

Raum und Zeit im Lichte der neueren Physik

Eine allgemeinverst. Entwicklung d. raumzeitlichen
Relativitätsgedankens bis zum Relativitätsprinzip d.
Trägheitssysteme

Raum und Zeit

im Lichte der neueren Physik

Eine allgemeinverständliche Entwicklung des
raumzeitlichen Relativitätsgedankens
bis zum Relativitätsprinzip der Trägheitssysteme

Von

Dr. Hans Witte

Oberlehrer am Gymnasium zu Wolfenbüttel
außerordentlicher Professor an der Technischen Hochschule zu Braunschweig

Dritte Auflage

Mit 18 Abbildungen



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
1920

Herausgeber dieses Heftes:
Geh. Rat Prof. Dr. K. Scheel, Berlin.

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-663-00964-1 ISBN 978-3-663-02877-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-02877-2

Copyright, 1920, by Springer Fachmedien Wiesbaden
Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Germany 1920

Den Herren

Geheimen Hofräten, Professoren

Dr. phil. Dr.-Ing. E. h. JULIUS ELSTER

Dr. phil. E. h. Dr.-Ing. E. h. HANS GEITEL

Oberlehrern am Gymnasium zu Wolfenbüttel

dankbar gewidmet

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Erster Abschnitt. Einleitung	1
Zweiter Abschnitt. Vorläufiger Umriß des Relativitätsgedankens	4
Dritter Abschnitt. Absoluter Raum und absolute Zeit I	9
Vierter Abschnitt. Lagenrelativität	16
Fünfter Abschnitt. Absoluter Raum und absolute Zeit II	19
Sechster Abschnitt. Das Relativitätsprinzip der älteren Mechanik . . .	23
Siebenter Abschnitt. Absoluter Raum und absolute Zeit III	32
A. Absoluter Raum und Weltäther	32
B. Die erste Untersuchungsreihe über den Weltäther	36
C. Zweite Untersuchungsreihe über den Äther. Der Michelson- Versuch	39
Achter Abschnitt. Das neue Relativitätsprinzip	56
A. Grundlegung. Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit . . 56	56
B. Die Relativierungen von der ersten Ordnung	60
C. Die Relativierungen von der zweiten Ordnung	69
D. Zusammenfassung	77
Neunter Abschnitt. Folgerungen. Schluß	79
Nachwort zur zweiten Auflage	86

Erster Abschnitt.

Einleitung.

§ 1. Gegenstand.

Viele Fragen stellen sich dem menschlichen Geiste entgegen auf dem immer wieder begonnenen, noch nie zu Ende gegangenen Wege zu einer Anschauung vom Ganzen der Welt; wenige mit solcher Dringlichkeit wie die große Doppelfrage nach dem Wesen von Raum und Zeit.

Denn für uns Menschen gibt es nichts Körperliches und — soweit unsere Erkenntnis reicht — auch nichts Geistiges ohne Raum und Zeit.

Im Raume und in der Zeit spielt sich alles ab, was in unserer „greifbaren“ Außenwelt wirklich „vorhanden ist“, alles Sein und alles Beharren, aller Wechsel und alle Veränderung, alles Werden und alles Vergehen; aber auch die volle Welt unseres Innenlebens, jedes Denken, jedes Fühlen und jedes Wollen, insgesamt alle bewußten und unbewußten Zustände, Tätigkeiten, oder wie man es sonst nennen mag, unseres „Geistes“ oder unserer „Seele“ sind für uns immer und überall nur gegeben in irgendwelchen Beziehungen zu Raum und Zeit: Raum und Zeit sind wesentlichste, innerste Grundbestandteile der Wirklichkeit, so wie wir Menschen (und alle Geister, die wir begreifen, wahrscheinlich auch) dieselbe wahrnehmen und erkennen; die Frage nach dem Wesen von Raum und Zeit ist eine der allerwichtigsten Grundfragen der Weltanschauung.

Das haben, mit wachsender Weite des körperlichen und geistigen Gesichtskreises, sämtliche Kulturvölker der Erde erkannt. Ihre Weltweisen haben Antworten gesucht und gegeben, so gut sie es vermochten; Dichter deren Gedanken — manchmal tiefere hinzufügend — niedergelegt in menschlich-unvergänglicher Form; der gebildete Laie hat sich seine Meinung zurechtgemacht, so gut es eben ging.

Ab und an hat auch die Wissenschaft Teilantworten auf die große Doppelfrage geliefert; was sie gesprochen hat, ist geblieben, denn es betraf das Wesen der Sache.

So war es vor vier Jahrhunderten, als des Kopernikus neue Raumlehre eine Welt aus den Angeln hob. So ist es heute wieder, da das „Relativitätsprinzip“ kraftvoll auf den Plan tritt mit wieder neuen Lehren über den Raum und mit geradezu unerhörten, eine völlige Umstellung unserer ganzen Weltauffassung fordernden Behauptungen über das Wesen der Zeit.

Die Entwicklung, die zu diesem Relativitätsprinzip geführt hat, und das Prinzip selber in seiner ursprünglichen, rein auf Räumlich-Zeitliches eingestellten Grundform weiteren Kreisen durchaus allgemeinverständlich darzulegen, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

§ 2. Behandlungsweise.

Dem steht entgegen, daß das Relativitätsprinzip nach Form und Inhalt den verstiegensten Höhen der dem Laien ohnehin außerordentlich schwer zugänglichen Wissenschaft der mathematischen Physik angehört.

Versucht man's ohne die mathematische Form, so gibt man das wesentlichste und vornehmste Darstellungsmittel auf. Ohne die mathematische Ausdrucksweise, insbesondere ohne die mathematischen Gleichungen und Formeln ist es unendlich viel schwieriger, dem Leser das eigentliche Wesen der neuen Gedanken zu übermitteln, ihn mit einem Blick die zwingende Entwicklung, das feste Gefüge und den inneren Zusammenhang erkennen zu lassen:

Wie ein Tritt tausend Fäden regt,
Die Schiffelein hinüber herüber schießen,
Die Fäden sich beegnend fließen,
Ein Schlag tausend Verbindungen schlägt ...

Leider aber ist das Verständnis für diese (die wichtigste) Seite der Mathematik und ihre sichere Handhabung noch immer nicht integrierender Bestandteil der heutigen Bildung; man steht auch rein gefühlsmäßig den weltdurchdringenden und weltbedeutenden mathematischen Zauberformeln noch immer nicht allgemein mit demjenigen Empfinden gegenüber, das allein ihrem Wesen entspricht:

... War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb? ...

Vielmehr muß hier und da auch heute noch eher mit gegenteiligen Gefühlen gerechnet werden. So ist die Annahme berechtigt, eine

mathematikfreie Darstellung sei erwünschter. Deshalb will ich mathematische Ausdrücke, Gleichungen, Formeln, Rechnungen in dieser Arbeit gänzlich vermeiden.

§ 3. Mechanisches Modell.

Allerdings steigt dadurch, wie gesagt, die Schwierigkeit, den eigentlichen Zusammenhang der geschichtlichen Entwicklung und insbesondere den Inhalt des Relativitätsprinzips selber mit seiner grundstürzenden Raum- und Zeittheorie auch nur einigermaßen genau zu übermitteln, ganz außerordentlich.

Ich würde es nicht unternehmen, diese schwierige Aufgabe zu lösen, wenn ich nicht in der Lage wäre, ein besonderes Hilfsmittel für den letzten, schwierigsten Teil der Darstellung heranzuziehen.

Vor einigen Jahren habe ich ein mechanisches Modell zur Veranschaulichung des Relativitätsprinzips ausgedacht und für einen Vortrag im Braunschweiger Verein für Naturwissenschaft, sowie für meine Vorlesungen an der Technischen Hochschule zu Braunschweig anfertigen lassen. Das Modell hat sich insbesondere auch für allerelementarste, keinerlei Fachkenntnisse voraussetzende und nur in ganz kleinen Schritten vorwärtsgehende Darstellungsweise bewährt. Diesen Apparat werde ich dem schwierigen Schlußteil der Auseinandersetzungen zugrunde legen. Die Darstellung vollzieht sich dann in der Weise, daß die verwickelten, genau nur durch mathematische Formeln wiedergebbaren Tatsachen, Gesetze und Zusammenhänge ersetzt werden durch die anschaulichen, leicht verständlichen, übersichtlichen Eigenschaften und Angaben des mechanischen Modells.

§ 4.

Freilich macht eine solche vereinfachende Darstellungsweise ein gewisses Schematisieren nötig. Das Schematisieren muß um der Allgemeinverständlichkeit willen sogar noch weiter gehen: Trotz der durch das Modell gewährleisteten sicht- und greifbaren Veranschaulichung der Probleme würde dennoch der leitende Grundgedanke und die Stufenfolge der wesentlichen Fortschritte nicht genügend allgemeinverständlich herauspringen, wenn ich nicht außerdem in der ganzen Darstellung durch absichtliches Verstärken der Hauptrichtlinien, durch Vereinfachen

der geschichtlichen Entwicklung usw. entschieden auf diese Wirkung hinarbeiten wollte¹⁾.

Vielleicht wird, wer diesen Aufsatz liest, ohne weiteres Anwendung eines solchen Verfahrens voraussetzen; um Mißverständnissen vorzubeugen, hebe ich das indessen hier ausdrücklich hervor.

Zweiter Abschnitt.

Vorläufiger Umriss des Relativitätsgedankens.

§ 5.

Wenn man in eine neue wissenschaftliche Theorie eindringen will, ist es vorteilhaft, den Zielpunkt ungefähr zu kennen. Man ist dann sicher, nie die Haupttrichtung aus den Augen zu verlieren, man wertet von vornherein alle Einzelzüge, so, wie sie nach und nach hinzutreten, richtig in ihrer Bedeutung für das Ganze, man braucht nicht, wenn man auf der letzten Seite ankommt, den ganzen Aufsatz noch einmal von vorn durchzulesen, um ihn nun erst richtig zu verstehen. Deshalb schicke ich der geschichtlichen Darstellung einen vorläufigen Umriss des raumzeitlichen Relativitätsgedankens voraus.

§ 6.

Das große Doppelproblem Raum und Zeit hat im Laufe der wissenschaftlichen Entwicklung naturgemäß eine lange Reihe von einzelnen Fragen und Zweifeln hervortreten lassen. So bei der Zeit z. B. die Überlegung, in welchen äußeren und inneren Tatsachen die psychologische Wurzel der Zeitvorstellung liegt. Beim Raum z. B. die Frage nach einer etwaigen inneren Krümmung des Raumes als solchen, ferner das hochinteressante Problem der mehrdimensionalen Räume, und noch manche andere Einzelfragen verschiedener Art. Schließlich und vor allem noch eine äußerst wichtige Gruppe von Problemen, die Raum und Zeit zugleich betreffen; man denke nur etwa an das bekannte Dilemma: sind Raum und Zeit unendlich, oder sind sie begrenzt? Oder an die besonders von den Philosophen lebhaft umstrittene Frage, wie man Raum und Zeit in erkenntnistheoretischer und psychologischer Beziehung eigentlich nennen mußte (nämlich Dinge oder Begriffe oder Abstraktionen oder Anschauungsformen oder sonst noch irgendwie anders: wir haben in

¹⁾ Es geschieht z. B. in § 17, 19, 21, 47, 77.

