

Unverkäufliche Leseprobe aus:

Domenico Giulini
Spezielle Relativitätstheorie

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Text und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.

© S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main

SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE

GRUNDRISS

1. Herkunft und Bedeutung der Speziellen Relativitätstheorie	3
2. Historische Entwicklung	6
2.1 Das dualistische Materiekonzept des 19. Jahrhunderts	6
2.2 Das Relativitätsprinzip der Mechanik	10
2.3 Gilt das Relativitätsprinzip in der Elektrodynamik?	19
2.4 Experimente, Widersprüche und Konsequenzen	21
3. Grundzüge der SRT	38
3.1 Der Begriff der Gleichzeitigkeit	43
3.2 Die Lorentz-Transformation	47
3.3 Längenkontraktion und Zeitdilatation	53
3.4 Geschwindigkeitsaddition	56
3.5 Kausalitätsverhältnisse	59
3.6 Aberration und Doppler-Effekt	62
3.7 Längenkontraktion und visuelle Erscheinung	66
3.8 Masse, Impuls und kinetische Energie	68
3.9 Die wohl berühmteste Formel der Physik	73
3.10 Elektrodynamik: Invarianz der Maxwell-Gleichungen	79
4. Weitere Konsequenzen und Anwendungen der SRT	82
4.1 Atomphysik	82
4.2 Kernphysik	83
4.3 Elementarteilchenphysik	87
4.4 Alltagsphysik: Navigationssysteme	92
4.5 Science-Fiction: Reisen zu anderen Sternen?	96
4.6 Ausblick auf die Allgemeine Relativitätstheorie	99

VERTIEFUNGEN

Die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustand der Quelle	103
Gibt es Überlichtgeschwindigkeiten?	106
Das Experiment von Kennedy und Thorndike	111
Das Experiment von Ives und Stilwell	116
Der derzeitige experimentelle Status der SRT	117
Synchronisation durch Transport von Uhren	120

ANHANG

Glossar	123
Symbole, Einheiten und Konstanten	126
Literaturhinweise	127

1. HERKUNFT UND BEDEUTUNG DER SPEZIELLEN RELATIVITÄTSTHEORIE

Das Jahr 1905 wird allgemein als Einsteins Annus Mirabilis bezeichnet. In diesem Jahr veröffentlichte der damals gerade 26 Jahre alte Albert Einstein (1879–1955) – zu dieser Zeit Patentamtsangestellter in Bern und in den wissenschaftlichen Kreisen ein noch weitgehend unbeschriebenes Blatt – fünf Arbeiten, von denen jede Physikgeschichte schrieb. In der ersten Arbeit entwickelte er seine so genannte Lichtquantenhypothese und erklärte damit den Photoelektrischen Effekt, was ihm 1922 den Nobelpreis (für das Jahr 1921) einbrachte. Einzig diese Arbeit bezeichnete Einstein selbst einmal als »sehr revolutionär«. Die zweite war seine Dissertation, in der er eine mathematische Beziehung zwischen der wahren Größe von Molekülen einer gelösten Substanz und der Viskosität der Lösung ableitete. Durch die zahlreichen Anwendungen, die diese Beziehungen in der Petrochemie besitzt, war diese Arbeit Einsteins bis in die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts nachweislich seine meistzitierte und ist es möglicherweise immer noch. Die dritte Arbeit handelt von der statistischen Theorie der Wärme, die Einstein benutzte, um die damals phänomenologisch längst bekannte, aber theoretisch unverstandene so genannte Brown'sche Bewegung als statistische Schwankungserscheinung zu erklären. (Unter »Brownscher Bewegung« versteht man allgemein eine irreguläre Zitterbewegung von sehr kleinen – jedoch mit dem Mikroskop noch beobachtbaren – in Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.) Damit war eine direkt beobachtbare Konsequenz der aufgrund ihres fundamental atomistischen Ansatzes damals noch umstrittenen statistischen Wärmetheorie gewonnen, die ihr letztendlich zum Durchbruch verhalf. Die vierte Arbeit trägt den Titel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* und beinhaltet im Wesent-

lichen das, was wir heute die Spezielle Relativitätstheorie nennen und im Folgenden mit »SRT« abkürzen werden. Die fünfte Arbeit ist der vierten direkt zugeordnet und enthält als Nachtrag auf drei Druckseiten die Ableitung der mittlerweile wohl berühmtesten Gleichung der Physik: $E = mc^2$.

