64. Lecture on the Special Theory of Relativity

[after 1 September 1921][1]

[p. 1]

Spezielle Relativitätstheorie.

A. Einstein.

1. Vorlesung.

Spezielles Relativitätsprinzip und Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Die Newton'sche Mechanik ist in den Bewegungsgleichungen des materiellen Punktes eines Systems

$$\left.\begin{aligned} m_\nu \frac{d^2 x_\nu}{dt^2} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial x_\nu} \\ m_\nu \frac{d^2 y_\nu}{dt^2} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial y_\nu} \\ m_\nu \frac{d^2 z_\nu}{dt^2} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial z_\nu} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

vollständig enthalten, wenn die potentielle Energie Φ als Funktion der gegenseitigen Abstände $r_{\mu\nu}$ der materiellen Punkte des betrachteten materiellen Systems als gegeben betrachtet wird. Diese Bewegungsgleichungen haben mit bezug auf die Erfahrung nur dann einen bestimmten Sinn, wenn ein reales Koordinatensystem (nebst Einheitsmasstab und Einheitsuhr) K gegeben ist, auf welches die Gleichungen bezogen werden sollen. ⟨Man kann also sagen: die Gleichungen allein enthalten noch keine bestimmte Aussage über den Ablauf der wirklichen Bewegung, sondern nur die Gleichungen in Verbindung mit einem real gegebenen⟩ Es lässt sich nämlich leicht zeigen, dass die Gleichungen (1) nicht bezüglich beliebig bewegter Koordinatensysteme gelten können; ihre Gültigkeit bezüglich K schliesst ihre Gültigkeit bezüglich eines gegenüber K beschleunigten Koordinatensystems K' aus. Es seien die Koordinaten von $K'(x', y', z')$ mit denen von K beispielsweise durch die leicht anschaulich ableitbaren Relationen

$$\left.\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

verbunden, wobei v zunächst eine beliebige Funktion der Zeit sei (ungleichförmige Parallel-Translation von K' parallel der X-Achse) so hat man

$$\frac{d^2x_\nu}{dt^2} = \frac{d^2x_\nu{}'}{dt^2} + 2\frac{dv}{dt} + t\frac{d^2v}{dt^2} \qquad \frac{\partial\Phi}{\partial x_\nu} = \frac{\partial\Phi}{\partial x_\nu{}'}$$

$$\frac{d^2y_\nu}{dt^2} = \frac{d^2y_\nu{}'}{dt^2} \qquad \frac{\partial\Phi}{\partial y_\nu} = \frac{\partial\Phi}{\partial y_\nu{}'}$$

$$\frac{d^2z_\nu}{dt^2} = \frac{d^2z_\nu{}'}{dt^2} \qquad \frac{\partial\Phi}{\partial z_\nu} = \frac{\partial\Phi}{\partial z_\nu{}'}.$$

Die erste dieser Transformationsgleichungen bringt es mit sich, dass den Gleichungen (1) gleichlautende Gleichungen in den Koordinaten x', y', z' im allgemeinen nicht gelten. Nur wenn die Translations-Geschwindigkeit v von K' gegenüber K von der Zeit unabhängig ist, degeneriert die erste der Umrechnungs-Gleichungen auf $\frac{d^2x_\nu}{dt^2} = \frac{d^2x_\nu{}'}{dt^2}$, sodass inbezug auf K' die den Gleichungen (1) genau gleich lautenden Gleichungen

$$m_\nu\frac{d^2x_\nu{}'}{dt^2} = -\frac{\partial\Phi}{\partial x_\nu{}'} \text{ etc.,}$$

gelten wobei Φ dieselbe Funktion aus den gegenseitigen Abständen $r_{\mu\nu}$ bedeutet wie oben. Wir drücken dies so aus: die Bewegungsgleichungen der Newton'schen Mechanik sind bezüglich der Transformation (2) mit konstantem v (auch „Galilei- [p. 2]
Transformation“ genannt) kovariant.

Gemäss der klassischen Mechanik gilt also Satz. Ist ein Koordinatensystem K gegeben, inbezug auf welches die Newton'schen Bewegungsgleichungen gültig sind, so gelten dieselben Gleichungen auch inbezug auf jedes System K', welches gegenüber K in gleichförmiger Translationsbewegung begriffen ist. Man sagt dafür auch kurz: die klassische Mechanik entspricht dem (speziellen) Relativitätsprinzip.