§ 1 die neutrale Bezeichnung Wirklichkeitsbestandteile gewählt, der Name hat für uns nur nebensächliche Bedeutung).

§ 7.

Es gibt über alle diese Einzelfragen hinaus eine Frage von ganz zentraler, abschließender Bedeutung, die bemerkenswerterweise über dem Vielerlei der Einzelfragen bis in die allerneueste Zeit hinein kaum als Problem, geschweige denn als letztes abschließendes Entweder-Oder empfunden und bewertet worden ist.

Mochten über die ganze Reihe der Einzelprobleme, sowohl bei den Fachgelehrten, wie in den weiteren Kreisen der Gebildeten, so verschiedene Vorstellungen und Lösungsgedanken gehegt werden wie nur irgend möglich, in einem Punkte war man und sind wir alle bis auf den heutigen Tag — ehrliche und gewissenhafte Selbstprüfung vorausgesetzt — im letzten Grunde einig gewesen: Wir alle¹⁾ haben rückhaltlos den Raum sowohl wie die Zeit bisher im Rahmen unserer Wirklichkeit für etwas durchaus Eindeutigfestliegend-absolutes gehalten.

§ 8. Die absolute Zeit.

Das heißt: Natürlich wußte, um mit der Zeit zu beginnen, ein jeder von uns sehr wohl, daß die Zeit, so wie wir sie messen, konventionelle Bestandteile enthält. Die Zeiteinheiten (Jahr, Tag) beruhen auf Verabredung, die Unterteilungen (z. B. Monat, Sekunde) erst recht, und verschiedene andere Einzelheiten mehr (z. B. die sogenannte Nullpunktfestsetzung, d. h. die Bestimmung, wann es auf einem bestimmten Punkt der Erde, etwa Wolfenbüttel, 12 Uhr mittags sein soll). Aber das ist ja alles nicht „Die Zeit“. Keiner von uns hat im geringsten bezweifelt — und die Wissenschaft hat das auch nicht getan —, daß die willkürlichen Bestandteile in der Zeitmessung eben nur unsere subjektiven Zutaten sind, von denen „Die Zeit“ als solche selbstverständlich nicht im geringsten berührt werden konnte. Diese selber war für uns alle, wenn wir es recht deutlich ausdrücken wollen, das eine unabhängige, unbeeinflusste Etwas hinter dem Ablauf der Welt, das immer und ewig seinen ruhigen, gleichmäßigen Gang weiter geht, unbeirrt durch den bunten Wechsel der Erscheinungen; eben dasjenige, was wir mit den zwei kurzen Worten bezeichnen: „Die Zeit“.

¹⁾ Auch Kant.

§ 9. Der absolute Raum.

Ganz genau so ist es mit dem Raume gewesen. Auch hier war uns selbstverständlich wohl bewußt, daß unsere Wahrnehmung oder Messung räumlicher Verhältnisse willkürliche Bestandteile enthält. Schon der konventionelle Charakter der Maßeinheiten zeigte das deutlich, andere Gesichtspunkte kamen hinzu. Aber alles das betraf wieder nicht den Raum selber. Dieser „Der Raum“ stand hinter dem allen wieder dahinter als das eine feste, unverrückbare Etwas, grob ausgedrückt gewissermaßen als der fest gegebene leere Behälter, in welchem die ganze bunte, vielgestaltige Welt der Erscheinungen enthalten war, in welchem sie sich, dem zeitlichen Ablauf folgend, bewegte und veränderte, löste und durchschlang.

§ 10.

Es muß besonders hervorgehoben werden, daß, genau wie „Die Zeit“, so auch „Der Raum“ keineswegs etwa nur ein Bestandteil der volkstümlichen Weltauffassung gewesen ist. Im Gegenteil hat, zusammen mit dem Zeitbegriff, gerade der Begriff des Raumes die unentbehrliche Grundlage auch des wissenschaftlichen Weltbildes geliefert, so wie sich dasselbe mit dem Erwachen des naturwissenschaftlich-mathematischen Geistes in allseitiger Vervollkommnung herausgebildet hat.

Dies im einzelnen zu entwickeln, ist nachher Hauptgegenstand unserer geschichtlichen Darstellung. Der ausdrückliche Hinweis schon an dieser Stelle war nötig, weil unklare philosophische Lehren, wie: es sei nicht festzustellen, ob sich die Sonne um die Erde drehe oder die Erde um die Sonne, nebst übereilten Folgerungen leider bis in physikalische Lehrbücher eingedrungen sind.

§ 11.

So war für uns alle dies eine ein unbezweifelbares, durch die Wissenschaft selber gebotenes Wert- und Wesensurteil über die Beschaffenheit von Raum und Zeit: Raum und Zeit sind etwas Absolutes; sie sind eben „Der Raum“ und „Die Zeit“.

Der Raum und Die Zeit! Recht besehen, waren sie uns nicht nur „etwas“ Absolutes, nicht nur ein Absolutes —, sondern das Absolute, das letzte grundtragende Absolute in der Welt.

Es ist eine bekannte Tatsache, daß die Wissenschaft im Laufe der geschichtlichen Entwicklung eine überaus große Menge von

Dingen, Tatsachen und Beziehungen, die der ursprüngliche Menschenverstand für etwas Unveränderlich-fest-absolutes hält, in diesem oder jenem Betracht „relativiert“ hatte. D. h. sie hatte bei einer großen und immer länger werdenden Reihe von einzelnen, scheinbar über jede willkürliche Auffassung erhabenen Bestandteilen unserer Wirklichkeit nachgewiesen, daß sie subjektive Elemente enthalten. Wir denken dabei keineswegs an die bekannten, mehr philosophischen Fragen, z. B. ob schön und häßlich absolute, im Wesen der Wirklichkeit selber liegende Werte sind oder nicht, vielmehr lediglich an die exaktwissenschaftlichen Fragen selber. Man hat oft ausgesprochen, daß der Relativismus in einer geradezu verheerenden Weise in die anscheinend so absoluten Bereiche der wissenschaftlichen Erfahrung eingebrochen sei. Vollständige große Gebiete der exakten Naturwissenschaft zeigen sich stark mit subjektiven Elementen durchsetzt. Man denke nur an Begriffe wie warm und kalt, leicht und schwer, hell und dunkel usw. Ja, sogar die Materie selber, nicht nur ihre äußere sinnliche Erscheinung, ist von dem Relativitätsgedanken angegriffen worden. Der Kenner weiß sehr wohl, wie ganz allmählich im Laufe der geschichtlichen Entwicklung selbst dieser scheinbar unentbehrliche Begriff des Stoffes vielfach als mit subjektiven Bestandteilen belastet in Zweifel gezogen worden ist.

Aber eins, das stand bisher unerschüttert und unverändert, wo vieles, vielleicht alles, wankte: Das war eben „Der Raum“ und „Die Zeit“. Mochte das ganze Bild der Welt, wie der menschliche Geist es nachschaffend in den Raum und die Zeit hineinzeichnet, in keiner denkbaren Form von subjektiven, relativistischen Elementen frei sein; dies eine Absolute blieb — etwas Absolutes mußte man ja auch, so meinte man wohl instinktiv, eigentlich haben, um überhaupt ein objektiv richtiges Weltbild zeichnen zu können.

Es gibt eine höchst kennzeichnende Fassung, in der man diese Grundüberzeugung zum Ausdruck brachte, nämlich den bekannten Ausspruch: Alles könne man sich zur Not aus der Welt wegdenken, alles Licht, alle Farbe, jeden Ton, jeden Duft, Wärme und Kälte, ja, wenn es sein müßte, alle Bewegung, alle Kraft, schließlich sogar den Stoff, den Träger alles Wirklichen selber, nur eins könne man auf ganz und gar keine Weise hinaus schaffen, das bleibe immer, nämlich: „Der Raum“ und „Die Zeit“.

§ 12. Der Relativitätsgedanke.

Das ist, in nuce, der absolute Raum und die absolute Zeit in ihrer Wertschätzung als wesentlichste, über allen Subjektivismus und Relativismus hoch erhabene „absolute“ Grundelemente der Wirklichkeit.

Diese anscheinend so gesicherte, anscheinend so unentbehrliche, „absolute“ Wesensauffassung von Raum und Zeit ist es, die das Relativitätsprinzip angreift.

Das Relativitätsprinzip behauptet: Auch für Raum und Zeit, die letzten untersten Grundbestandteile der Wirklichkeit, ist das Urteil „absolut“ keineswegs eine Selbstverständlichkeit. Die Antwort „absolut“ ist nur die eine Lösung der großen Scheidefrage, die ebenso wie für alles, was sich in Raum und Zeit abspielt, so auch für Raum und Zeit selber aufgeworfen werden muß, nämlich der Frage: Absolut oder relativ? Und zwar ist absolut auch hier die falsche Lösung; auch hier heißt die richtige Lösung „relativ“.

Auch „Der Raum“ und „Die Zeit“ sind nur vorläufige, der Wirklichkeit nicht entsprechende subjektive Hilfsbegriffe eines unhaltbaren Weltbildes. In Wirklichkeit existieren „Der Raum“ und „Die Zeit“ im absoluten Sinne nicht. Auch Raum und Zeit sind Standpunktssachen. Es gibt in Wirklichkeit nur eine unendliche Schar von relativen, gleichberechtigten, aber untereinander sämtlich verschiedenen Standpunkts-Räumen und -Zeiten.

§ 13. Einteilung.

Die geschichtliche Entwicklung verläuft in mehreren Abschnitten. Unser Ziel, das Relativitätsprinzip, ist nicht die erste und einzige Verkörperung des raumzeitlichen Relativitätsgedankens.

Wie schon erwähnt, enthalten ja Raum und Zeit, wie wir sie gewöhnlich darstellen und auffassen, einige konventionelle Elemente. Für das Verständnis der weiteren Entwicklung sind wir genötigt, dieselben zusammenzustellen. Wir nennen sie nach derjenigen Art von räumlicher Gleichwertigkeit, die dabei besonders hervortritt, „Lagenrelativität“.

Darauf folgt eine Vorstufe, die dem eigentlichen modernen Relativitätsprinzip geschichtlich vorhergegangen ist, das sogenannte „Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik“.

Schließlich als letztes Ziel das neue Relativitätsprinzip selber, kurz „das Relativitätsprinzip“.

So entstehen drei Teile, der erste kurz, der zweite länger, der dritte am längsten.

Davor und dazwischen schieben sich die Abschnitte: Absoluter Raum und Zeit I, II und III, von denen der erste die wissenschaftliche Begründung der absoluten Raum- und Zeitvorstellung wiedergibt, der zweite, nach Erledigung der Lagenrelativität, den absoluten Raum und die absolute Zeit schärfer faßt, der dritte, hinter dem mechanischen Relativitätsprinzip, eingehend die letzte Form derselben absoluten Raum- und Zeitvorstellung ausmalt, von der dann der steile Aufstieg zum neuen Relativitätsprinzip als Allgemeinesetz der ganzen Natur erfolgt.

Dritter Abschnitt.

Absoluter Raum und absolute Zeit I.

§ 14.