Die SRT ist eine *Rahmentheorie* und keine Theorie eines wohlumrissenen Phänomenbereichs, obwohl sie aus einer solchen hervorgegangen ist, wie bereits der Titel der Originalarbeit feststellt. Die Elektrodynamik bewegter Körper bzw. Medien war eines der großen Themen sowohl der theoretischen als auch der experimentellen Physik des ausgehenden 19. und beginnenden 20. Jahrhunderts, die sich zunehmend in Widersprüche verwickelte, bis schließlich Einstein mit seiner Arbeit den Gordischen Knoten auf überraschende Weise zerschlug: nicht durch eine raffinierte Verbesserung desjenigen Theorieteils, der den direkten Anschluss an die zur Erklärung stehenden Phänomene hält, sondern durch eine grundsätzliche Hinterfragung unerschütterlich geglaubter Begriffe betreffend raumzeitliche Feststellungen wie die eines »räumlichen Abstands«, einer »zeitlichen Dauer« oder einer »Gleichzeitigkeit«.

Da sich aber *alle* physikalischen Prozesse in Raum und Zeit abspielen, betrifft die damit eingeläutete Revision raum-zeitlicher Begriffe auch die gesamte Physik. Obwohl also die SRT ihre Entstehung spezifischen Fragestellungen der Elektrodynamik verdankt, ist sie logisch nicht an diese gebunden. Mit Ausnahme der Gravitation, die durch die Allgemeine Relativitätstheorie beschrieben wird, werden alle weiteren fundamentalen Wechselwirkungen – der Elektromagnetismus, die Kernkraft oder starke Wechselwirkung und die schwache Wechselwirkung – heute durch Theorien beschrieben, die den Axiomen der SRT genügen. Insbesondere trifft dies für das Standardmodell der Elementarteilchen zu, in dem die letzten drei der genannten Wechselwirkungen theoretisch zusammengefasst sind. Die moderne Hochenergie- und Teilchenphysik ist ohne die SRT nicht denkbar.

Aber nicht nur in der der Alltagserfahrung eher fern stehenden Welt der Elementarteilchen ist die SRT von grundlegender Bedeutung. So basieren zum Beispiel moderne Technologien der Navigation und Geodäsie ganz wesentlich auf Prinzipien der SRT, insbesondere der *Universalität der Lichtgeschwindigkeit*. Damit meint man, dass die Lichtgeschwindigkeit, die ein Beobachter misst, sowohl unabhängig vom Bewegungszustand des Beobachters als auch vom Bewegungszustand der Licht aussendenden Quelle ist.

Es ist nicht zu bestreiten, dass gewisse Ergebnisse der SRT für das am Alltagsgeschehen sich intuitiv herausgebildete Verständnis raumzeitlicher Relationen durchaus paradoxe Züge tragen können, wobei hier ausdrücklich die Unterscheidung von »paradox«, also »der (hergebrachten) Meinung entgegen«, zu »widersprüchlich« im logischen Sinne gemacht wird. Logische Widersprüche treten in der SRT nicht auf. Physikalisch hat diese Situation ihren Ursprung in der Größe der Lichtgeschwindigkeit, deren genauer Wert in Einheiten von Kilometer (km) pro Sekunde (s) gegeben ist durch:

