relativistischen Masse suggeriert wird. Die relativistische Masse ist aber nicht die Ursache dafür. Einstein formulierte den Umstand so:

„A moving body has both mass and kinetic energy. It resists charge of velocity more strongly than the resting body. It seems as though the kinetic energy of the moving body increases its resistance. If two bodies have the same rest mass, the one with the greater kinetic energy resists the action of an external force more strongly." Einstein zitiert nach (Adler, 1987, p. 741)

Die Passage deutet nicht darauf hin, dass der zunehmende Widerstand mit der Zunahme der trägen Masse assoziiert wird. Es handelt sich bei der Zunahme des Widerstandes bei höheren Geschwindigkeiten um eine Illusion, der Effekt liegt in der Zeitdilation. Die gleiche wirkende Kraft benötigt länger um ein schnell bewegtes Teilchen zu beschleunigen, als ein langsameres bewegtes Teilchen derselben Masse. (Adler, 1987, p. 741)

Besser ist es in diesem Zusammenhang, die relativistische Energie-Impuls-Beziehung anzuschreiben:

$$E = E_0 + E_{kin} = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \qquad (3.16)$$

Aus dieser Gleichung wird der Umstand ersichtlich, dass sich die Gesamtenergie aus der kinetischen Energie und einer Konstante, der Ruheenergie E_0, zusammensetzt. Die Energie-Impuls-Beziehung wurde erst später aufgestellt und ist in den zuvor genannten Schriften von Einstein nicht zu finden.

Die Masse in der speziellen Relativitätstheorie hat mit dem Konzept einer geschwindigkeitsabhängigen Masse nichts gemein. Das Konzept der relativistischen Masse ist in den Originalschriften von Albert Einstein nicht präsent. Die Herleitung der transversalen und longitudinalen Masse entspricht nicht dem Konzept einer relativischen Masse. Die Annahme einer longitudinalen und transversalen Masse war damals von namenhaften Physikern etabliert worden. Albert Einstein hat in Anlehnung daran diese hergeleitet. Die berühmte Energie-Masse-Beziehung hat Albert Einstein mehrfach hergeleitet, wobei die Ruheenergie von Gegenstand ist und nicht die Gesamtenergie. Albert Einstein hat 1948 an Lincoln Barnett einen Brief geschickt in dem er zum Ausdruck bringt, dass er das Konzept der relativistischen Masse für problematisch hält. Der Brief wurde original im Deutschen handschriftlich verfasst und

anschließend ins Englische übersetzt. Die relevanten Zeilen der englischen Fassung lauten:

„It is no good to introduce the concept of the mass $M = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ of a moving body for which no clear definition can be given. It is better to introduce no other mass than the "rest mass" m. Instead of introducing M it is better to mention the expression for the momentum and energy of a body in motion." Albert Einstein zitiert nach (Okun, 1989, p. 36)

Im Sinne von Albert Einstein ist von der Lehre der relativistischen Masse abzuraten. Besser ist es den Impuls und die Energie eines bewegten Körpers anzugeben. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass Planck als erstes die korrekte Formel $P = m_0 v/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ für den relativistischen Impuls aufgestellt hatte.

3.5 Historischer Kontext

Albert Einstein hat für die Entwicklung der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie niemals einen Nobelpreis erhalten. Die ersten Ergebnisse der Kaufmann-Bucherer Experimente widersprachen den Vorhersagen der speziellen Relativitätstheorie. Dies lag unter anderem an der damaligen Ungenauigkeit der Messergebnisse. Die Technik entwickelte sich schrittweise und erste Übereinstimmungen mit den Vorhersagen aus der Relativitätstheorie tauchten auf. 1919 konnte bei einer Sonnenfinsternis die von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte gravitative Ablenkung von Licht nachgewiesen werden. Die übereinstimmenden Ergebnisse überzeugten jedoch nicht ausreichend genug für einen Nobelpreis. (Okun, 1989, p. 35) Die Konsequenzen aus der theoretischen und allgemeinen Relativitätstheorie stellten einen enormen Bruch mit der damaligen Physik dar. Den Nobelpreis für 1921 erhielt Albert Einstein 1922 für die Deutung des Photoeffekts. Es wurde in einem Brief vom Sekretariat der Schwedischen Akademie auf die Relativitätstheorie hingewiesen. Die relevanten Zeilen im Brief lauten:

„[…] the Royal Academy of Sciences decided to award you last year´s Nobel Prize for physics, in consideration of your work on theoretical physics and in particular for your discovery of the law of the photoelectric effect, but without taking into account the value which will be accorded your relativity and gravitation theories after these are

confirmed in the future." Schwedische Akademie der Wissenschaften zitiert nach (Okun, 1989, p. 35)

Es zeigt sich, dass die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie damals noch keine wissenschaftlich allgemeine Anerkennung erhielt und ihre Bestätigung sowie Anerkennung für die Zukunft vorbehalten war. Obwohl bereits Messergebnisse vorlagen, welche mit den Vorhersagen der allgemeinen und speziellen Relativitätstheorie übereinstimmten.

Albert Einsteins Relativitätstheorie und seine Person stießen teilweise auf so große Ablehnung, dass er als Betrüger und wissenschaftlicher Banause denunziert wurde. (Dongen, 2010, p. 78) Die Anfeindungen gegen Albert Einstein waren so ernst, dass er bei einem Vortrag in der Berliner Philharmonie von namenhaften Physikern verbal angegriffen wurde. Bei dieser Veranstaltung in der Berliner Philharmonie wurde Albert Einstein von namenhaften deutschen Physikern wie Ernst Gehrcke denunziert. Es gab bereits zuvor Stimmen von namenhaften Physikern die sich gegen die Relativitätstheorie aussprachen. Die Kundgebung in der Berliner Philharmonie und die öffentliche Debatte zwischen Einstein und Nobelpreisträger Philipp Lenard bildeten den ersten Höhepunkt der Anti-Relativitätsbewegung. (Dongen, 2010, p. 79) Die Glaubwürdigkeit der Relativitätstheorie hatte politische Dimensionen. Einstein war davon überzeugt, dass die Heftigkeit seiner Gegner zuallererst politisch motiviert war. Einstein war ein prominenter Pazifist, Demokrat und Jude, und somit ein idealer Sündenbock für deutsche Reaktionäre. (Dongen, 2010, p. 79) 1922 sagte Albert Einstein ein Plenum bei einem Treffen der Deutschen Gesellschaft der Naturwissenschaften ab. Grund dafür war, dass Albert Einstein Gewalt gegen ihn befürchten musste. (Dongen, 2010, p. 79) 1929 wurde die Deutsche Physik unter anderem von Philipp Lenard und Johannes Stark gegründet. Die Deutsche Physik vertrat eine Nazi-Ideologie und sprach von einer Physik der Rasse. Die Quantenphysik und Relativitätstheorie wurden als jüdisch deklariert und gänzlich abgelehnt. Es gab weitere Gruppen wie zum Beispiel die Welträtsellöser, welche der Anti-Relativitätsbewegung angehörten. Für die Ablehnung der Relativitätstheorie wurden eine Reihe von Gründen genannt, wie das Festhalten am Äther oder an der absoluten Zeit. (Dongen, 2010, p. 79) Die Anti-Relativitätsbewegung hatte ein Netzwerk und war mitverantwortlich für die Verspätung und Auswahl des Themas bei der Vergabe des

Nobelpreises 1921 an Einstein. (Dongen, 2010, p. 79) Die Anfeindungen gegen die Relativitätstheorie und gegen Albert Einstein nahmen absurde Formen an. Zum Beispiel wurde der Erfolg der Relativitätstheorie von Einsteins Gegnern auf Massenhypnose zurückgeführt. (Dongen, 2010, p. 79) Juden Massenhypnose vorzuwerfen war damals eine gängige Methode, welche den Charakter einer Verschwörungstheorie hatte.

Als der Krieg ambitionierter und langwieriger wurde, haben sich die politisch offiziellen und inoffiziellen Meinungen zur modernen Physik unter den Nationalsozialisten gewandelt. (Walker, 1989, p. 69) Der berühmte Physiker Heisenberg spielte hierfür eine Rolle. Das Regime, die Partei und die bewaffneten Streitkräfte waren mehr beunruhigt über die wissenschaftliche Bildung und die Rüstungsproduktion, als über den Einfluss von Juden auf die Physik. (Walker, 1989, p. 69) Der Druck der deutschen Industrie und der Militärführer war stärker als die harte ideologische Linie der Nationalsozialisten. (Walker, 1989, p. 69) 1940 wurden bei einer Debatte über die moderne Physik in München fünf Punkte mit den Mitgliedern der deutschen Physik ausgehandelt. Wobei Punkt 2 insbesondere die spezielle Relativitätstheorie betrifft. Dieser lautet:

„Die in der speziellen Relativitätstheorie zusammengefassten Erfahrungstatsachen gehören zum festen Bestandteil der Physik. Die Sicherheit der Anwendung der speziellen Relativitätstheorie ist jedoch nicht so groß, dass eine weitere Nachprüfung unnötig wäre." (Walker, 1989, p. 72)

Die spezielle Relativitätstheorie fand 1940 Einzug in die Deutsche Physik, wenn auch mit Vorbehalt. Bereits zuvor, beginnend mit der Vergabe des Nobelpreises an Einstein, war die spezielle Relativitätstheorie außerhalb von Nazi-Deutschland weitgehend in der wissenschaftlichen Gesellschaft anerkannt. Heute ist die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie nicht mehr aus den Schulbüchern wegzudenken. Wann genau die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie Einzug in den österreichischen Lehrplan fand, konnte nicht herausgefunden werden.

3.6 Vorteile und Nachteile der relativistischen Masse

Das Konzept der Masse in der modernen Physik lässt keinen Raum für eine geschwindigkeitsabhängige (relativistische) Masse. (Silagadze, 2014, p. 1643) Auf diesen Umstand ist nochmals hinzuweisen, bevor die Vorteile und Nachteile der

relativistischen Masse dargelegt werden. Es soll hier zu keinen Missverständnissen kommen, die Vorteile und Nachteile werden im Sinne ihrer Umsetzung im Schulunterricht und nicht auf ihre physikalische Richtigkeit hin untersucht.

3.6.1 Vorteile

Der Vorteil liegt in der Einfachheit des Rezeptes, die Masse in Newtonschen Bewegungsgleichungen durch die relativistische Masse zu ersetzen, und somit relativistische Bewegungsgleichungen zu erhalten. Wichtig ist hierbei, auf die Rahmenbedingungen hinzuweisen unter denen dies möglich ist. Weiter muss eine sprachliche Konsistenz eingehalten werden um weitere irreführende und schlichtweg falsche Begriffe zu vermeiden. Der Begriff der geschwindigkeitsabhängigen Masse, welcher oft als Synonym für die relativistische Masse verwendet wird, ist nicht zulässig.

Der in der Fachliteratur meistgenannte Vorteil liegt in dem einfachen Übergang von der klassischen Physik zur relativistischen Physik. Der Ausdruck $m = m_0\gamma$ stellt ein nützliches heuristisches Konzept dar, welches ein Gefühl für die Impulsgröße $p = mv$ bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gibt. Der Impuls ist jedoch nur im nichtrelativistischen Grenzfall proportional zur Geschwindigkeit. Die Formel $E = mc^2$ in Verbindung mit der relativistischen Masse zeigt wie die Energie sich mit der Geschwindigkeit ändert. (Rindler, 1990, p. 13)

Der Vorteil liegt in der Form der Gleichung für die relativistische Masse:

$$m_{rel} = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{p^0}{c} = \frac{E}{c^2} \qquad (3.17)$$

Die relativistische Masse entspricht der Nullten Komponente des Vierer-Impulses p^α bis auf den Faktor c. Dies ist der Grund dafür, dass m_{rel} unter der Lorentztransformation ein definiertes Verhalten hat. Außerdem entspricht m_{rel} der Energie des Teilchens bis auf den Faktor c^2. Die Energie besitzt die Anteile der Ruheenergie und kinetischen Energie. Die Gleichung spiegelt die sogenannte effektive Trägheit wider, die veranschaulicht warum sich die Geschwindigkeit eines Teilchens nur an die Lichtgeschwindigkeit annähern kann, diese aber nicht erreicht. Der Übergang von nichtrelativistischen zu relativistischen Bewegungsgleichungen kann vereinfacht werden, indem die Masse durch die relativistische Masse ersetzt wird. Es ist aber zu

beachten, dass das Rezept nur dann gilt, wenn die Geschwindigkeit parallel zur Kraft ist. Die relativistische Masse ist eine weniger fundamentale Größe als die Masse selbst. Die Masse z.B. eines Elektrons, ist eine unveränderliche Eigenschaft wie seine Ladung. (Fließbach, 2018, p. 49)

Man kann argumentieren, dass die Akteure wie z.B. Lehrende die richtige Anwendung des Rezeptes verstehen und sich des Kontextes bewusst sind. In diesem Sinne spricht nichts dagegen den Begriff der relativistischen Masse einzuführen, weiter sollte dies unter dem Hinweis der nicht allgemeinen Gültigkeit geschehen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass es im Sinne der reinen Begrifflichkeit der relativistischen Masse, einem frei steht diese als Synonym für den Ausdruck $m\gamma$ zu verwenden. Das Konzept der relativistischen Masse kann StudentInnen und SchülerInnen helfen relativistische Gegebenheiten mittels ihrer Newtonschen Intuition besser zu verstehen. (Silagadze, 2014, p. 1650) Wird das Konzept richtig angewendet, dann kann die relativistische Masse interessante Einsichten in die hyperbolische Geometrie liefern. (Silagadze, 2014, p. 1650)

3.6.2 Nachteile

Die Vorteile scheinen sich mit den Nachteilen zu überschneiden. Das Konzept der relativistischen Masse kann den gegenteiligen Effekt haben und den Zugang zur speziellen Relativitätstheorie sogar verhindern. Einerseits wird das Verständnis der speziellen Relativitätstheorie mit dem Konzept der relativistischen Masse erschwert, da der Effekt in der Dynamik und nicht in der Kinematik vermutet wird. Andererseits wird das Konzept der Masse verändert und im schlimmsten Fall wird die relativistische Masse als eine Kernaussage der Relativitätstheorie gedeutet. Es ist fragwürdig ob der Begriff relativistische Masse nicht zu Missverständnissen führt. In der Fachliteratur lassen sich mehr Aussagen gegen die Verwendung der relativistischen Masse finden als dafür. Darunter wird hauptsächlich der Grund genannt, dass das Verständnis der speziellen Relativitätstheorie unter dem Konzept leide. Besonders hinderlich ist die Unterscheidung zwischen Ruhemasse und relativistischer Masse:

Die Begriffe relativistische Masse und Ruhemasse sind redundant und irreführend. Es gibt nur eine Masse in der Physik, m, welche unabhängig vom Bezugsystem ist. (Okun, 1989, p. 31) Sobald der Begriff der relativistischen Masse verworfen wird gibt es keine

Notwendigkeit mehr für den Begriff Ruhemasse und diese mit dem Index 0 zu vermerken. (Okun, 1989, p. 31) Die richtige Begrifflichkeit ist extrem wichtig für das Verständnis und die Vermittlung von Wissen. Eine konsistente relativistische Sprache verwendet nur eine Masse und zwar die invariante Masse. Die Problematik ergibt sich daraus, dass an der nichtrelativistisch linearen Formel für den Impuls festgehalten wird und diese für den relativistischen Bereich mit dem Konzept einer relativistischen Masse korrigiert werden muss.

Neben der sprachlichen und begrifflichen Irreführung entstehen weitere Nachteile aus der spezifischen Anwendung der relativistischen Masse. Es werden hier die oft genannten Vorteile auf ihre Bedeutung hin untersucht. Dazu werden Argumente aus der Fachliteratur zusammengefasst:

Als Vorteil wird genannt, dass die Zunahme der Trägheit bei hohen Geschwindigkeiten durch die relativistische Masse besser zu begreifen wäre. Die StudentInnen und SchülerInnen werden in dem Irrglauben gelassen, dass sie ein Verständnis über den Sachverhalt haben. Jedoch basiert das Verständnis auf dem falschen Konzept, dass $m = m_0/(v^2/c^2)^{1/2}$ als Trägheit angenommen werden kann, obwohl das nicht der Fall ist. (Adler, 1987, p. 742)

Ein weiterer Vorteil besteht angeblich darin, dass die meisten Lernenden mit der Formel $E = mc^2$ vertraut sind und dies einen Zugang zur Relativitätstheorie darstellt. Das Weglassen der relativistischen Masse wäre gleichbedeutend mit dem Weglassen des einzigen Punkts des anfänglichen Verständnisses. Jedoch handelt es sich bei der Formel nach Einstein nicht um die Gesamtmasse bzw. Gesamtenergie. Die Verwendung der relativistischen Masse in Zusammenhang mit der Formel impliziert dies und steht im Widerspruch mit der eigentlichen Bedeutung der Masse-Energie-Beziehung. Die beiden Gleichungen haben eine unterschiedliche Bedeutung und sollten deswegen nicht auf gleiche Ebene gebracht werden. (Adler, 1987, p. 742)

Ein weiterer oft genannter Vorteil ist angeblich, dass das Konzept äußerst hilfreich beim Unterrichten der gravitativen Rotverschiebung etc. ist. Dabei wird die Formel $E = mc^2$ (wobei die Masse als relativistische Masse für bewegte Körper angenommen wird) verwendet, um daraus die Masse für Photonen zu berechnen. Anschließend kann der verlangte Effekt der Gravitation auf die Frequenz gezeigt werden. Tatsächlich scheint

dies der einfachste Weg zu sein, um das zu erreichen. Ein anderer Zugang wäre der der Zeitdilatation in einem Gravitationsfeld. Oder die Beziehung $M = E_e/c^2$, wobei M die Massenänderung eines Körpers, welcher elektromagnetische Energie E_e emittiert, darstellt. M ist in diesem Fall die assoziierte Masse für emittierte Photonen, gegeben durch deren Energie dividiert durch c^2. (Adler, 1987, p. 742)

Die angegeben Vorteile entpuppen sich als irreführende Konzepte, welche den Lernenden beim Verständnis der Beschaffenheit der speziellen Relativitätstheorie und der Physik im Allgemeinem im Wege stehen. Die angebliche Einfachheit im Übergang von der Newtonschen zur relativistischen Physik verzerrt die Tatsache, dass die relativistische Physik einen radikalen Konzeptwechsel von Raum und Zeit abverlangen. Wird von der Newtonschen Physik ausgegangen, so muss das Konzept einer relativistischen Masse verwendet werden um die relativistischen Effekte erklären zu können. Durch die relativistische Masse werden die Newtonschen Bewegungsgleichungen repariert und erwecken den Eindruck, dass Newtons Physik weiterhin gültig ist. Dazu kann folgendes in diesem Zusammenhang zutreffendes zitiert werden:

„Nonrational, confusing language prevents many students from grasping the essence of special relativity and from enjiyong its beauty." (Okun, 1989, p. 32)

Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass die spezielle Relativitätstheorie neue Aufschlüsse über Raum und Zeit geben. Raum und Zeit sind keine absoluten Werte, sondern vom jeweiligen Bezugsystem abhängig. Das Konzept einer relativistischen Masse hält an einer nichtrelativistischen Physik fest, welche eine absolute Zeit und einen absoluten Raum voraussetzen.

3.7 Relativistische Masse im Schulunterricht

Österreichische Schulbücher wurden auf die Stichworte „dynamische Masse", „relativistische Masse" und „spezielle Relativitätstheorie" hin analysiert. Da keine Unterrichtskonzepte bzw. Unterrichtsmaterialen für die spezielle Relativitätstheorie für Österreich zur Verfügung stehen, dienen die ausgewählten Schulbücher als Hinweis für die Umsetzung im Schulunterricht. Die österreichischen Schulbücher wurden aus der Fachbereichsbibliothek für Physik und Chemie der Universität Wien entlehnt. Es handelt sich dabei um Physikschulbücher für die 8te Klasse Oberstufe, welche in

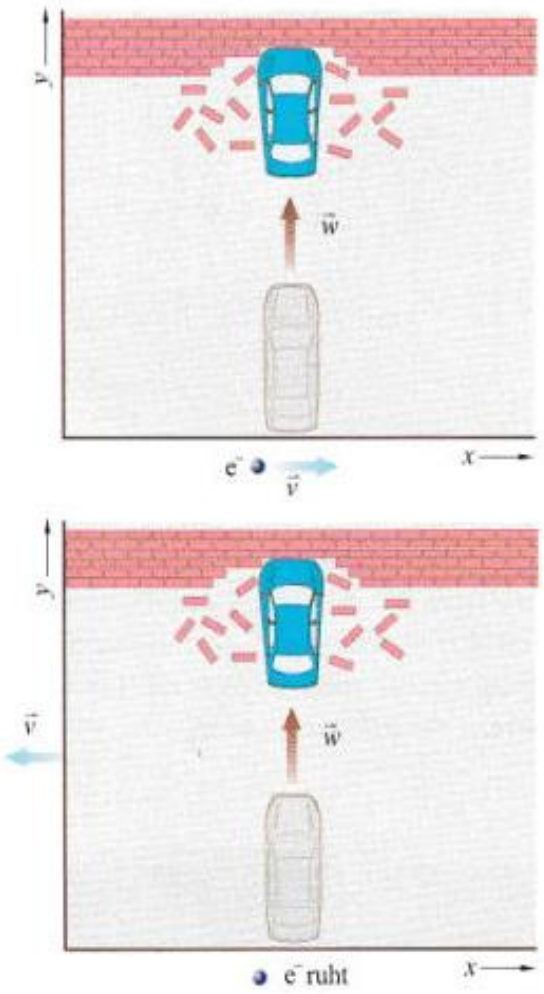
österreichischen Schulen mehrheitlich verwendet werden. Der Aufbau der Kapitel sowie deren Inhalte zur speziellen Relativitätstheorie wurden untersucht.

In der Fachbereichsbibliothek für Physik und Chemie konnten drei unterschiedliche Physikschulbücher für die Oberstufe gefunden werden. Die relevanten Kapitel in Hinblick auf die Forschungsfrage werden hier zusammengefasst.

