

2 Historische Entwicklung und Grundprinzipien der SRT

2.1 Äthertheorie

J.C. Maxwell hat mit den Maxwell-Gleichungen nicht nur der Theorie des Elektromagnetismus ihre heutige Gestalt gegeben (1861), sondern aus diesen auch selbst schon eine elektromagnetische Theorie des Lichts abgeleitet. 1888 gelang H. Hertz deren experimentelle Bestätigung, indem er mit Hilfe eines elektrischen Stromkreises elektromagnetische Wellen erzeugte und zeigte, daß diese die Eigenschaften von Licht aufweisen.

Trotz ihrer Erfolge setzte sich die Maxwellsche Theorie jedoch nur recht langsam durch – zu sehr waren die Physiker noch in mechanischen Vorstellungen verhaftet. Vielfach wurde versucht, die Maxwellsche Theorie durch mechanische Modelle zu deuten, unter anderem auch von L. Boltzmann. Die Vorstellung, daß es sich beim Licht um Schwingungen in einem als „Äther“ bezeichneten elastischen Medium handle, hatte schon 1818 A.J. Fresnel aufgebracht, um die Aberration des Sternenlichtes zu erklären. Nun bot es sich an, die Maxwell-Theorie aus elastischen Eigenschaften dieses Äthers abzuleiten. Maxwell selbst war davon überzeugt, daß es irgendeine Art von Äther geben müsse. In einem Artikel mit dem Titel „Äther“ schrieb er: „Es kann keinen Zweifel daran geben, daß die interplanetaren und interstellaren Räume nicht leer sind. Vielmehr müssen sie von einer materiellen Substanz oder einem Körper ausgefüllt sein, der sicher der größte und wahrscheinlich der gleichmäßigste aller Körper ist, die wir kennen.“ Maxwell selbst versuchte, eine Bremswirkung des Äthers auf die Bewegung der Erde um die Sonne nachzuweisen. Er berechnete auch die Zeit, die das Licht für den Weg von einer Lichtquelle durch den Äther zu einem Spiegel und zurück benötigt, und stellte fest, daß sich ein relativer Laufzeitunterschied von der Größenordnung v^2/c^2 (v = Äthergeschwindigkeit, c = Lichtgeschwindigkeit) ergeben müßte, wenn das Licht einmal parallel und ein zweites Mal senkrecht zur Ätherbewegung läuft. Geht man davon aus, daß sich die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne relativ zum Äther bewegt, so gibt ihre Umlaufgeschwindigkeit $v \approx 30$ km/s ein Maß für die beobachtbare Äthergeschwindigkeit. Mit $c \approx 300\,000$ km/s erforderte der Nachweis der unterschiedlichen Laufzeiten also eine relative Meßgenauigkeit von mindestens 10^{-8} . Maxwell hielt diese Meßgenauigkeit für nicht realisierbar und bemerkte, daß alle rein terrestrischen Experimente zum Nachweis des Äthers diese Genauigkeit erfordern würden. Daher wandte er sich astronomischen Beobachtungen zu, bei denen er durch Messungen von Lichtlaufzeiten zu verschiedenen Punkten der Erdbahn schon Effekte der Ordnung v/c erwarten konnte. Doch Maxwell starb (1879), bevor er Schlüsse aus entsprechenden Daten ziehen konnte.

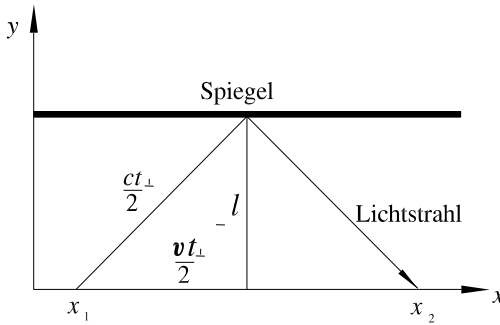


Abb. 2.1: Lichtverlauf senkrecht zur Bewegungsrichtung des Äthers in dessen Ruhesystem.