Daß der absolute Raum und die absolute Zeit dem bisherigen wissenschaftlichen Weltbilde zugrunde gelegen haben, ist erörtert worden. Dagegen noch nicht, was dieser ihr wissenschaftlicher Begriff gewesen ist und worauf er sich gründet.

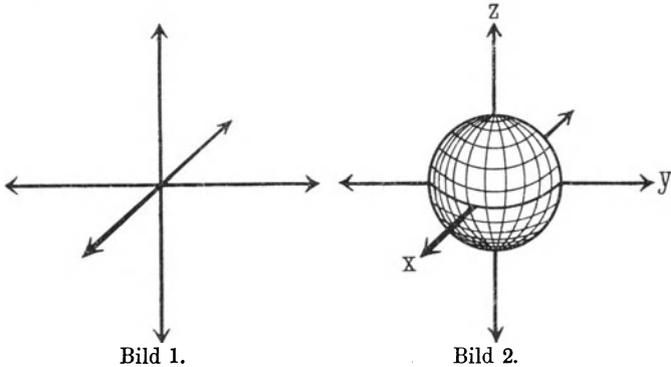
Zur besseren Verständigung wollen wir die üblichen Veranschaulichungsmittel benutzen.

§ 15. Veranschaulichungsmittel für Räume.

Irgendwelche „Räume“ veranschaulicht man in der Physik mit einem Hilfsmittel, das denjenigen geschlossenen Räumen entlehnt ist, in denen wir uns täglich aufhalten, nämlich Zimmern von der gewöhnlichen rechteckigen Form.

Wenn man den Raum eines Zimmers möglichst vollständig übersehen will, stellt man am besten einen Stuhl in eine freie Ecke und setzt sich darauf. Dann bezeichnen die drei Kanten, die von der Zimmerecke ausgehen, die drei räumlichen Hauptrichtungen, Länge, Breite, Höhe. Liegt die Ecke im Innern des Hauses, so hat in der Regel jede der drei aufeinander senkrechten Raumlinien in anderen Räumen des Hauses ihre rückwärtige Verlängerung. Dadurch entsteht ein dreifaches Kreuz von drei beliebig verlängerbaren, sich in einem Punkte senkrecht schneidenden

Linien (vgl. Bild 1). Das Kreuz heißt Koordinatensystem oder kurz „System“, die drei Linien Raumachsen oder Koordinaten-



achsen oder einfach Achsen, der gemeinsame Schnittpunkt Raum-Nullpunkt oder Koordinaten-Anfangspunkt.

§ 16. Fragestellung für den Raum.

So veranschaulicht man den „Raum der Erde“ durch drei ebensolche aufeinander senkrechte Achsen, die durch die Erde, wie Stricknadeln durch ein Garnknäuel, hindurchgesteckt, und wieder beliebig verlängerbar zu denken sind. Die eine (z) mag von Norden nach Süden gehen, dann liegen die beiden anderen (x und y) in der Ebene des Äquatorkreises (Bild 2).

Weshalb ist dieser „Systemraum“ der Erde nicht „Der Raum“?

Machen wir uns zunächst klar, daß es unendlich viele „Systemräume“ sind, die mit der Erde um den Anspruch, „Der Raum“ zu sein, im Wettbewerb stehen.

Genau wie durch die Erde, kann man durch jeden anderen Weltkörper ein Koordinatenkreuz hindurchgesteckt denken und ihm dadurch seinen „Systemraum“ anschaulich zuordnen. Alle diese Systemräume drängen und schieben, drehen und schlingen sich dann in den verschiedensten Bewegungen durcheinander; jeder Systemraum ist ein anderer als der andere; abgesehen von dem seltenen Ausnahmefall, daß irgend zwei Himmelskörper einmal kurze Zeit genau den gleichen Bewegungszustand haben, also ihre Systemräume solange eine Einheit bilden, gehört zu jedem Himmelskörper ein eigener, nur ihm zukommender Systemraum. Ins Unendliche wächst die Anzahl dieser Systemräume, wenn man

erwägt, daß die beobachteten Sternbewegungen nur einen Ausschnitt aus allen möglichen Sternbewegungen darstellen. Man kann sich schlechthin unendlich viele Koordinatensysteme in unendlich vielen verschiedenen Bahnen mit unendlich vielfach abgestuften und veränderlichen Geschwindigkeiten durcheinander hindurch bewegt denken und von ebenso unendlich vielen Systemräumen sprechen.

Weshalb gibt es unendlich viele „Systemräume“, aber nur einen „Raum“?

§ 17. Die Naturgesetze.

Mit der Antwort beginnen wir wieder bei der Erde.

Wenn die Wissenschaft nichts weiter könnte, als die gegenseitigen Bewegungen beschreiben, dann hätte sie niemals den alten, vorkopernikanischen Standpunkt überwunden: Der Systemraum der Erde sei der Raum. Denn vom reinen geometrischen Gegenseitigkeitsstandpunkte ist es ganz gleichgültig, ob sich die Sonne um die Erde oder die Erde um die Sonne dreht.

Aber die Wissenschaft leistet mehr. Sie erforscht auch die „Kräfte“ der Natur und geht von da über zu den Natur-„Gesetzen“. Diese Naturgesetze — und nur sie — sind es, die zum absoluten Raumurteil führen.

Im Systemraum der Erde sind die Naturgesetze nicht erfüllt — das ist der wissenschaftliche Grund dafür, dem Erdraum den Charakter „des Raumes“ abzusprechen.

Der absolute Raum ist der Raum der Naturgesetze. In allen den unendlich vielen anderen sich gleich der Erde bewegenden und drehenden Systemräumen gelten genau wie im Erdraum die Naturgesetze nicht: diese Einsicht spricht allen den anderen Systemen den Charakter des absoluten Raumes gleichfalls ab und erkennt ihm nur dem einen, „Dem Raume“ zu.

§ 18.

Beweise für die Nichterfülltheit der Naturgesetze auf der Erde gibt es heute eine ganze Menge.

Es ist üblich, als Beleg besonders das einfachste aller Naturgesetze heranzuziehen, nämlich das Trägheitsgesetz (Inertialgesetz, $\text{inertia} = \text{Trägheit}$).

Das Trägheitsgesetz ist deshalb das allereinfachste Naturgesetz, weil es aussagt, was geschieht, wenn auf einen Körper

gar keine Kräfte einwirken. Es lautet bekanntlich: Der Körper beschreibt, solange er nicht von Kräften beeinflusst wird, eine „Inertialbewegung“, d. h. er bewegt sich in gerader Linie und legt in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurück (wenn er im besonderen Falle „ruht“, so bleibt er „ruhend“, vgl. über diese Ausdrücke § 22).

Das Trägheitsgesetz ist in der Tat auf der Erde, oder im Systemraum der Erde, nicht erfüllt.

Gälte das Trägheitsgesetz auf der Erde, so müßte z. B. ein frei aufgehängtes schwingendes Pendel auf der Erde immer in derselben „irdischen“ Richtung schwingen; tatsächlich tut es das nicht, es „richtet“ sich nach einem anderen Etwas (eben „Dem Raum“), die Erde dreht sich unter ihm in 24 Stunden einmal herum: Foucaultsches Pendel.

Daß das Trägheitsgesetz für Vorgänge, die sich über kleine Strecken und kurze Zeiten ausdehnen, auch auf der Erde annähernd stimmt, ist eine Sache für sich, es kommt von der geringen Größe ihrer Drehgeschwindigkeit.

Würde sich die Erde schneller drehen, so wäre der Foucaulteffekt in viel kleineren Zeiten zu bemerken, wie jeder Versuch auf dem Karussell oder mit der Zentrifugmaschine beweist.

§ 19. Der absolute Raum.

Das ist also das Merkzeichen für die Entscheidung der Frage: „Raum“ im absoluten Sinne des Wortes oder nur „Systemraum“? Es heißt kurz: Sind die Naturgesetze erfüllt oder nicht?

Auf diesem Wege ist die Wissenschaft dazu gekommen, dem Erdsystem den Charakter des Raumes zu nehmen; gleichzeitig büßte alles, was sonst die Sonne umkreist, an Planeten und Kometen usw., erst recht die Untertrabanten der einzelnen Körper, für sein System den Anspruch auf den Raum ein. Denselben Weg ist die Wissenschaft weiter gegangen, sie hat auch den Systemraum der Sonne nicht als „den Raum“ anerkannt, sondern ihn ebenfalls für „im Raume bewegt“ erklären müssen; das gleiche Urteil mußte sie fällen für alle Systemräume, die der Sonne gleich stehen. Jedoch ist dann bald, in erreichbarer Ferne, diejenige Grenze gekommen, welche das Erfülltsein der Naturgesetze bringt und damit den „absoluten Raum“ festlegt. Sie wird durch ein Wort gekennzeichnet, das uns modernen Menschen zum mindesten

in diesem Zusammenhang etwas merkwürdig klingt: Die Grenze ist der Himmel; der Himmel ist der absolute Raum.

Nämlich der sogenannte Fixsternhimmel. Und das ist so zu verstehen. Man weiß ja sehr wohl, daß die einzelnen Glieder dieses ganzen fast unübersehbar vielgestaltig zusammengesetzten Sternenheeres sich mannigfach, in den verschiedensten Richtungen und mit den denkbar verschiedensten Geschwindigkeiten gegen- und umeinander bewegen. Aber man muß den Fixsternhimmel als Ganzes ins Auge fassen. Bewegung und Ruhe eines Ganzen ist ja immer und überall etwas anderes als Bewegung und Ruhe der einzelnen Teile. Man denke nur an sich selber, wenn man geht: die Bewegung des ganzen Körpers ist annähernd gleichmäßig nach vorn, davon weichen aber durchaus ab die Einzelbewegungen der Arme und Beine.

Bekanntlich darf man in solchen Fällen, einer wissenschaftlichen Ausdrucksweise folgend, für die Bewegung oder Ruhe des Ganzen auch die Bewegung oder Ruhe des Schwerpunktes oder Massenmittelpunktes einsetzen. Indessen empfiehlt sich dieser Begriffersatz, wenn man anschaulich bleiben will, nicht. Besser denkt man sich das Ganze von einer großen, alle Teile einschließenden geometrischen Hüllfläche, z. B. einer sehr großen Hohlkugel, eingeschlossen. In diesem Sinne spricht man von dem Fixsternhimmel als Ganzem.

In diesem Fixsternhimmel gelten also, so lautet das Ergebnis der Wissenschaft, die Naturgesetze genau. Oder, wenn wir mit diesem Himmel ein Koordinatenkreuz „fest verbinden“, d. h. mitten in ihn hineinstellen: dieses „absolute Koordinatensystem“ ist dasjenige eine gesuchte, dessen Raum nicht ein bloßer Systemraum ist, sondern „der Raum“ selbst, der „absolute Raum“.

§ 20.

Es war oben von unwissenschaftlichen, „metaphysischen“ Trübungen die Rede, welchen der wissenschaftliche Begriff des absoluten Raumes ausgesetzt gewesen sei.