3.7.1 Physik 8 Sexl

Das Schulbuch Physik von Sexl et al. ist für die 7te und 8te Klasse der allgemeinbildenden höheren Schule gedacht. Im übergeordneten Kapitel II „Spezielle Relativitätstheorie" wird in Kapitel 1 die Zeitdilatation und Längenkontraktion gelehrt. Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Galilei-Transformation und der Lorentz-Transformation. In Kapitel 3 „Masse und Energie" wird die „relativistische Massenzunahme" explizit als Unterkapitel genannt. In „3.1 Die relativistische Massenzunahme" wird zunächst die Frage gestellt, ob ein Körper durch ständige Beschleunigung die Lichtgeschwindigkeit überschreiten kann. Es wird gezeigt, dass mit den Gesetzen der Newtonschen Physik eine Rakete mit einer konstanten Beschleunigung von a eine Zeit von t=c/a bräuchte um Lichtgeschwindigkeit zu erreichen. Nach dieser Zeit würde laut der Newtonschen Physik die Rakete Überlichtgeschwindigkeit erreichen. Das Erreichen einer Überlichtgeschwindigkeit steht aber im Widerspruch zu den im vorherigen Kapitel eingeführten Überlegungen zur Lichtkonstanz. Im Schulbuch wird argumentiert, dass der Widerstand des Raumschiffes gegen die Beschleunigung mit zunehmender Geschwindigkeit offenbar immer größer werden muss. Die Schlussfolgerung lautet, dass die Masse mit der Geschwindigkeit zunehmen muss. Im Schulbuch wie folgt formuliert:

„Damit kein Widerspruch zu unseren früheren Überlegungen auftritt, muss der Widerstand des Raumschiffes gegen Beschleunigung mit zunehmender Geschwindigkeit offenbar immer größer werden. Die Masse eines Körpers muss also mit der Geschwindigkeit ansteigen, wie wir anhand des folgenden Gedankenexperiments herleiten." (Sexl, et al., 2007, p. 30) Bei dem erwähnten Gedankenexperiment handelt es sich um einen Stoßprozess, wobei ein Auto ein Loch in eine Wand fährt (siehe Abbildung 1).



30.2 Ein Auto fährt mit der Geschwindigkeit w = 50 km/h gegen die Wand und schlägt ein Loch (oberes Bild). Die Tiefe des Loches ist ein Maß für den Impuls des Autos. Vom Standpunkt eines mit sehr hoher Geschwindigkeit vorbeifliegenden Beobachters erscheint dieser Vorgang wegen der Zeitdilatation in Zeitlupe (unteres Bild). Ganz langsam bewegt sich das Auto auf die Wand zu. Vom Standpunkt des Beobachters ist das tiefe Loch in der Wand durch die große Masse des Autos zu erklären.

Abbildung 1: Autocrash

Quelle: (Sexl, et al., 2007, p. 30)

Die Tiefe des Lochs wird als Maß für den Impuls des Autos herangezogen. Zunächst wird der Stoßvorgang von einem ruhenden außenstehenden Beobachter betrachtet und der lineare Impuls berechnet. Anschließend wird der Impuls von einem parallel zur Wand schnell vorbeibewegten Beobachter berechnet. Aufgrund der Zeitdilatation läuft der Autocrash für den relativ dazu bewegten Beobachter langsamer ab. Mit Hilfe der Zeitdilatation wird die Geschwindigkeit des Autos im dazu relativ bewegten Bezugsystem berechnet. Das Loch ist viel tiefer, als man bei der berechneten Geschwindigkeit erwarten würde. Die linearen Impulse aus beiden Bezugsystemen werden gleichgesetzt. Um die gleiche Größe für den Impuls wie im Ruhesystem zu erhalten, wird die Masse um den Faktor erhöht, der aufgrund der Zeitdilatation auftritt. Dieser Faktor entspricht dem Lorentzfaktor und die hergeleitete Formel für die Masse, im relativen Bezugsystem, ist die für die relativistische Masse. Das hier zusammengefasste Gedankenexperiment inklusive Herleitung ist in Abbildung 2 zu sehen.

▲ **Gedankenexperiment**

Ein Auto mit der Masse m fahre mit der konstanten Geschwindigkeit w gegen eine Wand, wobei zB $w = 50$ km/h sei. Jedenfalls gelte aber $w \ll c$. Beim Auftreffen schlägt das Auto ein Loch in die Wand und bleibt stecken. Dabei überträgt es seinen gesamten Impuls $p = mw$ auf die Wand. Die Tiefe des Loches kann uns als Maß des Impulses dienen.

Wir betrachten diesen Vorgang nun vom Standpunkt eines Beobachters, der sich mit großer Geschwindigkeit v parallel zur Wand bewegt. Wegen der Zeitdilatation erscheint die Fahrt des Autos gegen die Wand vom Standpunkt des Beobachters im Zeitlupentempo. Mit der Geschwindigkeit[1]

$$w' = \frac{\Delta y'}{\Delta t'} = \frac{\Delta y}{\Delta t'} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta t}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta y}{\Delta t}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = w\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

fährt das Auto auf die Wand zu und schlägt dort überraschenderweise ein tiefes Loch. Um dies zu erklären, müssen wir fordern, dass zwar die Geschwindigkeit w des Autos auf w' verringert ist, seine Masse m jedoch auf einen solchen Wert m' vergrößert erscheint, dass der auf die Wand übertragene Impuls der gleiche ist wie zuvor. Aus der Gleichsetzung der Impulse $p = mw$ und $p' = m'w'$ folgt

$$p' = m'w' = m'w\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = mw = p, \text{ also } m' = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Abbildung 2: Gedankenexperiment Autocrash

Quelle: (Sexl, et al., 2007, p. 30)

Das Schulbuch weist darauf hin, dass die aus dem Spezialfall hergeleitete Formel für die Masse im relativ bewegten Bezugsystem allgemein gilt. Dabei wird zwischen der Ruhemasse m_0 und der dynamischen Masse m des bewegten Körpers unterschieden. Dazu im Schulbuch:

„Dieses Resultat, das wir für den Spezialfall hergeleitet haben, gilt allgemein. Die Masse eines mit der Geschwindigkeit v bewegten Körpers erscheint einem ruhenden Beobachter um den Faktor $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ größer als die Masse des ruhenden Körpers. Wir bezeichnen die Masse des ruhenden Körpers als Ruhemasse m_0 und die Masse des bewegten Körpers als dynamische Masse m." (Sexl, et al., 2007, p. 30)

Es ist hier anzumerken, dass die Formulierung „erscheint" im Zusammenhang mit dem Konzept der relativistischen Masse vorteilhaft ist. Die Formel für die relativistische Masse wird anschließend unter der Überschrift „Relativistische Massenzunahme" vorgestellt. Die Formel wird wie folgt angeschrieben:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Wobei m als Masse bezeichnet wird und m_0 als Ruhemasse.

Abschließend wird darauf verwiesen, dass die relativistische Massenzunahme, in den Jahrzehnten seit ihrer Herleitung, in zahlreichen Präzisionsexperimenten überprüft wurde. (Sexl, et al., 2007, p. 31) Als Beispiel dafür werden Teilchenbeschleuniger genannt.

In Kapitel 3.2 „Die relativistische kinetische Energie" wird die relativistische Masse nicht explizit angesprochen. Die Formel für die Gesamtenergie wird vorgestellt, wobei die vorherigen Notationen für die Ruhemasse m_0 und die Masse m beibehalten werden. (Sexl, et al., 2007, p. 32) Die Formel für die Gesamtenergie wird mit folgendem Satz eingeführt: „Einstein konnte zeigen, dass der Ausdruck für die Gesamtenergie E eines Köpers gegeben ist durch

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2$$

Es werden die einzelnen Formelsymbole im Schulbuch nicht weiter erläutert. Im vorherigen Kapitel wurden die Formelsymbole m_0 als Ruhemasse und m als Masse bzw. dynamische Masse eingeführt.

Anschließend wird für die Formel der Gesamtenergie eine Potenzreihe entwickelt. Es wird gezeigt, dass der erste Term der Potenzreihe unabhängig von der Geschwindigkeit des Körpers ist. Dieser Term wird als Ruheenergie bezeichnet. (Sexl, et al., 2007, p. 32) Dass die relativistische Energie bei Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit über alle Maße ansteigt, ist laut Schulbuch ein Indiz dafür, dass massive Körper keine Lichtgeschwindigkeit erreichen können. (Sexl, et al., 2007, p. 23)

In Kapitel 3.3 „Äquivalenz von Masse und Energie" wird gezeigt, dass ein ruhendes Teilchen durch eine Energiezufuhr ΔE eine Massenzunahme von Δm erfährt. Anschließend wird argumentiert, dass man bei den zuvor erwähnten Beschleunigern sehen kann, in welchem hohen Maß sich die Masse eines Teilchens durch Energiezufuhr verändern kann. (Sexl, et al., 2007, p. 33)

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Konzept der relativistischen Masse gelehrt wird. Die Formulierungen deuten teilweise darauf hin, dass es sich um eine scheinbare Massenzunahme handelt. Dennoch ist die Formulierung „relativistische Massenzunahme" gewählt worden. Begriffe wie Ruhemasse und dynamische Masse werden vorgestellt und auch in weiteren Formeln verwendet. Die Einführung der relativistischen Masse durch das Gedankenexperiment kann den Anschein erwecken, dass die Masse tatsächlich mit der Geschwindigkeit zunimmt. Bei der Herleitung der relativistischen Masse wird der lineare Impuls verwendet, ohne explizit darauf hinzuweisen. Die genannten Kapitel gehen nicht darauf ein, dass es sich bei der relativistischen Masse um ein Rezept mit bedingter Anwendbarkeit handelt. Es lassen sich keine Anmerkungen dazu finden, dass es sich um einen kinematischen Effekt innerhalb der speziellen Relativitätstheorie handelt. Dem Aufbau des Schulbuches und der Kapitel ist zu entnehmen, dass die relativistische Masse gleichbedeutend mit der Längenkontraktion und Zeitdilatation ist. Dadurch wird der Anschein erweckt, dass die relativistische Masse eine Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie ist.

3.7.2 Big Bang Physik 8

Das Schulbuch Big Bang ist für die 8te Schulstufe gedacht. In Kapitel 40 „Zeitdehnung und Raumschrumpfung" wird zunächst die Zeitdilatation und Längenkontraktion vermittelt. Kapitel 41 „Relativistische Masse und Energie" zeigt mit Hilfe der Zeitdilatation den Effekt der relativistischen Massenzunahme und die berühmteste Formel der Welt $E=mc^2$. (Apolin, 2019, p. 25) Das Unterkapitel heißt „Zeitlupencrash Massenzunahme". Die Einleitung des Unterkapitels sagt ausdrücklich, dass die Masse eines Objekts mit der Geschwindigkeit zunimmt. Im nächsten Satz folg der Hinweis, dass es in diesem Zusammenhang nicht schlecht ist, wieder einmal über den Begriff der Masse nachzudenken. (Apolin, 2019, p. 25) In den anschließenden Aufgaben ist das bereits bekannte Beispiel zu finden in dem eine Rakete beschleunigt wird. Bei diesem Beispiel wird gezeigt, dass eine Rakete, welche mit 10 m/s^2 beschleunigt wird, nach knapp einem Jahr Überlichtgeschwindigkeit erreichen würde. (Apolin, 2019, p. 25) Anschließend wird darauf hingewiesen, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht erreicht werden kann und schon gar nicht überschritten (siehe Abbildung 3). Es wird die Frage gestellt: „Wo ist der Überlegungsfehler?". (Apolin, 2019, p. 25)

F4 S1 Stell dir eine Rakete vor, die mit 10 m/s^2 beschleunigt (Abb. 41.1). Dadurch hat man quasi eine künstliche Gravitation mit erdähnlichen Bedingungen erzeugt. Weil die Rakete pro Sekunde um 10 m/s schneller wird, müsste sie nach $t = c/a =$ $(3 \cdot 10^8 m/s)/(10 m/s^2) = 3 \cdot 10^7 s$, also nach einem knappen Jahr, Lichtgeschwindigkeit erreichen und dann sogar überschreiten!? Aber die Lichtgeschwindigkeit kann nicht erreicht und schon gar nicht überschritten werden (Kap. 40.2)! Wo ist der Überlegungsfehler?

Abb. 41.1: Kann diese Rakete nach einem Jahr die Lichtgeschwindigkeit überschreiten?

Abbildung 3: beschleunigte Rakete

Quelle: (Apolin, 2019, p. 25)

Wie im Schulbuch „Physik 8 Sexl" wird danach ein Stoßprozess in zwei Inertialsystemen betrachtet. Das Gedankenexperiment wird „Zeitlupencrash" genannt (Abbildung 4).

Stell dir mal folgende Situation vor: Eine **Raumschiff** fliegt gegen eine Wand und beschädigt diese (Abb. 41.2 a). Die Tiefe des Lochs ist ein Maß für die Wucht des Aufpralls. Diese Wucht bezeichnet man in der Physik als **Impuls**. Der Impuls ist definiert als Masse mal Geschwindigkeit. Je größer Aufprallgeschwindigkeit und/oder Masse, desto größer ist der Impuls und desto größer wird das Loch.

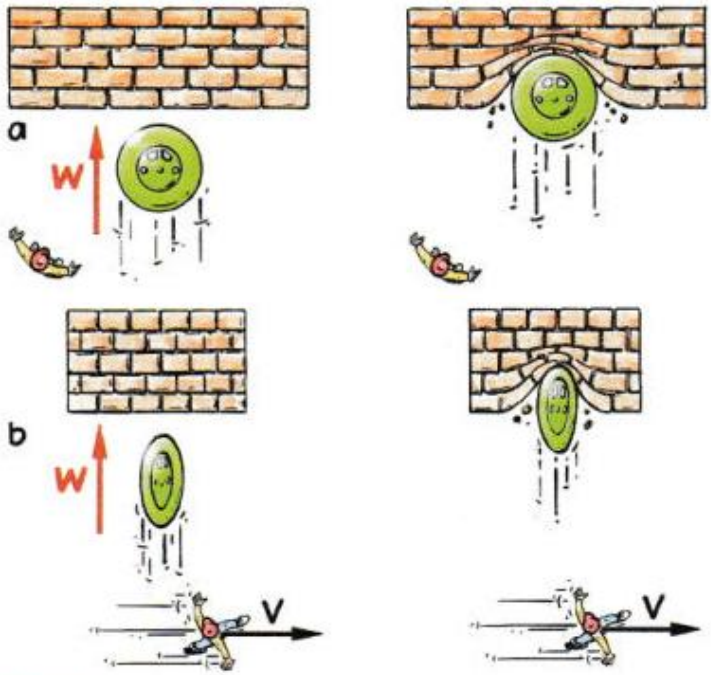


Abb. 41.2: Aufprall aus Sicht des Inertialsystems der Mauer (a) und wenn sich die (längenkontrahierte) Szene mit *v* an dir vorbei bewegt (b). Im Fall b läuft der Aufprall in Zeitlupe ab. Würdest du später zurückkommen und zur Wand ruhen, wäre das Loch aber so groß wie im Fall a. Weil die gesamte kinetische Energie umgewandelt wird, liegt hier ein plastischer Stoß vor.

Was passiert nun aber, wenn du dich während des Aufpralls parallel zur Wand bewegst (Abb. 41.2 b)? Die Szene läuft für dich dann auf Grund der Zeitdilatation langsamer ab, quasi ein **Zeitlupencrash**. Geschichten gehen aber immer gleich aus (Kap. 40.4 f.). Das Loch muss daher auch von diesem System aus gesehen gleich groß sein. Nun steht man aber vor einem Problem. Wie kann es sein, dass trotz der geringeren Geschwindigkeit das Loch in der Wand gleich groß ist? Die Wucht ist doch scheinbar kleiner, und deshalb müsste doch auch das Loch kleiner sein, oder? Welche Möglichkeit gibt es, aus diesem Dilemma herauszukommen?

Abbildung 4: Zeitlupencrash

Quelle: (Apolin, 2019, p. 25)

Ein Raumschiff fliegt in eine Wand, und wird einmal von einem außenstehenden Beobachter in Ruhe und einmal von einem parallel zur Wand relativ bewegten Beobachter betrachtet. Der Prozess läuft für den relativ dazu schnell bewegten Beobachter langsamer ab aufgrund der Zeitdilatation. Der Impuls stellt ein Maß für die Aufprallwucht dar. Wieder wird argumentiert, dass der Impuls in beiden Inertialsystemen gleich groß sein muss. Im Schulbuch wird der anscheinende widersprüchliche Sachverhalt so geklärt:

„Das Problem ist dann zu lösen, wenn man annimmt, dass die **Masse der Untertasse größer ist,** und zwar um genau denselben Faktor, um den die Geschwindigkeit kleiner ist." (Apolin, 2019, p. 26)

Diese Formulierung und gleichzeitig fett hervorgehobene Schrift erwecken den Anschein, dass die Masse tatsächlich größer ist. Wie bereits im Schulbuch „Physik 8 Sexl" wird darauf hingewiesen, dass die relativistische Massenzunahme nicht nur für den gezeigten Spezialfall gilt, sondern allgemein gültig ist. Im selben Absatz ist eine weitere Formulierung zur relativistischen Massenzunahme zu finden, welche im Original gelb hervorgehoben ist. Die Formulierung lautet wie folgt: „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.". (Apolin, 2019, p. 26) Diese Formulierung deutet darauf hin, dass es sich um einen Effekt handelt, der aus dem relativ dazu bewegten Bezugsystem zu beobachten ist. Im Anschluss an die Formulierung wird auf die Infobox „Dynamische Masse" verwiesen. In der Infobox „Dynamische Masse" werden die relative Geschwindigkeit sowie die linearen Impulse, ausgehend vom Gedankenexperiment, berechnet. Unter dem Verweis auf die Infobox „Dynamische Masse" steht die Formel für die relativistische Massenzunahme. Die Formel wird folgendermaßen dargestellt:

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

Wobei im Schulbuch m_d die dynamische Masse ist und m die „Ruhemasse". (Apolin, 2019, p. 26) Die Anführungszeichen bei der Ruhemasse werden nicht weiter erläutert.

Anschließend wird erklärt, dass es nun klar ist, dass eine Rakete nicht auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden kann. Grund dafür ist laut Schulbuch die

relativistische Massenzunahme. Es wird argumentiert, dass bei Lichtgeschwindigkeit die Masse unendlich groß würde und das würde eine unendlich hohe Schubkraft erfordern. (Apolin, 2019, p. 26) Laut Schulbuch sind Experimente an Teilchenbeschleunigern der Beweis für die relativistische Massenzunahme. Bis hierhin ist der Aufbau des Kapitels nahezu ident mit dem im Schulbuch „Physik 8 Sexl". In diesem Schulbuch ist jedoch ein Absatz zu finden, welcher die möglichen Vorstellungen zur relativistischen Massenzunahme anspricht. Dazu im Schulbuch:

„Was soll man sich aber unter der **Massenzunahme** eigentlich vorstellen? Es kann doch nicht sein, dass Raketen oder Elementarteilchen irgendwie „dicker" werden (Abb. 414)!? Natürlich nicht! Masse hat zwei Erscheinungsformen. Einerseits tritt sie als **träge Masse** auf. Je größer diese ist, desto mehr Kraft braucht man, um ein Objekt zu beschleunigen." (Apolin, 2019, p. 26)

Die im Zitat erwähnte Abbildung 414 ist hier Abbildung 5.

Abb. 41.4: Wenn sich Objekte relativ zu dir bewegen, so wächst ihre Masse. Aber was bedeutet das eigentlich? Es kann doch nicht so sein wie in dieser Abbildung!?

Abbildung 5: Massenzunahme

Quelle: (Apolin, 2019, p. 26)

Dieser Absatz weist darauf hin, dass die Objekte nicht tatsächlich dicker werden. Es wird auf die träge Masse verwiesen und die damit verbundene zusätzliche Kraft, welche für das Beschleunigen notwendig ist. Weiter wird die schwere Masse erwähnt, und dass schwere sowie träge Masse gleich groß sind. Das Schulbuch stellt klar, dass in

der speziellen Relativitätstheorie nur die träge Masse von Bedeutung ist. Im Schulbuch wie folgt:

„In der speziellen Relativitätstheorie spielt nur die träge Masse eine Rolle. Wenn man also sagt, dass bei einem schnell bewegten Objekt die Masse größer wird, ist es nicht dicker geworden, sondern schwerer zu beschleunigen, so wie etwa die Protonen im LHC." (Apolin, 2019, p. 27)

Diese Formulierung macht deutlich, dass es sich nicht um eine Änderung der inneren Struktur der beschleunigten Objekte handelt. Es handelt sich um einen Effekt, welcher die Beschleunigung der trägen Masse erschwert.

Im nächsten Unterkapitel „Was wiegt die Energie? $E=mc^2$ und relativistische Energie" wird die Masse-Energie Äquivalenz vorgestellt. In der Infobox „Überraschung" wird die dynamische Masse als Ausdruck für die Potenzreihenentwicklung herangezogen. Dabei zeigt sich, dass das erste Glied der Reihe multipliziert mit c^2 die Ruheenergie ergibt. Das zweite Glied multipliziert mit c^2 ergibt die kinetische Energie. (Apolin, 2019, p. 28). Die Terme für die Ruheenergie und kinetische Energie werden ausgehend von der relativistischen Masse hergeleitet.

Die Kapitel „Zeitdehnung und Raumschrumpfung" und „Relativistische Masse und Energie" werden im Buch gleichrangig dargestellt. Das kann den Anschein erwecken, dass es sich bei der relativistischen Masse um eine Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie handelt. Die relativistische Massenzahme wird jedoch, im Gegensatz zum Schulbuch „Physik 8 Sexl", als Effekt beschrieben. Dieser Effekt wird der trägen Masse zugschrieben, welche ein Maß für die Beschleunigung ist.

3.7.3 Physik compact Basiswissen 8

Dieses Schulbuch ist für die 8te Klasse Oberstufe, und soll sicher und kompetent auf die Matura vorbereiten. Kapitel 20.3 behandelt die Zeitdilatation und Längenkontraktion. Kapitel 20.4 ist der Lorentz-transformation gewidmet. Anschließend folgt Kapitel 20.5 mit dem Titel „Äquivalenz von Energie und Masse" mit dem Unterkapitel 20.5.1 „Dynamische Masse". Zu Beginn dieses Unterkapitels wird eine Aufgabe gestellt in der die klassische Geschwindigkeit eines Körpers berechnet werden soll, welcher ein Jahr lang mit 10 m/s^2 beschleunigt wird. Anschließend soll

überlegt werden, was eintreten muss, damit ein mit konstanter Kraft beschleunigter Körper keine Überlichtgeschwindigkeit erreicht. (Jaros, et al., 2013, p. 24)

Nach dieser Aufgabe wird die dynamische Masse vorgestellt und explizit auf die Massenzunahme bei steigender Geschwindigkeit hingewiesen. Im Schulbuch wie folgt:

„Ähnlich wie Zeiten und Längen kommt der Masse eines Körpers kein absoluter Wert zu. Vielmehr nimmt die Masse eines Körpers bei steigender Geschwindigkeit zu. Um die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse m besonders auszudrücken, spricht man auch manchmal von der so genannten **dynamischen Masse.** Im Unterschied dazu bezeichnet man die Masse eines rundenden Körpers als **Ruhemasse** m_0." (Jaros, et al., 2013, p. 24)

Es wird zwischen dynamischer Masse und Ruhemasse eines Körpers unterschieden. Anschließend wird die Formel der dynamischen Masse eingeführt. Dazu im Schulbuch: „**Masse** und **Ruhemasse** sind durch den γ-Faktor miteinander verknüpft:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{{c_0}^2}}}$$

$$m = m_0 . \gamma$$

m… (dynamische) Masse

m_0… Ruhemasse

v… Geschwindigkeit

c_0… Vakuumlichtgeschwindigkeit" (Jaros, et al., 2013, p. 24)

„Dynamisch" wurde hier in Klammer gesetzt, vermutlich um darauf hinzuweisen, dass auch nur von der Masse gesprochen wird. Anschließend werden fünf weitere Aufgaben gestellt, darunter Beispiele in denen die dynamische Masse berechnet werden soll. In einer Aufgabe soll begründet werden, warum es nicht möglich ist einen Körper mit Ruhemasse m_0 auf Vakuumlichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Bei einer weiteren Aufgabe soll überlegt werden wie sich die relativistische Massenzunahme auf den Impuls auswirkt. Anschließend wird in einem blau hinterlegten Kästchen ein Gedankenexperiment zur dynamischen Masse vorgestellt (siehe Abbildung 6).