Im Jahre 1881 stellte A.A. Michelson fest, daß Maxwell die Genauigkeit der Meßmethoden unterschätzt hatte, und versuchte mit einem heute als Michelson-Interferometer bezeichneten Instrument, für das der Laufweg des Lichts in Abb. 2.2 dargestellt ist, Maxwells Effekt zweiter Ordnung nachzuweisen. Der Ausgang des Experimentes war negativ, und Michelson schloß: „Das Ergebnis der Hypothese eines stationären Äthers ist damit als unkorrekt nachgewiesen, und es ergibt sich die notwendige Schlußfolgerung, daß die Hypothese falsch ist“. Nachdem Michelson von H.A. Lorentz ein Fehler in seiner theoretischer Deutung des Experiments nachgewiesen worden war, wiederholte er dieses zusammen mit dem Chemiker E.W. Morley, abermals mit negativem Ausgang.

Wegen ihrer großen Bedeutung wollen wir uns die Berechnung der Maxwellschen Laufzeitdifferenz und das Michelson-Morley-Experiment etwas näher ansehen. Bei der Addition und Subtraktion von Geschwindigkeiten legen wir die Regeln der Newtonschen Mechanik (und damit deren Relativitätsprinzip) zugrunde. Läuft ein Lichtstrahl von einer Lichtquelle zu einem im Abstand l befindlichen Spiegel, so beträgt seine Geschwindigkeit bei Ausbreitung parallel zur Äthergeschwindigkeit $c+v$, wenn es mit dem Äther, und $c-v$, wenn es diesem entgegen läuft. Bei der Reflexion am Spiegel ist daher die Zeit für den Hin- und Rückweg zusammen durch

$$t_{\parallel} = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} = \frac{2l}{c} \frac{1}{(1-v^2/c^2)} \quad (2.1)$$

gegeben. Die Zeit t_{\perp} bei einem Lichtverlauf senkrecht zur Bewegungsrichtung des Äthers berechnet man am einfachsten in dem als **Ruhesystem** des Äthers bezeichneten Koordinatensystem, in dem der Äther ruht (Abb. 2.1). Bis das Licht von $y=0$ zum Spiegel bei $y=l$ und wieder zurück nach $y=0$ gelangt ist, hat die Lichtquelle die Strecke vt von x_1 nach x_2 zurückgelegt. Nach Abb. 2.1 gilt

$$\frac{v^2 t_{\perp}^2}{4} + l^2 = \frac{c^2 t_{\perp}^2}{4} \Rightarrow t_{\perp} = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (2.2)$$

Der relative Zeitunterschied der beiden Messungen beträgt

$$\frac{t_{\parallel} - t_{\perp}}{t_{\perp}} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \approx \frac{v^2}{2c^2}.$$

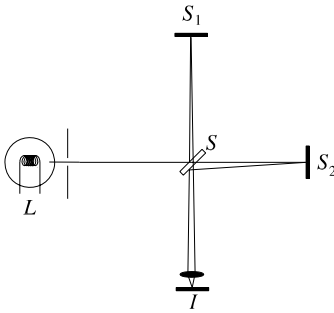


Abb. 2.2: Laufweg des Lichts beim Michelson-Morley-Experiment.

In Abb. 2.2 ist der prinzipielle Aufbau des Michelson-Morley-Experiments dargestellt. Das von einer Lichtquelle L kommende Licht wird an einem halbdurchlässigen Spiegel S teils reflektiert, teils von diesem durchgelassen, an Spiegeln S_1 und S_2 reflektiert und schließlich auf einem Schirm I zur Interferenz gebracht. Bewegt sich die ganze Anordnung relativ zum Äther, so ergibt sich für das an S_1 bzw. S_2 reflektierte Licht ein Laufzeitunterschied. Dieser verändert sich, wenn man die ganze Anordnung relativ zur Richtung der Ätherbewegung dreht, und dabei müßte sich eine Veränderung des Interferenzbildes ergeben. Falls die Geschwindigkeit des Äthers zu einer bestimmten Jahreszeit gerade mit der der Erde übereinstimmen sollte, könnte zu dieser kein Laufzeiteffekt gemessen werden. Dann müßte sich aber zu einer anderen Jahreszeit ein meßbarer Effekt ergeben. Nichts von dem wurde je beobachtet, zu allen Jahreszeiten ergibt sich stets dasselbe negative Ergebnis. Die Idee eines statischen Äthers, der entweder im Planetensystem ruht oder sich gleichförmig gegen diesen bewegt, mußte damit aufgegeben werden. R. Descartes Idee, daß sich die Erde womöglich in einem großen Ätherwirbel überall gerade mit dem Äther mitbewegt, führte zu inakzeptablen Konsequenzen hinsichtlich der astronomischen Beobachtungen.