Die Koordinatenraum-Veranschaulichung erlaubt, das innerste Wesen jener Irrtümer bloßzulegen. Es handelt sich um die Behauptung, daß eigentlich alle Bewegungen gleichwertig seien; d. h. alle diejenigen Räume, welche wir als bloße subjektive „Systemräume“ erkannt haben, werden unserem „absoluten Raum“ gleich-

gesetzt. Man sieht, bei dieser Behauptung handelt es sich einfach um ein Vernachlässigen der wissenschaftlichen Tatsachen: tatsächlich sind die Naturgesetze in den Systemen wie Erde usw. nicht erfüllt, deshalb muß man diesen „Systemräumen“ die Gleichwertigkeit mit dem „absoluten Raume“ des Fixsternhimmels absprechen.

§ 21.

Es liegt aber hier noch ein Tieferes in Rede und Gegenrede verborgen.

In einer anderen — durchaus anderen, von jenen Metaphysikern selber nicht gemeinten und nicht aufgestellten — Formulierung läßt sich allerdings die Lehre von einer Unerkennbarkeit eines gewissen Bewegungszustandes verstehen: Wenn man unseren „Raum“ als Ganzes ins Auge faßt — etwa anschaulich wieder eingewickelt in die große Kugelhülle —, dann kann man allerdings nicht entscheiden, ob und wie etwa dieser „Der Raum“ als Ganzes sich wieder „bewegt“¹⁾.

Aber diese Frage ist überhaupt ohne Sinn; denn ihr Aufstellen beruht auf einer Grenzüberschreitung. Solange unser Raum bis zu den Sternen reicht, die jetzt die letzten direkt oder indirekt wahrnehmbaren sind, ist da die räumliche Grenze unseres Wissens; erweitert sich das Wissen, so rückt die Grenze weiter hinaus; aber die Grenze bleibt.

Die Wissenschaft bezieht sich nur aufs Endliche; denn menschliche Vorstellungskraft reicht überall nicht über Endliches hinaus.

Wollen sich die Metaphysiker in diesem Sinne einer Grenzüberschreitung in Träumen über die Bewegung unseres „absoluten“ Raumes als Ganzes ergehen, so mögen sie das tun und in diesem Sinne ruhig von der Gleichberechtigung, richtiger Unterscheidbar-

¹⁾ In diesem Zusammenhang muß ich die Lehre einer physikalisch-philosophischen (also wissenschaftlichen) Schule erwähnen, der Positivisten. Die Positivisten haben dem Begriff des absoluten Raumes von jeher die volle Anerkennung versagt und unsere absolute Raum- und Zeitauffassung als relativistisch bezeichnet (E. Mach, J. Petzoldt, J. B. Stallo u. a. m.). Sie haben prophetischen Geist bewiesen. Aber ihr Voraussagen beruhte darauf, daß sie Einzelvermutungen vorsehend auf die ganze Natur übertrugen; die geschichtliche Entwicklung bis zu unserem Relativitätsprinzip hin hat den Weg nicht eingeschlagen, den sie weisen zu können glaubten. Der gebildete Laie, der in unser Relativitätsprinzip eindringen will, tut besser, die positivistischen Lehren, wenn er von ihnen weiß, bis auf weiteres zu vergessen.

keit, irgendwelcher Bewegungszustände des Raumganzen reden; sie sind da in einem Gebiet, auf dem sie von jeher am besten zu Hause gewesen sind, nämlich dem Reden über Dinge, die des Sinnes entbehren.

§ 22. Begriff der Ruhe.

Die klare Abgrenzung gegen die begrifflich doch unerreichbare Unendlichkeit findet ihren abschließenden Ausdruck in der üblichen Verwendung des Begriffs der „Ruhe“.

Ein Körper, der auf der bewegten Erde usw. usw. ruht, ruht in Wirklichkeit, im Raume, nicht; es sei denn, daß die Erde usw. infolge Sichaufhebens ihrer Bewegung mit den übergeordneten Bewegungen einmal ihrerseits kürzere oder längere Zeit im absoluten Raume ruhte.

Ein Körper „ruht“, wenn er im absoluten Raume (oder „im absoluten Koordinatensystem“) ruht.

Im gleichen Sinne sagt man: der absolute Raum selber „ruht“, oder: das absolute Koordinatensystem ist „in Ruhe“.

§ 23. Eine erkenntnistheoretische Anmerkung

ist hier am Platze. Es geht aus dem Vorigen klar hervor, wie der Begriff des Raumes erstens durch ganz schrittweises Aufsteigen aus der Erfahrung, zweitens in ausdrücklicher Beschränkung auf Endliches, drittens aber auch nicht ohne eine gewisse Abstraktion gewonnen wird (z. B. bei dem Begriff des Fixsternhimmels „als Ganzem“).

Dieses Abstrahieren mag vielleicht dem kritischen Gemüte bedenklich erscheinen.

Doch liegt gerade die Notwendigkeit des Abstrahierens wieder im innersten Wesen aller Wissenschaft. Gerade indem wir von den Ungeordnetheiten des uns zunächst umgebenden Materials vordringen zu Gesetzmäßigkeiten, die das Rohmaterial nur verhüllt zeigt, gerade auf diesem Wege allein dürfen wir ja hoffen, zu Ergebnissen zu gelangen, die wirklich „absolut“, „losgelöst“ von zufälligen Bedingtheiten sind.

§ 24. Die absolute Zeit.

Eben diesen selben Aufstieg vom ungenauen Rohbefunde zur gesetzmäßigen Begriffsbildung zeigt auch der Begriff der „absoluten Zeit“, dessen Begründung wir noch schuldig sind.

Wir können uns hier kürzer fassen. Der wissenschaftliche Begriff der Zeit beginnt bei den, gleiche Vorgänge benutzenden, Meßinstrumenten, läutert sich an den von zufälligen Störungen bedeutend freieren regelmäßigen Bewegungen der Gestirne und steigt so zu innerlich derselben Vorstellung des gleichmäßig dahinfließenden Etwas auf, die wir schon oben als gleichzeitig volkstümliche und wissenschaftliche Anschauung festgelegt haben.

Wesentliche Hindernisse hat hier, bei der Zeit, die Aufwärtsentwicklung des Begriffes nicht erfahren.

Als Veranschauligungsmittel für „die Zeit“ genüge vorläufig eine große Uhr, die Weltenuhr, die etwa im Nullpunkt des absoluten Koordinatensystems aufgestellt ist und, gleichmäßig weiterlaufend, „die Zeit“ anzeigt.

Vierter Abschnitt.

Lagenrelativität.

§ 25.

Wie eingangs auseinandergesetzt, sind wir jetzt genötigt, sorgfältig diejenigen konventionellen bzw. subjektiven Bestandteile zusammenzustellen, die bereits unserer bisherigen absoluten Raum- und Zeitvorstellung angehört haben.

Wir tun das in einer scharfen Gliederung in vier Teile. Diese Gliederung wird in den ganzen folgenden Entwicklungen immer wieder hervortreten.

§ 26. Relativität der räumlichen Richtung und des Raum-Nullpunktes.

Im täglichen Leben unterscheidet man die drei räumlichen Richtungen:

1. vorwärts — rückwärts,
2. links — rechts,
3. oben — unten.

Daß Nr. 1 und 2 nur Standpunktsäußerungen sind, erfährt der Mensch von jeher schon als Kind; für Nr. 3 ist die Relativität erst durch die bejahende Lösung der Gegenfüßlerfrage (bzw. der Kugelgestalt unserer Erde) entschieden worden.

Wenn wir daher oben (§ 19) übereingekommen sind, den absoluten Raum durch ein „Koordinatenkreuz“ zu veranschaulichen,

so tritt dazu die Relativitätserkenntnis: die Richtung der drei aufeinander senkrechten Kreuzachsen im Verhältnis zum „Fixsternhimmel“ ist willkürlich; das Kreuz kann in jede beliebige andere Lage hineingedreht, in dieser festgehalten und so als Normalkreuz angesehen werden (hierzu kein Bild).

Man kann auch den Koordinaten-Nullpunkt — und damit das ganze Achsensystem selber — um beliebige Stücke von der ursprünglich angenommenen Lage aus verschoben und dort festgelegt denken. Die Lage des Nullpunktes hat also, genau wie die Richtung der Achsen, keine absolute Bedeutung.

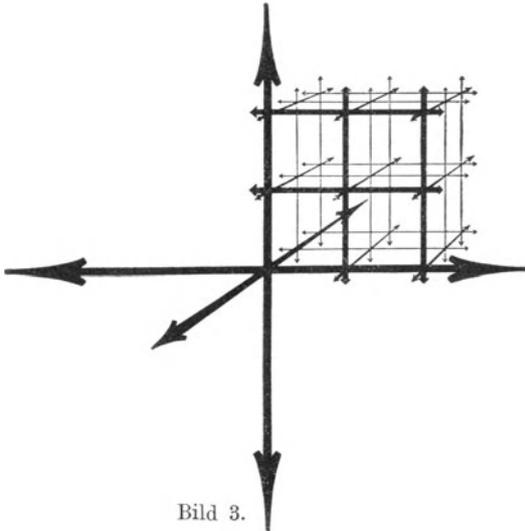


Bild 3.

Entgegenstehende Lehren gab es vor und nach Kopernikus. So die Ansicht, Sonne oder Erde sei die Mitte des Weltalls, oder die altchristliche: Jerusalem Mittelpunkt der Welt.

Einen Mittelpunkt der Welt gibt es nach den Kenntnissen der heutigen Physik nicht.

Zur Veranschaulichung kann man das ursprüngliche Raumkreuz (unbeschadet seiner willkürlichen Achsenrichtung) zu einem Raumgerüst erweitern, indem man von jeder der acht inneren Ecken aus ein ideales Gestell von lauter gleich großen Würfeln netzartig angebaut denkt bis ins Unendliche (vgl. Bild 3 u. 4; bei dem letzteren ist auf eine bessere Tiefenwirkung verzichtet worden, um nicht zu verwirren).

Dann entstehen unendlich viele neue Kreuzungspunkte und Kreuze, das ursprüngliche Kreuz geht in diesen unterschiedslos auf. Man kann sich das ursprüngliche Kreuz an jeden anderen

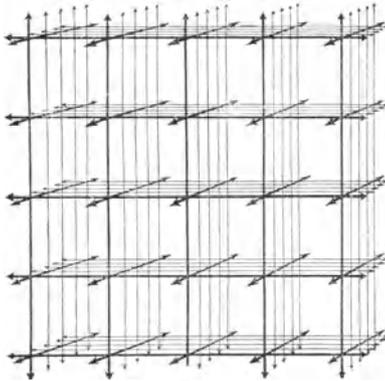


Bild 4

Kreuzungspunkt verlegt denken, natürlich auch überall zwischen ein (vgl. § 27).

Wegen der Richtungsrelativität kann das ganze Gerüst in jede andere Richtung gedreht und so festgehalten werden.

Die Veranschaulichung ist nicht zu unterschätzen, im Grunde denken wir uns alle so den „Raum“; d. h. unsere abstrakte Raumvorstellung findet in dieser Veranschaulichung ihr

zutreffendes Abbild. Auch wer den Raum nur für eine Zutat zu den Dingen hält, stellt sich, „den Raum selber“, wenn er anschaulich sein will, so vor.

§ 27. Relativität des Raummaßstabes.

Schließlich ist auch die Maßstabgröße für den Raum relativ. Das Raumgerüst des vorigen Paragraphen wird sich ein jeder zunächst nach einer der ihm geläufigen Maßeinheiten aufgebaut denken, etwa Zentimeter oder Meter; indessen sind diese alle „anthropomorph“, eine absolut bindende Einheit gibt es nicht.