Gedankenexperiment

Im folgenden Gedankenversuch wird die obige Beziehung zwischen Masse und Ruhemasse begründet.
Wir betrachten zwei Kugeln A und B, die in Ruhe die gleiche Masse m_0 (= Ruhemasse) aufweisen.

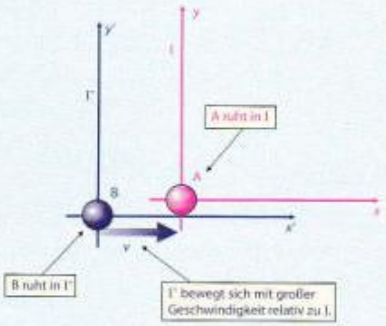


Abb. 24.1

Die Kugel A ruht im Inertialsystem I, die Kugel B ruht im Inertialsystem I', das sich mit großer Geschwindigkeit v relativ zu I in x-Richtung bewegt.

1. Die beiden Kugeln treffen aufeinander und stoßen einander elastisch so, dass sie eine kleine Geschwindigkeit in y-Richtung erhalten:

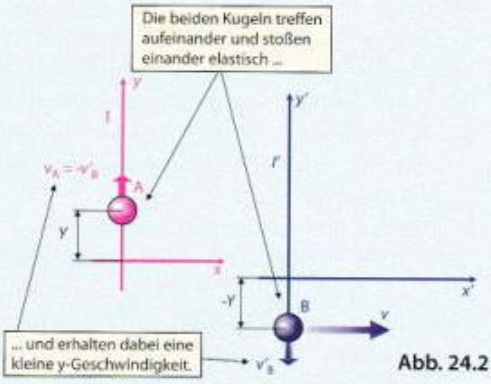


Abb. 24.2

Da der Vorgang bezüglich der beiden Inertialsysteme symmetrisch abläuft, gilt für die Geschwindigkeiten der Kugeln

$$v_A = -v_B'$$

v_A ... Geschwindigkeit der Kugel A in y-Richtung im System I
v_B' ... Geschwindigkeit der Kugel B in y-Richtung im System I'

2. Bei unseren weiteren Überlegungen müssen wir berücksichtigen, dass in der y-Richtung wegen der geringen Geschwindigkeit in y-Richtung praktisch keine Längenkontraktion auftritt. In gleichen Zeiten legen die Kugeln daher in y-Richtung gleiche Strecken zurück. Wir nennen die Strecke, die in der Zeit T zurückgelegt wird Y (bzw. $-Y$).

3. Für das System I ergeben sich daher folgende Werte für die Geschwindigkeit der Kugeln:
Kugel A:

$$v_A = Y/T$$

v_A ... Geschwindigkeit der Kugel A in I
Y ... Weg in y-Richtung
T ... Zeit im System I

Die Kugel B bewegt sich im System I mit der (großen) Geschwindigkeit v. Daher muss bei der Berechnung der Geschwindigkeit v_B die Zeitdilatation berücksichtigt werden:

$$v_B = \frac{-Y \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}{T}$$

v_B ... Geschwindigkeit der Kugel B in I in y-Richtung
Y ... Weg in y-Richtung
v ... Geschwindigkeit der Kugel B in x-Richtung
c_0 ... Vakuumlichtgeschwindigkeit
T ... Zeit im System I

4. Im System I muss der Impulserhaltungssatz gelten. Vor dem Stoß ist der Impuls in y-Richtung null. Daher muss auch nach dem Stoß der Impuls der Kugeln in y-Richtung null sein:

$$p_A + p_B = 0$$
$$m_A \cdot v_A + m_B \cdot v_B = 0$$

p_A ... Impuls der Kugel A in y-Richtung
p_B ... Impuls der Kugel B in y-Richtung
m_A ... Masse der Kugel A in I: $m_A = m_0$, weil sich A in I nur langsam bewegt
v_A ... Geschwindigkeit der Kugel A in I in y-Richtung
m_B ... Masse der Kugel B, die sich mit großer Geschwindigkeit v in x-Richtung bewegt
v_B ... Geschwindigkeit der Kugel B in I in y-Richtung

Einsetzen des Ausdrucks für v_B in den Impulserhaltungssatz liefert:

$$m_A = m_B \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}$$

Da m_A die Masse einer (nahezu) ruhenden Kugel und m_B die Masse einer gleichartigen, rasch bewegten Kugel ist, kann man m_A mit der Ruhemasse m_0 und m_B mit der (dynamischen) Masse m identifizieren. Dies führt auf die Formel

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}$$

m ... (dynamische) Masse
m_0 ... Ruhemasse
v ... Geschwindigkeit
c_0 ... Vakuumlichtgeschwindigkeit

Abbildung 6: stoßende Kugeln

Quelle: (Jaros, et al., 2013, pp. 24-25)

In diesem Gedankenexperiment werden zwei Kugeln A und B mit identer Ruhemasse in ihren jeweiligen Inertialsystemen betrachtet (siehe Abbildung 6). Kugel A ruht im Inertialsystem I und Kugel B ruht im Inertialsystem I´. Zunächst bewegt sich Kugel B relativ zu Kugel A mit großer Geschwindigkeit v in die positive x-Richtung. Die Kugeln stoßen einander elastisch und erhalten im jeweiligen Inertialsystem eine kleine Geschwindigkeit v_A und v_B´ in y-Richtung. Da der Vorgang bezüglich der beiden Inertialsysteme symmetrisch abläuft, gilt $v_A=-v_B$´. (Jaros, et al., 2013, p. 24) Weiter kann die Längenkontraktion in y-Richtung vernachlässigt werden, da es sich um geringe Geschwindigkeiten handelt. Daher legen die Kugeln in y-Richtung gleiche Strecken in gleichen Zeiteinheiten zurück. Die Kugel B bewegt sich im Inertialsystem I mit großer Geschwindigkeit, deswegen muss für die Berechnung der Geschwindigkeit v_B die Zeitdilatation berücksichtigt werden. Weiter wird darauf hingewiesen, dass im Inertialsystem I der Impulserhaltungssatz gelten muss. Vor dem Stoß ist der Impuls in y-Richtung Null, daher muss nach dem Stoß der Gesamtimpuls der Kugeln in y-Richtung Null sein. Es werden die linearen Impulsgleichungen verwendet und der zuvor berechnete Wert für v_B eingesetzt (siehe Abbildung 6). (Jaros, et al., 2013, p. 25) Aus dem Impulserhaltungssatz und den vorhergien Annahmen wird der Ausdruck für die dynamische Masse hergeleitet (siehe Abbildung 6).

Im weiteren Unterkapitel 20.5.2 „Energie und Impuls" wird die relativistische Energie-Impulsbeziehung erläutert. Zunächst wird eine Aufgabe gestellt in der man die Beziehung zwischen kinetischer Energie und Impuls im Rahmen der klassischen Mechanik herleiten soll. (Jaros, et al., 2013, p. 25) Das Ziel ist es einen relativistischen Zusammenhang zwischen Energie und Impuls herzuleiten. (Jaros, et al., 2013, p. 25) Dazu soll laut Schulbuch die geschwindigkeitsabhängige Masse verwendet werden, und in die Gleichung für die Gesamtenergie $E=mc_0^2$ und den Impuls $p=mv$ eingesetzt werden. Wobei die Formel für die Gesamtenergie bereits zu Beginn in Kapitel 20.5 hergeleitet wurde. Das heißt, dass die Masse-Energie Äquivalenz in diesem Schulbuch ohne das Konzept der relativistischen Masse eingeführt wird. Erst bei der relativistischen Energie-Impulsbeziehung wird die relativistische Masse als Ausgangspunkt für die Herleitung der Formel herangezogen. In einem farbig hinterlegten Kästchen wird die Formel für die relativistische Energie-Impulsbeziehung wie folgt vorgestellt:

$$E^2 = m_0^2 . c_0^4 + p^2 . c_0^2$$

Wobei die Masse m_0 in dieser Formel explizit die Ruhemasse darstellt. Ausgehend von dieser Formel wird argumentiert, dass Photonen keine Ruhemasse haben und sich die Formel in diesem Fall auf $E=pc_0$ reduziert.

3.7.4 Vergleich der Schulbücher

In allen drei vorgestellten Schulbüchern werden zunächst die Zeitdilatation und Längenkontraktion in einem separaten Kapitel gelehrt. Anschließend folgt in jedem Schulbuch ein Kapitel zur Masse und Energie mit einem Unterkapitel zur dynamischen Masse. Die Begriffe für die dynamische Masse variieren innerhalb der einzelnen Schulbücher. In allen drei Schulbüchern lassen sich die Ausdrücke „relativistische Masse", „relativistische Massenzunahme" und „dynamische Masse" finden. Dabei werden die Ausdrücke synonym verwendet und es findet keine einheitliche Verwendung bzw. Unterscheidung statt. Weiter wird der Begriff „Ruhemasse" verwendet mit dem Hinweis darauf, dass diese auch nur Masse genannt werden kann. Die Schreibweise „(dynamische) Masse" soll darauf hinweisen, dass zur dynamischen Masse auch nur Masse gesagt werden kann.

In allen drei Schulbüchern wird als Einstieg das Beispiel einer Rakete oder eines Raumschiffs vorgestellt, welches mit 10 m/s^2 beschleunigt wird. Nach etwa einem Jahr würde die Rakete bzw. das Raumschiff Überlichtgeschwindigkeit erreichen, was laut spezieller Relativitätstheorie nicht möglich ist. Weiter wird die Frage gestellt was eintreten muss, damit die Rakete bzw. das Raumschiff keine Lichtgeschwindigkeit bzw. Überlichtgeschwindigkeit erreichen kann. Es wird in diesen Beispielen die nichtrelativistische Formel für die Beschleunigung herangezogen.

Weiter werden in allen drei Schulbüchern Gedankenexperimente vorgestellt in denen die Formel für die relativistische Masse hergeleitet wird. In „Physik 8 Sexl" und „Big Bang" wird das gleiche Gedankenexperiment vorgestellt. Bei diesem Gedankenexperiment wird ein Aufprall in eine Wand von einem parallel zur Wand relativ bewegten Beobachter betrachtet. Das Loch in der Wand stellt bei diesem Gedankenexperiment ein Maß für die Wucht des Aufpralls dar. Der Impulserhaltungssatz mit der Formel für den linearen Impuls wird angewandt. Im Schulbuch „Physik compact" wird ein Stoßprozess von zwei relativ zueinander

bewegten Kugeln betrachtet. Der elastische Stoßprozess verläuft in y-Richtung, die anfängliche Relativbewegung ist in x-Richtung. Wieder wird aus dem linearen Impuls und dem Impulserhaltungssatz die Formel für die relativistische Masse hergeleitet. Alle drei Gedankenexperimente leiten die Formel für die relativistische Masse nach dem gleichen Prinzip her. Die Formel der relativistischen Masse wird in allen drei Schulbüchern als essentielle Formel dargestellt, gleichbedeutend mit den Formeln zur Zeitdilatation und Längenkontraktion. Es ergeben sich in den genannten Gedankenexperimenten mehrere Unstimmigkeiten bezüglich der Wahl der Inertialsysteme und der nichtrelativistischen Formel für den Impuls. Das Gedankenexperiment vermittelt den Eindruck, dass der Impulserhaltungssatz unabhängig von der Wahl des Inertialsystems gilt. Der Impulserhaltungssatz gilt im jeweiligen Inertialsystem, jedoch bleiben Energie und Impuls nicht erhalten beim Übergang von einem zum anderen Inertialsystem. Dazu kommt, dass weiterhin an der nichtrelativistischen Impulsformel festgehalten wird, obwohl in den vorhergien Kapiteln Zeitdilatation und Längenkontraktion bereits vorgestellt wurden. Es wird in den Schulbüchern darauf hingewiesen, dass es sich beim Gedankenexperiment um einen Spezialfall handelt. Gleichzeitig wird gesagt, dass der Spezialfall zu einem Ergebnis führt, welches allgemein gültig ist.

Im Schulbuch „Big Bang" lässt sich der Hinweis finden, dass es sich bei der Massenzunahme um keine tatsächliche Zunahme im Sinne von Dickerwerden handelt. Es wird argumentiert, dass die träge Masse zunimmt und diese schwerer zu beschleunigen ist.

Die Schulbücher „Big Bang" und „Physik 8 Sexl" erwähnen im Zusammenhang mit der relativistischen Masse die Experimente an Teilchenbeschleunigern. Die Messergebnisse stellen laut den zwei Schulbüchern einen Beweis für die dynamische Masse dar. Im Schulbuch „Physik compact" ist dieser Hinweis nicht zu finden.

In allen drei Schulbüchern wird zumindest implizit der Eindruck erweckt, dass es sich bei der relativistischen Masse um ein Konzept handelt, welches gleichbedeutend mit der Zeitdilatation und Längenkontraktion ist. Nirgends lässt sich der Hinweis finden, dass das Konzept der relativistischen Masse eine Folge der Zeitdilatation und

Längenkontraktion ist. In „Physik compact" wird sogar ausdrücklich erwähnt, dass der Masse so wie Raum und Zeit kein absoluter Wert zukommt.

Die Energie-Masse Äquivalenz wird in allen drei Schulbüchern über die Formel für die Gesamtenergie vermittelt. Im Schulbuch „Physik 8 Sexl" wird die Formel für die relativistische Energie vorgestellt und anschließend eine Potenzreihenentwicklung gezeigt. Der erste Term wird als Ruheenergie identifiziert, der zweite Term als kinetische Energie. Die Formel für die relativistische Gesamtenergie wird mit der Ruhemasse m_0 sowie mit der Masse m ausgedrückt. Wobei die Masse m in diesem Zusammenhang die relativistische Masse darstellt. Im Schulbuch wird das jedoch nicht erwähnt, der Zusammenhang ist nur aus der Formel heraus zu erkennen. Die relativistische Masse wird bei weiteren Formeln beibehalten, aber es findet keine Erwähnung oder Erklärung statt. In „Big Bang" wird die relativistische Masse mit c^2 multipliziert und dieser Ausdruck mit der Gesamtenergie gleichgesetzt. Anschließend wird eine Potenzreihenentwicklung durchgeführt. Hier wird im Gegensatz zum Schulbuch „Physik 8 Sexl" die relativistische Masse angesprochen. Die relativistische Masse ist in diesem Fall sogar der Ausgangspunkt für die Herleitung der relativistischen Energie.

In den Schulbüchern „Physik 8 Sexl" und „Big Bang" wird zuerst die relativistische Masse vorgestellt und anschließend die Energie-Masse-Äquivalenz. Das Schulbuch „Physik compact" geht anders vor und führt zuerst die Energie-Masse-Äquivalenz ein. Dabei werden die relativistische Masse und Ruhemasse nicht erwähnt. Die Masse m wird als Masse angeschrieben und nicht weiter besprochen. Anschließend wird die dynamische Masse vorgestellt. Darauf folgt die Energie-Impulsbeziehung, welche mit Hilfe der relativistischen Masse hergeleitet wird. Das Schulbuch „Physik compact" ist das einzige Schulbuch, welches die relativistische Energie-Impulsbeziehung vorstellt.

3.8 Forschungsstand Physikdidaktik

Nach der Durchsichtung von fachdidaktischen Artikeln und Büchern im deutschsprachigen und angloamerikanischen Raum ist festzustellen, dass die Thematik der Lehre der Masse in der speziellen Relativitätstheorie keinen Einzug in die Fachdidaktik gefunden hat. Es lassen sich Unterrichtskonzepte für die Lehre der speziellen Relativitätstheorie in Fachzeitschriften finden. Dabei liegt der Fokus auf den

Postulaten der Relativitätstheorie sowie der Zeitdilatation und Längenkontraktion. Explizite Unterrichtskonzepte für die Masse in der speziellen Relativitätstheorie lassen sich nicht finden. Es sind vereinzelt Unterrichtskonzepte für die spezielle Relativitätstheorie vorhanden, welche die geschwindigkeitsabhängige bzw. relativistische Masse gezielt lehren. Andere Unterrichtskonzepte behalten die relativistische Masse ohne weitere Anmerkungen bei. Ein Unterrichtskonzept konnte gefunden werden, welches die Masse explizit als Invariante erwähnt. Kein Unterrichtskonzept konnte gefunden werden, welches sich mit der Frage „relativistische Massenzunahme oder Masseninvarianz" beschäftigt. Die gefundenen Fachartikel werden auf die Forschungsfrage hin untersucht und zusammengefasst.

In der Physikdidaktik sind Fehlvorstellungen, auch SchülerInnenvorstellungen genannt, von besonderer Bedeutung für die zu erstellenden Unterrichtskonzepte. Die Physiklehrkraft muss sich über mögliche Fehlvorstellungen zu physikalischen Konzepten bewusst sein und diese beim Unterrichten beachten. Deswegen werden in diesem Kapitel SchülerInnenvorstellungen zur Relativitätstheorie zusammengefasst. Da es wenig Forschungsarbeit zu Fehlvorstellungen in der Relativitätstheorie gibt, werden auch Fehlvorstellungen zu artverwandten physikalischen Begriffen analysiert.

3.8.1 Unterrichtskonzepte aus Fachartikeln

Die ausgewählten Fachartikel enthalten Unterrichtskonzepte für unterschiedliche Bildungsniveaus. Bei manchen Unterrichtskonzepten konnte nicht ausfindig gemacht werden für welches Schulniveau diese gedacht sind. Es handelt sich um Unterrichtskonzepte die zumindest auf Collegeniveau sind, welches vergleichbar mit der Sekundarstufe II ist. Unter den Fachartikeln lassen sich Unterrichtskonzepte finden, welche ein höheres Schulniveau bis teilweise Universitätsniveau voraussetzen. Die Unterrichtskonzepte können dennoch herangezogen werden, weil bestimmte Teilaspekte davon für die Sekundarstufe II relevant sein können.

Blue Road Approach to Special Relativity von Elisha Huggins

Darunter der Artikel „Blue Road Approach to Special Relativity" in "The Physics Teacher". Es wird argumentiert, dass es viele Wege zum Lehren der speziellen Relativitätstheorie gibt. Die Vierer-Vektor-Darstellung ist eine große mathematische Herausforderung und kommt daher als fachdidaktisches Konzept zunächst nicht in

Frage. Das vorgestellte Unterrichtskonzept beginnt mit der Bestimmung der Masse durch Stoßprozesse mittels einer bekannten Referenzmasse. Anschließend wird das Prinzip der Impuls- und Energieerhaltung mit dem Rezept der relativistischen Masse verknüpft. Es wird die lineare Impulsgleichung p=mv herangezogen, wobei m die relativistische Masse ist. Der Autor rechtfertig dieses Unterrichtskonzept damit, dass es sich bei der relativistischen Masse um eine experimentell definierte Größe handelt. (Huggins, 2012, p. 465) Es handelt sich hierbei um ein Unterrichtskonzept für das College. Laut Autor sollte das Vierer-Vektor Konzept im zweiten Jahr des Physikkurses eingeführt werden. Im ersten Jahr liegt der Fokus auf dem genannten Beispiel mit der Energie- und Impulserhaltung. (Huggins, 2012, p. 466)

Bei Huggins wird zunächst eine Definition für die Masse bzw. eine Bestimmung der Masse gesucht und in der „Recoil Defintion" gefunden. Anschließend wird die Formel für die relativistische Masse hergeleitet, unter der Annahme der linearen Impulserhaltung.

Teaching Special Relativity without Calculus von Lawrence Ruby

In einem weiteren Artikel, „Teaching Special Relativity without Calculus" in "The Physics Teacher Today", wird die variable Masse als Unterrichtskonzept beibehalten. Zunächst wird die Formel für den relativistischen Dopplereffekt hergeleitet und anschließend die Formel für die relativistische Masse. Dazu wird ein Annihilierungsprozess beobachtet, bei dem ein Elektron und Positron gleicher Masse m im Ruhesystem der Teilchen annihilieren. Bei dem Prozess entstehen zwei entgegengesetzte Gammastrahlen entlang der x-Achse mit der Frequenz f und dem Impuls p=hf/c. Der Annihilierungsprozess wird von einem relativ dazu, mit der Geschwindigkeit v, bewegten Bezugsystem beobachtet. Der Autor bezieht sich auf das erste Postulat von Albert Einstein und analysiert die Impulserhaltung in beiden Bezugsystemen. Die Gesamtimpulse sind vor und nach dem Annihilierungsprozess gleich Null. Der Autor greift auf die lineare Impulsgleichung zurück, welche im relativistischen Bereich nicht gültig ist. Die Impulserhaltung und die Beziehung für die relativistische Dopplerverschiebung führen zu einer Formel für die Masse, welche von der Geschwindigkeit abhängig ist. Der Autor ersetzt die zuvor als konstant angenommene Masse mit der relativistischen Masse und löst den Widerspruch in der zuvor aufgestellten Formel auf. (Ruby, 2009, p. 232)

Ob das Unterrichtskonzept Vorteile mit sich bringt ist eine eigene Frage. Die Problematik besteht darin, dass der Autor die relativistische Masse als angemessen für jede Situation hält, in der sich eine Masse mit der Geschwindigkeit v bewegt. Es werden keinerlei Hinweise darauf gegeben, dass es sich um ein Konzept handelt. Dazu schreibt der Autor: „This relativistic dependence of mass on velocity has now been verified in many physics experiments and is particularly familiar to those who have worked with particle accelerators." (Ruby, 2009, p. 232) Dieses Zitat erweckt den Anschein, dass es sich bei der Masse um eine geschwindigkeitsabhängige Größe handelt.

Für die Energie-Masse Äquivalenz verwendet der Autor die zuvor hergeleitete Formel für die relativistische Masse und erweitert diese mit dem Faktor c^2. Der Autor zeigt, dass bei einer Geschwindigkeit von v=0 sich die Formel auf $E=mc^2$ reduziert, wobei dies der Ruheenergie entspricht.

Bei Ruby wird zuerst der relativistische Dopplereffekt hergeleitet und anschließend der Annihilierungsprozess von zwei Teilchen gleicher Masse beobachtet. Aufgrund dieses Zugangs werden von Anfang an auch Photonen betrachtet, im Gegensatz zu Stoßprozessen mit massebehafteten Teilchen.