Die Bezeichnung „Relativitätsprinzip“ für diesen Sachverhalt entstammt folgender Überlegung. Von jeher war es klar, dass Bewegung nur als Relativbewegung (Bewegung eines Körpers gegen einen andern) nicht als absolute Bewegung (Bewegung eines Körpers ohne Beziehung auf andere Körper) gedacht werden könne. Es ist daher unmöglich, solange man sich nur auf den Begriff der Bewegung stützt, einen Bewegungszustand gegenüber allen andern Bewegungszuständen vermöge besonderer Merkmale auszuzeichnen. Betrachtet man rlativ zu einander bewegte Koordinatensysteme K, K', K'', so kann man über den Bewegungszustand eines jeden derselben eben nur aussagen, dass, bezw. wie es relativ zu den übrigen

Systemen bewegt ist. Dagegen wäre es a priori sehr wohl möglich dass ein Koordinatensystem K *in physikalischer Beziehung* gegenüber allen anders bewegten Koordinatensystemen ausgezeichnet wäre. Dies wäre dann der Fall, wenn die Naturgesetze in ihrer einfachsten Form gegenüber *einem* Koordinatensystem K, gültig, gegenüber allen anders bewegten Koordinatensystemen aber ungültig wären. Ist aber umgekehrt die Gültigkeit der Naturgesetze nicht an ein bestimmtes Koordinatensystem gebunden, so kann man sagen, dass die Bewegung (der Koordinatensysteme) nicht nur in rein ⟨kinematischer⟩ begrifflicher Beziehung (was selbstverständlich ist) sondern auch in physikalischer Beziehung nur relativ sei.[2]

Während aber in kinematischer Beziehung alle Bewegungszustände einander gleichwertig sind, sind nach der klassischen Mechanik gewisse Bewegungszustände ausgezeichnet. Es gelten nämlich die Bewegungsgesetze ausser inbezug auf ein bestimmtes Koordinatensystem K nur inbezug auf solche Koordinatensysteme K', welche gegenüber K in gleichförmiger Translationsbewegung begriffen sind (Inertialsysteme), nicht aber bezüglich gegenüber K anders bewegter Koordinatensysteme. Man sagt in diesem Sinne, die Mechanik genüge nur dem *speziellen* Relativitätsprinzip. Die auf das spezielle Relativitätsprinzip gegründete Theorie heisst spezielle Relativitätstheorie.

Das Relativitätsprinzip spielt in der Relativitätstheorie eine ähnliche Rolle wie das Prinzip vom ausgeschlossenen Perpetuum mobile in der Thermodynamik. Man sucht auf mathematisch formalem Wege die Beschränkungen aufzufinden, wel-
[p. 3] chen die Naturgesetze gemäss dem Relativitätsprinzip unterworfen sind.[3]

Ist das spezielle Relativitätsprinzip ein allgemeines Naturgesetz, oder ist seine Gültigkeit auf die *Mechanik* beschränkt? Die Erfahrung spricht unbedingt für die Allgemeingültigkeit des Prinzipes. Um dies einzusehen stellen wir uns für einen Augenblick vor, das spezielle Relativitätsprinzip gelte nicht. Dann gibt es ein Koordinatensystem K von bestimmtem Bewegungszustande, relativ zu welchem die Naturgesetze in ihrer einfachsten Form gelten. Dieselben Gesetze gelten auch relativ zu jedem andern rechtwinkligen Koordinatensysteme, welches relativ zu K ruht. Dagegen gelten inbezug auf ein gegen K in gleichförmiger Translationsbewegung begriffenen System K' andere Gesetze. In diese Gesetze, welche relativ zu K' gelten, werden in diesem Falle Richtung und Grösse der Relativbewegung von K' gegen K eingehen. Ein solches System K' wäre z. B. ein mit der Erde verbundens Koordinatensystem, insofern man von der Erddrehung und von dem Umstande abstrahiert, dass die Bewegung der Erde keine gradlinig-gleichförmige ist. Denn die Erde hat infolge ihrer jährlichen Bewegung um die Sonne eine Geschwindigkeit von etwa 30 km/sek, deren Richtung im Laufe des Jahres wechselt, ganz abgesehen von einer vermutlichen zusätzlichen Geschwindigkeit, welche das Sonnensystem als Ganzes gegenüber dem bevorzugten System K (falls es ein solches gibt) haben dürfte. Es wäre nach der zu Grunde gelegten Hypothese zu erwarten, dass in die inbezug auf ein irdisches Koordinatensystem K' geltenden Gesetze die Geschwindigkeit von K' gegenüber K eingehe, oder—konkreter ausgedrückt—, dass der Ablauf eines Naturvorganges im Allgemeinen davon abhänge, welche Lage man der ganzen Apparatur im Raume (d. h. relativ zur Bewegungsrichtung von K' gegen K) gibt. Eine derartige Abhängigkeit der physikalischen Vorgänge von der Orientierung der ganzen Anordnung im Raume hat sich aber bisher trotz eifrigen Suchens nicht feststellen lassen.