$$c = 299\,792,458 \frac{\text{km}}{\text{s}} . \quad (1)$$

Diese enorme Geschwindigkeit ist bei Weitem größer als alle Geschwindigkeiten, die uns im Alltag anhand materieller Objekte begegnen. Es ist deshalb nur allzu natürlich, dass unser Alltagsverstand von einer instantanen Lichtausbreitung ausgeht. Wie wir jedoch sehen werden, erzwingt die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit und ihr Charakter als Grenzggeschwindigkeit aller Signalgeschwindigkeiten eine Revision der raumzeitlichen Alltagsbegriffe, insbesondere dem der Gleichzeitigkeit räumlich distanter Ereignisse. Bis heute haben sich die von der SRT gelieferten Konzepte von Raum und Zeit überall dort vollständig bewährt, wo von einer wesentlichen Einflussnahme der Gravitation abgesehen werden kann. In diesem Bereich testen moderne Präzisionsexperimente immer wieder ihre Voraussetzungen und fanden bis heute keinerlei Anzeichen einer Abweichung.

2. HISTORISCHE ENTWICKLUNG

2.1 Das dualistische Materiekonzept des 19. Jahrhunderts

Im Jahre 1687 erschienen in London die »Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie«, bis heute kurz *die Principia* genannt, des englischen Physikers und Mathematikers Isaac Newton (1643–1727). In diesem Epoche machenden Werk, das die mathematisch-physikalische Disziplin der Mechanik bis heute wie kein zweites prägt, legte Newton in mathematischer Sprache eine physikalische Theorie dar, die es erlaubt, die Bewegung von Himmelskörpern mit den gleichen Begriffen zu beschreiben wie irdische Bewegungsvorgänge. Allgemein redet Newton von »Körpern«, die man sich aufgebaut denken soll aus kleinsten, unendlich harten, ewig beständigen und unveränderlichen Teilen, die selbst aber nicht weiter beschrieben werden. Mit Hilfe dieses Konzepts idealer Punktteilchen (bis heute ist in der Physik das Konzept des »Newton'schen Punktteilchens« geläufig) gelingt es Newton, die Bewegung komplizierter zusammenhängender Konfigurationen solcher Teilchen auf die Bewegungsgesetze dieser Teilchen zurückzuführen, sofern einfache Annahmen über die zwischen den Punktteilchen wirkenden Kräfte gemacht werden. Wenn man sich fragt, auf welche materiellen Entitäten die Newton'sche Mechanik prinzipiell angewendet werden kann, so lautet die Antwort, dass dafür alles in Frage kommt, was man sich aus diesen Punktteilchen aufgebaut denken kann. Stellte man sich auf den Standpunkt eines (naiven) materiellen Atomismus, so käme man schließlich sogar zu der Vermutung, dass sich letztlich *alle* physikalischen Vorgänge auf einfache mechanische Grundgesetze zurückführen lassen würden.

Wirklich alle? Schon Newton waren die optischen Erscheinungen wohl vertraut. Über die Natur des Lichtes und die Gesetze seiner

Ausbreitung hat auch er spekuliert (in seiner »Optick« aus dem Jahre 1704), ohne jedoch dafür ein Lehrgebäude, vergleichbar der Mechanik, gründen zu können. Tatsächlich nahm Newton an, dass auch Licht aus kleinsten Teilchen bestünde, die durch Kräfte, wie die Gravitationskraft, Einwirkungen erfahren können. Diese Teilchenvorstellung des Lichtes verschwand aber vollends zugunsten einer konkurrierenden Vorstellung von Licht als Welle, als zu Beginn des 19. Jahrhunderts Thomas Young (1773–1829) experimentell die Interferenzfähigkeit von Licht nachwies, die der Teilchenvorstellung krass widerspricht. Doch wenn Licht eine Welle ist, also ein sich ausbreitender periodischer Schwingungsvorgang, so liegt die Frage nahe, was da schwingt. Analog der Wasserwelle auf der Oberfläche eines ruhigen Sees, in der die Wasserteilchen mit vertikaler Amplitude im Raum schwingen, müsste auch Licht den Schwingungen eines gewissen hypothetischen Mediums entsprechen, das man den »Äther« nannte. Nur müsste dieser Äther auch in alles eindringen können, in dem Licht sich fortpflanzt, z. B. in Glas, das immerhin eine nicht unerhebliche Dichtigkeit aufweist. Weiterhin war schon lange durch die Messungen des dänischen Astronomen Olaus Rømer (1644–1710) aus den Jahren 1672–76 bekannt, dass die Lichtgeschwindigkeit einen extrem hohen Wert besitzt, den Rømer damals mit 220 000 Kilometer pro Sekunde angab, was immer noch etwa $\frac{3}{4}$ des heute exakt bekannten Wertes ist, der bereits in (1) angegeben wurde und ziemlich nahe bei 300 000 Kilometern pro Sekunde liegt. Aus der extremen Höhe dieses Wertes wird aber sofort klar, dass die Analogie der Lichtwelle zu elastischen Verformungswellen eines herkömmlichen Materials sicherlich nicht allzu wörtlich genommen werden darf. Denn die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Verformungswellen wächst nach einem einfachen Gesetz mit der Festigkeit des Materials. Nach diesem müsste der Äther eine geradezu phantastische Festigkeit aufweisen, um Verformungswellen mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit zuzulassen. Gleich-