Special relativity from the dynamical viewpoint von William M. Nelson

Ein weiterer interessanter Artikel ist „Special relativity from the dynamical viewpoint", welcher einen anderen Zugang zur Masse in der speziellen Relativitätstheorie hat. Der Autor geht davon aus, dass die Konsequenzen der speziellen Relativitätstheorie im Kontext von Feldern und Wellen besser zu verstehen sind. (Nelson, 2015, p. 600) Das Unterrichtskonzept geht davon aus, dass alles aus Wellen und Feldern besteht. Der Autor argumentiert, dass damit die vom Beobachter unabhängige endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Möglichkeit einer Kontraktion nachvollziehbar werden. (Nelson, 2015, p. 601) Eine gespannte Saite dient als Modell, welches das Wellenpaket eines massenlosen Teilchens darstellt. Für das Modell von massiven Teilchen werden an beiden Enden der gespannten Saite Hook´sche Federn angebracht. Die Wellengleichung wird für beide Fälle aufgestellt und die Lösung berechnet. Der Autor kann somit zeigen, dass bei massenbehafteten Teilchen die Geschwindigkeit verringert wird aufgrund des zusätzlichen Terms in der Wellengleichung. Weiter kann man sehen, dass massive Teilchen annähernd ruhig sein können im Gegensatz zu masselosen Teilchen. Massive Wellen können ruhig sein, weil

sie hier unter der Federrückstellkraft oszillieren können. Masselose Teilchen können nicht still sein, weil die einzige Rückstellkraft von den benachbarten Teilen der Saite kommt. (Nelson, 2015, p. 602)

In einem weiteren Teil beschäftigt sich der Autor mit der relativistischen Masse in der Zeitdilatation. Dazu betrachtet der Autor die zuvor aufgestellte Wellengleichung mit einem zusätzlichen Term für ein Potentialfeld. Ein Wellenpaket kann durch ein Potentialfeld beschleunigt werden. Die Beschleunigung des Wellenpakets in eine Richtung erhöht dessen Frequenz und reduziert somit dessen Gruppengeschwindigkeit in senkrechter Richtung. (Nelson, 2015, p. 603)

Der Autor argumentiert, dass die Modelle ähnlich zu den Modellen in der modernen Quantenphysik sind. (Nelson, 2015, p. 602) Das Anliegen des Unterrichtskonzeptes ist es die abstrakten Auffassungen der speziellen Relativitätstheorie mit einfachen physikalischen Erklärungen zu verbinden. Ich konnte keinen Hinweis im Artikel finden für welches Niveau dieses Unterrichtskonzept gedacht ist. Ob dieses Unterrichtskonzept in einer abgewandelten Form für die Oberstufe denkbar ist wird im Diskussionskapitel erläutert.

Teaching Special Relativity to Lay Students von Ira Mark Egdall

Im Artikel "Teaching Special Relativity to Lay Students" in „The Physics Teacher" wird ein Unterrichtskonzept für Lernende auf Collegeniveau vorgestellt, welche keine besonderen Vorkenntnisse in Physik haben. Das Unterrichtskonzept ist in 6 Themen zu je einer Woche gegliedert und verwendet begleitend das Buch „Einstein Relatively Simple", welches vom Autor des Artikels stammt. Der Kurs konzentriert sich auf physikalische Konzepte und weniger auf die zugrundeliegende Mathematik. Es wird bei jeder Kurssitzung eine einfache mathematische Aufgabe gelöst. Das Unterrichtskonzept startet mit dem Konflikt zwischen dem Galiläischen Prinzip und den Maxwellgleichungen, welche unter Galilei Transformation ihre Form ändern. Es wird mit einer Anekdote zu Albert Einstein nacherzählt, wie zunächst die Maxwellgleichungen zu dem Lichtpostulat und die Anwendung der Lorenztransformation zu den Relativitätspostulat führten. Anschließend werden die Zeitdilatation und Längenkontraktion erklärt, gefolgt von der Relativität der Gleichzeitigkeit. Unter dem Punkt „The Wolrd´s Most Famous Equation" wird zunächst auf den Unterschied zwischen Masse und Gewicht eingegangen, und die Masse explizit

als Invariante erwähnt. Anschließend wird die Impulsgleichung nach Newton vorgestellt und der Impulserhaltungssatz eingeführt. Dazu werden Stoßprozesse berechnet und besprochen. (Egdall, 2014, p. 407) Ausgehend davon wird die relativistische Impulsformel eingeführt, welche bei relativistischen Geschwindigkeiten verwendet werden muss. Die relativistische Impulsformel entspricht der linearen Impulsformel multipliziert mit dem Lorentzfaktor. (Egdall, 2014, p. 408) Danach wird das Konzept der Energie besprochen und darauf hingewiesen, dass bei Newton ein Körper in Ruhe keine Energie besitzt. Im Gegensatz dazu besitzt ein Köper in Ruhe in der relativistischen Physik die Energie $E_0=mc^2$, auch Ruheenergie genannt. Jede Eigenschaft die der Masse zukommt, kommt auch als Eigenschaft der Energie zu. Zum Beispiel besitzen Masse und Energie beide Trägheit und Gewicht. Photonen haben laut Art Hobson´s Terminologie eine nichtmaterielle Form von Energie. Laut Einstein ist die Gesamtenergie eines Körpers seine Ruheenergie E_0 und seine kinetische Energie. Dies führt zur relativistischen Formel für die Gesamtenergie, die Ruheenergie multipliziert mit dem Lorentzfaktor. Mit dieser Formel kann gezeigt werden, dass bei Lichtgeschwindigkeit die Gesamtenergie unendlich groß wird. Das ist der Grund dafür warum massenbehaftete Teilchen nicht Lichtgeschwindigkeit erreichen können. (Egdall, 2014, p. 408) Der Kurs wird mit der Einführung der Raumzeit abgeschlossen.

In diesem Unterrichtskonzept wird die Masse ausdrücklich als Invariante gelehrt. Die relativistische Impulsgleichung wird im Anschluss an die Impulsgleichung von Newton gelehrt. Die Energie-Masse-Äquivalenz wird ausgehend von der Formel für die Ruheenergie gelehrt. Die relativistische Gesamtenergie wird als Begründung genannt, warum massive Teilchen keine Lichtgeschwindigkeit erreichen können. Dieses Unterrichtskonzept benötigt das Konzept der relativistischen Masse nicht.

3.8.2 SchülerInnenvorstellungen

Wie bereits erwähnt, gibt es explizit zur relativistischen Masse bzw. der Masse in der speziellen Relativitätstheorie keine Erhebung der SchülerInnenvorstellungen. Aus diesem Grund werden die SchülerInnenvorstellungen zu Konzepten und Begriffen, welche eng mit der relativistischen Masse verknüpft sind, analysiert. Wichtig ist es auf die Fehlvorstellungen einzugehen, welche mit dem Kraftkonzept in der Physik und dem Konzept der Trägheit einhergehen. Die in der Fachliteratur spärlich vorhandenen

Fehlvorstellungen in der Relativitätstheorie werden zusammengefasst und dienen als Basis für ein mögliches Unterrichtskonzept.

Fehlvorstellungen zu artverwandten Konzepten in der Physik

Die Kraft wird von vielen SchülerInnen als universale Wirkungsfähigkeit verstanden. Unterscheidung zwischen Impuls, kinetischer Energie und Kraft finden kaum statt und alles wird unter dem Begriff Kraftwirkung subsumiert. Dabei handelt es sich nicht um bloße begriffliche Schwierigkeiten für SchülerInnen, vielmehr stellt Kraft einen vagen Sammelbegriff dar. (Schecker & et al., 2018, p. 70) Für das Kraftkonzept nach Newton fehlt den SchülerInnen das Verständnis für die zentrale Idee der Wechselwirkung, und für das Impulsverständnis der Vektoraspekt. (Schecker & et al., 2018, p. 70) Das Kraftkonzept kann erst dann verstanden werden, wenn es zu den Konzepten der kinetischen Energie und des Impulses abgegrenzt und in Beziehung gesetzt wird. Das Newtonsche zweite Axiom F=ma wird auf zwei Arten verwendet. Einerseits kann bei Kenntnis aller einwirkenden Kräfte der Bewegungsverlauf vorhergesagt werden. Andererseits kann man aus der gemessenen Beschleunigung die wirkende Gesamtkraft berechnen. (Schecker & et al., 2018, p. 70) Die Schüler und SchülerInnen sind in der Lage mit der Formel F=ma physikalische Größen korrekt zu berechnen, unabhängig davon ob sie den Kraftbegriff in der Physik nachvollziehen können. (Schecker & et al., 2018, p. 71)

Die Trägheit lässt sich nach Ansicht vieler SchülerInnen überwinden. Eine Vielzahl von SchülerInnen versteht nicht, dass es kein absolutes Ruhesystem gibt. Es macht für SchülerInnen einen Unterschied ob sich ein Körper in Ruhe befindet oder gleichförmig bewegt. Für Schüler und Schülerinnen stellt ein Körper in Ruhe einen natürlichen bzw. bevorzugten Zustand dar. (Schecker & et al., 2018, p. 72) Daraus ergeben sich Lernschwierigkeiten beim ersten Newtonschen Axiom, dem sogenannten Trägheitssatz. Die Schüler und Schülerinnen sehen Trägheit als einen Zustand den man überwinden kann bzw. muss. (Schecker & et al., 2018, p. 72) SchülerInnen denken, wenn man einen Körper erstmal in Bewegung versetzt hat, dann sinkt die Trägheit und es wird einfacher diesen zu bewegen. Ursache dafür ist vermutlich die Erfahrung beim Schieben von Gegenständen, bei denen zunächst die Haftreibung überwunden werden muss. (Schecker & et al., 2018, p. 72) Die Trägheit wird auch teilweise von Fachleuten als quantitative Größe und Eigenschaft eines Körpers

gehandhabt. Vermutlich wird dabei die träge Masse, oder auch Masse, und das zweite Newtonsche Axiom gemeint sein. Statt von der Trägheit zu sprechen, sollte man den Begriff „Beharrungsprinzip" verwenden. Das Beharrungsprinzip und die Masse als quantitatives Maß für das Beharren im aktuellen Bewegungszustand erleichtern den Zugang zum physikalischen Verständnis. (Schecker & et al., 2018, p. 72)

Ein bewegter Körper hat laut SchülerInnen Kraft, diese Bewegungskraft nimmt mit der Zeit ab außer sie wird durch eine Antriebskraft aufrechterhalten. Zur Aufrechterhaltung der Bewegung bedarf es einer Kraft in Bewegungsrichtung. Für Schüler und Schülerinnen ist es natürlich, dass Körper langsamer werden. An eine Wechselwirkung mit der Umgebung als Ursache für die Bewegungsabnahme wird nicht gedacht. Hier ist es sinnvoll die Konzepte der kinetischen Energie und der Reibung gegenüber zu stellen. (Schecker & et al., 2018, p. 73)

Hilfreich für das Verständnis des zweiten Newtonschen Axioms sind folgende Formeln:

$$\vec{a} = \frac{\overrightarrow{F_{res}}}{m} \quad (3.18)$$

$$\Delta\vec{v} = \frac{\overrightarrow{F_{res}}.\Delta t}{m} \quad (3.19)$$

Diese Formel 3.19 verdeutlicht, dass die resultierende Kraft über einen bestimmten Zeitraum wirken muss um einen Bewegungszustand zu ändern. (Schecker & et al., 2018, p. 77) Die Formel 3.19 besagt, dass ein Körper, auf dem die resultierende Kraft F_{res} über eine Zeitdauer von Δt wirkt, eine Zusatzgeschwindigkeit Δv erhält.

In der Sekundarstufe I sind Betrachtungen die einen Wechsel von Bezugssystemen verlangen verzichtbar. Der Begriff „Trägheit" ist entbehrlich, es reicht die Einführung der Masse und des Beharrungsprinzips. Eine Unterscheidung zwischen träger und schwerer Masse ist nicht ratsam. (Schecker & et al., 2018, p. 81)

Fehlvorstellungen in der speziellen Relativitätstheorie

Zu den Fehlvorstellungen in der speziellen Relativitätstheorie konnte nicht viel in den Standardwerken zu Physikdidaktik gefunden werden. Der Forschungsstand ist begrenzt, dennoch können gewisse Hinweise auf Fehlvorstellungen in der speziellen Relativitätstheorie gefunden werden. In dem Buch „Schülervorstellungen und Physikunterricht" wird auf eine Dissertation verwiesen, welche den Forschungsstand

in der Physikdidaktik zur speziellen Relativitätstheorie zusammenfasst. In der Dissertation „Gleichzeitigkeit in der Relativitätstheorie – eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe I" von Herbert Wittmann konnten keine Studien gefunden werden, welche sich mit der Forschungsfrage auseinandersetzen. Unter den in der Dissertation aufgezählten und zusammengefassten Studien lassen sich auch Studien mit StudentInnen finden. Es zeigt sich, dass auch mehrheitlich StudentInnen des Physikstudiums für Lehramt Probleme mit den Konzepten der speziellen Relativitätstheorie haben. (Wittmann, 2012, p. 14)

Es kann festgehalten werden, dass es in der speziellen Relativitätstheorie folgende Fehlvorstellungen gibt:

In der Forschungsliteratur finden sich Hinweise, dass der Konzeptwechsel zwischen klassischer Newtonscher Mechanik und der speziellen Relativitätstheorie als solcher von den SchülerInnen gar nicht wahrgenommen wird. Die Konzepte der klassischen Physik sind nicht stark genug verinnerlicht, so dass die spezielle Relativitätstheorie nicht als Wandel des physikalischen Weltbildes verstanden wird. Die Galileitransformation für Geschwindigkeiten stellt für viele Schüler und Schülerinnen eine große Herausforderung dar. Diese Voraussetzungen verhindern bzw. erschweren es den gewünschten kognitiven Konflikt hervorzurufen, welcher in der Physikdidaktik eine Methode darstellt. (Schecker & et al., 2018, p. 239)

Laut Berichten wird die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugsystemen von SchülerInnen erstaunlich leicht akzeptiert. Verständnisschwierigkeiten treten dann auf, wenn die Konsequenzen daraus, wie Längenkontraktion und Zeitdilatation, gezeigt werden. (Schecker & et al., 2018, p. 239)

Der Raum, die Längen und die Zeit werden als absolut angesehen. Für Schüler und Schülerinnen ist es daher schwierig die physikalische Bedeutung von Relativbewegungen zwischen Objekt und Beobachter zu verstehen. (Schecker & et al., 2018, p. 239)

Die Relativität der Gleichzeitigkeit wird von vielen SchülerInnen als verzerrte Wahrnehmung interpretiert, z.B. liegt der Grund dafür in einer unscharfen Messung durch den bewegten Beobachter. (Schecker & et al., 2018, p. 239)

Relativistische Effekte, wie die Zeitdilatation und Längenkontraktion, werden von den SchülerInnen häufig als optische Täuschungen interpretiert. (Schecker & et al., 2018, p. 239)

Es zeigt sich, dass die SchülerInnen beachtliche Schwierigkeiten mit den Konsequenzen aus der Relativitätstheorie haben und ein Konzeptwechsel kaum zu erreichen ist. Wenn die Galileitransformation bereits zu Verständnisproblemen führt, dann ist davon auszugehen, dass dieser Umstand auch die Lorentztransformation betrifft.

4 Unterrichtskonzept

Für das zu erstellende Unterrichtskonzept fließen fachdidaktisches Basiswissen sowie die Erkenntnisse aus den Recherchearbeiten aus dem vorherigen Kapitel mit ein. Das Unterrichtskonzept soll die invariante Masse lehren und auf das Konzept einer relativistischen Masse verzichten. Dazu sind bestimmte Voraussetzungen im Physikunterricht notwendig, welche das Unterrichtskonzept überhaupt erst ermöglichen. Das Unterrichtskonzept bezieht sich auf die Dynamik in der speziellen Relativitätstheorie und setzt die Kinematik voraus. Ausgehend von allgemeinen fachdidaktischen Anforderungen und dem Unterrichtskonzept werden Stundenplanungen erstellt.

4.1 Notwendige Voraussetzungen

Der Ausgangspunkt des Unterrichtskonzepts ist der Impulserhaltungssatz. Dazu muss die Unterscheidung zwischen Kraft, Impuls und kinetischer Energie in der nichtrelativistischen Physik bei den SchülerInnen verinnerlicht sein. Die Formulierung des zweiten Newtonschen Axioms nach der Formel 3.19 kann dabei helfen den physikalischen Kraftbegriff von einer sogenannten universalen Kraftwirkung zu unterscheiden. Von einer Unterscheidung zwischen schwerer und träger Masse ist aus fachdidaktischer Sicht abzuraten. Eine Unterscheidung zwischen schwerer und träger Masse ist historisch bedingt und für das physikalische Verständnis von Masse nicht förderlich. Die Erhaltungssätze für Impuls und Energie sind in der nichtrelativistischen Physik als zentrale Punkte der Physik zu behandeln. Ihre allgemeine Gültigkeit soll im Rahmen der relativistischen Physik geprüft werden. Dazu muss bereits geklärt sein, was Bezugsysteme bzw. Inertialsysteme sind. Besonders wichtig ist, dass die SchülerInnen die Vorstellung eines absoluten Ruhesystems aufgeben. In Studien zeigt sich jedoch, dass die SchülerInnen Raum und Zeit als absolut ansehen. Es scheint mir als besonders schwierig umzusetzen, dass das Relativitätsprinzip von den SchülerInnen verstanden wird. Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, wird das Relativitätsprinzip und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Systemen erstaunlich leicht von den SchülerInnen akzeptiert. Die Konsequenzen daraus, wie die Lorentzkontraktion und Zeitdilatation, werden von den SchülerInnen laut fachdidaktischen Studien als optische Täuschungen oder Messfehler interpretiert. Dieser Umstand wird auch Einfluss auf das

zu erstellende Unterrichtskonzept haben. Wichtig ist, dass die SchülerInnen den Unterschied zwischen Kinematik und Dynamik bereits in der nichtrelativistischen Physik vermittelt bekommen. Die Kinematik und Dynamik in der relativistischen Physik kann somit logisch nachvollzogen werden, und erfordert auf dieser Ebene keinen Konzeptwechsel. Sind kinematische Größen in der speziellen Relativitätstheorie bei den SchülerInnen verinnerlicht, dann stellen dynamische Größen in der speziellen Relativitätstheorie keine kognitive Herausforderung dar, weil die Unterscheidung zwischen Kinematik und Dynamik bereits gelernt wurde. Das heißt, die SchülerInnen sollen kinematische Größen in relativ zueinander bewegten Bezugssystemen, ausgehend von den Prinzipien der Relativitätstheorie, interpretieren können. Das ist die Voraussetzung dafür, dass die relativistische Impulsgleichung sowie die relativistische Energie-Impulsbeziehung verstanden werden kann. Weiter kann dann besprochen werden warum sich Objekte mit zunehmender Geschwindigkeit langsamer beschleunigen lassen. Die Ursache für diesen Effekt kann dann in der Kinematik gefunden werden. Aus den Erhaltungssätzen für die relativistische Impuls- und Energiegleichung folgt, dass die Masse eine Invariante sein muss, welche sich beim Wechsel des Bezugssystems nicht ändert.

Der relativistische Impulserhaltungssatz im praktischen Schulunterricht kann mittels Anknüpfungsstrategie umgesetzt werden. Die SchülerInnen besitzen bereits Erfahrungen aus dem Alltag mit Stoßprozessen. Die SchülerInnen wissen bereits, dass die Masse Einfluss auf die Stoßprozesse hat. Dieses Wissen kann genutzt werden um Stoßprozesse aus unterschiedlichen Bezugssystemen betrachten zu können.

In der Physikdidaktik ist der kognitive Konflikt wünschenswert, weil dieser einen Konzeptwechsel erleichtert. Ein kognitiver Konflikt bei den SchülerInnen kann jedoch nicht einfach erzwungen werden. Ist für die SchülerInnen ihr eigenes physikalisches Konzept ausreichend um physikalische Sachverhalte zu klären, so wird ein Konzeptwechsel erschwert. Wie in Kapitel 3 zusammengefasst, stellt die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Systemen und die Prinzipien der Relativitätstheorie keinen kognitiven Konflikt dar. Die Konsequenzen aus der speziellen Relativitätstheorie würden einen Konzeptwechsel abverlangen, welcher meist von den SchülerInnen und auch von StudentInnen nicht vollzogen wird. Bei der Erstellung des

Unterrichtskonzeptes muss also davon ausgegangen werden, dass der kognitive Konflikt von den SchülerInnen gar nicht wahrgenommen wird.

4.2 Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie

Die spezielle Relativitätstheorie baut auf zwei zentrale Postulate auf: dem Relativitätsprinzip und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Relativitätsprinzip

Alle physikalischen Gesetze haben in jedem Inertialsystem dieselbe Form. Jede Geschwindigkeit eines Objektes bzw. eines Inertialsystems ist eine Relativgeschwindigkeit. Eine Geschwindigkeitsangabe muss in Bezug auf ein Inertialsystem erfolgen. Das heißt, dass es kein ausgezeichnetes Inertialsystem gibt und dass alle Inertialsysteme gleichberechtigt sind. Inertialsysteme sind kräftefrei und bewegen sich gleichförmig geradlinig.

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit c hat in allen Inertialsystemen denselben Wert und ist daher vom Bewegungszustand der Quelle unabhängig.

Diese Postulate lassen sich auch in den Schulbüchern finden. Es sind jedoch weitere Annahmen über Raum und Zeit erforderlich, welche meist nicht explizit erwähnt werden. Folgende Postulate gelten für Raum und Zeit:

Homogenität der Zeit

Homogenität und Isotropie des Raumes

Beide Axiome über Raum und Zeit scheinen so selbstverständlich zu sein, sodass sie nicht weiter erwähnt werden. Solange die Axiome durch empirische Erfahrung nicht falsifiziert werden, solange gelten die daraus gezogenen Konsequenzen. Bei der Konstante c, welche der Lichtgeschwindigkeit entspricht, handelt es sich um eine Raum/Zeit Konstante, welche zwangsläufig aus den Postulaten für Raum und Zeit, und dem Relativitätsprinzip, folgt. Welchen Wert die Raum/Zeit Konstante hat kann man durch Messungen von Geschwindigkeiten aus relativ zueinander bewegten Bezugsystemen bestimmen. Es sei kurz erwähnt, dass die spezielle Relativitätstheorie die Abwesenheit von Gravitationskräften voraussetzt. Bei vorhandener Gravitation kann es keine Inertialsysteme geben, weil diese nicht beschleunigt sein dürfen.

Die Postulate der speziellen Relativitätstheorie geben Aufschluss über Raum und Zeit. Jede physikalische Theorie, egal welchem Teilgebiet der Physik sie angehört, muss das Relativitätsprinzip realisieren. Das Relativitätsprinzip sagt aus, dass die physikalischen Gesetze in allen Inertialsystemen die gleiche Form haben müssen. Daraus folgt nicht automatisch welche Form die physikalischen Gesetze im Einzelnen haben. In der Regel müssen zusätzliche Annahmen gemacht werden, um die physikalischen Gesetze herzuleiten zu können. Für das Unterrichtskonzept muss die zusätzliche Annahme getroffen werden, dass der Impuls und die Energie additive Erhaltungsgrößen im jeweiligen Inertialsystem sind.