Man hätte an der Gültigkeit des (speziellen) Relativitätsprinzipes überhaupt nie gezweifelt, wenn nicht die Entwicklung der Optik und insbesondere der elektromagnetischen Lichttheorie zu solchen Zweifeln geführt hätte. Die Maxwell'schen elektromagnetischen Feldgleichungen für den leeren Raum führen zu der Konsequenz, dass jeder Lichtstrahl sich im Vacuum mit der universellen Geschwindigkeit c fortpflanzt, unabhängig von der Bewegung der benachbarten Körper und unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle. Ich will diese Aussage im Folgenden kurz als „Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit" bezeichnen. Die empirischen Gründe, welche für die Gültigkeit dieses Prinzips sprechen, sind von grosser Überzeugungskraft; sie sollen nachher kurz skizziert werden. Einstweilen wollen wir das Prinzip als zutreffend annehmen und zeigen, dass dasselbe zu einem Widerspruch mit dem speziellen Relativitätsprinzip zu führen scheint.

Wir betrachten beispielsweise ein Vakuum-Lichtsignal, das sich längs der X-Achse von K fortpflanzt. Nach dem Gesetz von der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit geschieht die Fortpflanzung gemäss der Gleichung [p. 4]

$$x = ct\,.$$

Führt man in diese Gleichung vermöge der Galilei-Transformation (2) die gestrichenen Koordinaten ein, so erhält man für die Fortpflanzung dieses Lichtstrahles gegenüber dem System K' die Gleichung

$$x' = (c-v)t\ .$$

Das Gesetz der Lichtfortpflanzung scheint also gegenüber dem System K' ein anderes zu sein als inbezug auf K.[4] Das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit scheint inbezug auf K' nicht zu gelten—im Widerspruch mit dem speziellen Relativitätsprinzip. Es scheint möglich zu sein, durch optische Experimente die Geschwindigkeit v des Koordinatensystems K' gegenüber dem bevorzugten System K zu bestimmen, inbezug auf welches das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gilt.

Bei dieser theoretischen Sachlage scheint man gezwungen zu sein, entweder das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit oder das Relativitätsprinzip fallen zu lassen. Beide Möglichkeiten haben jedoch der Erfahrung gegenüber versagt, wie sogleich kurz gezeigt werden soll.

Zunächst könnte man denken, der Satz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gelte nicht. Dies war auch der Ausweg, den die Wissenschaft zunächst versuchte (Heinrich Hertz).[5] Geht man nämlich von der Hypothese aus, dass das Licht in einer Wellenbewegung im Aether bestehe, so wird man annehmen, dass das Licht sich allenthalben mit derselben Geschwindigkeit fortpflanze, aber nicht relativ zum Raum (bez. relativ zum Koordinatensystem) sondern relativ zum Lichtäther. Wie sich das Licht relativ zum Koordinatensystem ausbreitet, hängt dann von der Frage ab, wie sich der Aether in mechanischer Beziehung verhält. Die von Hertz benutzte Hypothese war die, dass der Aether allenthalben an den Bewegungen der Materie teilnehme, oder m. a. W. dass der Aether allenthalben relativ zur Materie ruhe. Diese Auffassung hat schon begrifflich grosse Schwierigkeiten. Denkt man nämlich die Materie als Kontinuum, so müsste es nach dieser Hypothese möglich sein, aus einem Raume den Aether herauszupumpen, was der Erfahrung gegenüber nicht aufrecht zu erhalten ist. Nimmt man hingegen die Materie als altomistisch konstituiert an und setzt man voraus, dass das Atom nur in seinem Innern den Aether mitnehme, so bedeutet dies ein Aufgeben der Hertz'schen Hypothese, da dann für die makoskopische Betrachtung der Aether an den Bewegungen der Materie nicht teilnimmt. Eine direkte Widerlegung der Hertz'schen Hypothese lieferte ein schon Mitte des vorigen Jahrhunderts von Fizeau ausgeführtes Interferenzexperiment,[6] welches auf die Frage Antwort gibt: Wie wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines einen Körper durchsetzenden Lichtstrahls durch
[p. 5] die Bewegung ⟨des⟩ Körpers beeinflusst? Das Ergebnis war folgendes. Ein Lichtstrahl pflanzt sich durch ein mit der Geschwindigkei v bewegtes Medium vom Brechungsexponenten n mit der Gechwindigkeit