2. Historische Entwicklung

zeitig soll der Äther aber leicht in Materialien eindringen können, wie bereits festgestellt, um auch dort die Fortpflanzung von Licht zu ermöglichen. Offensichtlich passen diese beiden Eigenschaften nicht recht zusammen.

Trotz dieser scheinbar unvereinbaren Eigenschaften hielt man aber an dem Konzept eines Äthers fest – ohne ihn freilich physikalisch zu verstehen –, denn ohne ihn erschien nicht nur die Wellentheorie des Lichtes ohne physikalische Basis, auch die Übertragung von Kraftwirkungen über mitunter große räumliche Distanzen schien nicht verständlich, wenn nicht ein vermittelndes Medium angenommen wurde, das den Kraftübertrag physikalisch bewerkstelligte. Ganz analog verhielt sich die Sache mit den elektro- und magnetostatischen Kräften, die im ausgehenden 18. Jahrhundert Gegenstand intensiver Forschung waren, namentlich durch den Franzosen Charles Augustin de Coulomb (1736–1806), der ganz analog dem Newton'schen Gravitationsgesetz ein Kraftgesetz für elektrische Punktladungen aufstellte, das heute allgemein als Coulomb-Gesetz bezeichnet wird.

Eine umfassende Theorie elektrischer und magnetischer Phänomene publizierte 1873 der Schotte James Clerk Maxwell (1831–1879), der sich dabei eng an die Vorstellung des Chemikers und Experimentalphysikers Michael Faraday (1791–1867) hielt. Letzterer benutzte bei seiner Beschreibung elektrischer und magnetischer Wirkungen den Begriff der »Kraftfeldlinien«. Darunter verstand Faraday zunächst nur eine räumliche Verteilung von Kraftvektoren, die Richtung und Betrag der elektrischen (magnetischen) Kräfte auf eine am jeweiligen Ort angebrachte Einheitsladung (Einheits-Stromelement) angaben. Faraday ging aber einen logischen Schritt weiter, indem er die Kraftfeldlinien nicht nur als hilfsweise eingeführte Darstellungs- und Rechengröße betrachtete, sondern ihnen eine physikalische Existenz zuschrieb, die unabhängig vom lokalen Vorhandensein einer Test-Einheitsladung zur Messung der Kraft war. Er führte damit ein neues Realitätskonzept in die Physik ein, das des *elektrischen bzw.*

magnetischen Feldes: Jedem Raumpunkt wird zu jeder Zeit ein elektrischer und ein magnetischer Vektor zugeordnet, also jeweils eine Richtung und ein Betrag. Nimmt man diese Vorstellung auf, so ist die natürliche Frage die, wie sich in Abhängigkeit von äußeren Ladungen und Strömen diese Felder in Raum und Zeit verteilen bzw. verändern. Insbesondere ist es also sinnvoll, nach den elektrischen bzw. magnetischen Feldstärken an solchen Orten zu fragen, an denen sich keine Ladungen oder Ströme befinden. Auf diese Fragen gibt nun die Theorie Maxwells eine vollständige Antwort. Es bleibt aber zu betonen, dass der intendierte physikalische Sinn der dabei verwendeten mathematischen Begriffe auf dem Feldkonzept Faradays basiert. Die mathematische Theorie selbst ist von großer struktureller Eleganz. Insbesondere zeigt sich, dass sich im Falle zeitveränderlicher Feldkonfigurationen elektrische und magnetische Felder gegenseitig bedingen und dabei so eng in Beziehung treten, dass es sinnvoll ist, nur noch von einem vereinheitlichten *elektromagnetischen* Feld zu sprechen, dem jetzt pro Raum- und Zeitpunkt eine Größe mit 6 Komponenten (3 elektrische und 3 magnetische) zugeordnet wird.