Die Postulate sind die Ausgangspunkte für die Transformation kinematischer Größen. Die Raum/Zeit Konstante c folgt logisch aus den Annahmen über Raum und Zeit, sowie dem Relativitätsprinzip. Die Raum/Zeit-Konstante hat zwar die Einheit einer Geschwindigkeit, ist aber ein Skalar und somit keine Geschwindigkeit. Es folgt daraus nicht, dass es ein Teilchen geben muss, welches sich mit der Geschwindigkeit c bewegen kann. Die Raum/Zeit Konstante stellt eine Invariante dar, welche beim Wechsel von einem zu einem anderen Inertialsystem unverändert bleibt. Die Postulate der speziellen Relativitätstheorie können mittels linearer Transformation mathematisch beschrieben werden. Die Lorentztransformation ist eine lineare Transformation, welche den Postulaten der speziellen Relativitätstheorie genügt.

Für das Unterrichtskonzept ist der Umstand wichtig, dass weitere Annahmen gemacht werden müssen um die physikalischen Gesetze herzuleiten, welche dem Relativitätsprinzip entsprechen.

4.3 Lorentztransformation in der Schule

Da in der Fachliteratur darauf hingewiesen wird, dass die Galileitransformation für viele SchülerInnen eine Herausforderung darstellt, wird von der Herleitung der Lorentztransformation abgesehen. Nachdem die Postulate der speziellen Relativitätstheorie eingeführt wurden, kann die Lorentztransformation vorgestellt werden. Diese hilft dabei kinematische Größen zwischen zwei oder mehr Inertialsystemen umzurechnen. Die Lorentztransformation wird als eine Art Dolmetscher vorgestellt, welcher bekannte Größen im jeweiligen Inertialsystem für das andere Inertialsystem übersetzen kann. Wie bei einem Übersetzer hilft die

Lorentztransformation die bekannten Größen x, y, z, t im Inertialsystem I in die gesuchten Größen x´,y´,z´,t´ im Inertialsystem I´ zu übersetzen. Wer an der Lorentztransformation zweifelt, der zweifelt an dem Relativitätsprinzip, der Homogenität von Raum und Zeit, sowie and der Isotropie vom Raum.

Den SchülerInnen ist zu vermitteln, dass die Galileitransformation eine lineare Transformation ist. Die Galileitransformation berücksichtigt jedoch nicht das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Die Lorentztransformation geht für kleine Geschwindigkeiten in die Galileitransformation über.

Lorentztransformation

$$x´ = \gamma(v)\,(x - vt)$$

$$t´ = \gamma(v)\,(t - vx/c^2)$$

$$x = \gamma(v)\,(x´ + vt´)$$

$$t = \gamma(v)\,(t´ + vx´/c^2)$$

$$y´ = y \leftrightarrow y = y´$$

$$z´ = z \leftrightarrow z = z´$$

mit

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

Die gestrichenen Ereigniskoordinaten x´, y´, z´, t´ gehören zum Bezugssystem S´. Die ungestrichenen Ereigniskoordinaten x, y, z, t gehören zum Bezugssystem S. Die Geschwindigkeit v ist die relative Geschwindigkeit mit der sich beide Bezugsystemen S und S´ zueinander bewegen. In diesem Fall bewegen sich die Bezugssysteme entlang der x-Achse mit der Relativgeschwindigkeit v bzw. -v zueinander. Bezugssystem S´ bewegt sich mit +v relativ zu S und S bewegt sich mit -v relativ zu S´. Das Relativitätsprinzip ist erfüllt, weil beide Bezugssysteme gleichberechtigt sind. Man erhält die Formeln für die Ereigniskoordinaten in S und S´, indem man gestrichene und ungestrichene Ereigniskoordinaten vertauscht und v durch -v ersetzt. Die Raumkoordinaten y und z bzw. y´ und z´ transformieren sich nicht, weil die Relativbewegung entlang der x-Achse erfolgt.

4.4 Erhaltungsgrößen

Die SchülerInnen wissen bereits aus dem nichtrelativistischen Physikunterricht, dass die Energie und der Impuls additive Erhaltungsgrößen sind. Weiter wissen die SchülerInnen, dass die Postulate der speziellen Relativitätstheorie Grundlage für alle weiteren physikalischen Gesetze sind. Das heißt, dass der Energie- und Impulserhaltungssatz so formuliert werden muss, dass er mit dem Relativitätsprinzip und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Einklang ist. Die SchülerInnen können an ihre Erfahrungen mit Stoßprozessen, und den bereits erworbenen physikalischen Konzepten zu Impuls und Energie, anknüpfen. Dazu können die SchülerInnen ein Hands-on Experiment mit Münzen durchführen. Werden die unterschiedlichen Münzen miteinander in Wechselwirkung gebracht, also miteinander elastisch gestoßen, dann können die Stoßprozesse dokumentiert werden. Dazu sollen die SchülerInnen eine schwerere und eine leichtere Münze nehmen. Münze A und Münze B sollen die Anfangsgeschwindigkeiten v_A und $v_B$haben, und die Endgeschwindigkeiten $\widetilde{v_A}$ und $\widetilde{v_B}$. Anschließend sollen zwei gleiche Münzen miteinander gestoßen werden und die Geschwindigkeiten dokumentiert werden. Es lässt sich erkennen, dass eine physikalische Größe im Spiel ist, welche in Summe erhalten bleibt. Diese Größe scheint von den Anfangsgeschwindigkeiten und der Masse der beteiligten Münzen abhängig zu sein. Bei dieser physikalischen additiven Erhaltungsgröße handelt es sich um den Impuls. Die SchülerInnen kennen den Impuls und weitere Erhaltungsgrößen bereits aus der nichtrelativistischen Mechanik, und können ihr Vorwissen bestenfalls aktivieren.

In der Physik wird die Annahme gemacht, dass es additive Erhaltungsgrößen gibt. Diese Annahme darf nicht im Widerspruch zu den Prinzipien der Relativitätstheorie stehen. Wenn die Bilanzgleichung für die Erhaltungsgröße in irgendeinem Bezugssystem formuliert werden kann, dann muss sie auch in jedem physikalisch äquivalenten Bezugssystem in gleicher Form aufgestellt werden können. Prägnanter formuliert: "Eine Bilanzgleichung kann nur dann ein allgemeines physikalisches Gesetz sein, wenn sich die Erhaltungsgrößen beim Übergang zwischen äquivalenten Bezugssystemen linear transformieren." (Rupp, 2018, p. 92) Es ist bereits die Lorentztransformation bekannt, welche Ereigniskoordinaten gemäß den Prinzipien der Relativitätstheorie transformiert. Ausgehend von der Annahme, dass der Impuls und

die Energie Erhaltungsgrößen sind, werden die für die Transformation notwendigen Größen postuliert. Dieser Schritt wird für die SchülerInnen schwer nachvollziehbar sein. Wichtig ist der Umstand, dass man ausgehend von den Prinzipien der Relativitätstheorie und der Annahme von Erhaltungsgrößen zu neuen Formeln für Impuls und Energie kommt. Die SchülerInnen können bestenfalls an ihre Erfahrungen mit den nichtrelativistischen Erhaltungsgrößen und ihrer Kenntnis über die Prinzipien der Relativitätstheorie anknüpfen.

Anschließend können die Formel für den relativistischen Impuls p und die Formel für die relativistische Energie E vorgestellt werden.

$$E = m\,c^2\,\gamma(v)$$

$$p = m\,v\,\gamma(v)$$

Diese Formeln ersetzen die altbekannten Formeln für Impuls und Energie aus der nichtrelativistischen Physik. Den SchülerInnen ist zu vermitteln, dass der Newtonsche Grenzfall, bei nichtrelativistischen Geschwindigkeiten, einen Sonderfall der allgemein gültigen relativistischen physikalischen Gesetze darstellt. Man könnte sagen, dass die Newtonsche Physik der Vergangenheit angehört. Die relativistische Physik beinhaltet die Newtonsche Physik und kann darüber hinaus für relativistische Geschwindigkeiten physikalisch korrekte Ergebnisse liefern. Besonders wichtig ist, dass die Energie- und Impulserhaltung im jeweiligen Bezugssystem gelten. Dies kann verdeutlicht werden, indem für das Ruhesystem die Geschwindigkeit v gleich Null in die Impuls- bzw. Energiegleichung eingesetzt wird. Erhaltungsgrößen gelten im jeweiligen Bezugssystem und werden mit Hilfe der Lorentztransformation in ein anderes Bezugssystem umgerechnet.

4.5 Massenbestimmung durch Vergleichsverfahren

Die Masse eines Objektes soll bestimmt werden. Dazu muss zunächst geklärt werden, dass es zwei Voraussetzungen zum Messen einer physikalischen Größe braucht. Es braucht die Festlegung einer Einheit und ein Vergleichsverfahren. Die Einheit ist das Kilogramm, welches durch einen Gegenstand mit der Masse von einem Kilogramm repräsentiert wird. Wir nennen den Gegenstand mit der bekannten Masse von einem Kilogramm Prototyp bzw. Körper A. Den Prototypen kann man mit einem Körper mit

unbekannter Masse, genannt Körper B, in Wechselwirkung bringen. Dazu werden der Prototyp A und der Probekörper B elastisch miteinander gestoßen. Man kann nun den Impulserhaltungssatz oder den Energieerhaltungssatz anwenden um die Masse des Probekörpers B zu bestimmen. Das Messprinzip muss gewährleisten, dass man für jedes äquivalente Galileisystem die gleiche Masse erhält. (Rupp, 2018, p. 97) Dieses Vergleichsverfahren erfüllt die Anforderung, da die Erhaltungssätze auf den Prinzipien der Relativitätstheorie beruhen.

Die SchülerInnen haben bereits Hands-on Versuche zu elastischen Stoßprozessen mit Münzen durchgeführt. Dies kann den SchülerInnen dabei helfen das bereits erworbene Vorwissen mit dem Vergleichsverfahren zur Massenbestimmung zu verknüpfen. Die SchülerInnen kennen die neuen Formeln für den relativistischen Impuls und die relativistische Energie. Es kann die Bilanzgleichung für die Energieerhaltung und die Impulserhaltung für einen elastischen Stoß mit zwei Körpern aufgestellt werden. Da bei dem Hands-on Versuch der Impuls als Erhaltungsgröße betrachtet wird, wird die Bilanzgleichung für den Impuls aufgestellt.

Impulserhaltungssatz bei einem elastischen Stoß von Körper A und B:

$$m_A v_A \gamma(v_A) + m_B v_B \gamma(v_B) = m_A \tilde{v}_A \gamma(\tilde{v}_A) + m_B \tilde{v}_B \gamma(\tilde{v}_B)$$

m_A, m_B… Masse von Köper A, Masse von Körper B

v_A, v_B… Geschwindigkeit von Körper A, Geschwindigkeit von Körper B vor dem Stoß

$\widetilde{v_A}, \widetilde{v_B}$… Geschwindigkeit von Körper A, Geschwindigkeit von Körper B nach dem Stoß

$\gamma(\ )$… Lorentzfaktor

Es wird der einfache Fall betrachtet bei dem die Massen beider Körper gleich groß sind. Das bedeutet, dass die Massen gekürzt werden können. Daraus folgt:

$$v_A \gamma(v_A) + v_B \gamma(v_B) = \tilde{v}_A \gamma(\tilde{v}_A) + \tilde{v}_B \gamma(\tilde{v}_B)$$

Es gibt zwei mögliche Lösungen für diese Gleichung, im ersten Fall liegt folgende Lösung vor:

$$v_A \gamma(v_A) = \tilde{v}_A \gamma(\tilde{v}_A), \qquad v_B \gamma(v_B) = \tilde{v}_B \gamma(\tilde{v}_B)$$

In diesem Fall liegt keine Wechselwirkung vor und daher handelt es sich um keinen Stoßprozess.

Die weitere Lösung lautet:

$$v_A\gamma(v_A) = \tilde{v}_B\gamma(\tilde{v}_B)\,, \qquad v_B\gamma(v_B) = \tilde{v}_A\gamma(\tilde{v}_A)$$

In diesem Fall liegt ein Stoßprozess vor mit zwei Körpern gleicher Masse. Indem die Geschwindigkeiten der beiden Körper A und B vor und nach dem Stoß verglichen werden, kann die Masse eines Probekörpers B bestimmt werden. Die Bestimmung der Masse ist unabhängig vom verwendeten Bezugssystem. Die Massenbestimmung beruht nicht auf dem Zahlenwert der Geschwindigkeiten, sondern auf dem Vergleich der Geschwindigkeiten. (Rupp, 2018, p. 97) Wenn die Geschwindigkeiten gleich groß sind, dann haben beide Körper die gleiche Masse. Das heißt, dass die Masse eine Invariante ist, welche sich beim Wechsel von einem Bezugssystem in ein anders nicht ändert. Die Masse ist daher laut Relativitätstheorie eine Invariante.

4.6 Praktischer Schulunterricht

Für den praktischen Schulunterricht kann auf dem vorgestellten Unterrichtskonzept aufgebaut werden. In Abbildung 7 ist das Unterrichtskonzept in einer Mindmap zusammengefasst, um einen Überblick zu erhalten.

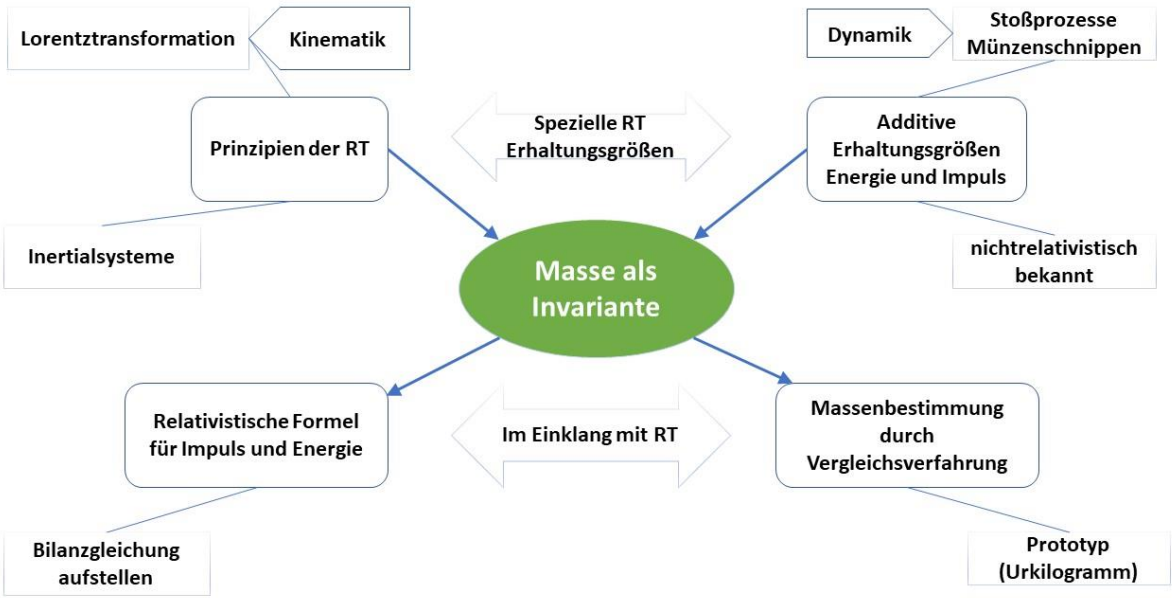


Abbildung 7: Mindmap zum erstellten Unterrichtskonzept

Quelle: eigene Darstellung

Es handelt sich um ein Konzept, welches für den praktischen Schulunterricht eine Richtlinie darstellt und im Detail weiter ausgearbeitet werden muss. Die tatsächliche Umsetzung hängt von den gegebenen Rahmenbedingungen in der jeweiligen Schule ab. Es werden Stundenplanungen auf Basis des erstellten Unterrichtskonzeptes vorgestellt, welche ohne weitere schulische Rahmenbedingungen verwendet werden können. Das Unterrichtskonzept wird auf Basis allgemeiner fachdidaktischer Richtlinien weiter ausgearbeitet. Es werden geeignete Unterrichtsmethoden analysiert und in die Gestaltung der konkreten Stundenplanungen miteinbezogen. Die erstellten Stundenplanungen können für die konkrete Umsetzung im praktischen Schulunterricht herangezogen werden.

4.6.1 Schulische Rahmenbedingungen

Es ist von Vorteil, wenn bereits in der Unterstufe der Fokus auf das erstellte Unterrichtskonzept gelegt wird. Das heißt, dass die Unterscheidung zwischen Kinematik und Dynamik zentral im Physikunterricht hervorgehoben werden soll. Weiter sollen die mechanischen Erhaltungsgrößen als allgemeines Konzept in der Physik gelehrt werden und nicht nur anhand der spezifischen mechanischen Größen. Es wäre ratsam die Newtonschen Axiome mit Hinweis auf die nichtrelativistische Physik zu lehren. Möglicherweise kann somit verhindert werden, dass die SchülerInnen Newtons Physik als physikalisch allgemein gültig verstehen. Aus fachdidaktischen Gründen ist davon abzuraten Inertialsystem in der Unterstufe zu unterrichten. Daher sollten die Inertialsysteme in der Oberstufe eingeführt werden. Dabei ist es besonders wichtig, die Newtonschen Axiome und mechanischen Erhaltungsgrößen innerhalb vom Unterricht der Inertialsysteme zu wiederholen. Da für die SchülerInnen die Galileitransformation laut Fachdidaktik schwer nachzuvollziehen ist, sollte eng mit dem Mathematikunterricht zusammengearbeitet werden. Wenn es möglich ist, dann sollte im Mathematikunterricht die Herleitung der Galileitransformation durchgeführt werden. In naturwissenschaftlichen Schulzweigen könnte eventuell, innerhalb des Mathematikunterrichts, die Lorentztransformation hergeleitet werden. Die Umrechnung von Ereigniskoordinaten zwischen relativ zueinander bewegten Inertialsystemen kann im Mathematikunterricht wiederholt werden. Innerhalb des Mathematikunterrichts wäre es möglich näher auf lineare Transformationen einzugehen. Die genannten Punkte sind Voraussetzung dafür, dass die spezielle

Relativitätstheorie gelehrt werden kann. Nachdem die Lorentzkontraktion und Zeitdilatation besprochen wurden, kann das erstellte Unterrichtskonzept gestartet werden. Dabei wird auf die additiven Erhaltungsgrößen im Rahmen der nichtrelativistischen Physik verwiesen, welche bereits in der Unterstufe gelehrt wurden. Dieses Konzept zeigt eine Möglichkeit auf um die Masse als Invariante zu lehren.

4.6.2 Stundenplanung auf Basis des Unterrichtskonzeptes

Ausgehend vom erstellten Unterrichtskonzept und den Unterrichtsmethoden in der Physikdidaktik werden Stundenplanungen erstellt. Der österreichische Lehrplan für die 8te Klasse Physik dient zur Abschätzung des zeitlichen Rahmens. Der österreichische Lehrplan führt den Punkt „Relativitätstheorie: Konzepte der speziellen Relativitätstheorie, Grundidee der allgemeinen Relativitätstheorie" für die 8te Klasse an. (Österreich, 2020) Der Physiklehrplan für die 8te Klasse ist in zwei Semester aufgeteilt, wobei die Konzepte der speziellen Relativitätstheorie in das erste Semester fallen. Im ersten Semester der 8ten Klasse Physik sind zwei weitere Themengebiete, die Kernphysik und Teilchenphysik, vorgesehen. Das bedeutet bei ein bis zwei Wochenstunden, dass die Zeit für das vorgestellte Unterrichtskonzept deutlich begrenzt ist. Das Unterrichtskonzept kann mittels geeigneter Unterrichtsmethoden gelehrt werden. Es wird eine grobe Schätzung für die benötigte Unterrichtszeit, auf Basis von eigens beobachtetem und durchgeführtem Physikunterricht, vorgenommen. Unter Berücksichtigung der verfügbaren Gesamtunterrichtszeit, werden für dieses Unterrichtskonzept drei Schulstunden zu jeweils 50 Minuten angesetzt. Die vorgesehene Stundenanzahl sowie die ausgewählten Unterrichtsmetoden werden für die Stundenplanung herangezogen.

Unterrichtsmethode

Um eine Stundenplanung ausgehend vom Unterrichtskonzept zu erstellen, muss zunächst die geeignete Unterrichtsmethode gefunden werden. Bei Unterrichtsmethoden handelt es sich um spezielle Formen und Abläufe mit denen Unterricht gestaltet wird. (Wiesner, et al., 2017, p. 88) Zuerst muss geklärt werden, welche Lernschritte die SchülerInnen beim Lernprozess durchlaufen sollen. Anschließend können die Sozialform, Medien und Methodenwerkzeuge bestimmt

werden, welche den Lernprozess begleiten bzw. ermöglichen. Die Physikdidaktik unterscheidet grundsätzlich zwischen diesen folgenden Lernprozessen:

- Wissen vertiefen;
- Konzepte wechseln: Wissen umformen;
- Probleme lösen: Wissen transformieren;
- Wissen durch Eigenerfahrung entwickeln. (Wiesner, et al., 2017, p. 88)

Die Frage ist, mit welchen Lernprozessen kann das vorgestellte Unterrichtskonzept bestmöglich umgesetzt werden. Der Lernprozess „Wissen durch Eigenerfahrung entwickeln" ist generell schwer im Physikunterricht umzusetzen. Grund dafür ist, dass die wenigsten physikalischen Konzepte durch Entdeckung aus unmittelbarer Erfahrung gebildet werden können. (Wiesner, et al., 2017, p. 91) Auch wenn das Unterrichtskonzept von den bereits bekannten mechanischen Erhaltungsgrößen ausgeht, welche teilweise durch Erfahrung entdeckt werden können. Die Konzepte der Relativitätstheorie beruhen nicht auf unmittelbarer Erfahrung. Daher wird auf den Lernprozess „Wissen durch Eigenerfahrung entwickeln" bei der zu entwickelten Unterrichtsmethode verzichtet.