$$V = V_0 + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v \qquad \ldots (3)$$

fort, wobei V_0 die Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch das ruhende Medium bedeutet. Aus dieser Formel, die wir zunächst als eine rein empirische ansehen, schliessen wir im Besonderen, dass die Bewegung eines das Licht nicht brechenden Mediums ($n = 1$) keinen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines hindurchgehenden Lichtstrahls ausübt. Dies Ergebnis ist unvereinbar mit der Hertz'schen Hypothese; will man es vom Standpunkt der Aethertheorie deuten, so muss man annehmen, dass der Aether an der Bewegung der Materie nicht teilnehme (Theorie des ruhenden Lichtäthers). Diese Theorie wurde von H. A. Lorentz[7] mit grossem Erfolge ausgebaut; sie liefert neben der Erklärung einer grossen Zahl anderer elektromagnetischer und optischer Phänomene auch die obige Formel für das Ergebnis des Fizeau'schen Experimentes.

Nach der Lorentz'schen Theorie gilt relativ zum Lichtäther das Prinzip von der Konstanz der (Vakuum-) Lichtgeschwindigkeit. Der Erfolg dieser Theorie in Verbindung mit obiger Überlegung scheint unsere Streitfrage in dem Sinne zu entscheiden, dass das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit aufrecht zu erhalten, das Relativitätsprinzip aber fallen zu lassen sei. Eine solche Entscheidung stellt uns wieder vor die Aufgabe, die Bewegung der Erde relativ zu dem Lichtäther durch Experimente nachzuweisen bezw. die Bewegung der Erde gegenüber demjenigen Koordinatensystem K zu bestimmen, inbezug auf welches das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gilt. Erst wenn dieser Nachweis gelungen war, konnte man sich zufrieden geben.

Dieser Sachlage gegenüber spielt das Experiment von Michelson[8] eine entscheidende Rolle, das auf folgendem Gedanken beruht. Es sei AB ein starrer, relativ zur Erde ruhender Stab. Man frägt: Wie lange braucht ein Lichtstrahl, um von A nach B und wieder zurück nach A zu gelangen. Würde der Stab samt der Erde relativ zum System K (Lichtäther) ruhen, so wäre diese Zeit gleich

$$\frac{2l}{c},$$

wobei l die Länge der Strecke $\overline{AB}$ bezeichnet. Ist aber der Stab samt der Erde relativ zum Lichtäther mit der Geschwindigkeit v in Bewegung, so scheint das Ergebnis von dem Winkel abzuhängen welche die Bewegungs-Geschwindigkeit v mit der Stabaxe bildet. Für die beiden Fälle, dass der Stab parallel bezw. senkrecht zur Bewegungsrichtung gelagert ist, erhält man ⟨der relativ zu K⟩ die gesuchten Zeiten durch eine einfache geometrische Überlegung,[9] indem man den ganzen Vorgang auf das Koordinatensystem K (d. h. auf ein zum Lichtäther ruhendes Koordinatensystem bezieht. Man erhält: [p. 6]

a) Stabrichtung parallel v-Richtung	b) Stabrichtung senkrecht zu v-Richtung
$t_1 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$	$t_2 = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