Eine der schönsten Leistungen der Maxwell'schen Theorie war die Voraussage elektromagnetischer Wellen, die sich im ladungs- und stromfreien Raum ausbreiten können. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde ebenfalls durch die Theorie vorhergesagt und ergab sich gleich der Lichtgeschwindigkeit. Damit setzte die Vorstellung ein, dass Licht nichts anderes sei als eine elektromagnetische Welle und dass die Gesetze der Optik, wie zum Beispiel die Brechungsgesetze, sämtlich aus der Maxwell-Theorie folgen sollten, was sich dann auch im Verlauf des ausgehenden 19. Jahrhunderts glänzend bestätigte.

Aber auch Maxwell kam nicht von der »Äthervorstellung« los.

Es blieb bis zu Anfang des 20. Jahrhunderts bei einem dualistischen Materiebegriff. Dieser umfasste einerseits die im Raum lokal beweglichen Körper, die auch das Attribut der Trägheit bzw. Schwere

tragen und deshalb in der älteren Terminologie die *ponderable* – also wägbare – Materie genannt werden und dem Äther, der den ganzen Raum einschließlich des Inneren der Körper durchdringt und Träger elektromagnetischer Felder und damit auch der Lichtwellen ist. Auch das Gravitationsfeld war damals als im Äther verankert zu denken, doch war die Gravitationstheorie zu diesem Zeitpunkt noch sehr unentwickelt, nicht vergleichbar etwa der Maxwell'schen Theorie des Elektromagnetismus.

2.2 Das Relativitätsprinzip der Mechanik

Ein zentraler Begriff der Newton'schen Mechanik ist die *Kraft*. Etwas weiter ausholend kann man sagen, dass sich die Mechanik einerseits mit dem Wirken von Kräften auf physikalische Körper und ihren daraus ableitbaren Bewegungstypen beschäftigt und andererseits erlaubt, aus Bewegungserscheinungen auf die wirkenden Kräfte zu schließen. Dies geschieht durch die Newton'sche Gleichung *Kraft = Masse × Beschleunigung*, die in Formeln ausgedrückt folgende Gestalt hat:

$$\vec{F} = m\vec{a} . \quad (2)$$

Dabei bedeutet der Pfeil über F und a , dass es sich hier um »vektorielle«, d.h. gerichtete Größen handelt, denn eine Kraft bzw. Beschleunigung hat nicht nur einen Betrag (Stärke), sondern auch eine Richtung. Gleichung (2) besagt dann, dass Beschleunigung und Kraft gleichgerichtet sind und dass der Betrag der Kraft das m -Fache des Betrages der Beschleunigung ist. Relativ zu einem *Bezugssystem* kann man eine vektorielle Größe durch Angabe dreier Zahlen (zusammen mit ihren physikalischen Einheiten, in denen sie gemessen werden) vollständig charakterisieren. Diese heißen dann die *Komponenten* der vektoriellen Größe in diesem Bezugssystem. Wechselt man das Bezugssystem, so ändern sich auch die Komponenten der vektoriellen Größe.

