

1. Einführung

In dieser Zusammenstellung werden zunächst die Grundlagen der Speziellen Relativitätstheorie dargestellt und anschließend die daraus abzuleitenden Konsequenzen sowie deren Grenzen diskutiert. Dabei ist ein wichtiger Beitrag zum Verständnis der Zusammenhänge die Betrachtung der historischen Entwicklung der hierfür erforderlichen Grundlagen. Hierzu werden drei Teilgebiete der Physik ausgewählt (klassische Mechanik, Licht und seine Ausbreitung, Elektromagnetismus) und damit verbunden bedeutende Persönlichkeiten vorgestellt, die jeweils einen wesentlichen Anteil am Erkenntnisgewinn hatten. Die Auswahl aus einer Vielzahl von Forschern ist naturgemäß subjektiv und möglicherweise ungleich, muss aber aus offensichtlichen Gründen wegen der nahezu unüberschaubaren Anzahl stark eingegrenzt werden.

1.1 Allgemeine historische Voraussetzungen

Nach der Auflösung des römischen Reiches in der Folge der Völkerwanderung war in Europa ein genereller Verlust des überkommenen Wissens aus griechisch/römischem Ursprung festzustellen. Viele Schriften sind nur deshalb erhalten, weil sie von der arabischen Wissenschaft, die generell ein viel höheres Niveau erreichte, übersetzt und kommentiert worden waren. Die Situation in Europa änderte sich erst, als zum Ende des ersten Jahrtausends eine Warmzeit begann, die große Umwälzungen zur Folge hatte. Bis zum Jahr 1300 verdreifachte sich die Bevölkerung, Land wurde in großem Umfang urbar gemacht und es wurden viele neue Städte gegründet.

Für den Aufbruch in die Neuzeit und der damit verbundenen Explosion des Wissens werden verschiedene Faktoren verantwortlich gemacht (zu diesem Thema sei das Buch „Der Morgen der Welt“ [1] von Bernd Roeck empfohlen). Zunächst bildete sich in den Städten durch die ausreichende Versorgung mit Nahrungsmitteln eine Gruppe heraus, die man heute als Mittelschicht bezeichnen würde und die aus Kaufleuten und Handwerkern bestand. Von Roeck wird ihre Struktur als „horizontal“ beschrieben, da sie keiner aristokratischen Obrigkeit unterworfen war und sich somit frei entwickeln konnte. Außerdem wurden im 12. Jahrhundert (beginnend mit Bologna, Paris und Oxford) erste Universitäten gegründet und es entstand mit dem Beruf des Hochschullehrers der Stand des Intellektuellen. Die hierzu ernannten Männer (Frauen war dieser Beruf und auch das Studium verschlossen) erfüllten zwar in den meisten Fällen sicher nicht unsere heutigen Erwartungen von der

1. Einführung

Qualität eines Professors, es wurden jedoch allgemein die aus griechisch/römischer Tradition stammenden Verfahren der Diskussion und Anwendung der Logik genutzt.

Generell ist festzuhalten, dass in Europa seit der Gründung der ersten Universitäten die Wissenschaft und deren Vermittlung bis ins 17. Jahrhundert recht einheitlich gegliedert war. Ein Studium vermittelte, nach antikem Vorbild, die 7 freien Künste mit dem sprachlichen Trivium (Grammatik, Rhetorik, Dialektik; Abschluss: Bakkalaureus) und dem mathematisch geprägten Quadrivium (Arithmetik, Geometrie, Musik und Astronomie [einschl. Astrologie]; Abschluss: Magister). Anschließend konnte an den drei höheren Fakultäten (der theologischen, juristischen und medizinischen) ein Doktorat erworben werden. Die Sprache war durchgehend Latein, was im vorhandenen territorial und sprachlich zersplitterten Umfeld ein erheblicher Vorteil war. Das Wissen wurde im Wesentlichen durch ein Studium der Bibel und von Schriften der griechischen Philosophen vermittelt; experimentelles Arbeiten wie wir es heute kennen war grundsätzlich nicht üblich.

Neben den bereits dargestellten Themen waren zum Ende des 13. Jahrhunderts weitere günstige Voraussetzungen vorhanden. Es waren nämlich wichtige Erfindungen gemacht worden, die das weitere Geschehen maßgeblich beeinflussten. Bei deren wichtigsten handelte es sich dabei um so unterschiedliche Dinge wie die Herstellung von Papier und Schwarzpulver (beides aus Asien importiert) sowie um die Erfindung der mechanischen Uhr und der Brille (und hiermit verbunden das Wissen Linsen herzustellen). Während der nach 1300 einsetzenden und länger als 500 Jahre dauernden kleinen Eiszeit, die Hunger und Not brachte, konnten sich über die Jahrhunderte hieraus Fertigkeiten entwickeln, die die Wissenschaft maßgeblich beeinflusst haben.

Papier hatte klare Vorteile vor dem bisher verwendeten, aus Tierhäuten hergestellten Pergament und war zu deutlich geringeren Kosten, in besserer Qualität und in größerer Menge herstellbar. Zusammen mit dem von Gutenberg erfundenen Buchdruck und mit entstehenden Postdiensten ermöglichte es einen nie gekannten Informationsaustausch. Die Nutzung von Schwarzpulver hatte dagegen eine beträchtliche Auswirkung auf Metallurgie und Metallbearbeitung, die für die Herstellung von Gewehren und Kanonen erforderlich waren und es entstanden die Anfänge einer Schwerindustrie.

Es wird vielfach behauptet, dass mit Buchdruck und Schwarzpulver die wichtigsten Faktoren zur Erklärung der Entwicklung zu sehen sind. Die Entfaltung der Wissenschaft ist jedoch ebenfalls untrennbar verbunden mit einer immer weiter verbesserten Feinmechanik die u. a. zur Herstellung von Uhren genutzt wurde, ohne die Messungen physikalischer Größen im Allgemeinen nicht durchführbar sind. Dieser langfristigen Entwicklung steht mit der Herstellung und Bearbeitung von Linsen eine Entwicklung gegenüber, deren Wirkung sich mit der Erfindung von Teleskop und Mikroskop in Wissenschaftskreisen mit den nun vorhandenen Mitteln nahezu schlagartig über ganz Europa verbreitete. Des Weiteren kam es durch die beginnende Einführung von Schutzrechten (Copyright, Patente) zu einem Anschlag von wichtigen Entwicklungen.

Etwa ab dem Jahre 1600 begann sich langsam die Überzeugung durchzusetzen, dass Erkenntnisse nicht nur durch das Studium alter Schriften, sondern auch durch neue Überlegungen und Experimente gewonnen werden können. Von Francis Bacon (1561-1626) wurde hierfür eine empirische Vorgehensweise vorgeschlagen. Er glaubte daran, dass das menschliche Wissen kumulativ sei (von ihm stammt auch der Ausdruck: „Wissen ist

Macht“). Durch René Descartes (1596-1650) wurden dann mathematische Methoden als wichtiges Mittel wissenschaftlicher Wahrheitsfindung beschrieben. Er benutzte als Erster Gleichungen, die ungefähr der Form entsprechen, wie wir sie heute kennen. Er verwendete dafür jedoch ein Zeichen ähnlich „æ“ (entsprechend dem lat. „aequalis“), das Gleichheitszeichen „=“ wurde erstmals vom walisischen Mathematiker Robert Recorde (1510-1558) benutzt, verbreitete sich ab etwa 1700 in größerem Umfang und wurde schließlich zum Standard bei der Abfassung naturwissenschaftlicher Schriften. Zusammen mit der „Erfindung“ der Null, die ab dem Ende des 13. Jahrhunderts langsam Eingang in die Mathematik fand, sind diese zwar keine notwendigen Voraussetzungen aber wichtige Beschleuniger wissenschaftlichen Arbeitens.

Vom Soziologen Robert K. Merton (1910-2003) stammen weitere bemerkenswerte Aussagen zu den Entwicklungen dieser Zeit [2]. Zunächst wurde von ihm die These aufgestellt, der zufolge Veränderungen in den Naturwissenschaften durch eine Anhäufung von Beobachtungen sowie von verbesserten experimentellen Techniken und methodischen Ansätzen verursacht wurden; dieser Ansatz korrespondiert zu den Thesen von Roeck [1]. Des Weiteren wird von ihm argumentiert, dass die naturwissenschaftliche Revolution im 17. und 18. Jahrhundert im Wesentlichen vom Protestantismus, insbesondere von englischen Puritanern und deutschen Pietisten getragen wurde. Dies änderte sich erst mit der französischen Revolution und der europaweiten Enteignung und Entmachtung der Kirche durch Napoleon. Diese These ist zwar nicht unumstritten denn sie wird anderen bedeutenden Naturforschern nicht gerecht. Es ist aber bezeichnend, dass der damals bedeutende Elsevier-Verlag die von der katholischen Kirche gebannten Schriften von Descartes und Galilei (nach 1633) nur deswegen drucken konnte, weil dieser im protestantischen Leiden angesiedelt war und damit nicht im direkten Einflussbereich der katholischen Kirche lag.

1.2 Klassische Mechanik

Einer der wichtigsten Begründer der modernen Wissenschaft ist Galileo Galilei (1564-1642). Er verbesserte ab 1609 die Technik des im Jahr zuvor durch den Brillenmacher Hans Lipperhey (1570-1619) erfundenen Teleskops durch Herstellung eigener Linsen sowie mittels konstruktiver Veränderungen. Außerdem beobachtete er damit als erster systematisch den Himmel und entdeckte dabei bereits 1610 unter anderem die Monde des Jupiters, die zuvor mit bloßem Auge nicht erkennbar waren. Es beeinflusste erheblich das damalige Weltbild, dass nun neben der Erde auch ein anderer Planet Monde hatte. Er entdeckte weiterhin, dass die Milchstraße eine Anhäufung vieler weit entfernter Sterne ist und kein schimmerndes Band, dass die Planeten im Gegensatz zu den Fixsternen scheibenförmig waren, und er berechnete anhand der Schlagschatten auf dem Mond die Höhe von Bergen und gab diese mit 8000m an [3]. Außerdem wurden von ihm Experimente zum freien Fall von Körpern durchgeführt. Dass diese wie manchmal behauptet am schiefen Turm von Pisa durchgeführt wurden ist aber wohl nur Legende; es handelte sich vermutlich um Rollversuche.