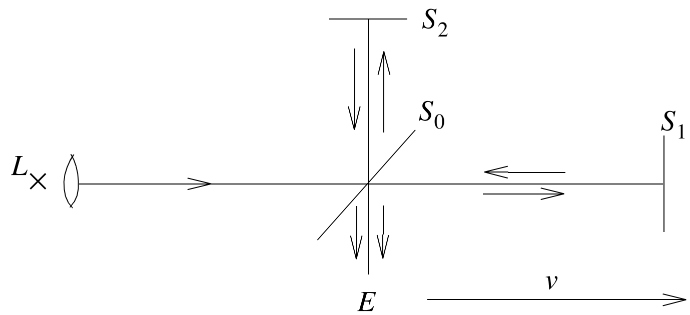
Diese beiden Zeitlängen ergeben sich also als verschieden. Man erhält $t_2 = t_1 \cdot \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. Führt man statt der Zeitdauern t_2 und t_1 die vom Lichte relativ zum Koordinatensystem zurückgelegten Wege („Lichtwege“) $\lambda_1 = ct_1$ und $\lambda_2 = ct_2$ ein, so gilt entsprechend

$$\lambda_2 = \lambda_1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad \ldots (4)$$

Die relative Verschiedenheit $\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2}$ beider Lichtwege λ_1 und λ_2 beträgt bei einer Stabgeschwindigkeit $v = 30$ km/sek in erster Näherung

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2} = \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-8}$$

Diese Differenz sollte durch den Michelson’schen Interferenz-versuch nachgewiesen werden. Derselbe beruhte im Prinzip auf folgender Anordnung.



Auf einer massiven, drehbaren Steinplatte waren die Lichtquelle L mit Linse, der halbdurchlässige Planspiegel S_0, die beiden Planspiegel S_1 und S_2 sowie Mittel zur Konstatierung des nach E gelangenden Lichtes vorgesehen. Das von L nach S_0 gelangende Lichtbündel wurde durch S_0 in zwei kohärente Bündel zerlegt, von denen das eine den Weg $S_0\ S_1\ S_0\ E$, das andere den Weg $S_0\ S_2\ S_0\ E$ zurücklegte. Die bei E resultierende Interferenzerscheinung wurde beobachtet. Sie entsprach der Differenz der Lichtwege $S_0\ S_1\ S_0$ und $S_0\ S_2\ S_0$. Diese Differenz, welche der oben angedeuteten Rechnung entspricht, sollte sich durch eine Verschiebung der Interferenzstreifen bemerkbar machen, die bei einer horizontalen Drehung der ganzen Einrichtung um einen rechten Winkel eintreten sollte.

[p. 7] Der von Michelson und Morley mit grosser Meisterschaft durchgeführte Versuch bewies, dass der zu erwartende Effekt in Wahrheit nicht vorhanden ist. Verallgemeinernd müssen wir uns also sagen: Die Lichtausbreitung relativ zur Erde lässt von einer Bewegung der Erde relativ zu einem bevorzugten Koordinatensystem (bezw. relativ zum Lichtäther) nichts erkennen auch die optischen ⟨Erscheinungen⟩ Vorgänge scheinen dem speziellen Relativitätsprinzip zu entsprechen—entgegen dem Ergebnis der oben skizzierten theoretischen Überlegung.

H. A. Lorentz und Fiz Gerald[10] fanden einen Ausweg aus dieser Schwierigkeit, der sich später auch als Konsequenz unserer allgemeinen Überlegungen ergeben wird. Ihre Erwägung war die Folgende. Bei der Berechnung der Zeiten t_1 und t_2 wird vorausgesetzt, dass die Bewegung der starren Platte nebst der auf ihr angeordneten Instrumente relativ zum System K (bezw. zum Lichtäther) auf das geometrischen Verhalten der Platte ohne Einfluss sei. Diese Voraussetzung braucht aber nicht zuzutreffen. Nehmen wir an, dass alle bewegten starren Körper in ihrer Bewegungsrichtung eine Verkürzung im Verhältnis $\frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1}$ erfahren, so würde dadurch der optische Weg S_0–S_1–S_0 eine solche Verkürzung erfahren, dass jener optische Weg nicht der oben berechnete (λ_1) wäre, sondern $\lambda_1{}' = \lambda_1\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$; man erhielte dann die Gleichung

$$\lambda_2 = \lambda_1{}',$$

wodurch das negative Ergebnis des Experimentes von Michelson und Morley erklärt wäre. Diese Auffassung ist gar nicht so fernliegend als sie im ersten Augenblick erscheint. Man kann nämlich aus dem Maxwell'schen Gleichungen leicht den Schluss ziehen, dass eine gleichförmig bewegte Punktladung kein kugelsymmetrisches elektrisches Feld hat, sondern dass die Bewegung deformierend auf das Feld wirkt. Wenn also die die festen Körper zusammenhaltenden Kräfte elektrischer Natur sind, so ist ein deformierender Einfluss der Bewegung auf die bewegten Körper geradezu zu erwarten. Die Existenz der angegebenen „Lorentz-Kontraktion“ lässt sich elektromagnetisch plausibel machen.[11]