Das Raumgerüst ist also von willkürlichem Grundmaß.

§ 28. Relativität der zeitlichen Richtung und Relativität des Zeitnullpunktes.

Dem Raumgerüst mit seinen drei Ausdehnungen entspricht die bekannte Darstellung der Zeit durch eine mit gleichweit abstehenden Marken belegte gerade Linie (vgl. Bild 5).



Bild 5.

Da es demnach nur eine Zeitachse gibt, gegenüber den drei das Koordinatenkreuz bildenden Raumachsen, fällt die Möglichkeit der Drehung in andere Lagen und damit die Richtungsrelativität bei der Zeit fort.

Dagegen steht heutzutage vollkommen unbezweifelt fest, daß der Nullpunkt der Zeitrechnung ein völlig willkürlicher ist.

Kein Punkt der unendlich langen Zeitlinie ist vor den anderen innerlich bevorzugt; man kann die Linie mit den Zeitmarken beliebig in ihrer Richtung verschoben denken, genau wie das Raumachsenkreuz im Raumgerüst.

Entgegenstehende Anschauungen waren z. B. alle Lehren von einem „Anfang der Welt“.

§ 29. Relativität des Zeitmaßstabes.

Schließlich gehört noch zu den gesicherten Lagenrelativitätserkenntnissen die Relativität des zeitlichen Maßstabes, also die Einsicht, daß die Sprossenleiter für die Zeit von willkürlichem Grundmaße ist.

Fünfter Abschnitt.

Absoluter Raum und absolute Zeit II.

§ 30.

Die im vorigen zusammengestellten relativistischen Einschränkungen:

1. Nullpunkts- und Richtungsrelativität des Raumes,
2. Maßstabsrelativität des Raumes,
3. Nullpunktsrelativität der Zeit,
4. Maßstabsrelativität der Zeit

sind uns Menschen des 20. Jahrhunderts, wie gesagt, keineswegs neu. Wir haben sie mehr oder weniger stillschweigend schon längst in unser Bild von dem absoluten Raum und der absoluten Zeit aufgenommen. Die lagenrelativistischen Einzelzüge beeinträchtigten unser absolutistisches Gesamtbild nicht, sondern vervollständigten dasselbe erst, indem sie die „anthropomorphen“ Zutaten, oben—unten usw. als solche erkennen ließen.

Es ist uns daher jetzt auch möglich, die eigentlichen „absoluten“ Eigenschaften des absoluten Raumes und der absoluten Zeit schärfer zu bestimmen und damit diejenige Grundlage genau festzulegen, von der aus dann der Aufstieg zu unserem modernen Relativitätsprinzip erfolgt.

§ 31. Die absolute Raumeigenschaft R I.

Als Veranschaulichung für den Raum haben wir das im ruhenden Fixsternhimmel in irgendeiner beliebig gewählten Orientierung festgelagerte Raumgerüst kennen gelernt, oder einfacher das Koordinaten-Achsenkreuz, das wir uns mit seinem Nullpunkt an irgendeiner Stelle des unendlich ausgedehnten Gerüstes festgelegt denken konnten (§ 26).

Standpunktssache oder „relativ“ waren dabei zunächst Achsenrichtung und Nullpunktslage. Jedoch liegt auf der Hand: hat man eine bestimmte Achsenrichtung gewählt und sich für eine bestimmte Nullpunktslage entschieden, hat man also mit einem Worte ein bestimmtes Koordinatenkreuz als Raumveranschaulichung herausgegriffen, dann muß man bei diesem Koordinatensystem bleiben; man kann nicht zu irgendeiner späteren Zeit ein anderes der unendlich vielen Achsenkreuze und zu einer noch späteren Zeit wieder ein anderes für „den Raum“ erklären wollen, man darf, kurz gesagt, dasjenige Kreuz, welches den Raum bedeuten soll, nicht an irgendwelche andere Stellen des Raumgerüstes bewegt denken. Das Kreuz muß mit seinem Nullpunkt fest liegen bleiben und ebenso müssen die drei Koordinatenachsen immer dieselbe Richtung beibehalten, wie anfangs festgelegt.

Nur ein solches festes Koordinatenkreuz kann das darstellen, was das Koordinatenkreuz darstellen soll, nämlich „Den Raum“. Ein Kreuz, welches sich in irgendeiner (geraden oder krummen) Richtung bewegt, oder dessen Achsen sich gar drehen, ist nicht identisch mit „Dem Raum“; es kann nur eine Bewegung im Raume veranschaulichen, aber nicht den ruhenden Raum selbst. Der Raum selber kann sich ganz selbstverständlich nicht bewegen, sonst wäre er ja nicht „Der Raum“.

Das ist die erste wesentliche Eigenschaft des absoluten Raumes. Wir wollen sie kurz mit R I bezeichnen.

§ 32. Die absolute Raumeigenschaft R II.

Auch die relativistische Einschränkung des § 27 (Raum-Maßstab) hat ein absolutistisches Gegenstück.

Gewiß ist die Raumeinheit, also etwa das Grundmaß unseres Raumgerüstes, willkürlich. Wenn aber das Raumgerüst einmal festgelegt ist, so muß es überall und jederzeit gleiche Weite der Maschen behalten; eine Maschenverengung oder -erweiterung

würde nur eine Zusammenziehung oder Ausdehnung eines körperlichen Gebildes im Raume bedeuten können. Der Raum selber kann sich ganz selbstverständlich weder im ganzen noch an einzelnen Stellen ausdehnen oder zusammenziehen, sonst wäre er eben nicht „Der Raum“.

Diese zweite absolutistische Grundeigenschaft des Raumes soll R II heißen.

§ 33. Die absolute Zeiteigenschaft Z I.

Den räumlichen Eigenschaften R I und R II entsprechen zwei zeitliche Z I und Z II.

Die Eigenschaft Z I ist die absolutistische Ergänzung zur Relativität des Zeitnullpunktes (§ 28). Gewiß kann man den Nullpunkt festlegen, wie man will; aber so wie er einmal, d. h. hier natürlich an einem Orte, festgelegt ist, gilt er allgemein, d. h. für alle Orte.

Auf den ersten Blick erscheint diese Fassung vielleicht unerwartet. Doch ist sie gerade so das genaue Gegenstück zu R I. Dort hieß es: der räumliche Nullpunkt bleibt, einmal festgelegt, derselbe für alle Zeiten; hier: der zeitliche Nullpunkt muß derselbe sein für alle Orte.

Machen wir uns den eigentlichen Sinn wieder an einer Veranschaulichung klar. Wir wollen uns den Raum wie oben als Raumgerüst und darin die Zeit durch Uhren dargestellt denken, die etwa in jedem Knotenpunkt des Raumgerüstes angebracht sind (vgl. Bild 6; diese Zeitveranschaulichung ist für später festzuhalten).

Dann sagt Z I: alle diese Uhren müssen, wenn sie „Die Zeit“ selber bedeuten sollen, in demselben „Zeitpunkt“ auch wirklich alle dieselbe Zeit zeigen.

Es genügt dabei, die Forderung für einen Zeitpunkt (Zeitnullpunkt, im Bilde etwa „zwölf Uhr“) auszusprechen; für alle übrigen, späteren und früheren, Zeiten wird die gleiche Einstellung dann durch die sogleich zu besprechende Bedingung Z II gewährleistet. [Genau wie man beim Raum die unveränderte Lage (R I) nur für einen Raumpunkt (Raumnullpunkt) zu fordern braucht, alle übrigen Raumpunkte hält R II fest.]

Die Bedingung Z I selber ist uns im Grunde so außerordentlich selbstverständlich, daß wir uns ihrer kaum bewußt werden. Es ist aber eine ganz eigentümliche Sache mit dieser Selbstverständlichkeit. Wir selber, auf der Erde, rechnen tatsächlich gerade

mit örtlich verschiedenen Zeiten (mitteleuropäische Zeit usw.). Wir betrachten es eben ohne weiteres als in der Natur der Sache selber liegend, daß alle diese „Ortszeiten“ nur subjektive Zutaten (nämlich eben willkürliche Zeitnullpunktsfestlegungen) sind, daß aber die wirkliche Zeit, hinter dem allen hinfließend, für alle Orte in jedem Augenblick dieselbe ist.

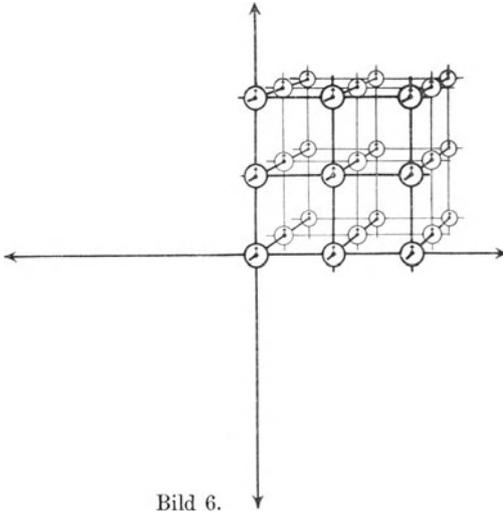


Bild 6.

In diesem Sinne sagen wir ja z. B.: wenn es in Berlin 12 Uhr mittags ist, dann ist es in New York 6 Uhr morgens. Die Verschiedenheit der Zeitangaben 12 und 6 Uhr ist das Relative, die tatsächliche Gleichheit des „Zeitpunktes“ das Absolute.

Es liegt aber darin wirklich eine besondere Tatsache, ein besonderer Einzelzug des bisherigen wissenschaftlichen

Weltbildes, der Form nach durchaus entsprechend der Eigenschaft R I, nach welcher der Raumnulldpunkt zu allen Zeiten derselbe sein muß.

Zusammengefaßt: die im Raumgerüst verteilten Uhren müssen in demselben Zeitpunkt (Zeitnullpunkt) dasselbe zeigen; zeigt eine Uhr etwas anderes, so ist diese Uhr eine subjektive Standpunktsuhr, aber nicht „Die Zeit“.

§ 34. Die absolute Zeiteigenschaft Z II.

Schließlich müssen wir als zweite absolutistische Grundeigenschaft der Zeit, wieder im Einklange mit dem bisherigen wissenschaftlichen Weltbilde, die folgende aufstellen (vgl. § 29).

Gewiß ist der Zeit-Maßstab relativ. Aber so wie er einmal festgelegt gedacht wird, bleibt er fest für alle Orte und alle Zeiten. Die Zeit (die Uhren im Raumgerüst) läuft überall und immer gleich schnell; täte sie das nicht (täte eine der Uhren das nicht), so wäre sie eben nicht „Die Zeit“.

Sechster Abschnitt.

Das Relativitätsprinzip der älteren Mechanik.

§ 35. Überblick.

Dem Relativitätsprinzip des zwanzigsten Jahrhunderts, welches die vier absoluten Raum- und Zeitvoraussetzungen R I, R II, Z I, Z II allesamt aufhebt, geht, wie gesagt, geschichtlich ein Vorbote voraus. Er zieht nur die absolute Eigenschaft R I bis zu einem gewissen Grade in Zweifel, und heißt: „Das Relativitätsprinzip der älteren Mechanik“, kurz „Das alte Relativitätsprinzip“.