Es sei noch erwähnt, dass es Lipperhey nicht gelang, sich seine Erfindung schützen zu lassen, weil bereits in den Folgemonaten andere Entwickler ihrerseits Ansprüche anmeldeten. Dies führte zu einem langen, aus seiner Sicht vergeblichen Patentstreit. Offensichtlich

1. Einführung

war die Zeit reif für das Teleskop und auch das kurz zuvor entwickelte Mikroskop und sie setzten sich sofort und umfassend durch.

Die für die im Folgenden betrachtete Zusammenstellung wichtigste Erkenntnis Galileis bezieht sich jedoch auf die erstmalige Formulierung des Relativitätsprinzips. Da dies nur im Zusammenhang mit der Konzeption seines Buches

Dialogo di Galileo Galilei sopra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano (Dialog von Galileo Galilei über die zwei wichtigsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische), erschienen 1632.

zu verstehen ist, soll hier kurz auf den „Fall Galileo Galilei“ eingegangen werden. Das Buch ist nicht auf Latein, sondern italienisch geschrieben und sollte weite gebildete Kreise erreichen. Es ist nicht aufgebaut wie eine übliche wissenschaftliche Publikation aus der damaligen Zeit, sondern als ein Gespräch zwischen drei Personen.

Dabei handelt es sich um Salviati, Salgreto und Simplicio. Während Salviati und Salgreto die Namen von lang zuvor verstorbenen Freunden Galileis sind [4a] und in der Darstellung des Buches über großes Wissen verfügen übernimmt Simplicio die Rolle des Einfältigen. Es ist zu erkennen, dass Salvati, teilweise aber auch Simplicio die Person Galileos darstellen sollen während Salgreto ein gebildeter Laie ist [4b]. Von Salvati wird auch das bereits erwähnte Relativitätsprinzip erläutert. In Abb. 1.1 ist in deutscher Übersetzung aus dem Jahr 1891 die entsprechende Passage zitiert; der Text ist beste Prosa und sicher auch ohne Verwendung einer Formel verständlich.

Die wissenschaftlichen Aussagen dieses Buches sind heute weitgehend überholt, jedoch ist die Lektüre der Einführung des Übersetzers Erich Strauss empfehlenswert, da sie einen spannenden und umfassenden Einblick in das Denken und den Erkenntnisstand der damaligen Zeit gibt. Neben diesem neueren Buch gab es auch zeitgenössische Übersetzungen z. B. 1661 von Thomas Salusbury in die englische Sprache [5].

Das Format des Dialogs wurde deswegen gewählt, weil die handelnden Personen frei waren und somit auch mit der herrschenden Lehrmeinung nicht übereinstimmende Positionen vertreten konnten. Obwohl die Schriften von Kopernikus über das heliozentrische Weltsystem verboten worden waren, durften seine mathematischen Berechnungen zur Planetenbewegung, die im Vergleich zu den vorher existierenden viel genauer und einfacher waren, benutzt werden, wenn man dabei betonte, dass es sich hierbei nur um eine Hypothese handeln würde und in Wirklichkeit das ptolemäische Weltbild mit der Erde als Mittelpunkt galt [4]. Diesem glaubte Galilei in ausreichender Weise nachzukommen, wenn er das Abschlusskapitel des Dialogs mit der „richtigen“ ptolemäischen Darstellung dem Simplicio übertrug. Dies ging aber gründlich daneben.

Obwohl dem Buch zuvor von der Inquisition das Imprimatur, d. h. die Druckerlaubnis erteilt worden war wurde Galilei angeklagt. Hauptgrund dürfte die Feindschaft mit den Jesuiten gewesen sein; diese war entstanden, weil Galilei sich in erbittertem Streit mit einem Mitglied dieses Ordens, Christoph Schreiner (1573-1650) bezüglich der erstmaligen Entdeckung der Sonnenflecken befand. Nachdem Papst Urban VIII ihm seine Gunst entzogen hatte (angeblich, weil seine Eitelkeit durch Äußerungen Galileis verletzt worden war) kam es zum Prozess. Galilei musste Widerruf und wurde zu lebenslanger Kerkerhaft verurteilt.

Schließt Euch in Gesellschaft eines Freundes in einen möglichst großen Raum unter dem Deck eines großen Schiffes ein. Verschafft Euch dort Mücken, Schmetterlinge und ähnliches fliegendes Getier; sorgt auch für ein Gefäß mit Wasser und kleinen Fischen darin; hängt ferner oben einen kleinen Eimer auf, welcher tropfenweise Wasser in ein zweites enghalsiges darunter gestelltes Gefäß träufeln läßt. Beobachtet nun sorgfältig, solange das Schiff stille steht, wie die fliegenden Tierchen mit der nämlichen Geschwindigkeit nach allen Seiten des Zimmers fliegen. Man wird sehen, wie die Fische ohne irgend welchen Unterschied nach allen Richtungen schwimmen; die fallenden Tropfen werden alle in das untergestellte Gefäß fließen. Wenn Ihr Euerem Gefährten einen Gegenstand zuwerft, so braucht Ihr nicht kräftiger nach der einen als nach der anderen Richtung zu werfen, vorausgesetzt, daß es sich um gleiche Entfernungen handelt. Wenn Ihr, wie man sagt, mit gleichen Füßen einen Sprung macht, werdet Ihr nach jeder Richtung hin gleichweit gelangen. Achtet darauf, Euch aller dieser Dinge sorgfältig zu vergewissern, wiewohl kein Zweifel obwaltet, daß bei ruhendem Schiffe alles sich so verhält. Nun laßt das Schiff mit jeder beliebigen Geschwindigkeit sich bewegen: Ihr werdet — wenn nur die Bewegung gleichförmig ist und nicht hier- und dorthin schwankend — bei allen genannten Erscheinungen nicht die geringste Veränderung eintreten sehen. Aus keiner derselben werdet Ihr entnehmen können, ob das Schiff fährt oder stille steht. Beim Springen werdet Ihr auf den Dielen die nämlichen Strecken zurücklegen wie vorher, und wiewohl das Schiff aufs schnellste sich bewegt, könnt Ihr keine größeren Sprünge nach dem Hinterteile als nach dem Vorderteile zu machen: und doch gleitet der unter Euch befindliche Boden während der Zeit, wo Ihr Euch in der Luft befindet, in entgegengesetzter Richtung zu Euerem Sprunge vorwärts. Wenn Ihr Euerem Gefährten einen Gegenstand zuwerft, so braucht Ihr nicht mit größerer Kraft zu werfen, damit er ankomme, ob nun der Freund sich, im Vorderteile und Ihr Euch im Hinterteile befindet oder ob Ihr umgekehrt steht. Die Tropfen werden wie zuvor in das untere Gefäß fallen, kein einziger wird nach dem Hinterteile zu fallen, obgleich das Schiff,

während der Tropfen in der Luft ist, viele Spannen zurücklegt. Die Fische im Wasser werden sich nicht mehr anstrengen müssen, um nach dem vorangehenden Teile des Gefäßes zu schwimmen als nach dem hinterher folgenden; sie werden sich vielmehr mit gleicher Leichtigkeit nach dem Futter begeben, auf welchen Punkt des Gefäßrandes man es auch legen mag. Endlich werden auch die Mücken und Schmetterlinge ihren Flug ganz ohne Unterschied nach allen Richtungen fortsetzen. Niemals wird es vorkommen, daß sie gegen die dem Hinterteil zugekehrte Wand gedrängt werden, gewissermaßen müde von der Anstrengung dem schnellfahrenden Schiffe nachfolgen zu müssen, und doch sind sie während ihres langen Aufenthaltes in der Luft von ihm getrennt. Verbrennt man ein Korn Weihrauch, so wird sich ein wenig Rauch bilden, man wird ihn in die Höhe steigen, wie eine kleine Wolke dort schweben und unterschiedslos sich nicht mehr nach der einen als nach der anderen Seite hin bewegen sehen. Die Ursache dieser Übereinstimmung aller Erscheinungen liegt darin, daß die Bewegung des Schiffes allen darin enthaltenen Dingen, auch der Luft, gemeinsam zukommt. Darum sagte ich auch, man solle sich unter Deck begeben; denn oben in der freien Luft, die den Lauf des Schiffes nicht begleitet, würden sich mehr oder weniger deutliche Unterschiede bei einigen der genannten Erscheinungen zeigen. So würde unzweifelhaft der Rauch ebensoweit zurückbleiben wie die Luft selbst. Desgleichen würden die Mücken und Schmetterlinge, von der Luft behindert, der Bewegung des Schiffes nicht folgen können, wenn sie sich von ihm um ein beträchtliches Stück entfernten; halten sie sich aber in der Nähe, so würden sie unbehindert und ohne Anstrengung dem Schiffe nachkommen, weil es, als ein unregelmäßig geformtes Bauwerk, die benachbarten Teile der Luft mit sich führt. Aus ähnlichen Gründen sehen wir bisweilen, wie die lästigen Mücken und Bremsen scharf trabenden Pferden nachfolgen und sich bald auf diesen, bald auf jenen Körperteil niederlassen. Bei den fallenden Tropfen hingegen würde der Unterschied ganz geringfügig sein, beim Springen und beim Werfen schwerer Körper sogar völlig unmerklich.