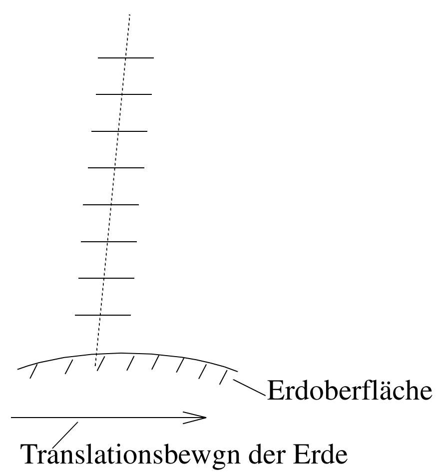
Trotzdem ist der bisher skizzierte Zustand der Theorie ohne Zweifel ein unbefriedigender. Nach diesem gibt es nämlich ein bevorzugtes Koordinatensystem K, dadurch ausgezeichnet, dass relativ zu dem das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gilt, inbezug auf (relativ zu K) bewegte Koordinatensysteme soll zwar dies Prinzip ungültig sein; aber infolge eines merkwürdigen Zusammentreffens von Umständen soll es unmöglich sein, bei Versuchen etwas davon zu merken. Dies erscheint als eine unnatürliche und komplizierte Auffassung eines einfachen Thatbestandes. Angesichts des Michelson'schen Versuches kann nur eine Theorie befriedigen, welche mit ihrer Grundlage dem speziellen Relativitätsprinzip gerecht wird.

Andererseits scheint aber das Ergebnis des Fizeau'schen Versuches zur Theorie [p. 8]
des ruhenden Lichtäthers zu zwingen, welche—wie oben dargelegt—mit dem speziellen Relativitätsprinzip in Konflikt kommt.

Man muss den Ernst dieser Situation ganz erfasst haben, um die Berechtigung des von der speziellen Relativitätstheorie ⟨gelieferten Befreiung⟩ eingeschlagenen Weges klar einzusehen. Bevor wir auf diesen Weg eingehen, will ich noch zwei andere Lösungsversuche erwähnen, welche nahe liegen und von verschiedenen Forschern versucht worden sind.

Ausgehend von der Lichtäther-Vorstellung kann man zur Erklärung des Ergebnisses des Fizeau'schen und des Michelson'schen Versuches folgende Überlegung anstellen. Die vorliegende Schwierigkeit kann so formuliert werden: Nach dem Fizeau'schen Versuche nehmen bewegte Flüssigkeiten den Aether nicht mit, während der Michelson'sche Versuch sich ohne Weiteres verstehen lässt, wenn man annimmt, dass die Erde den Aether mitnehme. Warum sollte die Mitnahme des Aethers nicht von der Grösse der Körper abhängig sein? Würde nicht der Michelson'sche Versuch vielleicht positiv ausfallen, wenn man ihn in genügender Entfernung von einem Himmelskörper anstellen könnte?[12]

Abgesehen davon, dass eine Theorie der partiellen Mitführung des Aethers durch die Körper zur Aufstellung sehr willkürlicher Hypothesen zwingt und notwendig zu grossen Komplikationen führt, ist diese Theorie nicht imstande, von einer dritten Erfahrungsthatsache, der Aberration des Fixsternlichtes infolge der Erdbewegung um die Sonne Rechenschaft zu geben,[13] während die Erklärung dieser Erscheinung der Lorentz'schen Theorie des ruhenden Lichtäthers keine Schwierigkeit bietet.