Die Unterrichtsmethode basierend auf „Konzepte wechseln: Wissen umformen" zielt auf einen Konzeptwechsel ab. Ausgehend von einer Schülervorstellung zu einem physikalischen Konzept, können zwei Varianten dieser Unterrichtsmethode umgesetzt werden. Entweder werden die Schülervorstellungen zu Beginn aktiviert, um gezielt einen kognitiven Konflikt von Anfang an zu erzeugen. Oder es wird die vorherrschende Schülervorstellung zunächst umgangen. Bei der zweiten Variante wird zuerst das neue Konzept vorgestellt und, erst nachdem dieses bestätigt und angewendet wurde, ein Vergleich mit den vorherrschenden Vorstellungen der SchülerInnen gemacht. Es ergeben sich bei dieser Unterrichtsmethode Probleme bezüglich des gewünschten Konzeptwechsels. Bei der anfänglichen Aktivierung der Schülerfehlvorstellungen können diese durch die Auseinandersetzung weiter verstärkt werden. Weiter ist es fast nicht möglich bei allen SchülerInnen zur gleichen Zeit einen kognitiven Konflikt herbeizuführen. Die weitere Problematik besteht darin, dass ein Umgehen von Schülervorstellungen nicht immer möglich ist. Manche Schülervorstellungen sind so prägnant, dass eine Aktivierung dieser zwangsweise auftritt, unabhängig davon ob

diese angesprochen werden. Die Wahl der jeweiligen Strategie hängt davon ab, inwieweit die Schülervorstellungen verbreitet und wirksam sind. (Wiesner, et al., 2017, pp. 89-90) Bezüglich der Schülervorstellungen zur Masse in der speziellen Relativitätstheorie gibt es keinerlei Forschungsliteratur. Es ist fraglich, wie viele Schülerinnen außerhalb des Physikunterrichts etwas von der relativistischen Massenzunahme gehört haben. Ausgehend von dieser Sachlage, ist von dieser Unterrichtsmethode abzuraten. Dafür gibt es weitere Gründe, wie dass Fehlvorstellungen bei den SchülerInnen indiziert werden könnten, welche die Vorstellung des physikalischen Konzepts erschweren oder sogar verhindern. Weiter kann das Konzept einer relativistischen Massenzunahme in Schulbüchern vorhanden sein und die SchülerInnen würden dieses nicht als Fehlvorstellung erkennen können. Welcher wissenschaftlichen Quelle können die SchülerInnen in diesem Zusammenhang trauen? Die Lehrkraft müsste vermehrt Zeit investieren um den Sachverhalt zu klären, indem mehrere wissenschaftliche Quellen herangezogen werden. Besonders schwierig ist es die Überlegenheit des physikalischen Konzeptes zu erkennen, weil sowohl die relativistische Massenzunahme wie auch die invariante Masse physikalische Phänomene, welche damit in Verbindung stehen, erklären können. Der Vorteil des physikalisch richtigen Konzepts kann in neuartigen Kontexten nur allmählich untermauert werden bzw. in manchen Kontexten gar nicht. Auch wenn ich von dieser Unterrichtsmethode aus fachdidaktischen Gründen absehe, ist damit zu rechnen, dass die relativistische Massenzunahme als Fehlvorstellung bei einigen SchülerInnen auftreten wird. Auf diesen Umstand kann auch bei anderen Unterrichtsmethoden eingegangen werden. Der Unterschied bei anderen Unterrichtsmethoden besteht darin, dass nicht von einer Schülervorstellung ausgehend der Lernprozess gestaltet wird. Um weitere Fehlvorstellungen zu vermeiden wird der irreführende Begriff „Ruhemasse" nicht verwendet.

Für die zu entwickelnden Stundenplanungen werden die Unterrichtsmethoden „Wissen vertiefen" und „Problem lösen: Wissen transferieren" angewendet. Die Unterrichtsmethode „Wissen vertiefen" eignet sich dazu, das Verständnis von bereits eingeführten physikalischen Konzepten zu vertiefen, indem neue Aspekte daran erarbeitet werden. (Wiesner, et al., 2017, p. 88) Bei dem bereits eingeführten physikalischen Konzept handelt es sich um die mechanischen Erhaltungsgrößen

Energie und Impuls. Die neuen Aspekte stellen die Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie dar. Es ist wichtig das bereits Gelernte zu aktivieren bevor an einem typisch neuen Beispiel der Lerninhalt besprochen wird. In der Fachdidaktik werden Exprimente vorgeschlagen, welche das Vorwissen aktivieren können. (Wiesner, et al., 2017, p. 89) Das Hands-on Experiment „Münzenschnippen" soll den SchülerInnen ermöglichen ihr Vorwissen zum Impuls als Erhaltungsgröße zu aktivieren. Das Ergebnis des Experiments wird anschließend an einem typischen Anwendungsbeispiel besprochen. Dazu wird eine Bilanzgleichung für die nichtrelativistischen Impulse vor und nach dem Stoß aufgestellt. Beim nächsten Lernschritt steht die Verallgemeinerung des physikalischen Konzeptes im Vordergrund und deren Abgrenzung zu anderen Konzepten. (Wiesner, et al., 2017, p. 88) Das heißt im konkreten Fall des vorgestellten Unterrichtskonzepts, dass die Erhaltungsgrößen in der Physik als verallgemeinertes physikalisches Konzept vorgestellt werden. Den SchülerInnen soll in diesem Lernschritt klar werden, dass es sich dabei um ein grundlegendes Konzept in der Physik handelt, unabhängig von der konkreten Erhaltungsgröße. Die Abgrenzung zu anderen Konzepten erfolgt durch den Hinweis auf die jeweiligen Bezugssysteme in dem die Erhaltungsgrößen gelten. Weiter muss der Umstand geklärt werden, dass es sich um ein abgeschlossenes physikalisches System handeln muss. Im letzten Schritt des Lernprozesses bekommen die SchülerInnen die Gelegenheit weitere Anwendungen des Konzeptes in verschiedenen Kontexten kennenzulernen. (Wiesner, et al., 2017, p. 88) Dazu werden die Erhaltungsgrößen, als physikalisches allgemeines Konzept, mit den Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie vernetzt. Für die Stundeplanung bedeutet das, dass die SchülerInnen die bereits bekannten physikalischen Erhaltungsgrößen in Übereinstimmung mit den Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie bringen sollen. Dazu müssen zwei Punkte geklärt sein: was Erhaltungsgrößen sind und wie diese im Einklang mit der speziellen Relativitätstheorie sein können. In dieser Phase werden den SchülerInnen die neuen Formeln für relativistischen Impuls und relativistische Energie vorgestellt. Damit die SchülerInnen den Lerninhalt dauerhaft verinnerlichen können, müssen diese anschließen genügend Zeit zum Üben haben. (Wiesner, et al., 2017, p. 89) In Abbildung 8 ist die Unterrichtsmethode „Wissen vertiefen" mit ihren einzelnen Lernschritten als Flussdiagramm dargestellt, um eine Übersicht zu erhalten.

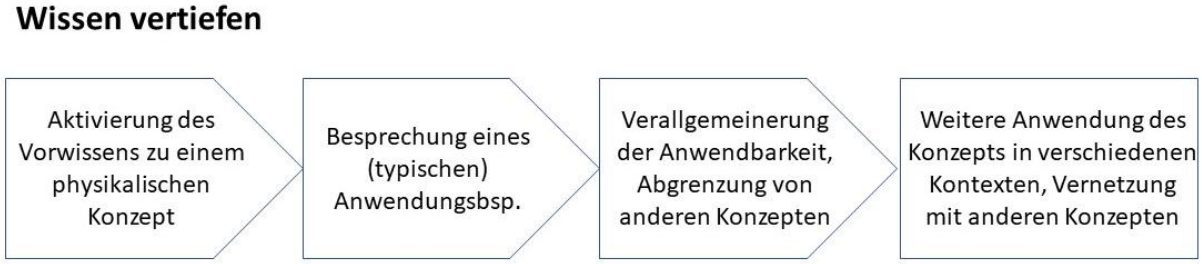


Abbildung 8: Unterrichtsmethode "Wissen vertiefen"
Quelle: (Wiesner, et al., 2017, p. 88)

Mit Hilfe des Konzepts der Massenbestimmung durch Vergleichsverfahren können die SchülerInnen das vernetzte Wissen anwenden. Die SchülerInnen erhalten die Denkaufgabe die Masse eines Körpers mit Hilfe eines Referenzkörpers, mit bekannter Masse, zu bestimmen. Bei dieser Unterrichtsmethode handelt es sich um „Probleme lösen: Wissen transferieren". Das Problem wird in Form einer Fragestellung vorgestellt und kann prinzipiell mit den vorhandenen Wissenselementen gelöst werden. Dazu werden den SchülerInnen zentrale Ideen vorgegeben, von denen ausgehend die SchülerInnen Lösungen konzipieren können. Das bereist erlangte Wissen wurde noch nicht in dieser Form angewendet und muss neu verbunden werden, um die Fragestellung lösen zu können. Gegebenenfalls müssen die bereits erlernten Wissenselemente erweitert werden. (Wiesner, et al., 2017, p. 90) Der Wissenstransfer findet statt, indem bereits erlerntes Wissen auf begrenzt neue Situationen übertragen wird. (Wiesner, et al., 2017, p. 90) Dazu muss zunächst ein Problemverständnis erzeugt werden und Lösungsvorschläge dazu gesammelt werden. (Wiesner, et al., 2017, p. 90) In diesem konkreten Fall handelt es sich um die Massenbestimmung als zu lösendes Problem. Besonders wichtig ist es bei dieser Unterrichtsmethode, dass den SchülerInnen die Problemstellung klar wird. (Wiesner, et al., 2017, p. 91) Die Problemstellung wird durch Angabe der verfügbaren Mittel und Einschränkungen überschaubarer. Die SchülerInnen können sich untereinander und mit der Lehrkraft über die Problemstellung austauschen. Dadurch kann die Problemstellung deutlich werden und ein Verständnis erzeugt werden. Nachdem die Fragestellung präzisiert und analysiert wurde, können Lösungsvorschläge gesammelt werden. Dazu werden den SchülerInnen zentrale Ideen vorgegeben, von denen ausgehend die SchülerInnen Lösungsvorschläge konzipieren können. Die gesammelten Lösungsvorschläge werden von den SchülerInnen notiert und anschließend in der Klasse besprochen. Dies

geschieht im konkreten Fall unter Anleitung der Lehrkraft, indem Pro- und Contra-thesen formuliert werden. Anschließend stellt die Lehrkraft, ausgehend von der Kernidee, einen Lösungsvorschlag vor und zeichnet ein Ideennetz. Der von der Lehrkraft vorgeschlagene Lösungsweg wird laut Unterrichtsmethode angewendet und überprüft. Dazu wird die Bilanzgleichung für die relativistischen Impulse aufgestellt und die möglichen Fallbeispiele besprochen. Am Schluss werden die gefundenen Lösungsvorschläge auf ihre Wirksamkeit hin untersucht und verallgemeinert. (Wiesner, et al., 2017, pp. 90-91) Die Verallgemeinerung des Lösungsvorschlages zeigt, dass es eine physikalische Größe gibt, welche sich beim Wechsel der Bezugsysteme nicht ändert. Im Fall des vorgestellten Unterrichtskonzepts wird der Lösungsvorschlag von der Lehrkraft vorgegeben. Deren Anwendung und Überprüfung erfolgt durch begleitete Aufstellungen von Bilanzgleichungen. Grund dafür ist, dass die Zeit begrenzt ist und die SchülerInnen mit einer fachlichen Bewertung der Lösungsvorschläge überfordert sein würden. Die Bewertung der Lösungsvorschläge wir in diesem Fall von der Lehrkraft als Fachkraft durchgeführt. Das schließt ein Lehrer-Schüler-Gespräch nicht aus, welches Argumente der SchülerInnen miteinfließen lässt. Die Bewertung der gefunden Lösungen dient zur Untermauerung, dass es sich bei der Masse um eine Invariante handelt. Die Verallgemeinerung der gefunden Lösung soll zeigen, dass es sich bei der Masse, unabhängig vom Verfahren, um eine Invariante handelt. Die Unterrichtsmethode „Probleme lösen: Wissen transferieren" ist in Abbildung 9 in einem Flussdiagramm dargestellt, um einen Überblick über die einzelnen Lernschritte zu erhalten.

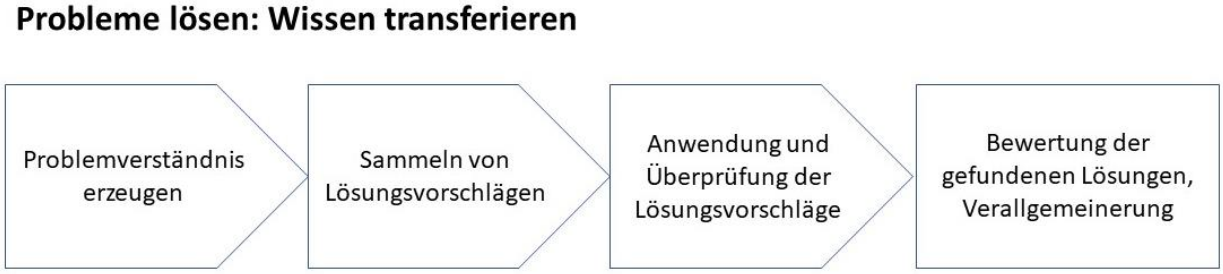


Abbildung 9: Unterrichtsmethode "Probleme lösen: Wissen transferieren"
Quelle: (Wiesner, et al., 2017, p. 90)

Bei den bis jetzt dargelegten Unterrichtsmethoden, handelt es sich um die sogenannte Tiefenstruktur des Physikunterrichts. Erst nachdem die Tiefenstruktur der

Lernprozesse geklärt ist, kann die sogenannte Oberflächenstruktur bestimmt werden. Bei der Oberflächenstruktur handelt es sich zum Beispiel um Sozialformen oder eingesetzte Medien im Unterricht. (Wiesner, et al., 2017, p. 91) Die für die Stundenplanungen verwendeten Sozialformen und Medien werden in den Stundenplanungstabellen vermerkt. Für die weitere Gestaltung des Physikunterrichts braucht es sogenannte Methoden-Werkzeuge. Bei Methoden-Werkzeugen handelt es sich um lehrergesteuerte oder schüleraktive Verfahren, Materialien und Hilfsmittel zur Unterstützung von Lehr- und Lernprozessen. (Wiesner, et al., 2017, p. 93) Die Auswahl der Methoden-Werkzeuge erfolgt durch die Identifikation der Standardsituation. Bei einer Standardsituation handelt es sich um die Spezifika einer Situation im Physikunterricht. Das ist zum Beispiel die Situation des Übens, Ordnens, Strukturieren, Problemfindens oder Präsentierens. (Wiesner, et al., 2017, p. 93) Die Lehrkraft muss die vorliegende Situation analysieren und Methoden-Werkzeuge wählen, welche der Sache und dem Verstehen im fachdidaktischen Sinn dienen. (Wiesner, et al., 2017, p. 93) Methoden-Werkzeuge müssen nicht in jeder Lernsituation eingesetzt werden, der Gebrauch von Methoden-Werkzeugen orientiert sich stark an der jeweiligen Lernsituation. Bei fachdidaktischen Hürden bieten Methoden-Werkzeuge keine generelle Lösung. (Wiesner, et al., 2017, p. 98) Es ist noch offen ob bzw. welche fachdidaktischen Hürden bei dem vorgestellten Unterrichtskonzept vorhanden sind. Weiter ist der Einsatz von Methoden-Werkzeugen im Unterricht sehr zeitintensiv und es ergeben sich Probleme bezüglich fehlerhafter Lösungsvorschläge seitens der SchülerInnen. (Wiesner, et al., 2017, p. 97) Bei der Auswahl der Methoden-Werkzeuge wird auf diese Umstände eingegangen. Bei den komplexen Sachverhalten, wie der Verallgemeinerung der Konzepte und der Anwendung eines Lösungsvorschlages, wird auf Methoden-Werkzeuge verzichtet. Die Standardsituationen für das vorgestellte Unterrichtskonzept werden analysiert und geeignete Methoden-Werkzeuge laut Fachdidaktik ausgewählt. Die Standardsituationen und die dazu passenden Methoden-Werkzeuge werden aus der Fachdidaktikliteratur „Physikdidaktik kompakt" entnommen. Standardsituation und Methoden-Werkzeug werden in den Stundenplanungstabellen vermerkt. Ausgehend von diesen fachdidaktischen Kriterien und Überlegungen zu den einzelnen Lernprozessen, wurden die Stundenplanungen

erstellt. Es handelt sich um theoretische Stundenplanungen, welche im praktischen Schulunterricht noch nicht erprobt wurden.

Stundenplanungen

Tabelle 1: 1. Stundenplanung: Wissen vertiefen

Zeit min	**Lernschritt: Inhalt**	**Standardsituation:** **Methodenwerkzeuge**	**Verwendete Medien:** **Sozialform**
10	Vorwissen aktivieren: Hands-on Experiment „Münzenschnippen" mit zwei gleichen und ungleichen Münzen, Stoßvorgang beobachten und beschreiben	Experimente beschreiben: Filmleiste (zeitliche Abfolge zu fachlichen Vorgängen) von SchülerInnen erstellt	-Euromünzen (Cent und 1 bzw. 2 Euro): Einzelarbeit -Papier und Stifte (Filmleiste): Einzelarbeit -Tafel (Lehrkraft sammelt Ergebnisse): Lehrer-Schüler-Austausch
15	Besprechung eines Anwendungsbeispiels: Bilanzgleichung aufstellen für elastischen Stoßprozess, Impuls vor und nach der Wechselwirkung, Fachbegriffe: additive Erhaltungsgröße, Wechselwirkung, Bilanzgleichung, physikalisches System	Über fachliches reden: Wortliste, Begriffsinventar (Liste wichtiger Fachbegriffe) von Lehrkraft zur Verfügung gestellt	-Tafel (Lehrkraft stellt Bilanzgleichung auf): lehrerzentriert -Wortliste (Verbalisierung des Sachverhalts, SchülerInnen haben nun Fachbegriffe für die Beobachtungen im Experiment, Vermerk der Fachbegriffe in der bereits erstellten Filmleiste): Lehrer-Schüler-Austausch
20	Verallgemeinerung und Abgrenzung des Konzepts: Charakteristika von additiven Erhaltungsgrößen in der Physik (Bsp. für Erhaltungsgrößen: Energie, Impuls und elektrische Ladung) Verallgemeinerung: in der Physik werden Erhaltungsgrößen beobachtet und postuliert. Erhaltungsgrößen als zentrales Konzept unabhängig von der spezifischen physikalischen Größe Abgrenzung: auf ein Bezugsystem bezogen, in einem physikalisch abgeschlossenen System	Über fachliches reden: Thesentopf (Sammlung von Pro- und Contra-Thesen) Pro-These: Nachweise für Drehimpuls, Impuls, Energie, elektrischer Ladung; allgemeines Prinzip in der Physik. Contra-These: es könne nicht immer alle Teilchen eines Systems beobachtet werden. Diskussion mit SchülerInnen	-Tafel (Lehrkraft schreibt Pro- und Contra-Thesen auf): lehrerzentriert -Magnete und A5 Zettel (SchülerInnen schreiben ihre Argumente auf Zettel und heften diese an die Tafel): Einzelarbeit, Kleingruppen -Diskussion: Lehrer-Schüler-Austausch -Zettel und Stifte (SchülerInnen notieren Konzept der Erhaltungsgrößen, Abgrenzung zu anderen Konzepten -Heft und Kleber: Filmleiste und Zettel werden ins Heft geklebt: Einzelarbeit

Tabelle 2: 2. Stundenplanung: Wissen vertiefen und Probleme lösen

Zeit min	**Lernschritt: Inhalt**	**Standardsituation:** **Methodenwerkzeuge**	**Verwendete Medien:** **Sozialform**
10	Vernetzung mit anderen Konzepten: physikalische Erhaltungsgrößen in Übereinstimmung mit Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie	Ordnung hineinbringen: Mind-Map	-Tafel (Mind-Map an Tafel erstellen, siehe Abb. 7): lehrerzentriert -Heft (Mind-Map in Heft übertragen): Einzelarbeit
10	Vernetzung mit anderen Konzepten: relativistische Impuls- und Energiegleichung vorstellen. In Übereinstimmung mit allgemeinen Kriterien einer Erhaltungsgröße und den Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie. Lorentztransformation ist eine lineare Transformation, welche bereits bekannt ist.	Neues erarbeiten: von der Lehrkraft angeleitet	-Tafel (Formeln werden aufgeschrieben): lehrerzentriert -Heft (Übertragen der Formeln): Einzelarbeit
10	Problemverständnis erzeugen: „Wie kann man die Masse von einem Körper ohne Waage bestimmen?" Präzisierung des Körpers (fest, elastisches Stoßverhalten, unbekanntes Material). Problem: keine Waage zur Verfügung oder so kleine Teilchen, dass sie nicht gewogen werden können. Bezugsysteme müssen beachtet werden.	Neues erarbeiten: Think-Pair-Share (zunächst denkt jeder einzelne Schüler über die Fragestellung nach, anschließend tauschen sich die Sitznachbarn aus und dann werden die Gedanken mit der Klasse geteilt	-Tafel (Fragestellung und Ergebnisse der Think-Pair-Share Phase): Einzelarbeit, Partnerarbeit, Kleingruppen
10	Sammeln von Lösungsvorschlägen: Die Kernidee ist, dass ein Körper mit bekannter Masse zur Verfügung steht. Von dieser Kernidee aus werden astartig weiterfließende Ideen und Einfälle notiert.	Auf Ideen kommen: Ideennetz (Ideen als Kern vorgegeben)	-Tafel (Kernidee aufschreiben, SchülerInnen nennen weitere Ideen): Lehrer-Schüler-Austausch -Heft (Kernidee und weitere Ideen ins Heft übertragen): Einzelarbeit bzw. Kleingruppen

Tabelle 3: 3. Stundenplanung: Probleme lösen (Wissen transferieren)

Zeit min	**Lernschritt: Inhalt**	**Standardsituation:** **Methodenwerkzeuge**	**Verwendete Medien:** **Sozialform**
10	Sammeln von Lösungsvorschlägen: Rückblick auf die in der 2ten Stunde gesammelten Vorschläge Lehrkraft stellt Lösungsvorschlag vor: Massenbestimmung durch Vergleichsverfahren. Der Körper mit der bekannten Referenzmasse wird mit dem Probekörper in Wechselwirkung gebracht. Ein elastischer Stoß: die Geschwindigkeiten der Körper können gemessen werden.	Auf Ideen kommen: Ideennetz wird von der Lehrkraft erstellt	-Tafel (Ideennetz anschreiben): lehrerzentriert -Heft (Ideennetz übertragen): Einzelarbeit
15	Anwendung und Überprüfung des Lösungsvorschlages: Aufstellen der Bilanzgleichung mit Hilfe der Formel für den relativistischen Impuls. Kürzen und Vereinfachen. Mögliche Fälle: Gleiche Masse, ungleiche Masse (größer oder kleiner als die der Referenzmasse)	Neues erarbeiten: von der Lehrkraft angeleitet	-Tafel (Bilanzgleichung, Fälle): lehrerzentriert -Heft (Übertragen der Bilanzgleichung, Fälle): Einzelarbeit
15	Bewertung der gefundenen Lösung, Verallgemeinerung: Die Masse eines Körpers ist unabhängig von seiner Geschwindigkeit. Die Messung der Masse beruht auf dem Vergleich der Geschwindigkeiten und nicht auf deren Zahlenwert. Die Masse ist unabhängig vom gewählten Bezugssystem. Verallgemeinerung: es gibt physikalische Größen, welche sich bei einem Wechsel der Bezugsysteme nicht ändern. Diese physikalischen Größen nennt man Invarianten. Die Masse ist ein Invariante.	Neues erarbeiten: von der Lehrkraft angeleitet	-Tafel (Flussdiagramm): lehrerzentriert -Heft (Übertragung Flussdiagramm): Einzelarbeit