Abb. 1.1 Erste Formulierung des klassischen Relativitätsprinzips von G. Galilei
Übersetzung von E. Strauss [4c] aus dem Jahre 1891

1. Einführung

Die Haft wurde aber kurz darauf in einen Hausarrest umgewandelt und er durfte sein restliches Leben das Haus auch für erbetene ärztliche Behandlungen nicht mehr verlassen. Selbst nach seinem Tod wurde ihm ein ehrenvolles Begräbnis verweigert. Obwohl das Urteil kein explizites Publikationsverbot enthielt, konnte sein späteres Hauptwerk, in dem er die Kinematik und Festigkeitslehre begründete, nicht im Inland erscheinen und wurde dann vom Elsevier-Verlag in Leiden veröffentlicht.

Das von Galilei formulierte Relativitätsprinzip lässt sich „mit Mücken, Schmetterlingen und sonstigem fliegenden Getier“ nur schwer anschaulich darstellen. Um aber weiterhin ein Schiff als Ausgang der Betrachtungen beizubehalten, wird im Folgenden angenommen, dass dieses an einer Hafentmole vorbeifährt, wo gerade eine Fahne mit gleichmäßiger Geschwindigkeit an einem Mast hochgezogen wird und zur Zeit t_0 die Spitze erreicht. Für den ruhenden Beobachter an der Mole erscheint die Bewegung der Fahne als senkrecht (Koordinaten $x = 0$, y und Zeit t als veränderliche Größen) während vom Schiff, das sich mit der Geschwindigkeit v dazu bewegt, die Fahne bezüglich seines mitbewegten Koordinatensystems (bezeichnet mit x', y', t') um $v \cdot t_0$ zurückbleibt (s. Abb. 1.2).

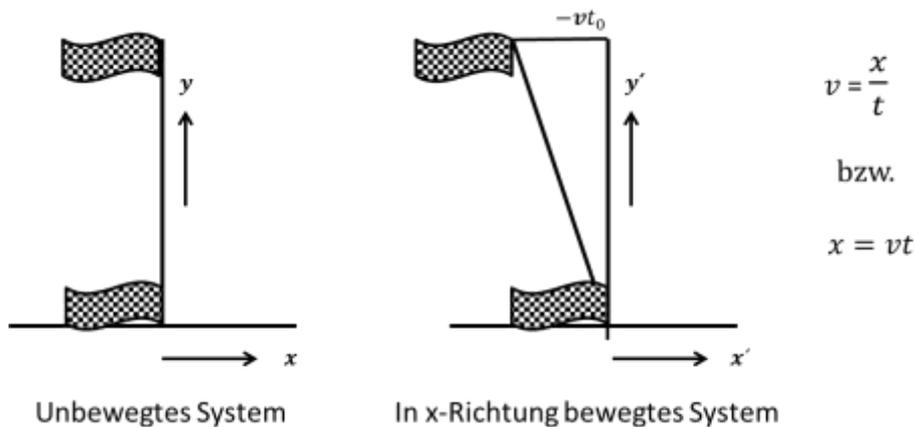


Abb. 1.2: Unterschiedliche Wahrnehmung des gleichen Sachverhaltes beobachtet aus verschiedenen Bezugssystemen

Die Koordinaten können demnach mit den folgenden Beziehungen ineinander umgerechnet werden:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z \quad t' = t \quad (1.01)$$

Wird dagegen am Schiff eine Fahne hochgezogen so gilt der umgekehrte Fall und aus Sicht des ruhenden Beobachters an der Mole bewegt sich die Fahne in x -Richtung

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z' \quad t = t' \quad (1.02)$$

wobei dies nur eine einfache Umstellung der Gl. (1.01) erfordert. Dieses Gleichungssystem wird als die Galilei-Transformation der klassischen Mechanik bezeichnet. Wichtig ist hierbei, dass es nur eine Veränderung in Bewegungsrichtung gibt, die anderen Raumrichtungen und die Zeit bleiben unbeeinflusst. Dieses Prinzip wurde über mehrere Jahrhunderte als a priori gegeben betrachtet, weil es der menschlichen Erfahrung unmittelbar entspricht und dementsprechend auch lange Zeit nicht hinterfragt. Wie später noch ausgeführt wird,

weiß man heute, dass die Gültigkeit nur dann (näherungsweise) gegeben ist, wenn die Systemgeschwindigkeit (d. h. in diesem Fall die des Schiffes in x -Richtung) deutlich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist.

Obwohl damit seitens Galilei bereits wichtige Grundlagen geschaffen worden waren, blieb die hauptsächliche Vervollständigung der klassischen Mechanik einem anderen vorbehalten. Im Jahr 1687 veröffentlichte Isaac Newton (1643-1727) das Werk

Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Mathematische Prinzipien der Naturlehre)

Diese auf Latein geschriebene Arbeit enthält die bekannten, später nach ihm benannten Axiome sowie umfassende Berechnungen und Beweise. Diese sind jedoch in Textform gefasst und aus heutiger Sicht nur schwer lesbar, da sie noch keine Gleichungen mit Verwendung des Gleichheitszeichens enthalten (vgl. Abb. 1.3). Diese Schrift ist im Original sowie in verschiedenen Übersetzungen und neueren Übertragungen verfügbar, unter anderem ist von der Cambridge University die von Newton genutzte Originalversion mit handschriftlichen Bemerkungen abrufbar.

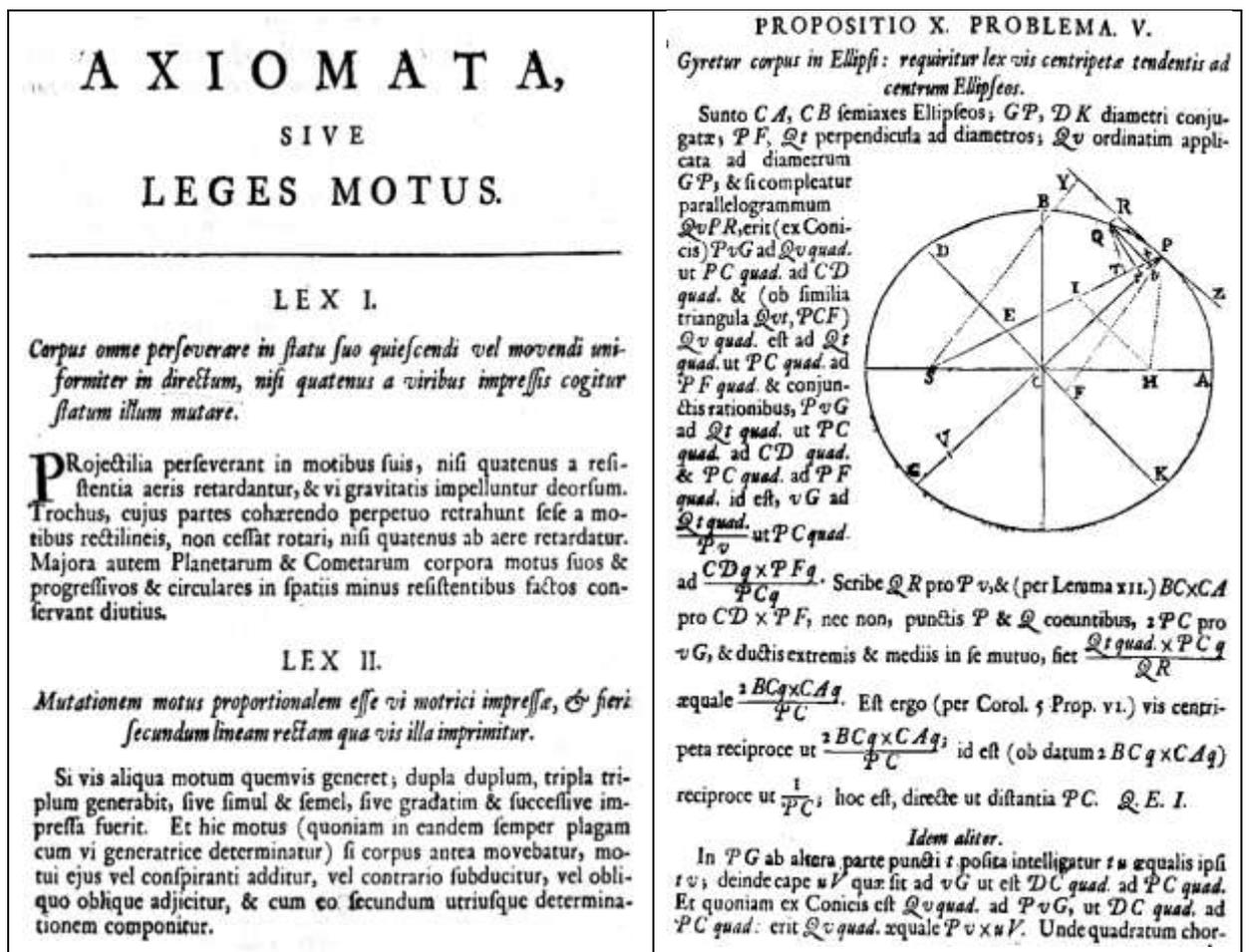


Abb. 1.3: Auszüge aus Newtons Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica
Links: Erstes und zweites Axiom
Rechts: Typischer Text mit Diagramm und Formeln ohne Verwendung eines Gleichheitszeichens „=“

1. Einführung

In dem Buch werden erstmals die heute als „Newtons Axiome“ bezeichneten Grundgesetze der Mechanik definiert. Zur Darstellung wird im Folgenden eine dem heutigen Sprachgebrauch angepasste Version genutzt. Außerdem werden die zugehörigen Formeln in Vektorschreibweise dargestellt. Die Definition von physikalischen Größen als Vektoren, d. h. die Zusammenführung von Betrag und Richtung wurde erst im 19. Jahrhundert durch den deutschen Lehrer Herrmann Günter Graßmann (1809-1877) entwickelt und war demzufolge Newton noch nicht bekannt. Diese Darstellungen sind jedoch heute üblich und sollen demzufolge auch hier genutzt werden.

1. Das Trägheitsgesetz

Jeder Körper mit konstanter Masse verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, sofern er nicht durch Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern.

$$v = \text{const.} \quad \text{falls} \quad \sum_i \vec{F}_i = 0 \quad (1.03)$$

Diese Feststellung erfordert ein hohes Maß an Abstraktion, weil die in der Natur zu beobachtenden Bewegungen stets durch äußere Einflüsse wie Reibung und Gravitation beeinflusst werden.