Dass die Aberration im Falle des mitbewegten (d. h. mit der Erde bewegten) Aether nicht existieren würde, erkennt man aus folgender elementaren Überlegung. In beiliegender Figur ist ein Stück Erdoberfläche angedeutet. Die Erde möge nach rechts mit konstanter Geschwindigkeit bewegt sein. Es komme von einem im Zenith befindlichen Stern Licht herab in Form von ebenen Lichtwellen. Wir fragen nach dem Einfluss, den die Aetherbewegung auf diese Lichtwellen ausübt, um endlich zu erfahren, an welcher Stelle man an der Erdoberfläche den Stern sieht. Den Lichtäther denken wir uns in der Umgebung der gestrichelten Vertikalen in horizontale Schichten geteilt. Diese Schichten werden relativ zu einander horizontal gleiten, derart, dass die Horizontalgeschwindigkeit der Aetherschichten bei Annäherung an die Erdoberfläche allmählich vom Werte null bis zum Werte v übergeht. Die Lichtwellen werden von dieser Horizontalbewegung der Schichten mitgenommen, wobei aber die Ebenen gleicher Phase notwendig horizontal bleiben; sie treten immer mit allen Punkten gleichzeitig in die nächstuntere Schicht ein, ohne dass sie dabei gedreht würden. Sie gelangen also horizontal an die Erdoberfläche. Es ist also klar, dass ein an der Erdoberfläche befindliches Fernrohr zur Beobachtung des Sternes genau vertikal gestellt werden müsste, genau wie wenn eine Translationsgeschwindigkeit der Erde gar nicht vorhanden wäre. Dieser Beweis beruht natürlich darauf, dass in dem ins Auge gefassten Falle die Aetherbewegung keine (insbesondere keine örtlich variabeln) Vertikalkomponenten hat.— [p. 9]

Es ist endlich vorgeschlagen worden, die geschilderte Schwierigkeit der Theorie dadurch zu umgehen, dass man unter Wahrung des Relativitätsprinzips die Theorie des Lichtes völlig umgestaltet. Man kann nämlich annehmen, dass die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit nicht relativ zum Koordinatensystem (bezw. Raum, Aether) sondern relativ zum emittierenden Körper immer einen konstanten Wert c habe. Diese theoretische Möglichkeit, welche insbesondere von W. Ritz[14] eingehend bearbeitet wurde, ist mit dem Ergebnis des Michelson'schen Versuchs, und mit der Thatsache der Aberration ohne Weiteres im Einklang. Sie führt aber auf grosse Komplikationen, wenn man sie zu einer exakten Theorie ausbauen will. Nach einer solchen Theorie würde sich mehrere Lichtstrahlen durch denselben Raum zur selben Zeit in derselben Richtung mit verschiedenen Geschwindigkeiten fortpflanzen können; sie brauchen hiezu nur von verschieden bewegten Körpern emittiert zu sein. Der Astronom De Sitter[15] hat diese Theorie endgültig widerlegt, indem er darauf hinwies, dass die Erscheinungen bei spektroskopischen Doppelsternen mit ihr nicht vereinbar sind; ich will seine Überlegung kurz skizzieren.

Emittiert ein Stern Licht von der Frequenz ν_0, so nehmen wir eine etwas andere Frequenz ν wahr, wenn sich der Stern relativ zu uns im Visionsradius bewegt; es ist nach Dopplers Prinzip

$$\nu - \nu_0 = -\nu_0 \frac{v}{c} \qquad \ldots (\ )$$

wenn v die in Richtung des (wachsenden) Visionsradius fallende Komponente der Relativbewegung des Sternes bedeutet. Beschreibt der Stern eine geschlossene Bahn, so gibt dies zu periodischen Schwankungen der Frequenz ν des zu uns gelangenden Lichtes Veranlassung; es verraten sich daher Umlaufbewegungen ferner Sterne durch periodische kleine Verlagerungen der Spektrallinien (spektroscopische Doppelsterne). Wir nehmen nun diese Farbenschwankungen verspätet wahr um die Zeit $\frac{\Delta}{c}$, wobei Δ die Entfernung des Doppelsternes von uns bedeutet. Ist c konstant, d. h. unabhängig von der Radialgeschwindigkeit des Sternes während der

Lichtaussendung, so bekommen wir abgesehen von einer gewissen konstanten Verspätung einen zeitlichen Verlauf von $\nu - \nu_0$, welcher dem zeitlichen Verlauf [p. 10] der Radialbewegung genau entspricht. Anders aber, wenn die Lichtgeschwindigkeit c (relativ zum Raume) von der Radialgeschwindigkeit abhängt. Dann erreicht uns das bei positivem v ausgesandte Licht mit grösserer Verspätung als das bei negativem v ausgesandte Licht, und es müsste die $(\nu - \nu_0)$-Kurve gegenüber der Geschwindigkeitskurve verzerrt sein. Die quantitativen Verhältnisse sind dabei so, dass diese Verzerrungen sich sehr stark bemerkbar machen müssten, während die Erfahrung nichts dergleichen zeigt. Die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustand des emittierenden Körpers ist also mit grosser Sicherheit erwiesen.