Der Ausweg, den unabhängig voneinander G.F. Fitzgerald (1889) und H.A. Lorentz (1892) vorschlugen, bestand in der Annahme, daß der Äther die zwischenmolekularen Kräfte beeinflusst. Dabei solle es sich um eine dynamische Beeinflussung handeln, die zu einer Kontraktion aller materiellen Körper in der Richtung parallel zur Ätherbewegung führt. Wir können uns leicht klar machen, wie diese Annahme den negativen Ausgang des Michelson-Morley-Experiments mit der Ätherhypothese in Einklang bringt. Setzen wir in (2.1) und (2.2) $t_{\parallel} = t_{\perp} = t$, ersetzen dafür aber in (2.1) l durch l_{\parallel} und in (2.2) l durch l_{\perp} , so erhalten wir

$$l_{\perp} = \frac{ct}{2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{und} \quad l_{\parallel} = \frac{ct}{2} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} l_{\perp}. \quad (2.3)$$

Die Verkürzung von l_{\parallel} gegenüber l_{\perp} wird heute als **Lorentz-Kontraktion** bezeichnet.

Fitzgeralds Kontraktionshypothese war qualitativer Natur, er sprach nur von einer Kontraktion um einen Betrag, der von v^2/c^2 abhängt. Lorentz gab zunächst den Kontraktionsfaktor $(1 - v^2/c^2)$, also eine Näherung an den exakten Faktor, an. Erst in seinen späteren Arbeiten über die Lorentz-Transformation findet sich der korrekte Wert. Damit kommen wir zu der interessanten Geschichte der Entdeckung der Lorentz-Transforma-

tionen.

Die Maxwell-Gleichungen sind invariant gegenüber den Transformationen

$$x' = \kappa \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = \kappa y, \quad z' = \kappa z, \quad t' = \kappa \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (2.4)$$

in denen κ eine beliebige Konstante ist. Wir werden uns in diesem Buch nur für den Fall $\kappa=1$ reziproker Transformationen interessieren, in denen Hin- und Rücktransformation genau dieselbe Form besitzen. Nur er soll gemeint sein, wenn im weiteren von der Lorentz-Transformation gesprochen wird. Der Fall $\kappa \neq 1$ bedeutet nur eine nicht weiter interessante zusätzliche Streckung oder Kürzung der Koordinaten.

1895 gab Lorentz die Transformationsgleichungen

$$x' = x - vt, \quad t' = t - vx/c^2 \quad (2.5)$$

an und zeigte, das sie das elektromagnetische Feld bis zu Termen der Ordnung v/c invariant lassen, wenn man für dieses eine passende Transformation wählt. Setzt man in (2.4) $\kappa = \sqrt{1 - v^2/c^2}$, so erhält man (2.5), d. h. bis auf den Skalenfaktor ist (2.5) schon die richtige Lorentz-Transformation. Die von Lorentz angegebenen Feldtransformationen waren allerdings noch nicht korrekt. 1899 gab Lorentz die Transformationsgleichungen (2.4) an und bemerkte dazu, daß sie die von ihm geforderte Kontraktion enthielten. (Der Skalenfaktor κ spielt für diese keine Rolle.) Hinsichtlich des Skalenfaktors meinte er, daß dieser sich „durch ein tieferes Verständnis der Phänomene“ bestimmen lassen müsse. Dies gelang ihm schließlich in einem 1904 publizierten Übersichtsartikel, in welchem er den Wert von κ aus den Transformationseigenschaften der Bewegungsgleichungen eines Elektrons in einem äußeren Feld zu eins bestimmte.

Ohne daß Lorentz davon erfahren hatte, war ihm allerdings schon ein anderer zuvor gekommen: In einer Arbeit des Jahres 1898 mit dem Titel „Äther und Materie“, die 1900 publiziert wurde, hatte J. Larmor schon die vollständigen Transformationsgleichungen (2.4) (mit $\kappa=1$) aufgestellt.

In seinem Übersichtsartikel des Jahres 1904 bewies Lorentz auch die Invarianz der inhomogenen Maxwell-Gleichungen gegenüber Lorentz-Transformationen bis zu Termen der Ordnung v/c . Daß ihm der vollständige Invarianzbeweis mißlang, ist auf einen Rechenfehler zurückzuführen. 1905 bewies schließlich H. Poincaré in Strenge die Lorentz-Invarianz der Maxwellschen Vakuumgleichungen (d. h. der Maxwell-Gleichungen für den Fall verschwindender Ladungen und Ströme).