2. Das Grundgesetz der Dynamik

Die zeitliche Änderung des Impulses eines Massenpunktes ist gleich der wirkenden Kraft. Bei konstanter Masse ist Kraft gleich Masse mal Beschleunigung

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.04)$$

3. Das Reaktionsprinzip

Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 die Kraft \vec{F}_{12} aus, so reagiert der Körper 2 auf den Körper 1 mit einer Gegenkraft \vec{F}_{21} . Es gilt

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (1.05)$$

oder allgemein „Aktion ist gleich Reaktion“.

Es existiert eine weitere aus der Schrift abzuleitende Gesetzmäßigkeit, die aber von Newton selbst nicht als Axiom eingeführt wurde. Diese ist jedoch ebenfalls sehr wichtig und wird heute vielfach als 4. Axiom bezeichnet

4. Das Superpositionsprinzip

Wirken auf einen Punkt mehrere Kräfte, so addieren sich diese vektoriell.

$$\vec{F}_{res} = \sum_i \vec{F}_i \quad (1.06)$$

Diese 4 Axiome bilden die Grundlage der klassischen Mechanik und es können dementsprechend alle Prozesse darauf zurückgeführt werden.

Es ist hierbei noch bemerkenswert, dass das Imprimatur für dieses Buch von Samuel Pepys (1633-1703) erteilt wurde, dessen großem Freundeskreis auch Newton angehörte.

1.3 Licht und seine Ausbreitung

Anders als in den katholischen Ländern, wo Vertreter der Inquisition dies vornahmen, war er im protestantischen England als Präsident der Royal Society dafür zuständig. Pepys ist der Nachwelt bekannt durch seine geheimen Tagebücher, die er zwischen 1660 und 1669 anfertigte und die erst nach seinem Tod gefunden und dann veröffentlicht wurden. Diese enthalten interessante und unverfälschte Tatsachenberichte, so z. B. über die große Pest 1665 und den großen Brand von London 1666; außerdem sind die drastischen Schilderungen seiner Mitbürger und die seiner vielen außerehelichen Beziehungen zu erwähnen. Er ist einer der bekanntesten Autoren der damaligen Zeit und seine Bücher werden noch heute gedruckt.

Von Newton wurde auch das erste bekannte Spiegelteleskop hergestellt, das von seinen Zeitgenossen sehr geschätzt wurde. Außerdem war er Mitbegründer der Infinitesimalrechnung, wegen der er sich mit Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), der auch als letzter Universalgelehrter bezeichnet wird, einen teilweise boshaft geführten Prioritätsstreit lieferte. So verklagte er ihn vor der Royal Society – dessen Präsident er zu diesem Zeitpunkt war – wegen Plagiats und diese sprach Leibniz schuldig. Newton rühmte sich später ihm das Herz gebrochen zu haben. Heute gelten Newton und Leibniz als unabhängige Begründer dieses Bereiches der Mathematik.

Neben seinen bahnbrechenden Entdeckungen gehörte jedoch die größte Leidenschaft Newtons der Alchemie, der er einen erheblichen Teil seiner Forschungen widmete. Ein großer Teil der Bücher aus seinem Nachlass, der nunmehr im Kings College in London aufbewahrt wird, befasst sich mit den entsprechenden Themen. Er wurde Warden (1696-1700) und anschließend Master (1700-1727) der Royal Mint in London. Letztendlich war es ihm also nicht gelungen Gold oder Silber zu erzeugen dafür wurde er mit dieser Ernennung jedoch Herr des Geldes.

Seinem Charakter gemäß nahm er seine Tätigkeit an der Royal Mint sehr ernst. Eines der Hauptprobleme dieser Institution in der damaligen Zeit war die Falschmünzerei; dabei wurden den von der Krone herausgegebenen Silbermünzen durch Abfeilen Metall abgetragen, das dann eingeschmolzen und zu Falschgeld geprägt wurde. Er ließ die Täter rigoros verfolgen und verurteilen, was den Gesetzen der damaligen Zeit zufolge üblicherweise mit der Todesstrafe geahndet wurde. Dies und auch weitere Begebenheiten aus seinem Leben sind dem sehr unkonventionellen Buch von F. Freistetter zu entnehmen (Newton, wie ein Arschloch die Welt neu erfand [83]).

1.3 Licht und seine Ausbreitung

Neben der klassischen Mechanik ist eine weitere wichtige Grundlage für die im Folgenden dargestellten Überlegungen die Natur des Lichts und die Art und Weise wie es sich ausbreitet. In der Frühzeit gab es abhängig vom Kulturkreis verschiedene Überlieferungen zur Natur des Lichts und des Sehens. So war es in der griechischen Mythologie die Göttin Aphrodite, die aus den Elementen Erde, Wasser, Luft und Feuer das Augenlicht schuf; dies war so zu verstehen, dass das Licht aus dem Auge austritt und Dinge dadurch sichtbar werden. Von Euklid wurde etwa im Jahr 300 vor unserer Zeitrechnung das Verhalten von Lichtstrahlen untersucht. Er stellte fest, dass Licht in geraden Strahlen verläuft und entdeckte die Reflexionsgesetze. Außerdem kam er zu dem Schluss, dass Licht nicht aus dem Auge austreten

1. Einführung

kann, da sonst keine Unterschiede zwischen Tag und Nacht auftreten dürften. Obwohl damit schon eine Basis für weitere Erkenntnisse gelegt war, blieben weitere Fortschritte den Entdeckern der Neuzeit vorbehalten.

Von Newton wurde angenommen, dass das Licht aus kleinen Korpuskeln mit unterschiedlicher Größe und Eigenschaften besteht. Er unternahm Versuche mit Spiegeln, Linsen und Prismen um die Brechungsgesetze sowie andere optische Eigenschaften des Lichts abzuleiten und war auch teilweise erfolgreich. Mit seiner Korpuskel-Theorie konnten aber verschiedene andere Eigenschaften insbesondere bezüglich Interferenzbildungen nicht erklärt werden.

Vom Niederländer Christiaan Huygens (1629-1695) wurde 1690 die erste vollständige Wellentheorie des Lichts formuliert. Durch seine umfassenden Beschreibungen konnte er unter Verwendung der Wellentheorie als erster eine schlüssige Erklärung für die bekannten Phänomene Reflektion und Brechung geben. Neben seinen bahnbrechenden Arbeiten zur Wellentheorie ist Huygens auch als Astronom von großer Bedeutung; er entdeckte durch die Verwendung verbesserter Teleskope, die er zusammen mit seinem Bruder Constantijn entwickelt hatte, als erster den Saturnmond Titan und identifizierte die Saturnringe. Außerdem wurden mathematische Grundüberlegungen zur Kreiszahl π und zur Anwendung von Logarithmen von ihm durchgeführt und er gilt als Mitbegründer der Wahrscheinlichkeitsrechnung.

Die Wellentheorie war lange Zeit umstritten, insbesondere weil die Korpuskeltheorie als Gegenmodell vom großen Isaac Newton formuliert worden war. Eines seiner Hauptargumente war dabei, dass Licht von einem Hindernis abgeschirmt wird und dahinter keine Wellen (wie z. B. auf einer Wasseroberfläche) sichtbar werden. Es war noch nicht bekannt, dass die Wellenlängen des Lichts sehr klein sind (ca. 400-700 Nanometer).

Erst das von Thomas Young (1773-1829) durchgeführte Doppelspaltexperiment, bei dem die Wellen durch Interferenzen sichtbar gemacht werden konnten, verhalf der Theorie zum endgültigen Durchbruch. Young löste auch das Problem der Polarisation, indem er das Licht als Transversalwelle deutete. Nach heutigem Sprachgebrauch bedeutet dies, dass die Vektoren des elektrischen und des magnetischen Felds senkrecht zueinanderstehen und auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verlaufen (vgl. Abb. 1.4). Dies steht im Gegensatz zum Verhalten bei einer Schallwelle, die sich longitudinal ausbreitet, d. h. es bilden sich hierbei in Bewegungsrichtung Schwingungen im transportierenden Medium wie z. B. in Luft oder Wasser und es ist deshalb dabei auch keine Polarisation möglich. Lineare Polarisation bei Licht tritt auf, wenn viele sich überlagernde Wellen die gleiche Orientierung aufweisen.

Im Jahr 1676 wurde von Ole Christian Rømer (1644-1710) erstmals der Nachweis geführt, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist. Er beobachtete die Verfinsterung des Jupiter-Mondes Io, die bei Erdnähe des Jupiters früher, bei Erdferne später auftritt. Das Ergebnis widersprach dem Verständnis anderer, von Aristoteles bis Descartes, die eine unendliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts annahmen und setzte sich nur langsam durch. Aus den Messergebnissen von Rømer, der bei seinen Messungen nur die Zeitverzögerung bestimmt hatte, errechnete Huygens 1678 eine Geschwindigkeit von etwa 213000 km/s, die etwa 70 % des tatsächlichen Wertes beträgt. Gemessen an den Möglichkeiten der damaligen Zeit ist dies bereits bemerkenswert genau.