10	Bewertung der gefunden Lösung: SchülerInnen bekommen die Möglichkeit die gefundene Lösung zu bewerten und mit ihren eignen entworfenen Lösungsvorschlägen zu vergleichen. Anschließend können sich die SchülerInnen untereinander austauschen.	Über Fachliches reden: Expertenkongress (Besprechung der einzelnen Lösungsverschläge und Vergleich mit dem vorgestellten Lösungsvorschlag der Lehrkraft)	Zettel und Stift (Notizen machen): Gruppenarbeit

Quelle: eigene Darstellung

Erweiterte Stundenplanung

Die Stundenplanungen sind so erstellt, dass das Konzept einer dynamischen Masse oder gar die Fehlvorstellung einer relativistischen Massenzunahme nicht weiter besprochen werden. Sollte es von Seiten der SchülerInnen zu dem Thema „relativistische Masse" kommen, so muss darauf im Schulunterricht eingegangen werden. Wird bereits vor dem Lösungsvorschlag der Lehrkraft das Thema seitens der SchülerInnen angesprochen, so kann die Lehrkraft auf die bevorstehende Unterrichtssequenz verweisen, welche den Sachverhalt klären soll. Nachdem die Verallgemeinerung des Lösungsvorschlages unterrichtet wurde kann auf die Frage der SchülerInnen zur relativistischen Masse eingegangen werden. Es ist möglich, dass die angewandten Unterrichtsmethoden „Wissen vertiefen" und „Probleme lösen" die SchülerInnen nicht vom vorgestellten physikalischen Konzept der invarianten Masse überzeugen. Dann kann auf das Zitat von Albert Einstein verwiesen werden, welches von dem Konzept einer relativistischen Masse abrät. Man kann das Zitat von Albert Einstein als eine Art Jocker betrachten, da es sich bei ihm um die Autorität in der Relativitätstheorie handelt. Das Zitat kann auf eine Karte gedruckt werden und den SchülerInnen zum Schluss der Unterrichtseinheiten ausgeteilt werden. Das Zitat lautet:

„It is no good to introduce the concept of the mass $M = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ of a moving body for which no clear definition can be given. It is better to introduce no other mass than the "rest mass" m. Instead of introducing M it is better to mention the expression for the momentum and energy of a body in motion." Albert Einstein zitiert nach (Okun, 1989, p. 36)

Um den Umstand zu klären warum ein Körper bei höherer Geschwindigkeit schwerer zu beschleunigen ist, kann zunächst auf die relativistische Energieformel verwiesen werden. Sollten die SchülerInnen weiter an dem Konzept der invarianten Masse zweifeln, kann ein weiteres Zitat von Albert Einstein vorgestellt werden. Man könnte dieses weitere Zitat auf die Rückseite der Karte drucken. Das weitere Zitat lautet:

„A moving body has both mass and kinetic energy. It resists charge of velocity more strongly than the resting body. It seems as though the kinetic energy of the moving body increases its resistance. If two bodies have the same rest mass, the one with the greater kinetic energy resists the action of an external force more strongly." Einstein zitiert nach (Adler, 1987, p. 741)

Für die Klärung einzelner physikalischer Sachverhalte, welche mit dem Konzept der relativistischen Masse in Verbindung gebracht werden, müssten weitere Stundenplanungen erarbeitet werden. Die Überlegungen zu weiteren Unterrichtsansätzen kann im Kapitel „Forschungsausblick" geklärt werden.

Inwieweit das vorgestellte Unterrichtskonzept inklusive Unterrichtsmethoden und Stundenplanungen von Vorteil ist, gegenüber anderen Unterrichtskonzepten, ist im Diskussionskapitel zu klären.

5 Diskussionskapitel

Die erhobenen Vorteile und Nachteile der Lehre der relativistischen Massenzunahme bzw. invarianten Masse stellen die Ergebnisse meiner Literaturforschung dar. Das erstellte Unterrichtskonzept inklusive Stundenplanungen sind die Ergebnisse meiner Forschungsfrage. Die Ergebnisse zeigen, dass die invariante Masse innerhalb des praktischen Schulunterrichts gelehrt werden kann. Es handelt sich dabei um theoretisch erhobene Ergebnisse. Meine formulierte These lautet „Eine Lehre der speziellen Relativitätstheorie ohne die relativistische Masse ist im praktischen Schulunterricht möglich und von Vorteil für das physikalische Verständnis." Inwieweit das erstellte Unterrichtskonzept für das physikalische Verständnis von Vorteil ist kann auf Basis der erhobenen Fachliteratur beantwortet werden.

Die Lehre der relativistischen Masse wird in Hinsicht auf ihre fachdidaktische Umsetzbarkeit geprüft. Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Lehre der relativistischen Masse kritisch hinterfragt.

5.1.1 Vorteile und Nachteile des erstellten Unterrichtskonzeptes

Beim erstellten Unterrichtskonzept handelt es sich um ein theoretisches Konzept, welches noch nicht im praktischen Schulunterricht erprobt wurde. Das stellt einen Nachteil des erstellten Unterrichtskonzeptes gegenüber bereits durchgeführten Unterrichtskonzepten dar. Beim erstellten Unterrichtskonzeptes wird innerhalb der newtonschen und relativistischen Physik die invariante Masse gelehrt. Dies ist ein Vorteil gegenüber anderen Unterrichtskonzepten, welche zwei Konzepte der Masse vermitteln müssen. In den analysierten Schulbüchern wird in der newtonschen Physik die invariante Masse unterrichtet und in der relativistischen Physik die dynamische Masse. Die SchülerInnen sind mit zwei Konzepten innerhalb eines physikalischen Konzeptes, das der Masse, konfrontiert. Dieser Widerspruch wird innerhalb der vorgestellten Unterrichtskonzepte nicht aufgelöst. Kognitive Konflikte dürfen aus fachdidaktischen Gründen aber nicht unbesprochen stehen gelassen werden. Das Schulbuch „Big Bang" ist das Einzige, welches den kognitiven Konflikt innerhalb der relativistischen Massenzunahme anspricht. Es bleibt jedoch fragwürdig, ob die Interpretation der relativistischen Massenzunahme als träge Masse den kognitiven Konflikt auflösen kann.

Ein möglicher Nachteil ist, dass die Formel für die relativistische Gesamtenergie nicht mit Hilfe der relativistischen Masse eingeführt werden kann. Das vorgestellte Unterrichtskonzept stellt die relativistische Energieformel vor und kann somit auf das Konzept der relativistischen Masse verzichten. Indem die Geschwindigkeit gleich Null gesetzt wird, kann der Anteil der Ruheenergie gezeigt werden. Der mögliche Nachteil besteht darin, dass die weiteren Unterrichtssequenzen an das vorgestellte Konzept angepasst werden müssen. Aus fachdidaktischer Sicht erschließt sich kein Vorteil daraus, die relativistische Energie mit Hilfe des Konzepts der relativistischen Masse einzuführen. In den untersuchten Schulbüchern wird die relativistische Masse mit der Konstante c^2 multipliziert und als Formel für die relativistische Energie identifiziert. Es ist hier keine fachdidaktische Unterrichtsmethode, wie „Wissen vertiefen" etc., zu erkennen. Es findet keine weitere Erklärung statt wie es zu dieser Formel kommt. Die einzige Erklärung lautet, dass die relativistische Masse multipliziert mit c^2 die Einheit einer Energie besitzt. In der Physik können Einheiten alleine keine Gewissheit darüber geben, ob die aufgestellte Formel richtig ist. Hingegen argumentiert das vorgestellte Unterrichtskonzept mit dem Konzept der physikalischen Erhaltungsgrößen und den Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie.

Mit der Transformation der Ereigniskoordinaten sind alle Grundbausteine gelegt, um in den Schulbüchern vorgestellte Effekte der speziellen Relativitätstheorie deuten zu können. Das Beispiel mit der Rakete, welche nicht auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden kann, kann innerhalb der Kinematik der speziellen Relativitätstheorie geklärt werden. Auch mit Hilfe der relativistischen Energieformel kann gezeigt werden, dass unendlich viel Energie notwendig wäre um eine Rakete mit einer invarianten Masse auf Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Die Messergebnisse der Experimente an Teilchenbeschleunigern können auf gleiche Weise erklärt werden. Das vorgestellte Unterrichtskonzept ist also konsistent mit den beobachtbaren Effekten, welche bei relativistischen Geschwindigkeiten offensichtlich werden. Dies ist ein Vorteil gegenüber anderen Unterrichtskonzepten, welche die physikalischen Phänomene mit dem zusätzlichen Konzept einer relativistischen Massenzunahme beschreiben.

Einerseits stellt das erstellte Unterrichtskonzept eine Reduktion der zu unterrichteten Konzepte dar und anderseits ist es in sich konsistent. Da die Lorentztransformation

bereits gelehrt wurde und das Prinzip von Erhaltungsgrößen bereits in der Unterstufe bekannt ist, sind keine weiteren Konzepte einzuführen. Das vorgestellte Unterrichtskonzept stellt in diesem Sinn keinen Mehraufwand dar. Weiter gibt die Struktur des Unterrichtskonzeptes wieder, wie physikalische Gesetze in Hinblick auf die Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie geprüft werden können. Dies ist Teil des Bildungs- und Lehrauftrags im Unterrichtsfach Physik. Die Formulierung lautet wie folgt: „Verstehen und altersgemäßes Anwenden von typischen Denk- und Arbeitsweisen der Physik." (Österreich, 2020) Weiter wird unter dem Punkt „Sprache und Kommunikation" darauf hingewiesen, dass eine altersadäquate Fachsprache anzuwenden ist sowie ein präziser Sprachgebrauch bei Beobachtung. (Österreich, 2020) Dies geschieht, indem der einheitliche Fachterminus Masse und nicht Ruhemasse, dynamische Masse oder relativistische Masse verwendet wird. Am wichtigsten scheint mir in diesem Zusammenhang der didaktische Grundsatz: „Der Physikunterricht soll zu übergeordneten Begriffen und allgemeinen Einsichten führen, die an Hand weiterer Beispiele auf konkrete Sachverhalte angewendet werden." Das erstellte Unterrichtskonzept führt zur allgemeinen Einsicht, dass physikalische Gesetze im Einklang mit der Relativitätstheorie sein müssen und dass die Masse eine Invariante ist. In diesem Sinn erweist sich das vorgestellte Unterrichtskonzept als vorteilhaft gegenüber anderen Unterrichtskonzepten, welche die dynamische Masse lehren.

Ein möglicher Nachteil könnte sein, dass die SchülerInnen die Newtonsche Physik so stark verinnerlicht haben, dass die relativistischen Formeln für Impuls und Energie auf Widerstand stoßen. Dabei könnte ein Physikunterricht helfen, welcher bereits in der Unterstufe die vorläufige Gültigkeit der Newtonschen Physik thematisiert. Spätestens bei der speziellen Relativitätstheorie ist darauf hinzuweisen, dass Newton nur bei nichtrelativistischen Geschwindigkeiten näherungsweise gilt.

Im Sinne der sprachlichen Konsistenz und Richtigkeit, der Konsistenz physikalischer Konzepte und allgemeiner physikalischer Gültigkeit, ist das vorgestellte Unterrichtskonzept von Vorteil gegenüber anderen Unterrichtskonzepten.

5.1.2 Vorteile und Nachteile aktueller Unterrichtskonzepte

Es werden Unterrichtskonzepte aus den ausgewählten Schulbüchern und Fachartikeln auf ihre Vorteile und Nachteile hin untersucht.

Schulbücher

Die analysierten Schulbücher verwenden alle das Konzept der relativistischen Masse. Bei allen drei Schulbüchern wird die relativistische Masse mit Hilfe eines Gedankenexperiments zu einem Stoßprozess hergeleitet. Dabei müssen die SchülerInnen viele Schritte nachvollziehen, um die Herleitung für die Formel der relativistischen Masse verstehen zu können. Es ist problematisch, dass bei der Herleitung der relativistischen Masse mehrfach Fehler begangen werden. Es wird an der linearen Impulsgleichung festgehalten und der Impulserhaltungssatz angewandt, obwohl zwei unterschiedliche Inertialsysteme betrachtet werden. Diese Vorgangsweise lässt keinen Vorteil erkennen. Die SchülerInnen sollen komplexe Gedankenexperimente nachvollziehen und dabei physikalisch falsche Annahmen treffen. Es handelt sich weder um die vereinfachte Darstellung eines physikalischen Sachverhaltes, noch um die Anwendung einer fachdidaktischen Methode. Dieser Aufwand, in Form eines Gedankenexperimentes, soll die relativistische Masse legitimieren. Es lässt sich nicht erkennen warum dieser Aufwand betrieben wird. Die Lorentztransformationen, Längenkontraktion und Zeitdilatation werden in allen analysierten Schulbüchern vor der relativistischen Masse gelehrt. Lediglich für die Beantwortung der relativistischen Effekte scheint die relativistische Massenzunahme von Vorteil zu sein. Jedoch könnten die Messergebnisse der Teilchenbeschleuniger und die beschleunigte Rakete auch ohne das Konzept der relativistischen Masse erklärt werden. Die notwendigen physikalischen Konzepte, wie die Lorentztransformation, wären bereits vorhanden.

Das Konzept der relativistischen Masse kann ihre Berechtigung haben, wenn es als Konzept mit Einschränkungen gelehrt wird. Werden bei den Newtonschen Bewegungsgleichungen die Massenterme durch die relativistische Masse ersetzt, dann ist auf die Rahmenbedingungen hinzuweisen unter denen dies geschehen darf. Im Fall der analysierten Bücher lässt sich diese Vorgehensweise nicht finden. Die sprachliche Konsistenz ist besonders wichtig, um Missverständnisse zu vermeiden. Alle drei Schulbücher verwenden keine einheitlichen Begriffe. Es werden „relativistische Masse", „relativistische Massenzunahme", „dynamische Masse" oder „Masse" als Synonym füreinander verwendet ohne darauf hinzuweisen. Besonders problematisch ist der Begriff „Masse", der einmal für die sogenannte „Ruhemasse" und einmal für die

„dynamische Masse" verwendet wird. Der Begriff geschwindigkeitsabhängige Masse ist nicht zulässig. Das Schulbuch „Physik compact" besagt, dass der Masse, ähnlich wie Längen und Zeiten, kein absoluter Wert zukommt. (Jaros, et al., 2013, p. 24) Die Formulierung einer geschwindigkeitsabhängigen Masse lässt sich in allen Schulbüchern finden. Das Schulbuch „Big Bang" ist das Einzige, welches die relativistische Masse explizit als effektive Trägheit deutet. Das Konzept der relativistischen Masse kann ein Gefühl für die Impuls- und Energiegröße bei relativistischen Geschwindigkeiten geben. In den analysierten Schulbüchern wird die relativistische Impulsgleichung nicht vorgestellt. Einzig im Schulbuch „Physik compact" lässt sich die relativistische Energie-Impulsbeziehung finden. Die möglichen Vorteile des Konzeptes einer relativistischen Masse werden in den untersuchten Schulbüchern nicht genutzt. Besonders von Nachteil für das physikalische Verständnis sind die Gedankenexperimente, mit deren Hilfe die Formel für die relativistische Masse hergeleitet wird. Weder eine vereinfachte Darstellung eines physikalischen Sachverhaltes, noch sonst ein Vorteil kann in den analysierten Schulbüchern ausgemacht werden. Es wird nicht ersichtlich, worin der Vorteil bestehen soll, ein zusätzliches Konzept einzuführen. Alle drei Schulbücher stellen zunächst die Lorentztransformation vor und anschließend die Längenkontraktion sowie Zeitdilatation. Mit Hilfe der Lorentztransformation sind alle physikalischen Werkzeuge vorhanden um die genannten Effekte beschreiben zu können. Es stellt sich die Frage: „Warum wird das zusätzliche Konzept einer relativistischen Masse anschließend eingeführt?".

Fachartikel

Die Unterrichtskonzepte, welche in fachdidaktischen Artikeln ausfindig gemacht wurden, unterscheiden sich von denen in den Schulbüchern.

Das Unterrichtskonzept „Blue Road Approach to Special Relativity" definiert die relativistische Masse mit Hilfe von Stoßversuchen, der sogenannten „recoil definition". Die Masse stellt in diesem Unterrichtskonzept eine definierte Messgröße dar. Die relativistische Masse wird mit Hilfe der linearen Impulsgleichung und der „recoil definiton" hergeleitet. Es werden die nichtrelativistischen Gleichungen für Impuls und Energie mit dem Konzept der relativistischen Masse verbunden. Das Unterrichtskonzept geht davon aus, dass die Vierer-Vektor-Schreibweise in den höheren Semestern gelehrt wird. Der Vorteil dieses Unterrichtskonzeptes ist, dass die

Bestimmung der Masse thematisiert wird. Die relativistische Masse stellt eine definierte Messgröße dar und kann als solche gelehrt werden. Der Nachtteil ist, dass nicht besprochen wird, dass es sich um ein Konzept mit beschränkter Gültigkeit handelt. Die Verwendung der linearen Impulsgleichung erweckt den Anschein, dass Newton weiterhin gültig ist. Es fehlt der klare Hinweis, dass es sich bei der relativistischen Masse um ein Rezept handelt.

Bei dem Unterrichtskonzept „Teaching Special Relativity without Calculus" von Lawrence Ruby wird zunächst die Formel für den relativistischen Dopplereffekt hergeleitet. Anschließend wird ein Annihilationsprozess von einem Positron und einem Elektron, aus einem relativ dazu bewegten Bezugsystem, beobachtet. Im Ruhesystem der Teilchen und im relativ dazu bewegten Bezugsystem wird der Impulserhaltungssatz angewandt. Der Vorteil besteht darin, dass auch Photonen betrachtet werden. In anderen Unterrichtskonzepten werden Photonen innerhalb der speziellen Relativitätstheorie nicht besprochen. Der Nachteil ist jedoch, dass an der linearen Impulsgleichung festgehalten wird und dadurch ein künstlicher Widerspruch herbeigeführt wird. Der scheinbare Widerspruch wird aufgehoben indem die relativistische Masse eingeführt wird. Auch in diesem Unterrichtskonzept wird die relativistische Masse nicht als Rezept mit bedingter Gültigkeit gelehrt. Dieses Unterrichtskonzept hat eigentlich alle Voraussetzungen um auf das Konzept der relativistischen Masse verzichten zu können. Warum dennoch an der relativistischen Masse festgehalten wird, kann nicht ausfindig gemacht werden. Einen künstlichen kognitiven Konflikt herbeizuführen ist fachdidaktisch sinnlos, wenn er nicht den physikalischen Gegebenheiten entspricht. Es findet auch keine Vereinfachung des physikalischen Sachverhaltes statt, weil ja bereits die relativistische Formel für den Dopplereffekt hergeleitet wurde. Die relativistische Impulsgleichung ist nicht schwieriger nachzuvollziehen als der relativistische Dopplereffekt.

Das Unterrichtskonzept im Fachartikel „Special Relativity from the dynamical viewpoint" von William M. Nelson unterscheidet sich von allen anderen vorgestellten Unterrichtskonzepten. Die Effekte in der speziellen Relativitätstheorie sollen mit Hilfe von mechanischer Analyse grundlegender verstanden werden. Das Unterrichtskonzept ist für die Schule nicht geeignet, da es ein zu hohes Niveau in der Physik voraussetzt. Der Ansatz geht von Wellen und Feldern aus, so wie das in der Quantenmechanik

üblich ist. Indem die Modelle von Wellen und Feldern verwendet werden, können die Längenkontraktion und Zeitdilation neu gedeutet werden. Es kann gezeigt werden warum massenbehaftete Teilchen nicht auf Lichtgeschwindigkeit beschleuniget werden können und warum Photonen nicht in Ruhe sein können. Im Schulunterricht fehlen notwendige Grundlagen, um die Wellengleichungen nachvollziehen zu können. Die Unterscheidung zwischen Gruppengeschwindigkeit und Phasengeschwindigkeit ist den SchülerInnen nicht bekannt bzw. im Lehrplan nicht vorgesehen. Dieses Unterrichtskonzept bringt in seiner ursprünglichen Form keinen Vorteil für die Schule. Die grundlegende Idee des Unterrichtskonzepts könnte jedoch als Basis für ein neues Unterrichtskonzept herangezogen werden. Ein Unterrichtskonzept für die Schule, basierend auf den Modellen von Federn und Wellen, ist zumindest im Rahmen eines phänomenologischen Unterrichts möglich.

Das Unterrichtskonzept "Teaching Special Relativity to Lay Students" von Ira Mark Egdall verwendet als einziges das Konzept der invarianten Masse. Dieses Unterrichtskonzept zeichnet den Entstehungsprozess der Postulate der speziellen Relativitätstheorie nach. Die SchülerInnen werden gleich zu Beginn mit Koordinatentransformationen und deren physikalische Interpretation vertraut gemacht. Dies stellt einen Vorteil gegenüber anderen Unterrichtskonzepten dar, weil der Entstehungsprozess nachvollzogen werden kann. Die SchülerInnen müssen nicht die Maxwellgleichungen unter Galileitransformation analysieren, eine Reduktion auf die wesentlichen physikalischen Widersprüche genügt. Anschließend wird die Masse explizit als invariante Masse vorgestellt. Die Impulsgleichung nach Newton und der Impulserhaltungssatz werden vorgestellt. Im Gegensatz zu anderen Unterrichtskonzepten wird explizit darauf hingewiesen, dass es sich um die lineare Impulsgleichung handelt, welche bei relativistischen Geschwindigkeiten nicht gilt. Danach wird die relativistische Impulsformel gelehrt und der linearen Impulsgleichung gegenübergestellt. Dieses Unterrichtskonzept stellt von Anfang an den begrenzten Gültigkeitsbereich der newtonschen Impuls- und Energieformel klar. Dies ist ein Vorteil gegenüber anderen Unterrichtskonzepten, welche diesen Umstand nicht thematisieren und dadurch künstliche Widersprüche erzeugen. Abschließend wird die relativistische Ruheenergie vorgestellt, welche es in der Newtonschen Physik nicht gibt. Mit Hilfe der Formel für die relativistische Gesamtenergie kann gezeigt werden, dass die Energie

von massiven Teilchen bei Lichtgeschwindigkeit unendlich groß würde. Dieses Unterrichtskonzept benötigt das Konzept der relativistischen Masse nicht und kann relativistische Effekte trotzdem erklären. Die Vorteile sind die Nachvollziehbarkeit des Entstehungsprozesses und der konkrete Hinweis auf die invariante Masse. Die Gegenüberstellung der relativistischen und nichtrelativistischen Formeln für Energie und Impuls erleichtert den Überblick für die SchülerInnen. Der weitere Vorteil dieses Unterrichtskonzeptes ist, dass eine klare Trennung zwischen relativistischer und nichtrelativistischer Physik stattfindet. Dieses Unterrichtskonzept könnte innerhalb des Schulunterrichts umgesetzt werden, da es inhaltlich mit dem Lehrplan konform ist und keine zusätzliche Zeit in Anspruch nimmt.