Nicht übergangen werden soll hier die Tatsache, daß die Lorentz-Transformationen bis auf den richtigen Skalenfaktor schon 1887 von W. Voigt aufgestellt worden waren. In einer Arbeit, die sich mit Oszillationen eines elastischen, inkompressiblen Mediums befaßt, hatte Voigt gezeigt, daß die Wellengleichung

$$\Delta \Phi - \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.6)$$

gegenüber Transformationen der Form

$$x' = x - vt, \quad y' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{\omega^2}} y, \quad z' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{\omega^2}} z, \quad t' = t - \frac{vx}{\omega^2} \quad (2.7)$$

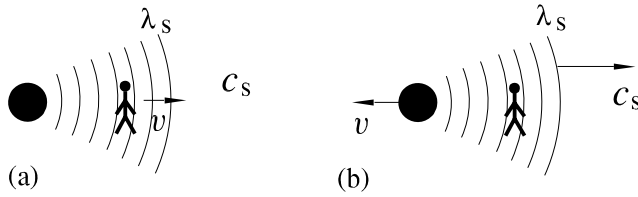


Abb. 2.3: Doppler-Effekt: (a) bewegter Beobachter, (b) bewegte Schallquelle.

invariant ist. Wenn man ω mit der Lichtgeschwindigkeit c identifiziert und in (2.4) für den Skalenfaktor $\kappa = \sqrt{1 - v^2/c^2}$ setzt, erhält man aus (2.4) die Voigtschen Transformationsgleichungen. Ihr einziger Schönheitsfehler besteht darin, daß sie nicht reziprok sind. Voigts Ergebnis wurde von seinen Physikerkollegen allerdings völlig ignoriert. Als es später von anderen wiederentdeckt wurde, hatte die Allgemeinheit der Physiker Voigt vergessen. Lorentz selbst machte allerdings in seinem berühmten, 1909 publizierten Buch „Die Theorie des Elektrons“ auf Voigts Verdienste aufmerksam. In einer Fußnote seines Buches steht: „In einer Arbeit ‘Über das Dopplersche Prinzip’ aus dem Jahre 1887 . . . , die in all diesen Jahren leider meiner Aufmerksamkeit entgangen ist, hat Voigt auf Gleichungen der Form . . . eine Transformation angewandt, die den Formeln . . . äquivalent ist. Die Idee der obigen Transformationen hätte daher von Voigt übernommen werden können, und der Beweis, daß sie die Form der Gleichungen für den freien Äther nicht verändern, ist in seiner Arbeit enthalten.“

Es ist interessant, der Frage nachzugehen, wieso man aus den heute als falsch erkannten Äthervorstellungen, die hinter all den bisher besprochenen Arbeiten stehen, dennoch zu den richtigen Transformationsgleichungen gelangen konnte. Um besser einschätzen zu können, wie erstaunlich das ist, wollen wir zunächst das Phänomen des Doppler-Effekts bei Schall und bei Licht vergleichen. Beginnen wir mit dem Doppler-Effekt des Schalls.

Schallwellen breiten sich in Luft als Trägermedium mit der Geschwindigkeit c_s aus. Bewegt sich nun ein Beobachter mit der konstanten Geschwindigkeit v von einer in der Luft ruhenden Schallquelle weg (Abb. 2.3 (a)), so ist seine Relativgeschwindigkeit gegenüber den Schallwellen $c_s - v$. In der Zeit t kommen an ihm $N = (c_s - v)t / \lambda_s$ Schallwellen vorbei, wenn λ_s die Wellenlänge der Schallwellen angibt, und er hört die Frequenz

$$\nu' = \frac{N}{t} = \frac{c_s - v}{\lambda_s} = \nu \left(1 - \frac{v}{c_s} \right), \quad (2.8)$$

wobei $\nu = c_s / \lambda_s$ die Frequenz der Schallwellen für einen gegenüber der Luft ruhenden Beobachter ist.