1.3 Licht und seine Ausbreitung

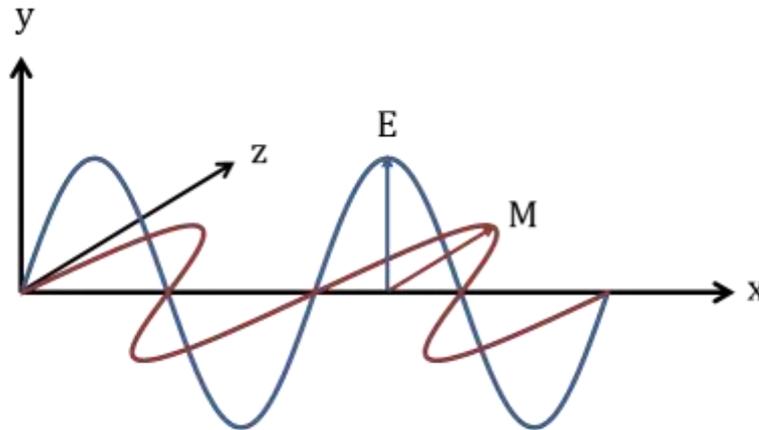


Abb. 1.4: Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle mit den Komponenten des elektrischen und des magnetischen Felds (E bzw. M)

Dem Verständnis der damaligen Zeit entsprechend nahm man an, dass das Licht für seine Ausbreitung einen Träger benötigt. Dies entspricht der Übertragung des mechanischen Bildes, das sich für die Schallausbreitung in Medien ergibt. Hierbei werden Atome bzw. Moleküle zu Schwingungen angeregt. Der Mittelpunkt der Schwingungsbewegung bleibt hierbei konstant was bedeutet, dass die Atome bzw. Moleküle im Mittel sich nicht bewegen aber dass eine Energieübertragung erfolgt.

Erste Erkenntnisse hierzu stammen von Otto von Guericke (1602-1686). Er erfand 1649 die Kolbenvakuumpumpe und führte damit eine Vielzahl von Versuchen durch. Der wohl bekannteste ist die Demonstration der Kraftwirkung des Luftdrucks, für die er aus Kupfer zwei Halbkugeln (Durchmesser ca. 42 cm) anfertigen ließ. Auf dem Reichstag in Regensburg im Jahre 1657 ließ er in Anwesenheit von Kaiser Ferdinand III nach dem Zusammenlegen unter Nutzung einer Dichtung und anschließender Evakuierung an jeder Seite acht Pferde anspannen, denen es nicht möglich war, die Halbkugeln auseinanderzuziehen. Die Versuchsvorrichtung wurde unter Nutzung des Namens seiner Heimatstadt als „Magdeburger Halbkugeln“ bekannt. Neben diesen spektakulären Versuchen führte er aber auch grundlegende Untersuchungen durch und konnte erstmalig zeigen, dass ein Vakuum keinen Schall leitet aber für Licht durchlässig ist.

Das Medium, das den Kenntnissen dieser Zeit entsprechend zur Übertragung des Lichts erforderlich war wurde allgemein „Lichtäther“ oder einfach „Äther“ genannt. Der Begriff stammt ursprünglich aus der griechischen Mythologie und bezeichnet den (blauen) Himmel. Im Gegensatz zu den vier irdischen Elementen, die stetigen Veränderungen unterliegen (diese sind Erde, Wasser, Luft und Feuer, die interessanterweise den Aggregatzuständen fest, flüssig, gasförmig und ionisiert entsprechen), war der Äther das 5. himmlische Element und unveränderlich [4d].

Im Laufe der Jahrhunderte hat es viele verschiedene Theorien zur Natur des Äthers gegeben. Er musste alles durchdringen, durfte aber den sich in ihm bewegenden Objekten keinen Widerstand entgegensetzen da er sonst die physikalischen Gesetze beeinflusst hätte. Man war der Meinung, dass Lichtwellen sich im Äther ausbreiten, ähnlich wie Schallwellen

1. Einführung

in der Luft. Es waren aber zwei Beobachtungen aus Versuchen, die eine eindeutige Festlegung verhinderten, weil sie sich fundamental widersprechen:

1. Der erstmals von James Bradley (1693-1762) im Jahre 1725 entdeckte Effekt der stellaren Aberration.
2. Der in bewegten transparenten Medien (z. B. Glas oder Wasser) auftretende Effekt der teilweisen Mitführung des Lichts in Bewegungsrichtung. Dieser Effekt ist abhängig vom Brechungsindex des Mediums.

zu Punkt 1:

Unter stellarer Aberration versteht man in der Astronomie eine kleine scheinbare Ortsveränderung von Gestirnen, wenn ein Beobachter sich seitlich dazu bewegt. Die Erde bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/s um die Sonne; nach einem halben Jahr tritt also ein Messeffekt gegenüber dem nicht bewegten Himmel von 60 km/s auf, der beim Lichteinfall zu einem Versatz führt, der von Bradley mit Präzisionsmessungen eines Zenitteleskops nachgewiesen werden konnte. Ein solches Teleskop ist senkrecht stehend fest ausgerichtet. Bradley hatte dies in seinem Haus entlang des Kamins aufgebaut und verbrachte die meiste Zeit seiner Beobachtungen auf einer Bank liegend unter dem Gerät.

Eine wichtige Voraussetzung für das Auftreten eines Aberrationseffekts ist die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit. Bradley berechnete für das Licht eine 10210-fach größere Geschwindigkeit als die Erdbewegung, was mit einer Genauigkeit von 2% tatsächlich der Fall ist. Außerdem zog er die Schlussfolgerung, dass ein vorhandener Äther nicht durch Massen wie z. B. die der Erde beeinflusst wird. Würde die Erde den lichttragenden Äther mitführen, so wäre grundsätzlich keine Aberration messbar.

Dieser Effekt ist nicht zu verwechseln mit der Messung der Parallaxe, d. h. der Winkelabhängigkeit eines relativ nahen Sterns in Abhängigkeit von der Stellung der Erde zur Sonne im Ablauf eines Jahres. Eine solche Messung gelang erstmals Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) im Jahr 1838 beim Stern 61 Cygni, dessen Entfernung er aufgrund der Winkelbestimmung auf 10,28 Lichtjahre festlegte (heutiger Wert: 11,4 Lichtjahre). Dieser Effekt ist etwa 2 Größenordnungen kleiner als der der Aberration.

Entfernungsbestimmungen sind heute ein wesentlicher Bestandteil der Kosmologie. Die Messung der Parallaxe ist mit erdgebundenen Teleskopen jedoch nur bis zu Entfernungen von etwa 100 Lichtjahren möglich. Von Henrietta S. Leavitt (1868-1921) wurde dann im Jahr 1912 durch umfangreiche Untersuchungen an Sternen der Magellanschen Wolken festgestellt, dass der Absolutwert der maximalen Helligkeit bei periodisch veränderlichen Sternen direkt mit deren Periode zusammenhängt. Da es im erdnahen Bereich ausreichend veränderliche Sterne gibt konnte damit eine erste Kalibrierung vorgenommen und die Ausdehnung unsere Galaxis ermittelt werden (100.000 Lichtjahre) und folgend die Entfernungen zur großen und kleinen Magellanschen Wolke (163.000 bzw. 200.000 Lj.) sowie später durch Edwin Hubble (1889-1953) zur Andromeda Galaxie (2,5 Mio. Lj.).

zu Punkt 2:

Erstmals im Jahr 1810 wurde von Francois Arago (1786-1853) ein Versuch durchgeführt, bei dem er bei einer Aberrationsmessung ein Prisma benutzte und eine Veränderung des

1.4 Elektromagnetismus

Aberrationswinkels erwartete, die jedoch nicht auftrat. Bereits 1818 wurde von Augustin Jean Fresnel (1788-1827) die Theorie aufgestellt, dass das Licht vom Medium teilweise mitgeführt wird und der auftretende Effekt durch den Brechungsindex bestimmt wird. Im Jahr 1851 wurde von Hyppolyte Fizeau (1819-1896) ein Versuch zur Messung der Lichtgeschwindigkeit in bewegtem Wasser durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Lichtgeschwindigkeit im Wasser steigt, wenn das Licht sich in Bewegungsrichtung ausbreitet und im umgekehrten Fall sinkt und dass die auftretenden Messwerte den von Fresnel formulierten Gleichungen entsprechen. Hierdurch wurde nun dem Äther als Medium für die Lichtausbreitung die Eigenschaft zugesprochen von der Materie mitgeführt zu werden.

Wegen ihrer grundlegenden Bedeutung werden die Themen Aberration in Kap 2.1.2 und die Mitführung in bewegten Medien in Kap. 4.3 noch ausführlich behandelt.

Aufgrund der widersprüchlichen Versuche gab es insbesondere im 19. Jahrhundert eine Vielzahl von Äthertheorien, die einen Zusammenhang erklären sollten. Auch Einstein hatte in seiner wohl ersten Veröffentlichung noch als Jugendlicher hierzu Überlegungen angestellt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass keine Einigkeit über die Natur des Äthers bestand, dass aber die Existenz zunächst von niemandem ernsthaft in Frage gestellt wurde.

1.4 Elektromagnetismus

Die mit einer elektrostatischen Aufladung verbundenen Effekte waren bereits in der Antike bekannt. Wenn Bernstein (griechisch: Elektron) mit einem Fell oder Tuch gerieben wird so zeigen sich Effekte wie z. B. die Erzeugung von Funken. Auch der Magnetismus ist lange bekannt, wobei die beobachteten Effekte dabei stets an das Vorhandensein von Magneteisenstein gebunden waren. Der Begriff ist abgeleitet von der griechischen Landschaft Magnesia, in der Magneteisenstein schon früh gefunden wurde. Eine praktische Nutzung lag dabei ausschließlich bei der Verwendung als Kompass, der schon im vorchristlichen China und in Europa etwa ab dem Jahr 1200 verwendet wurde.

Dies veränderte sich erst mit der Erfindung des elektrostatischen Generators. Otto v. Guericke führte Experimente mit einer Schwefelkugel durch und wollte damit kosmische Wirkkräfte nachweisen. Der Versuchsaufbau wird als erste „Elektrisiermaschine“ beschrieben, wobei Guericke Anziehungen und Abstoßungen erkannte aber wohl keine genaue Vorstellung von den Ursachen hatte. Spätere Ausführungen mit Verwendung von Glaskörpern und Lederkissen konnten sehr hohe Spannungen erzeugen. Ein weiterer Fortschritt ergab sich durch die Entwicklung der „Leidener Flasche“. Hierbei handelte es sich um die Frühform eines Kondensators, mit der Ladungen erzeugt und auch gespeichert werden konnten. Obwohl verschiedene elektrische und magnetische Effekte bekannt waren, wurden sie jedoch hauptsächlich zur Belustigung eines interessierten Publikums genutzt. So war es sehr beliebt, einer Menschenmenge, die sich an den Händen hielt, mit einer Leidener Flasche Stromschläge zu versetzen.