§ 36. Mechanik.

Mechanische Vorgänge sind alle diejenigen Naturvorgänge, die man mit Sicherheit und vollständig als „stoffliche“ Vorgänge auffassen kann. Das ist bekanntlich ungefähr die Hälfte der ganzen Physik: Nicht nur, was man im Altertum dazu rechnete, Gleichgewichts- und Bewegungserscheinungen unter dem Einfluß der Schwerkraft und anderer leicht verfolgbare Naturkräfte, sondern auch das ganze Gebiet des Schalles, ein großer Teil der Wärmeerscheinungen, sowie mit dem letzteren vereint bis zu einem gewissen Grade überhaupt die Vorgänge in der untermikroskopischen Stoffwelt (Bewegungs- und Gleichgewichtszustände der Moleküle und Atome).

Die Gesetze der Mechanik sind insbesondere durch Archimedes, Galilei, Huygens, Newton und neuere Physiker festgestellt worden.

§ 37. Das mechanische Relativitätsprinzip.

Wir haben oben (§ 18) gehört, auf der Erde gelten die Naturgesetze genau nicht, weil die Erde sich dreht; diese Aussage gilt für die ganze Physik, bezieht sich also auch im besonderen auf die Mechanik.

Genauere Geltung der Naturgesetze kommt, das war der Grundgedanke unserer bisherigen Raum- und Zeitauffassung, nur dem absoluten Raume (Fixsternhimmel) und der zugehörigen absoluten Zeit zu.

Rufen wir uns wieder die Vorstellungen der §§ 15 bis 19 ins Gedächtnis; also außer dem ruhenden Raume, veranschaulicht durch das ruhende Koordinatensystem, die unendliche Menge

der Systemräume, nach allen Richtungen des Raumes, in allen möglichen Geschwindigkeiten bewegt, bald schneller, bald langsamer, bald gerade, bald krummlinig laufend, mit gleichmäßig gehaltenen oder auch beliebig gedrehten Achsen. Bisher wurde vom Beispiel der Erde, der Sonne usw. verallgemeinernd angenommen, daß keins aller dieser bewegten Systeme dem absoluten

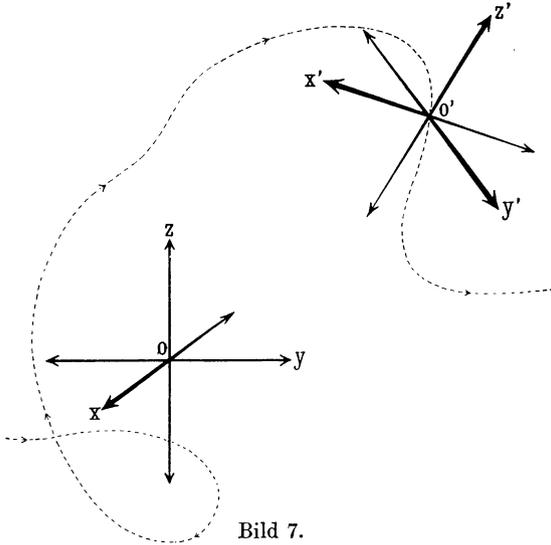


Bild 7.

Raume gleichwertig sein könnte. Das mechanische Relativitätsprinzip behauptet: Es gibt doch — wenigstens für die mechanische Hälfte der Natur — eine unendliche Anzahl bewegter Systeme, die dem ursprünglich angenommenen und allein für richtig gehaltenen System, dem absoluten Ruhesystem, gleichwertig sind.

§ 38. Die Inertialsysteme.

Denken wir uns das ursprüngliche Ruhesystem S mit den Achsen xyz hingezeichnet (vgl. Bild 7); außerdem ein zweites im Raume bewegtes System S' mit den Achsen $x'y'z'$. Das Bild 7 zeigt das zweite System in irgendeiner Lage, die willkürlich herausgegriffen wird, die gestrichelte Linie soll den Weg anzeigen, den der Koordinatennullpunkt O' im Raume zurücklegt¹⁾.

¹⁾ Ein Strich an den Buchstaben (S' , x' , y' , z' , O') bedeutet immer „bewegtes System“, Fehlen des Striches (S , x , y , z , O) „Ruhesystem“ oder „absolutes System“.

Wenn sich das zweite System S' dreht, gelten in der Tat in ihm die Naturgesetze nicht; ebensowenig, wenn das zweite System auf seinem Wege krumme Linien beschreibt, beschleunigt oder verzögert wird.

Diese Arten von Bewegungen sind aber nicht alle. Es gibt außerdem noch eine besondere Klasse von Bewegungen, eben Bewegungen ohne Drehungen und ohne Beschleunigungen oder Verzögerungen: geradlinig-gleichförmige Bewegungen (vgl. Bild 8, § 43).

Wie der Leser sich erinnert, ist das gerade diejenige große Gruppe von Bewegungen, deren wir oben bei der Betrachtung des Trägheitsgesetzes gedacht haben (§ 18). Geradlinig-gleichförmig bewegt sich im Raume jeder Körper, der frei von Kräften ist, also seiner eigenen Trägheit folgen kann: Trägheitsbewegung oder „Inertial“bewegung. Von dorthier übernimmt man den Ausdruck und nennt die gleichförmig-geradlinig bewegten Systeme oder Räume Inertialsysteme, Trägheitssysteme, Inertialräume, Trägheitsräume. Diese Trägheitsräume oder Inertialsysteme sind es nun, die bei den Koordinatensystemen die besondere ausgezeichnete Gruppe bilden. In der ganzen mechanischen Hälfte der Natur gelten nicht nur im ruhenden absoluten Raume die Naturgesetze genau, sondern auch in jedem Trägheitsraume, d. h. jedem Raume, welcher sich geradlinig-gleichförmig bewegt¹⁾.

§ 39.

In der anschaulicheren Form: die mechanischen Experimente fallen in einem geradlinig-gleichförmig bewegten System genau so aus, wie wenn es ruhte, ist uns allen diese Tatsache wohl bekannt; so sehr wohl bekannt, daß ihre Merkwürdigkeit, sowie die sich daraus ergebenden Folgerungen für den Raum meist übersehen werden.

¹⁾ Zur Begriffsklärung:

Ein Trägheitsraum bedeutet einen Raum, der sich geradlinig-gleichförmig bewegt.

In einem Trägheitsraum ist — mit allen anderen mechanischen Naturgesetzen — das Trägheitsgesetz erfüllt; d. h. in einem Trägheitsraum (oder von einem Trägheitsraume aus betrachtet) bewegt sich jeder kräftefreie Körper geradlinig-gleichförmig.

Dagegen braucht die geradlinig-gleichförmige Bewegung des Trägheitsraumes selber keineswegs nur auf der Trägheit des den Raum tragenden Körpers zu beruhen: z. B. Wagen mit Pferd, tretender Radfahrer, Flugzeug mit Motor usw.

Ein Trägheitsraum ist ein Raum, der sich so bewegt, als ob der raumtragende Körper seiner reinen Trägheit folgte.

Wir haben die Bestätigung dieser Tatsache täglich unter Händen, erfahren sie täglich am eigenen Leibe, wie an der uns umgebenden Natur.

Unsere Erde ist allerdings in Wirklichkeit kein Trägheitsraum; das durch die Erde nach Art des Garnknäuels hindurchgesteckte Koordinatenkreuz erfährt ja bei genauer Betrachtung gerade diejenigen Drehungen usw., die dazu führen, der Erde den Charakter des absoluten Raumes abzuspochen. Aber diese Wirkungen machen sich erst nach längeren Zeiten oder bei Beobachtung über große Strecken (Passatwinde) bemerkbar. Für kleine Zeiten, z. B. einige Sekunden, und kleine Strecken ist, wie schon in § 18 gelegentlich herangezogen wurde, Drehung und Beschleunigung ganz geringfügig, praktisch völlig verschwindend. Praktisch ist die Bahn der ganzen Erde und auch die Bahn jedes einzelnen Stückes der Erdoberfläche für kurze Zeiten eine gerade Linie und die Geschwindigkeit gleichmäßig. Der Betrag dieser Geschwindigkeit ist aber außerordentlich groß, nämlich durchschnittlich mindestens 30 km pro Sekunde (Erde um Sonne). Wir stellen also alle unsere Beobachtungen und Experimente auf einem rasend schnell durch „Den Raum“ hinausenden Systemraum an — und nun zeigt sich: Alle mechanischen Experimente, bei denen es sich um so kurze Vorgänge handelt, daß die Drehungs- usw. Einflüsse unbemerkbar bleiben, also nur die geradlinige Geschwindigkeit von etwa 30 km pro Sekunde in Betracht kommt, fallen haarscharf genau ebenso aus, als ob die Erde ruhte.

§ 40.

Zum Beleg nur einige wenige Beispiele. Vor allem die reichhaltige Gesamtheit der Fall- und Wurfbewegungen. Unter dem Stein, den ich senkrecht in die Höhe werfe und der vielleicht zwei Sekunden in der Luft bleibt, bewegt sich nicht etwa die Erde ihre 60 km weg, sondern er fällt genau zu meinen Füßen wieder auf den Erdboden nieder. (Maßgebend ist dafür natürlich nicht etwa der ganz unbedeutende Einfluß der Luft; der Versuch fällt genau so aus, wenn die Luft weggepumpt wird; maßgebend ist nur der Bewegungszustand der Erde. Würde sich die Erdbahn während der zwei Sekunden merklich krümmen, so würden wir eine Abweichung feststellen, so aber kommt nur die reine geradlinige Geschwindigkeit von etwa 30 km als derjenige Faktor in Betracht, von dem man an und für sich einen Einfluß, und zwar

einen ganz kräftigen Einfluß, erwarten müßte.) Ebenso der Bleistift, der von meinem Pulte fällt; er fliegt nicht etwa gegen die der Erdbewegung abgekehrte Zimmerwand, sondern fällt ruhig senkrecht auf den Fußboden, er weiß auch nicht das geringste von der rasenden Geschwindigkeit, die unsere Erde selber hat. Jeder geschleuderte Gegenstand, jedes Geschoß legt genau dieselben Bahnen zurück, die es beschreiben würde, wenn die Erde ruhte usw. usw. Das Vorhandensein der ungeheuren Fortschrittggeschwindigkeit von durchschnittlich 30 km in der Sekunde tritt nicht durch die geringste Hemmung oder Förderung der Vorgänge in Erscheinung.

Ganz bekannt sind die folgenden Bestätigungen: Bewegen sich auf der Erde neue Räume wieder gegenüber dem Erdboden geradlinig-gleichförmig, so sind das mit derselben Annäherung während kleiner Zeiten wieder beinahe echte Trägheitsräume. Es fallen daher hier die Experimente wieder mit großer Annäherung ebenso aus, als ob das neue System ruhte. Die Erfahrungen, die ein jeder im Eisenbahnzuge usw. macht, sind schlagende Beispiele: Wenn der Wagen genau in gerader Linie und genau mit gleicher Geschwindigkeit fährt, fällt jeder Gegenstand, den man los läßt, im Wagen genau senkrecht herunter, das Wasser im Glase steht genau wagerecht und auch sonst verhalten sich alle mechanischen Vorgänge genau so, als ob der Wagen ruhte. Zum Beispiel klingen die Musikinstrumente im Wagen für die Insassen genau nach Tonhöhe und Klangfarbe ebenso wie auf dem festen Erdboden.