Befindet sich der Beobachter gegenüber der Luft in Ruhe und bewegt sich dagegen die Schallquelle mit der Geschwindigkeit v vom Beobachter weg (Abb. 2.3 (b)), so vergrößert sich die Wellenlänge der Schallwellen auf $\lambda'_s = \lambda_s + v/\nu = (c_s + v)/\nu$. In der Zeit $1/\nu$, die das erste Dichtemaximum zum Durchlaufen der Strecke λ_s benötigt und die bis zur Emission des zweiten Dichtemaximums vergeht, hat sich die Schallquelle um die Strecke v/ν entfernt. Am Beobachter ziehen in der Zeit t jetzt $N = c_s t / \lambda'_s$ Schallwellen

vorbei, und er hört die Frequenz

$$\nu' = \frac{N}{t} = \frac{\nu}{1 + v/c_s} = \nu \left(1 - \frac{v}{c_s} + \frac{v^2}{c_s^2} - \dots \right). \quad (2.9)$$

Gegenüber (2.8) besteht also ein Unterschied von der Größenordnung v^2/c_s^2 . Dieser Unterschied spiegelt die physikalische Asymmetrie zwischen den in Abb. 2.3 (a) und (b) dargestellten Situationen wieder. Das Ruhesystem des Trägermediums Luft ist gegenüber allen anderen Inertialsystemen ausgezeichnet, und es kommt auch auf die Relativbewegung von Sender und Empfänger gegenüber diesem an, nicht nur auf ihre gegenseitige Relativbewegung.

Anders als der des Schalls ist der Doppler-Effekt des Lichts im Vakuum unabhängig davon, ob die Lichtquelle ruht und der Beobachter sich bewegt oder umgekehrt. Für beide Fälle liefert die SRT (bzw. die Maxwell'sche Theorie) das einheitliche Ergebnis

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}, \quad (2.10)$$

das in Abschn. 5.9 abgeleitet wird. Gäbe es einen Äther, so müßte man stattdessen zwischen den Situationen der Abb. 2.3 (a) und (b) unterscheiden können und erhielte statt (2.10) die Ergebnisse (2.8) bzw. (2.9) mit $c_s \rightarrow c$.

Wie konnte Voigt nun ausgerechnet in einer Arbeit über den Doppler-Effekt die richtigen Transformationsformeln finden? Hier muß man sich zunächst klar machen, daß Gleichung (2.6) nur für den Fall $\omega=c$ im relativistischen Sinn **lorentz-invariant** ist, also bei Lorentz-Transformationen ihre Form beibehält. Wenn man für ω die Schallgeschwindigkeit irgendeines Mediums einsetzt, ist sie weder lorentz- noch galilei-invariant, denn das Ruhesystem des Trägermediums ist vor allen anderen Inertialsystemen ausgezeichnet. Dies bedeutet, daß man in diesem Falle die Gleichungen (2.7) gar nicht als Transformationsgleichungen zwischen Inertialsystemen interpretieren darf, vielmehr besitzen diese dann nur den Charakter von Substitutionen, mit deren Hilfe man bequem von einem Satz Lösungen zu einem anderen gelangen kann. Genau in diesem Sinne wurden sie auch von Voigt selbst interpretiert. Und genau dasselbe gilt auch dann noch, wenn man (2.6) mit $\omega=c$ als Wellengleichung des Lichts benutzt, solange man dieses als Schwingungen eines elastischen Äthers interpretiert. Dementsprechend betrachtete auch Lorentz seine Transformationsgleichungen nur als ein bequemes mathematisches Hilfsmittel.

Die vorangegangene Diskussion macht deutlich, wie physikalisch bedeutsam der Schritt Albert Einsteins war, als er im Jahre 1905 die Lorentz-Transformation nicht als Substitution sondern als reale Transformation zwischen Inertialsystemen auslegte. Interessant ist, daß Einsteins Denken viel weniger vom negativen Ausgang des Michelson-Morley-Experiments beeindruckt wurde – er konnte sich später nicht einmal mehr daran erinnern, ob er davon schon vor dem Verfassen seiner SRT gehört hatte –, als von einem Experiment, das A.H.L. Fizeau schon 1851 durchgeführt hatte.