Im 18. Jahrhundert ergaben sich jedoch auch weitere neue Erkenntnisse, z. B. das Froschenkelexperiment von Luigi Galvani (1737-1798), bei dem er nach der Berührung mit einer Elektrisiermaschine Zuckungen an toten Fröschen beobachtet hatte. Außerdem sind die Untersuchungen von Benjamin Franklin (1706-1790) bezüglich der elektrischen Natur von Blitzen zu erwähnen. Aufgrund der experimentellen Einschränkungen waren dies

1. Einführung

jedoch Ausnahmen und von einer umfassenden wissenschaftlichen Forschung zu diesem Thema kann nicht gesprochen werden.

Ein Wendepunkt wurde erreicht, als es Alessandro Volta (1745-1827) im Jahre 1799 gelang eine stabile Spannungsquelle in Form einer Batterie zu entwickeln, die als „Volta'sche Säule“ bekannt wurde. Es handelt sich hierbei sicher um eine der bedeutendsten Erfindungen aller Zeiten und wurde auch von seinen Zeitgenossen entsprechend gewürdigt. Volta fügte hierfür Elemente zusammen, die jeweils aus einer Kupfer- und Zinkplatte bestanden, die mit säuregetränkten Leder- oder Papierstücken voneinander getrennt wurden und so elektrochemische Zellen bildeten. Der Aufbau gestattete je nach Anzahl der Zellen die Herstellung von Spannungen von mehr als 100 Volt (eine physikalische Einheit die später nach ihm benannt wurde).

In der Folge kam es durch Nutzung von sich nun ergebenden neuen Experimentiermöglichkeiten zu wesentlichen Entdeckungen. Hier sind insbesondere die Versuche von Ørsted, Faraday, Ampère, Heaviside und Lorentz zu nennen, mit denen die Eigenschaften von Ladungen, elektrischem Strom und die Zusammenhänge mit dem Magnetismus entdeckt wurden. Von Ampère wurde dann erstmalig der Begriff des Feldes eingeführt, der in der weiteren Entwicklung der Wissenschaft von großer Bedeutung ist.

Weitere Erkenntnisse brachten insbesondere die theoretischen Überlegungen von James C. Maxwell (1831-1879), der zeigen konnte, dass die Existenz von elektrischen und magnetischen Feldern zusammenhängt (vgl. Details in Kap. 12). Von ihm wurde danach auch erstmals von elektromagnetischen Feldern gesprochen. Ein wichtiges Ergebnis der entwickelten Gleichungen war, dass diese nicht der Galilei-Transformation entsprechen; hierdurch kam es zum Bruch mit der klassischen Mechanik, für die das weiterhin unterstellt wurde. Maxwell kam darüber hinaus mit seinen Formeln zu dem Ergebnis, dass elektromagnetische Wellen existieren müssen und dass diese sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Er vermutete daher, dass auch Licht eine elektromagnetische Welle ist.

Die experimentellen Arbeiten von Heinrich Hertz (1857-1894) bestätigten dann, dass Licht tatsächlich als Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen interpretiert werden muss. Von 1889 bis zu seinem Tod im Jahre 1894 war er Professor für Physik in Bonn. Noch heute werden die von ihm gebauten Apparaturen in den Vorlesungen für Experimentalphysik benutzt und zeigen anschaulich den technischen Stand der damaligen Zeit. Mit den gewonnenen Ergebnissen gab es nun in der Naturvorstellung keinen Zweifel, dass ein Äther zum Transport von elektromagnetischen Wellen existieren muss. Dieses Verständnis wurde allgemein auch auf die Gravitation ausgedehnt.

1.5 Das Michelson-Morley Experiment und erste Deutungsversuche

Albert A. Michelson (1852-1931) war zum Ende des 19. Jahrhunderts einer der bedeutendsten Physiker. Er trat im Jahr 1869 in die US Naval Academy ein und graduierte im Jahr 1873. Nach 2 Jahren auf See wurde er Akademie-Instrukteur für Physik und Chemie, 1879 wurde er dann nach Washington versetzt. Ein Jahr später ließ er sich freistellen und setzte in Europa (Berlin, Heidelberg und Paris) seine Studien fort. Im Jahr 1877 heiratete er die Tochter eines vermögenden Börsenmaklers. Er war sehr interessiert an wissenschaftlichen

1.5 Das Michelson-Morley Experiment und erste Deutungsversuche

Untersuchungen, insbesondere bezüglich der Messung der Lichtgeschwindigkeit; hierbei waren seine erworbenen Kenntnisse als Marine-Artillerieoffizier sehr hilfreich, wo er sich intensiv mit optischer Entfernungsmessung befasst hatte. Im Jahr 1881 verließ er das Militär und begann seine wissenschaftliche Karriere. 1907 war er der erste Amerikaner, dem der Nobelpreis verliehen wurde.

Das erste von ihm 1881 zunächst am Helmholtz Labor in Berlin durchgeführte Experiment zum Nachweis eines Lichtäthers führte nicht zum Erfolg, weil die Einflüsse des Verkehrs zu groß waren. Es wurde dann an der Sternwarte in Potsdam wiederholt und ergab ein Nullresultat [6]. Aufgrund von experimentellen Unzulänglichkeiten wurde die Aussage dieses Experiments aber zunächst in Zweifel gezogen und allgemein von der Fachwelt abgelehnt.

Gemeinsam mit Eduard W. Morley (1838-1923) wurden dann die Apparaturen verfeinert und der Versuch im Jahr 1887 in Cleveland wiederholt [7]. Es war nun zweifelsfrei nachgewiesen, dass die Messung der Lichtgeschwindigkeit in allen Richtungen stets zu den gleichen Ergebnissen führt, und zwar unabhängig von der Eigenbewegung der Messvorrichtung gegenüber einem angenommenen Äther. Aufgrund seiner großen Bedeutung werden das Experiment und seine Interpretation im Folgenden noch ausführlich dargestellt (Kap. 9.1).

In den nächsten Jahren führte dieses Ergebnis zu einer Vielzahl von Veröffentlichungen, deren wichtigste hier kurz dargestellt werden sollen. Von George F. FitzGerald wurde bereits im Jahre 1889 die These aufgestellt, dass sich der Raum bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit kontrahieren muss [8]. Er nahm an, dass die Kontraktion quadratisch von der Geschwindigkeit des bewegten Beobachters abhängt. Von Hendrik A. Lorentz (1853-1928) wurde dies unabhängig davon ebenfalls postuliert [9]. Da es aber weitere Widersprüche gab, wurde von Lorentz und auch von Henri Poincaré (1854-1912) im Jahre 1900 der Begriff der „Ortszeit“ eingeführt [10]. Dies bedeutet, dass aus Sicht eines ruhenden Beobachters die Uhren bewegter Versuchsteilnehmer abhängig von ihrem Abstand bei einer Synchronisation unterschiedliche Zeiten anzeigen.

Hiermit war es nun möglich, quantitative Bestimmungen zwischen unterschiedlich bewegten Systemen durchzuführen. Die zugrundeliegenden Gleichungen wurden durch Poincaré, der hierfür auch den Namen „Lorentz-Transformation“ einführte, in ihre moderne Gestalt gebracht [11]. Er ordnete der Raumkontraktion und der Zeitdilatation den gleichen Faktor zu (er nannte ihn k , Einstein β , heute wird er allgemein mit γ bezeichnet).

Die Transformationsgleichungen lauten

$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) \quad (1.07)$$

$$x' = \gamma (x - vt) \quad (1.08)$$

mit

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.09)$$

Hierbei sind x und t die Koordinaten eines Referenzsystems und x' und t' die Koordinaten eines dazu gleichförmig bewegten Systems, y - und z -Koordinaten ändern sich nicht.

1. Einführung

Diese Zusammenhänge werden heute üblicherweise als Lorentz-Transformation (LT) oder „Lorentz-boost“ bezeichnet. Der englischsprachige Begriff „boost“ impliziert eine Beschleunigung, die aber hier nicht vorhanden ist. Es handelt sich stattdessen um Transformationsgleichungen, die die Beziehungen zwischen gleichförmig zueinander bewegten Systemen beschreiben, die keiner Beschleunigung unterliegen.

Mit diesen Gleichungen wurde darüber hinaus ein vergleichbarer Formalismus gefunden, der für die durch die Maxwell-Gleichungen gegebenen Zusammenhänge in elektromagnetischen Feldern gilt.

Die Herleitung der Lorentz-Gleichungen wird im Weiteren noch detailliert vorgenommen. Es sei noch erwähnt, dass bei Geschwindigkeiten $v \ll c$ der Faktor $\gamma = 1$ wird und die Gleichungen in die Galilei-Transformation aus Gl. (1.01) übergehen.

1.6 Einsteins Spezielle Relativitätstheorie

Im Jahre 1905 wurde von Albert Einstein (1879-1955) die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) formuliert. Zu einer exakten Darstellung ist dabei zunächst die Einführung des Begriffs eines Inertialsystems erforderlich. Inertialsysteme sind alle Systeme, die sich in beliebiger Geschwindigkeit zueinander bewegen aber nicht beschleunigt werden oder eine Drehbewegung aufweisen.