Oder als letztes anschaulichstes Beispiel auch hier wieder das Trägheitsgesetz: Wie schon vorher für den festen Erdboden ausgesprochen, so bewegt sich auch im gleichförmig-geradlinig fahrenden Eisenbahnwagen die gestoßene Kugel auf wagerechter glatter Unterlage mit größter Annäherung gleichförmig-geradlinig; jeder im Wagen ruhende Gegenstand bleibt ruhend.

§ 41.

Diese genaue Übereinstimmung der mechanischen Naturgesetze gilt also für alle geradlinig-gleichförmig bewegten Räume; auch der Grund läßt sich übrigens unschwer verstehen.

Zunächst beim Trägheitsgesetz als dem Schulbeispiel. Das Trägheitsgesetz besagt: gegenüber dem absoluten Raume bewegt sich ein kräftefreier Körper geradlinig-gleichförmig: es ist klar, daß derselbe kräftefreie Körper auch von jedem einzelnen der

unendlich vielen bewegten Inertial- oder Trägheitsräume aus betrachtet, eine gerade Linie beschreiben muß und weder beschleunigt noch verzögert erscheinen kann. Denn das Wesen eines Trägheitsraumes beruht ja gerade darauf, daß er sich seinerseits gegenüber dem absoluten Raume selber geradlinig bewegt und seine eigene Geschwindigkeit weder vermehrt noch vermindert. Daher kann ein Insasse eines Trägheitsraumes unmöglich einem Körper, der sich selber geradlinig-gleichförmig bewegt, eine ungleichmäßige Geschwindigkeit oder eine Bahnkrümmung zuschreiben (einfaches Beispiel: ein beim Rangieren abgestoßener, der reinen Trägheit folgender Eisenbahnwagen werde erstens vom festen Erdboden, zweitens von einem gegenüber der Erde selber gleichförmig geradlinig fahrenden Zuge aus beurteilt; die Insassen dieses Zuges können unmöglich den Eindruck haben, daß der betrachtete Wagen beschleunigt oder verzögert würde oder gar sich krummlinig bewege).

Beim Trägheitsgesetz ergibt sich also das gleiche Urteil von den Trägheitsräumen aus ohne weiteres; bei den übrigen mechanischen Gesetzen, also denen, die sich nicht auf kräftefreie, sondern von Kräften beeinflusste Bewegungen beziehen, erklärt es sich so: Alle Gesetze der Mechanik, mag man sie nun in den verschiedenartigsten Formen aussprechen (z. B. Galilei, Newton, Maupertuis, Hamilton, Gauß), beruhen im letzten Grunde auf der einen grundlegenden Tatsache bzw. Annahme, daß die Kraft mit der Änderung der Geschwindigkeit zusammenhängt. Jede beobachtete Änderung einer Geschwindigkeit muß aber von allen Trägheitsräumen aus beurteilt in der Tat dieselbe sein, wie von dem ruhenden Raume aus, weil die Trägheitsräume selber ihre Geschwindigkeit nicht ändern.

§ 42. Angriff auf die absolute Raumeigenschaft R I.

Die mechanischen Naturgesetze sind in allen Trägheitsräumen dieselben wie im absoluten Raume — wäre die ganze Physik nur mechanisch, so würde man auf Grund dieser Erkenntnis den äußerst wichtigen und folgenschweren Schritt eines Angriffes auf den absoluten Raum auszuführen berechtigt sein:

..... Der echte Ring
Vermutlich ging verloren! . . .

In jeden bewegten Trägheitsraum S' sind nach dem Vorigen die Naturgesetze erfüllt, folglich ist jeder einzelne dieser unendlich vielen Trägheitsräume S' gleichwertig dem ruhenden absoluten Raume S . Jeder Beobachter in einem Trägheitssystem S' kann

dieses sein bisher für bewegt erklärtes System mit demselben Rechte den absoluten ruhenden Raum nennen, wie der Bewohner des zuerst als „Der Raum“ bezeichneten angeblichen „Ruheystems“ S.

Es gibt keinen ruhenden absoluten Raum: „Der Raum“ geht unter in der unendlichen Mannigfaltigkeit aller Trägheitsräume; es gibt kein bevorzugtes einzigartiges absolutes Ruhesystem, es gibt nur unendlich viele gleichberechtigte Inertialsysteme, Trägheitssysteme; das absolute Ruhesystem, der ruhende Raum, ist ein relativer Begriff.

§ 43. Kennzeichen M und Kennzeichen F.

Allerdings müßte, um den Gedanken an eine derartige Gleichsetzung der Trägheitsräume mit dem absoluten Raum überhaupt möglich erscheinen zu lassen, noch ein anderes vorangehen.

Gewiß ist die materielle Gleichwertigkeit der Naturgesetze das endgültige Merkzeichen für die Gleichberechtigung der Inertialräume und des absoluten Raumes. Jedoch hat die Anwendbarkeit dieses materiellen Kennzeichens („Kennzeichen M“) das Erfülltsein eines formellen Kennzeichens („Kennzeichen F“) zur selbstverständlichen Voraussetzung. Würde die rein formhafte, rein-geometrisch-räumliche Gegenseitigkeitsbetrachtung zwischen irgendeinem Inertialsystem O' und dem absoluten Raumsystem O nicht ihrerseits schon volle formelle geometrisch-

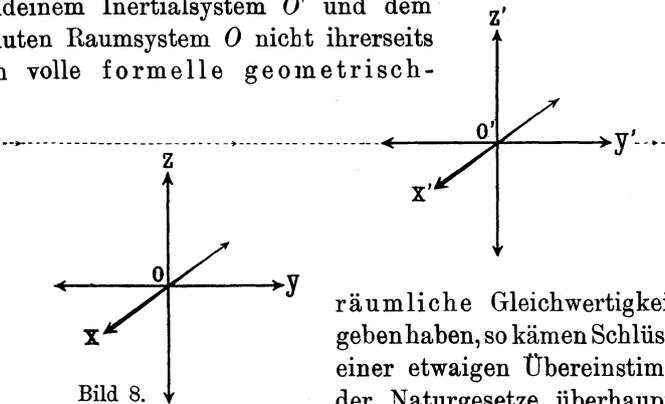


Bild 8.

räumliche Gleichwertigkeit ergeben haben, so kämen Schlüsse aus einer etwaigen Übereinstimmung der Naturgesetze überhaupt gar

nicht in Frage. Diese formelle Gleichwertigkeit ist jedoch, wie bereits auseinandergesetzt, solange es sich um Raumfragen allein handelt, immer ohne weiteres erfüllt. Es ist kaum nötig, an der Hand einer einfachen Zeichnung dieselbe auch hier abzuleiten (vgl. Bild 8).

Das Bild zeigt das Ruhesystem O und das geradlinig-gleichförmig bewegte Trägheitssystem O' . Die gestrichelte Linie deutet

wieder die Bahn des bewegten Koordinaten-Nullpunktes O' an. Da die Achsenrichtung doch willkürlich ist, sind vorher beide Systeme in Gedanken so gedreht worden, daß die y -Achse und die y' -Achse beide der Bewegungsrichtung entsprechen und die übrigen Achsen ebenfalls gleichgerichtet sind. Dann ergibt sich folgender einfacher Gedankengang:

1. Ausgangsauffassung:

O sagt: Ich, O , bin der Raum, du, O' , nicht, denn ich, O , ruhe, du, O' , bewegst dich; sagen wir mit der Geschwindigkeit von 30 km in der Sekunde. Wenn du, O' , behauptest, du ruhst, und zeichnest dir danach das Bild der Bewegungen in der Welt, so zeichnest du verkehrt. Mein Weltbild ist richtig, dein Weltbild ist falsch.

2. Gegenüberlegung:

O' kann das zwar zugeben. Er kann sagen: Jawohl, gewiß, du ruhst, ich bin in Bewegung. Aber (immer rein formell!) er braucht das nicht. Er kann, rein formell, ebensowohl behaupten: Nein, ich, O' , ruhe und du, O , bewegst dich mit der Geschwindigkeit von 30 km, die du mir fälschlich zuschreibst, selber (nach der entgegengesetzten Seite). Mein Weltbild ist richtig, dein Weltbild ist falsch.

In der Tat ist es vom formellen Standpunkt ganz unmöglich, zu sagen, wer von beiden recht hat.

§ 44.

So führen formelle Gleichwertigkeit und materielle Übereinstimmung des Naturgeschehens zum Relativitätsprinzip der alten Mechanik. Für den Raum und die Zeit selber konnten die kühnen Folgerungen natürlich nicht mit Sicherheit gezogen werden. Denn es war keineswegs bewiesen, daß die Übereinstimmung auch bei den nicht mechanischen Naturvorgängen vorhalten würde.

Heben wir noch einmal ausdrücklich diejenige absolute Raumeigenschaft heraus, welche durch das alte Relativitätsprinzip angezweifelt wird; es ist die Eigenschaft R I, Nullpunkts- und Achsenabsolutität des Raumes. Vollkommen unerschüttert stehen nach wie vor da die absoluten Eigenschaften

R II: Absolute Bedeutung des räumlichen Maßstabes,

Z I: Absolute Bedeutung des zeitlichen Nullpunktes,

Z II: Absolute Bedeutung des zeitlichen Maßstabes,

also die zweite absolute Grundeigenschaft des Raumes und beide absolute Grundeigenschaften der Zeit.

§ 45. Geltungsbereich des alten Relativitätsprinzipes.

In Wahrheit konnte von einer allgemeinen Gültigkeit des alten Relativitätsprinzipes keine Rede sein. Es galt für die Mechanik, unter der Voraussetzung, daß die als richtig angenommenen mechanischen Bewegungs- und Gleichgewichtssätze überhaupt genau richtig waren (vgl. über diesen Punkt §§ 96 bis 98 im letzten Abschnitt) und es reichte dann zunächst so weit, wie die Naturvorgänge sich eben als mechanische Vorgänge herausstellten. Dagegen konnte man auf elektromagnetische Vorgänge das Relativitätsprinzip offenbar nicht übertragen. Zum Beispiel erzeugt eine auf der Erde ruhende elektrisierte Kugel bekanntlich in ihrer Umgebung ein reines elektrisches („elektrostatisches“) Feld. Eine gleichmäßig geradlinig bewegte Kugel dürfte, wenn für die elektrischen Vorgänge das mechanische Relativitätsprinzip gälte, augenscheinlich auch nur gerade dasselbe rein elektrostatische Feld erzeugen. Das ist aber augenscheinlich ganz und gar nicht der Fall; es ist eine bekannte Tatsache, daß jede bewegte elektrische Ladung außer dem elektrischen auch ein magnetisches Feld besitzt. Auf der Erzeugung magnetischer Felder durch bewegte elektrische Ladungen beruht ja eine überaus große Menge der praktischen Anwendungen elektrischer Ströme¹⁾.

Ähnliche Erfahrungen und Überlegungen kamen in anderen Naturgebieten hinzu, so z. B. in der Optik und bei den Erscheinungen der strahlenden Wärme.

Für alle diese und verwandte Erscheinungsgruppen konnte das alte Relativitätsprinzip keine Geltung beanspruchen.