Abb. 2.4 stellt den prinzipiellen Aufbau des Fizeauschen Experiments dar. Aus einem kohärenten Lichtstrahl werden zwei Teilstrahlen ausgeblendet, von denen einer durch ruhendes, der zweite durch strömendes Wasser geschickt wird. Beide Teilstrahlen

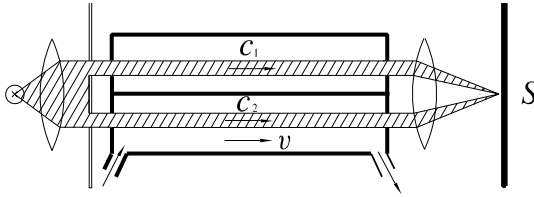


Abb. 2.4: Aufbau des Fizeau- Experiments.

werden anschließend auf einem Schirm S zur Interferenz gebracht. Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit beider Teilstrahlen können an der Verschiebung der Interferenzstreifen gemessen werden, wenn man die Strömungsgeschwindigkeit von null auf einen endlichen Wert v anwachsen läßt.

Unter Vorgriff auf das relativistische Additionstheorem (3.35) von Geschwindigkeiten,

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2 / c^2},$$

leiten wir den korrekten Wert von c_2 ab. Die Lichtgeschwindigkeit in einem brechenden Medium ist c/n . Strömt dieses mit der Geschwindigkeit v , so sind $v_1 = v$ und $v_2 = c/n$ nach der relativistischen Formel zu addieren, mit dem Ergebnis

$$c_2 = \frac{c/n + v}{1 + v c / (n c^2)} \approx \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right). \quad (2.11)$$

Das genäherte Ergebnis war auch das, was Fizeaus Messungen ergaben. Um es mit der Äthertheorie in Einklang zu bringen, mußte man zu sehr merkwürdigen Vorstellungen greifen: Um die Ausbreitung des Lichts in der Flüssigkeit überhaupt zu verstehen, mußte angenommen werden, daß der Äther die Flüssigkeit durchsetzt. Blicke der Äther von der Flüssigkeitsbewegung unberührt, so müßte sich $c_2 = c/n$ ergeben, würde er jedoch von ihr mitgenommen, so hätte man $c_2 = c/n + v$. Die Messung ergibt jedoch eine um den Faktor $(1 - 1/n^2)$ reduzierte „Mitführung“ des Äthers, die von dem Brechungsindex n der Flüssigkeit abhängt. Schon A.J. Fresnel hatte eine Ableitung des Näherungsergebnisses für c_2 gegeben. Bei ihm ergab sich der Frenelsche Faktor $(1 - 1/n^2)$ aus einem Kompromiß zwischen der Tendenz der Flüssigkeit, das Licht mitzunehmen, und der Tendenz des ruhenden Äthers, das Licht zurückzuhalten.

Für Einstein waren die Aberration des Sternenlichtes und die Ergebnisse des Fizeauschen Experiments nach eigenem Bekunden schon ausreichend, um ihn am Ätherkonzept zweifeln zu lassen und für eine neue Theorie zu motivieren.

2.2 Relativitätspostulat und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Einstein verfaßte seine berühmte Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ 1905, ohne die Arbeiten von Larmor, Lorentz und Poincaré mit den Transformationsformeln

(2.4) gekannt zu haben. Ihm war natürlich bekannt, daß zwar die Newtonsche Mechanik, nicht jedoch die Maxwell-Theorie galilei-invariant ist.¹ Da alle Naturgesetze vom momentanen Bewegungszustand der Erde unabhängig sind, ergab sich als ein möglicher Ausweg aus dieser Situation, die Maxwell-Theorie als falsch aufzugeben. Dagegen sprach jedoch deren großer Erfolg und die große Präzision, mit der die von ihr vorhergesagten Ergebnisse experimentell bestätigt waren. Diese war viel höher als die Präzision mechanischer Experimente. Eine zweite Alternative bestand in der zur Zeit Einsteins allgemein üblichen Akzeptanz des Äthermodells. Diese implizierte aber ganz zwangsläufig, das Ruhesystem des Äthers als ein Koordinatensystem aufzufassen, das vor allen anderen ausgezeichnet ist. Besonders in Anbetracht des Fizeauschen Mitführungsexperiments lag Einstein diese Haltung überhaupt nicht. Er entschied sich für eine dritte Möglichkeit: Wenn die Gesetze des Elektromagnetismus wegen ihrer hervorragenden experimentellen Bestätigung als richtig aufgefaßt werden müssen, und wenn andererseits die Naturgesetze in allen Inertialsystemen in gleicher Weise gelten sollen, mußte zwangsläufig die Newtonsche Mechanik korrekturbedürftig sein. Abgesehen davon, daß Einstein noch einmal unabhängig die Lorentz-Transformationen abgeleitet und die Invarianz der Maxwell-Gleichungen gegenüber diesen bewiesen hat, bestand seine große Leistung darin, daß er deren physikalischen Inhalt entdeckte, damit den Begriffen Raum und Zeit einen neuen Sinn verlieh, und darüber hinausgehend eine neue, relativistische Mechanik aufstellte.