Grundlagen der SRT sind das Relativitätsprinzip und das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. In der Originalfassung hat Einstein folgende Formulierung gewählt [12]:

„Relativitätsprinzip: Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden.“

Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Jeder Lichtstrahl bewegt sich im „ruhenden“ Koordinatensystem mit einer bestimmten Geschwindigkeit V , unabhängig davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper emittiert ist. Hierbei ist

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Lichtweg}}{\text{Zeitdauer}}$$

wobei „Zeitdauer“ im Sinne der Definition des § 1 aufzufassen ist.“

Die Interpretation ist nicht einfach, auch weil Einstein hier von einem „ruhenden“ System spricht. Die Bedeutung, insbesondere des 2. Paragraphen, wird aber klar, wenn man die im weiteren Text gewählte Vorgehensweise betrachtet, insbesondere die Anwendung der Synchronisationsvorschrift (heute: Einstein-Synchronisation, vgl. Kap. 3.4 und 12.2). Aufgrund der Komplexität werden Details erst in den weiterführenden Kapiteln diskutiert.

Wichtig ist hier der radikale Bruch mit der bisherigen Vorgehensweise bei der Aufstellung einer physikalischen Theorie. Während Lorentz und Poincaré die verfügbaren Versuchsergebnisse interpretierten, daraus die Transformationsgleichungen ableiteten und dann das Relativitätsprinzip fanden, setzte Einstein dies an die Spitze und war in der Lage die Gleichungen auf relativ einfache Weise abzuleiten. Allgemein gesprochen handelt es sich um die Prinzipien Bottom-up (Lorentz, Poincaré) und Top-down (Einstein).

1.6 Einsteins Spezielle Relativitätstheorie

Von Lorentz wurde im Jahr 1892 zunächst angenommen, dass es ein absolut ruhendes Grundsystem geben müsste [9]; 1910 war er dann der Auffassung, dass man niemals in der Lage sein würde zwischen beiden Ansätzen zu unterscheiden [13]. Unabhängig davon begrüßte er jedoch die von Einstein formulierte Darstellung der Relativitätstheorie und wurde ihr Verfechter [14,15], insbesondere wegen der „Kühnheit“ des Ansatzes [14].

Zu der Zeit der Entwicklung war nicht abzusehen, dass es jemals zu einer messtechnischen Überprüfung der Theorie kommen würde. In den folgenden Jahrzehnten kamen aber immer neue Experimente hinzu, als deren wichtigste die von Kennedy-Thorndike [16] sowie Ives-Stilwell [17,18] zu nennen sind, die noch ausführlich erörtert werden. Außerdem wurden die Messgenauigkeiten immer weiter verbessert; moderne Messungen mit sehr hoher Präzision haben u. a. die Gültigkeit der von Lorentz formulierten Zeitdilatation eindrucksvoll gezeigt [19,20,21]. Andererseits kann jedoch die spezielle Relativitätstheorie in ihrer allgemeinen Form prinzipiell nicht bewiesen werden. Jeder positiv ausgehende Versuch stärkt zwar die Theorie, ein einziges eindeutiges Gegenbeispiel würde aber dazu führen, dass sie als widerlegt gelten muss.

Im ersten Teil seiner Veröffentlichung „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ werden von Einstein die Transformationsgleichungen aus den bereits genannten Prinzipien abgeleitet. Da diese jedoch bereits zuvor von Lorentz entdeckt worden waren, werden sie heute allgemein als „Lorentz-Gleichungen“ bezeichnet. Einsteins Veröffentlichung enthält keinerlei Literaturangaben und so ist auf eine Parallelentwicklung zu Lorentz zu schließen. Es ist darüber hinaus eindeutig das Verdienst von Einstein, den photoelektrischen Effekt mit diesen Beziehungen kombiniert zu haben und dadurch in der Folge vollständig auf das Ätherkonzept zu verzichten zu können.

Bei weiterführenden Überlegungen zum Relativitätsprinzip wurde von Einstein außerdem ebenfalls bereits in Jahr 1905 der Effekt vorhergesagt, dass die kinetische Energie einer bewegten Masse bei höheren Geschwindigkeiten gemäß der Formel

$$E_{kin} = m_0 c^2 (\gamma - 1) \quad (1.10)$$

ansteigen muss [22]. Dieser Effekt hat sich experimentell bestätigt und wird heute allgemein als relativistischer Massenanstieg bezeichnet. Es ist hier wichtig zu sehen, dass die Bezeichnungen unterschiedlich sind. Lorentz wählte x, t für das Referenzsystem, während Einstein m_0 nutzte.

	Lorentz-Gleichungen	Relativistischer Massenanstieg
Gleichungen	$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$ $x' = \gamma (x - vt)$	$m = \gamma m_0$ $\{E = mc^2 = \gamma m_0 c^2\}$
Referenzsystem	x, t	m_0
Bewegtes System	x', t'	m

Tab. 1.1: Unterschiedliche Bezeichnungen für Referenz- und Ruhesystem bei den verschiedenen Ansätzen

1. Einführung

In der wohl bekanntesten Formel Einsteins

$$E = mc^2 \quad (1.11)$$

beinhaltet die Gesamtmasse m den in Gl. (1.10) definierten Teil der kinetischen Energie. Auch die Masse erhöht sich mit steigender Geschwindigkeit um den Faktor γ . Beide Darstellungen werden bis zum heutigen Tag parallel benutzt. Diese Beziehungen bilden gemeinsam die Grundlage für die Spezielle Relativitätstheorie.

Für die Beschreibung der von Einstein postulierten Prinzipien, heute vielfach als Einstein-Axiome bezeichnet, gibt es keine einheitliche Definition und sie wird in jeder Publikation anders gewählt. In einigen Fällen ist die Darstellung für beide Axiome beschreibender Art („es können bei Messungen keine Unterschiede festgestellt werden“), in anderen werden die Eigenschaften in den Vordergrund gestellt („die Lichtgeschwindigkeit ist in allen Inertialsystemen gleich“, „alle Inertialsysteme sind äquivalent“). Obwohl diese Ausdrücke dem ersten Anschein nach identisch sind, gibt es jedoch wichtige Unterschiede, die im Weiteren noch genauer diskutiert werden müssen. Der bereits erwähnte relativistische Massenanstieg wird nicht in den Axiomen aufgeführt, ohne diesen Effekt wäre aber die Aussage bezüglich des Relativitätsprinzips nicht möglich.

Ohne die generelle Aussage einzuschränken oder zu verändern, lässt sich das Relativitätsprinzip in folgende Details aussagen aufteilen:

- a) Werden von Beobachtern in verschiedenen Inertialsystemen identische Versuche durchgeführt, so führen diese zu den gleichen Ergebnissen.
- b) Ein Beobachter kann die in einem anderen Inertialsystem stattfindenden Ereignisse mit den von Lorentz formulierten Transformationsgleichungen und der relativistischen Massenzunahme widerspruchsfrei beschreiben. Insbesondere ist die Beobachtung der zeitlichen Abfolge von Ereignissen in allen Fällen gleich.
- c) Alle Inertialsysteme sind relativ zueinander gleichwertig und es existiert kein absolutes „Ruhe-system“.

Die Aussage in Punkt a) wird im Folgenden als „Identitätsprinzip“, die Aussage in Punkt b) als „Äquivalenzprinzip“ und in Punkt c) als „Prinzip der völligen Gleichwertigkeit von Inertialsystemen“ bezeichnet. Obwohl über die Gültigkeit der SRT innerhalb der physikalischen Forschungsgemeinschaft weitgehender Konsens herrscht, gibt es bis heute viele theoretische und experimentelle Versuche einzelne Punkte zu widerlegen. Dies betrifft insbesondere Messungen bezüglich geringfügiger Verletzungen der Lorentz-Gleichungen, die durch theoretische Überlegungen bezüglich einer generellen, vereinheitlichten Theorie aller in der Natur auftretenden Gesetze veranlasst worden sind. Außerdem wird weiterhin nach einer Möglichkeit gesucht, einen Zustand absoluter Ruhe zu integrieren.

Abschließend sollen noch interessante historische Fragen angesprochen werden. Einstein hat sich früh mit physikalischen Themen beschäftigt. Bereits im Alter von 16 Jahren schrieb er seinem Onkel einen Brief, in dem er mögliche Versuche zum Äthernachweis skizzierte [99]. Im Jahr 1901, also etwa 6 Jahre später, hatte er bereits weitergehende Vorstellungen und schrieb über sich und seine spätere Frau Mileva Marić, die er während des Studiums der Physik und Mathematik an der ETH in Zürich kennengelernt hatte: „Wie glücklich

1.7 Aktuelle Diskussionsthemen

und stolz werde ich sein, wenn wir beide zusammen unsere Arbeit über die Relativitätstheorie siegreich zu Ende geführt haben“. Sie war die einzige Frau in dieser damals von Männern dominierten Fachrichtung. Unklar ist aber ihr Anteil an der Entwicklung der Theorie, außerdem wird angezweifelt, ob zu dieser Zeit die Äthertheorie bereits überwunden war [85]. Im Nachwort seiner Arbeit bedankt sich Einstein nur bei seinem Freund und Kollegen M. Besso dafür, dass dieser ihm beim Arbeiten an den behandelten Problemen treu zur Seite stand und er ihm wertvolle Anregungen verdankt; seine Frau erwähnt er nicht [12].

Obwohl es keine eindeutigen Belege dafür gibt, erscheint es aber sehr plausibel, dass Einstein im Jahr 1905, im dem er neben seiner Arbeit im Patentamt seine Dissertation einreichte und weitere 4 Veröffentlichungen schrieb, die weitreichende Unterstützung seiner Frau hatte. Im Jahr 2005 wurde Mileva Marić offiziell als Mitbegründerin der Relativitätstheorie durch die ETH Zürich geehrt [84]. Allerdings gibt es eine große Zahl an Veröffentlichungen zu diesem Thema und auch abweichende Meinungen (z. B. [85]). Im Jahre 2003 wurde von Fernsehstationen in den USA die Dokumentation Einstein's wife übertragen. Während und nach der Sendung wurden die Zuschauer online nach ihrer Meinung gefragt und 75% der Zuschauer waren der Überzeugung, dass seine Frau tatsächlich mit ihm zusammengearbeitet hat. „Geschichte ist aber keine Angelegenheit für demokratische Abstimmungen“ [85]. Aufgrund fehlender Quellen muss heute festgestellt werden, dass wir es einfach nicht genau wissen.