ADftS. [2 084]. The manuscript consists of ten unnumbered pages. On the verso of two pages, there are deleted passages. They are transcribed in notes 4 and 9. Page numbers are here provided in the margin in square brackets.

[1]This document is dated on the assumption that it is an aborted draft for *Einstein 1922c* (Doc. 71). See the preceding document, note 1.

[2]See the typescript of the second Princeton lecture, Appendix C, [p. 1], for a similar discussion of the distinction between kinematical and physical relativity of motion.

[3]See *Einstein 1919f* (Doc. 26), p. 13, for Einstein's use of this analogy with the second law of thermodynamics in a published text.

[4]In a deleted passage on the verso of [p. 4], Einstein made the same point using a light signal traveling in an arbitrary direction rather than along the x-axis: "Wird nämlich im Punkte x_0, y_0, z_0 von K ein Vakuum Lichtsignal zur Zeit t_0 ausgesandt, so geschieht dessen allseitige Ausbreitung relativ zum System K nach dem Prinzip von der Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit gemäss der Gleichung

$$r = c(t - t_0),$$

wobei r die Entfernung eines von der Kugelwelle erreichten Aufpunktes bedeutet. Quadriert man diese Gleichung, so erhält man

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - c^2(t - t_0)^2 = 0 \quad \ldots (3)$$

oder

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2 = 0$$

"Relativ zu einem gleichförmig bewegten Koordinatensystem K' scheint die Ausbreitung nach einem andern Gesetze zu verlaufen. führt man nämlich in (3) mit Hilfe der Galilei-Transformation die Koordinaten $x', y', z', x'_0, y'_0, z'_0$ ein, so erhält man anstelle von (3)

$$[x' - (x'_0 - v(t - t_0))]^2 + (y' - y'_0)^2 + (z' - z'_0)^2 - c^2(t - t_0)^2 = 0 \quad \ldots (3a)\text{"}$$

[5]*Hertz 1890.* For a historical discussion, see *Darrigol 1993.* For more on Einstein's views on the ether, see *Einstein 1920j* (Doc. 38).

[6]*Fizeau 1851.*

[7]*Lorentz 1886.*

[8]*Michelson 1881* and *Michelson and Morley 1887.*

[9]On the verso of [p. 6], there are two deleted equations for the case that the rod is perpendicular to the direction of motion: $(v\tau)^2 + l^2 = (c\tau)^2$ and $l^2 = (c^2 - v^2)\tau^2$.

[10]*Lorentz 1892a* and *FitzGerald 1889.*

[11]*Lorentz 1892a* and *1895*. For a discussion of the plausibility of Lorentz's approach, see Hendrik A. Lorentz to Einstein, between 1 and 23 January 1915 (Vol. 8, Doc. 43), and Einstein to Hendrik A. Lorentz, 23 January 1915 (Vol. 8, Doc. 47).

[12]In 1904, Edward W. Morley (1838–1923) and Dayton C. Miller (1866–1940) attempted to replicate the Michelson-Morley experiment (see note 8) on a hilltop, to test whether altitude had any effect on the experiment (*Morley and Miller 1904*).

[13]See *Stokes 1845.*

[14]*Ritz 1908a*, *1908b.* Einstein discusses Walter Ritz's theory in *Einstein 1909b* (Vol. 2, Doc. 56), *Ritz and Einstein 1909* (Vol. 2, Doc. 57), and Vol. 4, Doc. 1, pp. 34–35.

[15]*De Sitter 1913a*, *1913b.* See also Einstein's discussion in Vol. 4, Doc. 1, p. 35, and his praise of Willem de Sitter's work in Einstein to Paul Ehrenfest, 28 May 1913 (Vol. 5, Doc. 441).