Einstein leitete die SRT aus den folgenden zwei Grundpostulaten ab:

Relativitätspostulat. *Alle Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen dieselbe Form an.*

Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. *Die Vakuumlichtgeschwindigkeit hat in allen Inertialsystemen stets denselben Wert $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\approx 3\cdot 10^8$ m/s (ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante des Vakuums, μ_0 = Permeabilität des Vakuums).*

Inertialsysteme sind dabei wie in der klassischen Mechanik definiert: S ist ein Inertialsystem, wenn alle kräftefreien Bewegungen, die ein Massenpunkt in ihm ausführt, geradlinig und gleichförmig verlaufen (siehe *Mechanik*, Abschn. 2.2.2). Daß man sich nicht in einem Inertialsystem befindet, macht sich durch das Auftreten von Scheinkräften bemerkbar.

Das Relativitätspostulat ist das wichtigere der beiden Postulate. Das Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit kann auch durch andere Postulate ersetzt werden und wäre überhaupt überflüssig gewesen, wenn man zur Zeit Einsteins schon die relativistische Mechanik gekannt hätte (siehe unten). Die Gesetze der klassischen Mechanik stehen in Einklang mit dem ersten Postulat: Sie lauten in allen Inertialsystemen gleich, wenn eine Galilei-Transformation zugrunde gelegt wird. Auch die Gesetze der Elektrodynamik sind mit dem Relativitätspostulat vereinbar, denn sie sind invariant gegenüber Lorentz-Transformationen. Das Relativitätspostulat fordert aber die Invarianz beider Theorien gegenüber ein und derselben Transformation, und darum muß eine der

1 Ein Beweis dafür wurde im Teil *Elektrodynamik*, Abschn. 3.3.8 angegeben.

beiden abgeändert werden. Die Elektrodynamik hat zusammen mit dem Relativitätspostulat zur Folge, daß die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen gleich ist. Nach der klassischen Mechanik dagegen unterscheidet sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in verschiedenen Inertialsystemen um deren Relativgeschwindigkeit. Nur die Elektrodynamik ist daher mit beiden Postulaten verträglich, und die klassische Mechanik muß aufgegeben werden, wenn beide Postulate gelten sollen. Statt der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hätte Einstein auch die Gültigkeit der Elektrodynamik in allen Inertialsystemen fordern können. Er reduzierte diese Forderung auf ein Minimum, indem er aus der ganzen Theorie des Elektromagnetismus nur ein Ergebnis übernahm: In jedem Inertialsystem ergibt sich als Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Vakuum immer derselbe Wert c .

Im Zusammenhang mit dem Relativitätspostulat benutzt man heute das Wort **Kovarianz**. Gemeint ist damit Folgendes: Eine physikalische Theorie heißt kovariant, wenn eine Transformation zwischen verschiedenen Koordinatensystemen existiert derart, daß sie in allen betrachteten Systemen – in der SRT handelt es sich dabei um Inertialsysteme – die gleiche Form annimmt.

Die klassische Mechanik ist kovariant, denn sie ist invariant gegenüber Galilei-Transformationen. Die Maxwell-Theorie ist kovariant, denn sie ist lorentz-invariant. Klassische Mechanik und Maxwell-Theorie zusammengekommen sind nicht kovariant, da sie nicht gegenüber derselben Transformation invariant sind. Durch Abänderung der klassischen Mechanik können sie jedoch gemeinsam gegenüber der Lorentz-Transformation invariant gemacht und damit zu einer kovarianten Theorie zusammengefaßt werden. Auch Gleichungen, denen man ihre Invarianz aufgrund einer geeigneten Darstellung unmittelbar ansehen kann, bezeichnet man als **kovariant**, manchmal auch als **manifest kovariant**.