Dies gilt ebenfalls für Informationen über ihr erstes Kind. Mileva Marić brachte vor ihrer Hochzeit (diese fand im Jahr 1903 statt) im Jahre 1902 ein Mädchen zur Welt. Hierzu war sie allein zu ihren Eltern nach Novi Sad (heute Serbien, damals österreichische Monarchie) zurückgekehrt; es ist nicht klar, ob das Kind dort verstarb oder ob es zu Adoption freigegeben wurde. Trotz der Tatsache, dass Einstein als bekanntester Wissenschaftler seiner Zeit eine öffentliche Person war, liegen Geheimnisse auf dieser frühen Periode, die sich wahrscheinlich nie aufklären lassen.

1.7 Aktuelle Diskussionsthemen

Bereits zu Beginn der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts wurde deutlich, dass die zu dieser Zeit entdeckte Hintergrundstrahlung des Urknalls in allen Raumrichtungen völlig gleichmäßig verläuft. Hierdurch hat sich die Möglichkeit ergeben, eine Geschwindigkeit relativ dazu zu messen. Neueste Messungen mit extremer Genauigkeit haben ergeben, dass unsere Sonne sich mit $369,1 \pm 0,9$ km/s relativ hierzu bewegt [23]. Es sei hier angemerkt, dass die Eigenbewegung der Sonne um das Zentrum der Milchstraße ca. 220 km/s beträgt, und zwar fast entgegengesetzt dazu. Dies bedeutet, dass die Milchstraße eine Eigenbewegung von fast 600 km/s gegenüber dieser Hintergrundstrahlung aufweist [19].

Insbesondere aufgrund dieser Beobachtungen hat es Überlegungen gegeben, die spezielle Relativitätstheorie mit einem übergeordneten Ruhezustand in Einklang zu bringen (z. B. „Relativität ohne Relativität“ [24]). Diese haben jedoch bisher nicht zu widerspruchsfreien Ergebnissen geführt. Details hierzu sind in Kap. 12.1 zusammengestellt.

Außerdem ist in letzter Zeit ein Problem durch die Messungen von Geschwindigkeiten größer als die des Lichts entstanden. Die bereits seit einigen Jahren von verschiedenen Forschungsgruppen durchgeführten Versuche zeigen, dass bei Tunnelexperimenten solche

1. Einführung

Geschwindigkeiten gemessen werden können. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ergeben sich jedoch große Unterschiede. Während einige Forscher der Überzeugung sind, dass trotz der Überlichtgeschwindigkeit keine Information mit dieser Geschwindigkeit übertragen werden kann, wird von anderen dies doch erwartet. Sollte letzteres der Fall sein, ist dies grundsätzlich nicht mit der Speziellen Relativitätstheorie kompatibel. Die Effekte werden im Detail erörtert.

Weitere theoretische Überlegungen führen zu einem großen Problem, das ein faszinierender Teil der heutigen Diskussionen innerhalb der Physik ist: Es besteht nämlich bereits seit längerem ein Konsens, dass die beiden fundamentalen physikalischen Theorien unserer Zeit, die (allgemeine) Relativitätstheorie und die Quantenmechanik sich widersprechen [20,25]. Insgesamt lässt sich feststellen, dass nach mehr als 110 Jahren seit der Präsentation der speziellen Relativitätstheorie noch viele Fragen offenbleiben. In dieser Ausarbeitung sollen daher einige Vorschläge zur Modifikation formuliert werden.

1.8 Inhalt dieser Zusammenstellung

Die Spezielle Relativitätstheorie stellt heute einen grundlegenden Standard innerhalb der Physik dar. Hierzu gibt es eine nahezu unüberschaubare Anzahl von Büchern, Literaturstellen und Vorlesungsskripten. Die hier vorliegende Ausarbeitung versteht sich als Ergänzung zu anderen Büchern zu diesem Thema, insbesondere dem hervorragenden Werk von Max Born (1882 -1970), einem Wegbegleiter und Freund Einsteins [26]. Das Buch erschien erstmals im Jahr 1920 und wird - versehen mit einigen notwendigen Ergänzungen - noch heute nachgedruckt. Neben dem theoretischen Teil, der zu Schulungszwecken bewusst einfach gehalten ist, sind hier auch die im 19. Jahrhundert erfolgten Entwicklungen der Physik sehr genau wiedergegeben. Dies gilt auch für das wichtige Thema Elektromagnetismus, das hier nur kurz gestreift wird.

Üblicherweise folgen Ausarbeitungen zur Speziellen Relativitätstheorie dem Schema, dass zunächst die Ergebnisse der klassischen Versuche dargestellt werden und darauf aufbauend die Theorie formuliert wird. Im vorliegenden Fall soll jedoch die Theorie als axiomatischer Rahmen gewählt und dann die sich daraus ergebenden Konsequenzen diskutiert werden. Wie sich zeigen wird, werden durch diese systematische Vorgehensweise auch zusätzliche Effekte erfasst, die sonst nicht im Fokus stehen aber für die Theorie eine große Bedeutung haben. Die sich ergebenden Berechnungen erfordern teilweise auch die Nutzung von numerischen Verfahren. Deren Ausführung ist jeweils in einer Anlage (A bis D) detailliert beschrieben.

Der zentrale Ansatz der dargestellten Untersuchungen ist dabei folgender: Es werden zunächst alle untersuchten Phänomene aus dem Blickwinkel eines ruhenden Beobachters dargestellt. Aufbauend hierauf wird untersucht, wie sich der gleiche Sachverhalt für einen bewegten Beobachter ergibt; hierzu wird ausschließlich der Formalismus der Lorentz-Transformation und der relativistischen Massenzunahme genutzt. Es wird sich zeigen, dass sich für eine Vielzahl von untersuchten Zusammenhängen die gleichen Ergebnisse für beide Beobachter einstellen.

Im Detail wird zunächst eine genaue Darstellung der Zusammenhänge innerhalb der Speziellen Relativitätstheorie wiedergegeben. Diese beginnt mit Untersuchungen zum

1.8 Inhalt dieser Zusammenstellung

Signalaustausch zwischen zwei relativ zueinander bewegten Beobachtern. Danach wird die Lorentz-Transformation aus den Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie (Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und Gleichwertigkeit von allen Inertialsystemen) abgeleitet.

Es wird außerdem der wichtige Teilbereich der Synchronisation von Ereignissen genauer betrachtet. Dies erfolgt zunächst auf Basis einer Synchronisierung mittels Signalaustausch, später auch durch Austausch von Uhren. In der Folge sind die Relationen zwischen mehreren bewegten Beobachten Gegenstand von Überlegungen. Außerdem werden auch die Verhältnisse beim Signalaustausch in bewegten transparenten Medien untersucht. Bei allen Beispielen ist festzustellen, dass die Gültigkeit der von Lorentz entwickelten Gleichungen gewährleistet ist.

Die in Kapitel 5 ausführlich dargestellte Synchronisation mit langsamem Uhrentransport enthält einige neue Ansätze zum eindeutigen Nachweis eines Nullresultats.

In Kap. 6 und 7 werden Betrachtungen zu den relativistischen Einflüssen auf Masse, Impuls, Kraft und Energie vorgenommen. Es werden ebenfalls Untersuchungen durchgeführt, deren Gegenstand die Verhältnisse während und nach Beschleunigungen sind. Dazu werden die Verhältnisse beim elastischen und plastischen relativistischen Stoß untersucht, und daraus abgeleitet wird die Beziehung für eine relativistische Raketengleichung aufgestellt. Es zeigt sich auch hierbei in allen Fällen, dass sich für einen als ruhend oder als bewegt angenommenen Beobachter keine Unterschiede bei den Betrachtungen ergeben.

Weiterführend weisen Untersuchungen zu den Verhältnissen beim Austausch von Signalen mit konstanter Frequenz neue Aspekte zur Interpretation von klassischen Versuchen auf. Es wird sich zeigen, dass beim Übergang zwischen zueinander bewegten Systemen nicht die Lichtgeschwindigkeit, sondern die Phasengeschwindigkeit des Lichts die relevante Größe ist. Hieraus ergibt sich, dass klassische Versuche wie das Michelson-Morley-Experiment und auch das Kennedy-Thorndike-Experiment, obgleich deren prinzipielle Aussagen erhalten bleiben, neu bewertet werden müssen.

Des Weiteren wird der Fall diskutiert, wenn Überlichtgeschwindigkeiten auftreten, die im Zusammenhang mit Tunnelexperimenten beobachtet werden. Wenn es in diesem Fall möglich ist Informationen zu übertragen, werden hierbei zwischen Identitäts- und Äquivalenzprinzip Widersprüche auftreten.

Es wird ein Vorschlag entwickelt, wie sich diese aufheben lassen. Dabei wird, abweichend zu der von Einstein gewählten Vorgehensweise, nicht ein Top-down Ansatz mit vorgegebenen Prinzipien gewählt. Stattdessen werden als Basis die Lorentz-Gleichungen verwendet und darüber hinaus der von Einstein aus dem Relativitätsprinzip abgeleitete relativistische Massenanstieg bei steigenden Relativgeschwindigkeiten. Deren Kombination in eine „Erweiterte Lorentz Theorie“ erlaubt es, alle in der Natur auftretenden Phänomene in gleicher Weise wie die Spezielle Relativitätstheorie zu beschreiben. Hierbei wird vorausgesetzt, dass eine Informationsübertragung mit Lichtgeschwindigkeit erfolgt. Sollte dies jemals mit Überlichtgeschwindigkeit möglich sein, so lässt sich die SRT nicht mehr aufrechterhalten, für die Erweiterte Lorentz-Theorie würde sich dann die Gelegenheit ergeben, die Lage eines Systems absoluter Ruhe zu bestimmen.

Zum Abschluss werden auf Basis dieser Überlegungen Klärungsversuche vorgeschlagen. Mit deren Hilfe können dann eindeutige Aussagen zur Gültigkeit der vorgeschlagenen Theorie erfolgen.