Demnach sind Kräfte die Ursache von Beschleunigungen, also Änderungen der Geschwindigkeit, und zwar nicht nur hinsichtlich des Betrages der Geschwindigkeit, sondern auch hinsichtlich ihrer Richtung. So muss z. B. ein Hammerwerfer beständig am Drahtseil ziehen, um die Metallkugel auf eine Kreisbahn zu zwingen, auch wenn der Betrag der Geschwindigkeit der Metallkugel konstant ist. Wesentlich ist hier, dass sich die Richtung der Geschwindigkeit beständig ändert. In diesem Beispiel steht die Beschleunigung stets senkrecht auf der momentanen Geschwindigkeit, weshalb Letztere sich nicht im Betrag, sondern nur der Richtung nach ändert. Gemäß der Newton'schen Formel (2) gilt nun, dass in Abwesenheit von Kräften die Beschleunigungen verschwinden müssen, in anderen Worten, die Geschwindigkeiten konstant sind. Da auch die Geschwindigkeit eine vektorielle Größe ist, die man mit \vec{v} bezeichnet, bedeutet dies, dass Betrag und Richtung der Geschwindigkeit sich nicht ändern, sofern keine Kräfte einwirken. Dies ist gerade die Aussage des so genannten Trägheitsgesetzes:

Trägheitsgesetz. Ein kräftefreier Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung.

Man beachte, dass eine beliebige gleichförmig geradlinige Bewegung mit der Annahme einer verschwindenden Kraft verträglich ist. Betrag und Richtung der Geschwindigkeit können frei gewählt werden. Auch der Ort, an dem sich der Körper zu einer festen Zeit, etwa zur Zeit $t=0$ befindet, ist dann noch unbestimmt. Ganz allgemein ist bei vorgegebener Kraft die Bewegung nur bis auf eine konstante Geschwindigkeit und einen beliebigen Anfangsort festgelegt. Insbesondere gilt das

Mechanische Relativitätsprinzip. Zwei identische abgeschlossene physikalische Systeme, die sich relativ zueinander in gleichförmig

2. Historische Entwicklung

geradliniger Bewegung befinden, sind hinsichtlich der an den Einzelsystemen mechanisch messbaren Phänomene ununterscheidbar.

An dieser Stelle soll auch noch ein prinzipieller Aspekt im Zusammenhang mit der obigen, üblichen Formulierung des Trägheitsgesetzes erwähnt werden, der ungerechtfertigterweise häufig unterschlagen wird. So ist nämlich in obiger Formulierung keine Aussage darüber enthalten, bezüglich *welchem* Referenzsystem die kräftefreie Bewegung geradlinig und gemessen mit *welcher* Uhr sie gleichförmig sein soll. Bezogen auf die rotierende Erde ist eine kräftefreie Bewegung keineswegs geradlinig. Ebenso ist eine kräftefreie Bewegung keineswegs gleichförmig, wenn ich sie mit einer Uhr vermesse, deren Ganggeschwindigkeit relativ zu einer »Normaluhr« zeitlich variiert. Eine solche Uhr wäre keineswegs nutzlos, sofern ihre Gangrate wohldefiniert und reproduzierbar ist. So war es etwa bis in das 15. Jahrhundert üblich, den Tag, also die Zeit zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang und die Nacht, also die Zeit zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang, jeweils in 12 gleich lange Tag- bzw. Nachtstunden zu unterteilen. Im Sommer war dann eine Tagstunde länger als eine Nachtstunde; im Winter war es umgekehrt. Darüber hinaus hing diese Differenz auch von der jeweiligen geographischen Breite ab. Noch heute kann man Uhren besichtigen – z. B. in der St. Nikolai-Kirche in Stralsund –, die zwei ineinander gemalte Zifferblätter besitzen, eines eingeteilt in die eben beschriebenen Tag-Nacht-Stunden, genannt »Temporalstunden«, das andere mit der uns heute geläufigen Einteilung in damals so genannte »Äquinoktialstunden«. Um auf das Trägheitsgesetz zurückzukommen, kann man fragen, woher man eigentlich weiß, dass die darin ausgesprochene Gleichförmigkeit bezüglich der Äquinoktialeinteilung und nicht bezüglich der Temporaleinteilung gemeint ist. Die etwas lapidare Antwort darauf lautet: Weil dann das Trägheitsgesetz nicht gültig wäre. Der Punkt ist nämlich, dass der obigen Formulierung des