2.3 Raum-Zeit-Struktur der SRT

In der SRT werden über den Raum folgende Annahmen gemacht: *Der Raum ist homogen* (kein Raumpunkt ist vor anderen Raumpunkten ausgezeichnet) *und isotrop* (keine Richtung des Raumes ist gegenüber anderen Richtungen ausgezeichnet). *Die Metrik des Raumes ist euklidisch*. (Die Winkelsumme im Dreieck beträgt 180° , und die kürzeste Verbindung zweier Punkte ist eine Gerade; dabei wird als Gerade jede Raumkurve definiert, die bei allen Rotationen, die zwei Punkte invariant lassen, insgesamt in sich selbst überführt wird.) Erst in der ART muß die Euklidizität des Raumes aufgegeben werden. Abweichungen von der Euklidizität erweisen sich aber im allgemeinen als so klein, daß die Aussagen der SRT auch in der ART für viele Fragen als Näherungen mit hervorragender Genauigkeit gültig bleiben.

Längenmessungen werden in bekannter Weise durch das Aneinanderlegen von Maßstäben durchgeführt. Die Grundlage für diese Meßvorschrift bildet das Relativitätsprinzip in Kombination mit der Homogenität und Isotropie des Raumes: Danach liefern in einem Inertialsystem ruhende Maßstäbe gleicher Bauart unabhängig davon, wo sie sich befinden, dasselbe Meßergebnis.

Auch die Zeit wird in der SRT als homogen angenommen. (Kein Zeitpunkt ist ausgezeichnet.) Außerdem fordern wir die Gültigkeit des folgenden Kausalitätsprinzips.

Kausalitätsprinzip. *Läßt sich von zwei Ereignissen das erste als Ursache des zweiten erklären, so muß das zweite für jeden Beobachter später als das erste stattgefunden haben.*

Plakativ gesagt: Die Henne ist älter als das von ihr gelegte Ei. Etwas wissenschaftlicher ist das folgende Beispiel.

Beispiel 2.1: Zum Kausalitätsprinzip

In Abb. 2.5 läuft Licht durch ein Rotfilter auf einen Spiegel zu und wird an diesem reflektiert. Ein Beobachter in der Mitte zwischen Filter und Spiegel sieht sowohl das vom Filter als auch

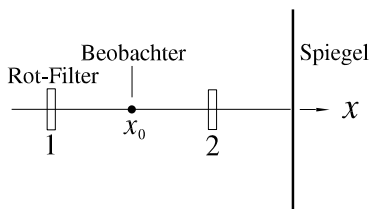


Abb. 2.5: Zum Kausalitätsprinzip.

das vom Spiegel kommende Licht rot verfärbt. Befindet sich das Filter zwischen Beobachter und Spiegel, so sieht der Beobachter nur das von rechts kommende Licht verfärbt. Er urteilt daher, daß die Rotfärbung des von rechts kommenden Lichts im ersten Fall kausal dadurch bedingt ist, daß schon das von links kommende Licht verfärbt war. Der Zeitpunkt, zu dem das von links kommende Licht den Beobachtungsort x_0 passiert, liegt also früher als der Zeitpunkt, zu dem das reflektierte Licht diesen Ort erreicht.

Die hier vorgenommene absolute zeitliche Einordnung von Ereignissen in früher und später wurde nur dadurch möglich, daß diese am gleichen Ort stattfanden. Wir werden sehen, daß die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen an verschiedenen Orten von verschiedenen Beobachtern unter Umständen unterschiedlich beurteilt wird.

Haben zwei Experimente denselben Aufbau, sind sie denselben Bedingungen unterworfen und haben sie denselben Anfangszustand, so vergeht in ihnen nach dem Relativitätspostulat bis zum (ersten) Eintreten desselben Folgezustands dieselbe Zeit. Bei periodischen Vorgängen ist die Zeitdauer einer Periode immer gleich. Diese Folge des Relativitätspostulats kann dazu benutzt werden, festzulegen, wie Zeit gemessen werden soll. Man benutzt dazu als Uhren bezeichnete baugleiche Vorrichtungen, in denen periodische Vorgänge ablaufen, sorgt dafür, daß diese bei der Zeitmessung denselben Bedingungen unterworfen sind, und mißt die Zeit durch die Anzahl der durchlaufenen Perioden.

Theoretische Physik: Relativitätstheorie und Kosmologie

Rebhan, E.

2012, XVIII, 608 S., Softcover

ISBN: 978-3-8274-2314-6