5.1.3 Kritik an der Lehre der relativistischen Masse

Bei Unterrichtskonzepten muss fast immer eine Elementarisierung der physikalischen Sachverhalte vorgenommen werden. Die Elementarisierung beinhaltet die fachdidaktische Reduktion, die Bestimmung eines zentralen Themenbereichs, die begriffliche und die methodische Elementarisierung. Unter der methodischen Elementarisierung versteht man die Zerlegung in einfache Lernschritte. (Wiesner, et al., 2017, p. 72) Dabei ist eine Elementarisierung nicht nur auf einzelne Begriffe oder Phänomene beschränkt. Die Elementarisierung betrifft übergeordnete physikalische Konzepte. (Wiesner, et al., 2017, p. 72)

Die Frage ist, ob die Lehre der relativistischen Masse eine Elementarisierung darstellt, welche komplizierte und komplexe Sachverhalte vermittelt. Wenn das Konzept der relativistischen Masse einer fachdidaktischen Elementarisierung entspricht, dann hat es in diesem Sinn seine Berechtigung. Dazu muss zunächst geklärt werden, welche Punkte bei der fachdidaktischen Elementarisierung zu beachten sind. Bei der fachdidaktischen Reduktion werden physikalische Sachverhalte vereinfacht. Die Reduktion der Komplexität eines Sachverhaltes wird an die Leistungsfähigkeit der SchülerInnen angepasst. Die Vereinfachung betrifft Vorstellungen, Theorien, Modelle, Prinzipien, Zusammenhänge und Methoden. (Wiesner, et al., 2017, p. 72) Die relativistische Masse als Rezept ist eine fachdidaktische Reduktion, welche die relativistische Physik auf Basis der Newtonschen Physik lehrt. Durch das Ersetzen der Masse durch die relativistische Masse, können die Newtonschen Gleichungen

beibehalten werden. Bei der Lehre der relativistischen Masse in den analysierten Schulbüchern ist keine fachdidaktische Reduktion zu erkennen. Die relativistische Masse wird mit Hilfe von Gedankenexperimenten hergeleitet. Bei der Herleitung müssen viele physikalische Konzepte miteinander kombiniert werden. Zunächst müssen Ereigniskoordinaten transformiert werden, bestimmte Annahmen getroffen werden und Erhaltungssätze angewandt werden. Eine Vereinfachung des physikalischen Sachverhaltes ist nicht zu erkennen. In den Schulbüchern werden vor der relativistischen Masse die Lorentztransformation, Längenkontraktion und Zeitdilatation vorgestellt. Das heißt, dass die SchülerInnen ein ausreichendes Lernniveau besitzen, von dem aus sie starten können. Einerseits ist keine fachdidaktische Reduktion zu erkennen, andererseits ist eine Vereinfachung unter den genannten Voraussetzungen gar nicht notwendig.

Die inhaltliche Elementarisierung betrifft die begründete Auswahl von grundlegenden Aussagen in der Physik. (Wiesner, et al., 2017, p. 73) Dazu müssen die physikalisch fundamentalen Grundideen eines Themas herausgearbeitet werden. (Wiesner, et al., 2017, p. 73) Bei dem Thema „Spezielle Relativitätstheorie" ist die grundlegende Aussage die Relativität von Raum und Zeit. Die relativistische Masse ist keine Idee und schon gar keine fundamentalte Grundidee der speziellen Relativitätstheorie. Das heißt, dass eine Lehre der relativistischen Masse nur mit Hinweis auf diesen Umstand legitim ist. Besonders problematisch sind die Unterrichtskonzepte, welche die relativistische Masse als Konsequenz oder Kernaussage der speziellen Relativitätstheorie deuten. Die relativistische Masse hat im Sinne einer inhaltlichen Elementarisierung keine Berechtigung, da sie diese kontrakariert.

Die begriffliche Elementarisierung ist der Aufbau von modular verwendbaren Wissensbausteinen, d.h. kleiner konsistenter Sinneseinheiten. Diese Wissensbausteine sind die Bausteine für komplexere Inhalte und Anwendungen. (Wiesner, et al., 2017, p. 74) In den analysierten Schulbüchern werden zunächst die Lorentztransformation, Längenkontraktion und Zeitdilatation gelehrt. Dabei handelt es sich um Wissensbausteine, welche zusammengesetzt die Effekte in der speziellen Relativitätstheorie beschreiben können. Ein weiterer Wissensbaustein ist daher nicht notwendig. Wichtig ist, dass die Wissensbausteine konsistent sind. Im Fall der relativistischen Masse wird zusätzlich eine kleine Sinneseinheit eingeführt, welche nicht

konsistent mit den anderen Wissensbausteinen ist. Der Begriff „relativistische Masse" ist kein fachadäquater Begriff in der Physik und somit entbehrlich. Die relativistische Masse als Wissensbaustein hilft nicht bei der Erklärung von komplexeren physikalischen Sachverhalten. Im Sinne der begrifflichen Elementarisierung ist von der Lehre der relativistischen Masse abzusehen.

Die Zerlegung in elementare Lernschritte bedeutet, dass neues Wissen Schritt für Schritt aufgebaut werden muss und mit Vorwissen vernetzt werden muss. (Wiesner, et al., 2017, p. 74) Besonders entscheidend dafür ist die innere Konsistenz der einzelnen Lernschritte. (Wiesner, et al., 2017, p. 74) Bei den analysierten Schulbüchern kann keine innere Konsistenz hinsichtlich relativistischer Masse beobachtet werden. Die Lorentztransformation ist bereits als Lernschritt abgeschlossen. In weiteren Lernschritten werden die Längenkontraktion und Zeitdilation als Ergebnisse der Lorentztransformation herausgearbeitet. Die anschließende Herleitung der relativistischen Masse lässt keine innere Konsistenz erkennen. Es handelt sich bei den Gedankenexperimenten zur relativistischen Masse um keinen elementaren Lernschritt, weil Lernschritte nicht nachvollzogen werden können und Vorwissen nur lückenhaft vernetzt wird. So wird das Vorwissen über Zeitdilatation und Längenkontraktion nicht konsistent eingesetzt. Weiter wird an der linearen Formel für den Impuls festgehalten, ohne auf diesen Umstand zu verweisen. Besonders problematisch ist, dass die Impulserhaltungssätze aus zwei unterschiedlichen Bezugsystemen miteinander verglichen werden ohne Rücksicht auf die Relativgeschwindigkeit. Die Impulse innerhalb eines Bezugsystems bleiben erhalten. Die Impulse nehmen jedoch je nach Bezugssystem unterschiedliche Werte an. Die Gedankenexperimente in den Schulbüchern sind daher in vielerlei Hinsicht inkonsistent und physikalisch falsch. Bei der Lehre der relativistischen Masse handelt es sich um keine methodische Elementarisierung.

Die fachdidaktische Elementarisierung hat bestimmten Kriterien zu folgen. Die Kriterien sind die Fachgerechtheit, Anschlussfähigkeit und Schülergemäßheit. (Wiesner, et al., 2017, pp. 74-75) Im Sinne der Fachgerechtheit dürfen Vereinfachungen nicht grundlegend falsche Vorstellungen nahelegen oder fachliche Fehler enthalten. (Wiesner, et al., 2017, p. 74) Die Lehre der relativistischen Massenzunahme in den Schulbüchern vermittelt die falsche Annahme, dass die Masse

geschwindigkeitsabhängig ist. Bei der Herleitung der relativistischen Masse werden mehrere fachliche Fehler begangen. Die Anschlussfähigkeit besagt, dass das Erlernte ausbaubar und weiterentwickelbar sein soll. Das spätere Umlernen soll vermieden werden. (Wiesner, et al., 2017, p. 75) Das Konzept der relativistischen Masse kann zum Teil ausgebaut werden. In den Schulbüchern wird die relativistische Energie mit Hilfe der relativistischen Masse eingeführt. Die Frequenzverschiebung von Photonen im Schwerefeld wird mit Hilfe des Konzepts der relativistischen Masse erklärt. Jedoch steht die Weiterentwicklung des Konzepts im Widerspruch mit der Fachgerechtheit. Bei Unterrichtskonzepten, welche die relativistische Masse vorläufig einführen, muss umgelernt werden. Wird die relativistische Masse zunächst eingeführt und anschließend als träge Masse interpretiert, dann entsteht ein kognitiver Konflikt und es muss umgelernt werden. Im Sinne der Anschlussfähigkeit kann die Lehre der relativistischen Masse zwar weiterentwickelt werden, jedoch steht sie im Widerspruch zur fachlichen Korrektheit. Bei der Schülergemäßheit ist das Vorwissen, die Fehlvorstellungen und der Entwicklungsstand der SchülerInnen zu berücksichtigen. (Wiesner, et al., 2017, p. 75) Der Entwicklungsstand der SchülerInnen ist in der 8ten Klasse ein fortgeschrittener. Die SchülerInnen besitzen aus dem Physikunterricht der Vorjahre ausreichend Grundwissen und bereits vertieftes Wissen in bestimmten Themenbereichen. Die Lorentztransformation stellt das notwendige Vorwissen dar, um die relativistischen Effekte nachvollziehen zu können. Bei der Lehre der relativistischen Masse wird an dieses Vorwissen nur teilweise und inkonsistent angeschlossen. Das Konzept der relativistischen Masse kann Fehlvorstellungen in der speziellen Relativitätstheorie erzeugen. Die Ursachen für die relativistischen Effekte werden in der Dynamik vermutet, obwohl diese in der Relativität von Raum und Zeit liegen. Die Herleitung der relativistischen Masse in den Schulbüchern erzeugt mehrere Fehlvorstellungen. Es wird die Fehlvorstellung erzeugt, dass die lineare Impulsgleichung weiterhin in er speziellen Relativitätstheorie gültig ist. Eine weitere Fehlvorstellung wird erzeugt indem die Ergebnisse der Teilchenbeschleuniger auf die Massenzunahme zurückgeführt werden. Die relativistische Massenzunahme an sich stellt eine Fehlvorstellung dar.

Ausgehend von diesen Punkten ist aus fachdidaktischer Sicht von der Lehre der relativistischen Masse abzuraten. Weder eine Elementarisierung noch ein anderes

fachdidaktisches Vorgehen ist in der Lehre der relativistischen Masse zu erkennen. Die notwendigen Voraussetzungen, wie in etwa die Lorentztransformation, sind im Schulunterricht vorhanden. Daher stellt die Lehre der relativistischen Masse, in der zulässigen Form eines Rezeptes, keine zeitliche Ersparnis dar. Es kann also auch kein anderer Vorteil ausfindig gemacht werden.

Abgesehen von den fachdidaktischen Gründen sprechen weitere Gründe gegen die Lehre der relativistischen Masse. Die relativistische Masse erweckt den Eindruck, dass Newton in abgeänderter Form weiterhin gültig ist. Die Lehre der relativistischen Masse hat ihren Ursprung nicht in der speziellen Relativitätstheorie bzw. wurde diese niemals von Albert Einstein entwickelt. Durch eine Verkettung von Umständen hat die relativistische Masse Einzug in die Lehre der Relativitätstheorie gefunden. Bevor die spezielle Relativitätstheorie entwickelt wurde, gab es bereits das Konzept einer geschwindigkeitsabhängigen Masse. Die mechanische Herleitung der relativistischen Masse von Richard C. Tolman ist bis heute in verschiedensten Abwandlungen in Fachbüchern zu finden. Es gibt Fachbücher bzw. Unterrichtskonzepte, welche ohne die Lehre der relativistischen Masse auskommen. Das Konzept der relativistischen Masse verhindert im schlimmsten Fall die Möglichkeit die Essenz der speziellen Relativitätstheorie zu begreifen.

6 Forschungsausblick

In der Physikdidaktik sind SchülerInnenvorstellungen, auch Fehlvorstellungen genannt, von besonderer Bedeutung. Es sind nur spärlich SchülerInnenvorstellungen zur speziellen Relativitätstheorie in der Fachliteratur zur Physikdidaktik ausfindig zu machen. Eine großangelegte Erhebung der Fehlvorstellungen in der speziellen Relativitätstheorie sollte angestrebt werden, da dies die Grundlage für weitere fachdidaktische Forschung ist. Im Speziellen ist eine Erhebung der Fehlvorstellungen zur relativistischen Masse wünschenswert. Ausgehend von den erhobenen Fehlvorstellungen kann der fachdidaktische Nutzen der relativistischen Masse als Konzept besser abgeschätzt werden. In dieser Forschungsarbeit konnten nur Unterrichtskonzepte aus den ausgewählten Schulbüchern und Fachartikeln untersucht werden. Eine großangelegte Feldstudie in österreichischen und auch deutschen Schulen kann Einblick in die tatsächlich gelehrten Unterrichtskonzepte geben. Interessant wäre ein Einblick in die Unterrichtskonzepte zur speziellen Relativitätstheorie in weiteren, vor allem westlichen, Ländern. Auf Basis der erhobenen Daten könnten Unterrichtskonzepte für die Relativitätstheorie entwickelt werden, welche das Konzept einer relativistischen Masse nicht benötigen. Eine Überarbeitung der Kapitel zur speziellen Relativitätstheorie in den Schulbüchern ist aus fachdidaktischer Sicht dringend notwendig. Die Universität Wien könnte einen Beitrag liefern indem sie Fachdidaktikseminare zur Relativitätstheorie anbietet und somit angehende Lehrkräfte schult.

Das vorgestellte Unterrichtskonzept beschränkt sich auf die spezielle Relativitätstheorie. Die relativistische Masse wird teilweise auch in der allgemeinen Relativitätstheorie gelehrt. Mit Hilfe der relativistischen Masse wird die Frequenzverschiebung von Photonen im Schwerefeld gedeutet. Das Konzept der relativistischen Masse ist auch in diesem Kontext zu hinterfragen. Besonders problematisch erscheint mir hier der Umstand, dass den Photonen eine Masse zugeschrieben wird. Der Widerspruch, dass Photonen keine Masse besitzen und anschließend eine Masse zugeschrieben bekommen, führt zwangsweise zu einem kognitiven Konflikt.

In Fachzeitschriften zu Physik und Physikdidaktik lassen sich Artikel finden, welche sich mit der Forschungsfrage auseinandersetzen. Es handelt sich dabei um eine überschaubare Zahl von Artikeln, welche größtenteils die Hochschullehre im Fokus haben. Eine Auseinandersetzung mit der Forschungsfrage lässt sich in der aktuellen Fachdidaktik nicht finden. Vielmehr scheinen sich einzelne Personen dieser Thematik anzunehmen. Es scheint als müsse noch viel Forschungsarbeit getätigt werden um der korrekten Umsetzung im praktischen Schulunterricht näher zu kommen.

7 Zusammenfassung

Diese Forschungsarbeit untersucht inwieweit die Lehre der relativistischen Masse, in fachdidaktischer und fachlicher Hinsicht, im Schulunterricht gerechtfertigt ist. Alternativ zur relativistischen Masse kann die invariante Masse gelehrt werden. Dazu werden zunächst vorhandene Konzepte der Masse analysiert und gegenübergestellt. Neben den jeweiligen Konzepten wird kurz auf die experimentelle Bestimmung der Masse eingegangen. Es wird der Entstehungsprozess des Konzepts der relativistischen Masse nachgezeichnet und mit dem Konzept der Masse in der speziellen Relativitätstheorie verglichen. Dazu wird Originalliteratur von Albert Einstein herangezogen. Der Ursprung der relativistischen Masse im heutigen Sinne kann bei Richard C. Tolman ausfindig gemacht werden. Die Betrachtung des historischen Kontextes, in dem die spezielle Relativitätstheorie entstand, gibt Aufschluss über weitere mögliche Einflüsse auf die Lehre der Relativitätstheorie.

Die Vorteile und Nachteile des Konzepts der relativistischen Masse werden auf Basis von Fachliteratur erläutert. Um einen Einblick in vorhandene Unterrichtskonzepte zur Masse in der Relativitätstheorie zu bekommen, werden österreichische Schulbücher und Fachartikel analysiert. Eine Bestandsaufnahme der Fehlvorstellungen zu artverwandten Themen dient als Grundlage für mögliche Unterrichtskonzepte.

Auf Basis fachdidaktischer Richtlinien und dem Skript „Romanos Physikkurs 1" wird ein Unterrichtskonzept erstellt, welches die invariante Masse innerhalb der speziellen Relativitätstheorie lehrt. Abschließend wird das erstellte Unterrichtskonzept mit denen aus den Fachartikeln und Schulbüchern verglichen. Mögliche Vorteile und Nachteile der jeweiligen Unterrichtskonzepte werden erläutert. Das Fazit lautet, dass die Lehre der relativistischen Masse problematisch ist, und die Lehre der invarianten Masse fachdidaktisch und fachlich von Vorteil ist. Aufgrund der spärlich vorhandenen Fachliteratur ist weitere Forschungsarbeit in der Physikdidaktik notwendig.

8 Abstract

The present paper will investigate whether teaching relativistic mass in school can be justified with regard to didactics and subject-specifics. Alternatively, one can teach invariant mass instead. For this, given conceptions of mass will be analysed and contrasted. Alongside these two conceptions, the experimental determination will briefly be presented. The origination process of the conception of relativistic mass will be elaborated and subsequently compared with the conception of mass found in the theory of relativity. For this end, primary literature by Albert Einstein will be consulted. The origin of relativistic mass as it is understood today can be found in Richard C. Tolman. Consulting this historic context within which the theory of special relativity arose will elucidate further possible influences on teaching the theory of relativity.

The advantages and disadvantages of the conception of relativistic mass will be elaborated on the basis of specialised literature. In order to get some insight into current teaching concepts on mass within the theory of relativity, Austrian schoolbooks and journal articles will be analysed. A first stocktaking of misconceptions to related topics will serve as a foundation for possible teachings concepts.

A teaching concept for invariant mass within the theory of special relativity will be created on the basis of didactical guidelines and the script „Romanos Physikkurs 1". Finally, this teaching concept will be compared to those in journal articles and school books. Possible advantages and disadvantages of the individual teaching concepts will be elaborated. In conclusion, the present paper will show that teaching relativistic mass is problematic, and that teaching invariant mass better serves didactical as well as content-directed goals. Given the scarcity of articles in this area, further research for and within the didactics of physics will be needed.

Literaturverzeichnis

Adler, C. G., 1987. Does mass really depend on velocity, dad?. *American Journal of Physics*, August, 55(8), pp. 739-743.

Apolin, M., 2019. *Big Bang Physik 8.* Wien: Österreichische Bundesverlag Schulbuch GmbH oebv.

Dongen, J. v., 2010. On Einstein´s Opponents, and Other Crackpots. *Philosophie of modern Physics*, Volume 41, pp. 78-80.

Egdall, I. M., 2014. Teaching Special Relativity to Lay Students. *The Physics Teacher*, October, Volume 52, pp. 406-409.

Einstein, A., 1905. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, pp. 891-921.

Fließbach, T., 2018. *Die relativistische Masse.* Berlin: Springer Spektrum.

Hecht, E., 2009. Einstein Never Approved of Relativistic Mass. *The Physics Teacher*, September, Volume 47, pp. 336-341.

Hecht, E., 2011. On Defining Mass. *The Physics Teacher*, January, Volume 49, pp. 40-44.

Huggins, E., 2012. Blue Road Approach to Special Relativity. *The Physics Teacher*, November, Volume 50, pp. 464-466.

Jammer, M., 2000. *Concepts of Mass in Contemporary.* Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Jaros, A., Nussbaumer, A. & Nussbaumer, P., 2013. *Physik compact Basiswissen 8.* Wien: Österreichische Bundesverlag Schulbuch GmbH öbv.

Komission, E., 2019. *Richtlinien (EU/2019/1258) der Kommision von 23. Juli 2019 zur Änderung der Richtlinien 80/181/EWG des Rates hinsichtlich der Definition der SI-Basiseinheiten zwecks ihrer Anpassung an den technischen Fortschritt.* s.l., Arbeitsblatt der Europäischen Union.

Nelson, W. M., 2015. Special relativity from the dynamical viewpoint. *American Journal of Physics*, July, 83(7), pp. 600-607.

Nolting, W., 2012. *Grundkurs Theoretische Physik 4: Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik.* 7. Auflage ed. Berlin Heidelberg: Springer.

Okun, L. B., 1989. The Concept of Mass. *Physics Today*, June, pp. 31-36.

Österreich, R. d. R., 2020. *RIS-Lehrpläne-allgemeinbildende höhere Schule.* [Online] Available at: https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568&FassungVom=2018-09-01 [Accessed 22.02.2020 Februar 2020].

Rindler, W., 1990. Putting to Rest Mass Misconceptions. *Physics Today*, May, Issue 42, p. 13.

Ruby, L., 2009. Teaching Special Relativity without Calculus. *The Physics Teacher*, April, Volume 47, pp. 231-232.

Rupp, R. A., 2018. *Romanos Physikkurs.* Universität Wien: Universität Wien.

Schecker, H. & et al., 2018. *Schülervorstellungen und Physikunterricht.* Berlin: Springer Spektrum.

Sexl, R. U. et al., 2007. *Physik 8.* Wien: öbvhpt VerlagsgmbH.

Silagadze, Z., 2014. Relativistic mass and modern physics. *Canadian Journal of Physics*, June, Volume 92, pp. 1643-1651.

Tolman, R. C., 1909. Non-Newtonian Mechanics, The Mass of a Moving Body. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, June, Volume 44, pp. 375-380.

Walker, M., 1989. National Socialism and German Physics. *Journal of Contemporary History*, Jan., Volume 24, pp. 63-89.

Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M., 2017. *Physikdidaktik kompakt.* 3. ed. Seelze: Aulis Verlag in Friedrich Verlag GmbH.

Wikipedia, 2020. *https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Masse.* [Online] Available at: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Masse [Accessed 28 Februar 2020].

wikipedia, 2020. *https://de.wikipedia.org/wiki/Kilogramm.* [Online] Available at: https://de.wikipedia.org/wiki/Kilogramm [Accessed 11 März 2020].

Wittmann, H., 2012. *Gleichzeitigkeit in der Relativitätstheorie - eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe I.* Wien: s.n.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Autocrash 38
Abbildung 2: Gedankenexperiment Autocrash 39
Abbildung 3: beschleunigte Rakete 42
Abbildung 4: Zeitlupencrash 43
Abbildung 5: Massenzunahme 45
Abbildung 6: stoßende Kugeln 48
Abbildung 7: Mindmap zum erstellten Unterrichtskonzept 70
Abbildung 8: Unterrichtsmethode "Wissen vertiefen" 76
Abbildung 9: Unterrichtsmethode "Probleme lösen: Wissen transferieren" 77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: 1. Stundenplanung: Wissen vertiefen 80
Tabelle 2: 2. Stundenplanung: Wissen vertiefen und Probleme lösen 81
Tabelle 3: 3. Stundenplanung: Probleme lösen (Wissen transferieren) 82