§ 46. Die zwei Hälften der Natur.

Für die weitere Entwicklung ist es wichtig, sich an die Tatsache zu erinnern, daß die erwähnte Verwandtschaft der nichtmechanischen Vorgänge untereinander ebenfalls eine sehr enge ist, genau entsprechend der engen sachlichen Zusammengehörigkeit der vorher besprochenen mechanischen Vorgänge.

Auch die nichtmechanischen Vorgänge bilden eine einzige große Familie. Wenigstens haben bisher alle wissenschaftlichen Erfahrungen die Annahme gerechtfertigt, daß die Gesamtheit dieser nichtmechanischen Vorgänge wieder aus einer gemeinsamen Gruppe von Naturgesetzen übereinstimmend abzuleiten ist: sie sind, kurz

¹⁾ Vgl. übrigens § 97.

gesagt, alle elektromagnetischer Natur, also beherrscht von den gemeinsamen Grundgesetzen der ruhenden und bewegten elektrischen und magnetischen Felder (z. B. Maxwellsche Gleichungen).

Die ganze Natur, soweit sie überhaupt den physikalischen Gesetzen unterworfen ist, zerfällt also in zwei große verschiedenartige Gebiete: Erstens rein mechanische, zweitens elektromagnetische Vorgänge.

Die Frage: wie weit reicht das Relativitätsprinzip? nahm daher, nachdem das Relativitätsprinzip für die Mechanik angenommen war, die folgende deutlichere Gestalt an: Gilt das Relativitätsprinzip auch für die zweite große Hälfte der Naturvorgänge, nämlich die elektromagnetischen Erscheinungen?

Siebenter Abschnitt.

Absoluter Raum und absolute Zeit III.

A. Absoluter Raum und Weltäther.

§ 47.

Diese Frage schien einen Augenblick eine überraschend einfache Wendung nehmen zu sollen, nämlich als der außerordentliche Gedanke aufkam, man könne die Gesamtheit aller elektromagnetischen Vorgänge auch wieder, wie das bei der einen Hälfte der Natur gelungen schien, als rein mechanische Vorgänge erklären. Indessen zeigte sich bald, daß gerade im Falle einer solchen mechanischen Erklärbarkeit der Elektrizität doch der Relativitätsgedanke tatsächlich nicht den Sieg davontrug, sondern im Gegenteil nur eine erneute Stärkung der absoluten Raum- und Zeitvorstellung die unabweisbare Folge sein mußte.

Dieser auf den ersten Blick höchst überraschende Rückschlag erklärt sich folgendermaßen:

Die Stärkung der absolutistischen Anschauung wäre jedenfalls nicht zustande gekommen, wenn die älteren mechanischen Erklärungsversuche der Elektrizität (Theorie der elektrischen „Flüssigkeiten“ usw.) recht behalten hätten.

Diese älteren Theorien haben sich aber bekanntlich als durchaus unzutreffend erwiesen. In dem Kampfe der Erklärungsversuche behauptete auf Grund gesicherter Erfahrung die von

Faraday und Maxwell begründete berühmte Theorie des „Weltäthers“ das Feld, als einzig und allein mit den Tatsachen im Einklang stehende Erklärungsmöglichkeit.

Der Weltäther stammte bekanntlich aus der Optik. Als „Äther“ bezeichnete man jenen merkwürdigen Stoff, durch den man seit dem Siege der Huygensschen über die Newtonsche Lichttheorie die Lichterscheinungen und die Lichtvorgänge erklärte. Er sollte überall vorhanden sein und alles durchdringen, war also gewissermaßen seiner Verbreitung nach der Universalstoff der Welt, in dem die Körperwelt schwimmt, vielleicht sogar der Urstoff, aus dem die ganze Körperwelt durch Verdichtung usw. entstanden sein mochte; übrigens seinerseits für die menschlichen Sinne, im Gegensatz zu allen sonstigen Stoffen, völlig un wahrnehmbar. Faraday und Maxwell lehrten, die elektrischen und magnetischen Felder seien Spannungszustände usw. in diesem Äther.

Nun führte verhältnismäßig früh eine Reihe von außerordentlich bedeutungsvollen Experimenten zu dem wichtigen Schlusse, daß der Äther nie von einem bewegten Körper mitgerissen werden kann, vielmehr bewegt sich jeglicher Stoff ohne Widerstand siebartig¹⁾ durch ihn hindurch. So gelangte man weiter zu der äußerst wichtigen Folgerung:

Der Weltäther liegt, ruhend, als Ganzes unbeweglich ausgebreitet gerade in demselben Gesamtbereiche des „Fixsternhimmels“, welcher auf Grund der mechanischen Vorgänge für den absoluten Raum erklärt worden war.

Es liegt auf der Hand, daß durch diese Einsicht der absolute Raum, weit entfernt, relativiert zu werden, im Gegenteil eine ganz neue vertiefte Bedeutung gewann.

Denn wenn dieser mit dem absoluten Raume sich deckende Weltäther der Träger der elektrischen und magnetischen Erscheinungen war, dann verstand es sich erst recht, daß von irgendeiner Gleichwertigkeit von elektromagnetischen Vorgängen in bewegten Räumen mit denen im Ruhraume (nämlich dem Weltäther) gar keine Rede sein konnte. Rein konnten die elektro-

¹⁾ Die Zusammensetzung der Stoffe aus getrennten Einzelteilchen ist heutzutage bewiesen. Bei der szintillierenden Phosphoreszenz von Elster und Geitel sieht das Auge Wirkungen von einzelnen Unterteilen der Atome; bei den Laueschen Kristallversuchen „sieht“ die Röntgenplatte unmittelbar den Aufbau der molekularen Welt.

magnetischen Vorgänge dann selbstverständlich nur in diesem ruhenden Äther selber herauskommen; in jedem anderen System mußten Störungen erwartet werden, denn jedes bewegte System bewegte sich ja jetzt nicht nur gegen das körperlose Hohlgebilde des absoluten Raumes, sondern es durchschnitt und zerteilte, mit mehr oder weniger großer Geschwindigkeit, gerade denjenigen Stoff selber, welcher die elektromagnetischen Vorgänge trug und fortpflanzte. So mußten unbedingt Abweichungen zustande kommen, zunächst einfach durch die Tatsache, daß der Beobachter selber seine elektrischen und magnetischen Felder gar nicht im Ruhäther herstellen konnte, sondern nur in einem ihm gewissermaßen fortwährend unter den Händen wegflutenden Strome (genau wie der Insasse eines fahrenden Ozeandampfers irgendwelche physikalischen Studien an dem Wasser des Meeres als Ganzem nicht im Normalzustande der Ruhe machen kann, sondern nur den fortwährend weggleitenden Strom zur Verfügung hat).

Also in der Tat eine zweifellose Verstärkung der absoluten Raumauffassung.

§ 48.

Das Unerwartete der Schlußfolgerung liegt darin, daß gerade die Einsicht: die elektrischen Vorgänge sind mechanischer Natur, nicht dem mechanischen Relativitätsgedanken zum Siege verhilft, sondern zur absolutistischen Raumauffassung zurückleitet. Indessen ist die Erklärung sehr einfach. Sie besteht darin, daß der ganze absolute Raum eben als Ganzes mit einem einzigen Körper ausgefüllt wird. Fragt man: Für alle mechanischen Vorgänge gilt doch aber die Trägheitsrelativität des Raumes, wo bleibt denn nun bei den elektrischen Vorgängen, die doch mechanische sein sollen, diese Relativität? so lautet die Antwort: Die einzig mögliche Anwendung des Relativitätsgedankens für die elektrische Hälfte der Natur ist jetzt die, diesen Körper, den Weltäther, als Ganzes, anstatt ruhend, geradlinig-gleichförmig bewegt zu denken. Das kann man natürlich tun. Aber das heißt jetzt nichts anderes, als sich den Raum als Ganzes wieder „bewegt“ vorstellen wollen; und diese Vorstellung entbehrt, wie wir bereits in § 21 erkannt haben, des physikalischen Sinnes. Die an und für sich mit der „mechanischen“ Erklärung zweifellos verbundene Trägheitsbewegungs-Relativität ist damit, wenn ich so sagen darf, über die uns begrifflich unzugängliche Unendlichkeitsgrenze abgeschoben.

§ 49. Zusammenfassung.

Zusammengefaßt: Indem die mechanische Erklärbarkeit der elektrischen Erscheinungen wahrscheinlich wurde, nahm der absolute Raum die gewissermaßen greifbare Gestalt des Weltäthers an. Gerade dadurch wurde aber eine Gleichwertigkeit der gleichförmig-geradlinig bewegten Systeme gegenüber dem Ruhssystem für die ganze elektrische Hälfte der Natur augenscheinlich unmöglich gemacht; denn jede Bewegung bedeutete jetzt, als Bewegung gegen den absoluten Raum, zugleich eine tatsächliche Verschiebung gegenüber dem Träger der elektrischen Erscheinungen, dem Weltäther.

§ 50. Folgerung.

Daraus ergibt sich nun mit zwingender Notwendigkeit diejenige grundlegende Folgerung, die die Grundlage für die ganze überraschende Entwicklung des neuen Relativitätsprinzips geworden ist.

Soll auf irgendeine Weise irgendeine Art von Relativität des Raumes zustande kommen, so gibt es dafür nur eine einzige Möglichkeit: Es muß eine vollkommen grundsätzliche Wandlung in unserer Grundauffassung vom Wesen der elektrischen Erscheinungen eintreten; der „Weltäther“, das anscheinend ganz unentbehrliche Erklärungsmittel für die gesamte elektrische Hälfte der Natur, muß fallen.

§ 51.

Man bedenke, welche ungeheuerlichen Zumutungen ein solcher Umsturzedanke mit sich bringen mußte. Auf dem Boden des Weltäthers war die ganze moderne Entwicklung der Elektrizitätstheorie erfolgt. Die kennzeichnendste Eigenschaft aller elektrischen Vorgänge, nämlich ihre Fortpflanzbarkeit durch den leeren Raum (mit Lichtgeschwindigkeit), insbesondere die ungeheuer verwickelten Vorgänge der Lichtübertragung selber mußten zunächst vollkommen unvorstellbar erscheinen, wenn man nicht den „Träger“ für diese Vorgänge, eben den Äther, hatte. Nicht minder führten die bekannten Erscheinungen der Induktion, eine Reihe von magnetischen Wirkungen und schließlich mehr oder weniger auch fast alle übrigen Erscheinungen des Gebietes ins Grundlose, sobald man den Träger fallen ließ.

Es mußten experimentelle Ergebnisse ganz zwingender Art kommen, wenn in dieser Beziehung auch nur das geringste Aufgeben der anscheinend unentbehrlichen Äthervoraussetzung mit

den gesicherten Ergebnissen der bisherigen Erfahrung verträglich erscheinen sollte; und es mußte ganz sicher ein solches Zurückweichen von der Ätherauffassung eine außerordentliche Umstellung der ganzen physikalischen Vorstellungsweise voraussetzen: im Raume fortgepflanzte Energie ohne Träger, Wellen ohne ein oszillierendes Medium, Schwingungen ohne einen schwingenden Stoff, das war in der That zunächst eine schlechthin unvollziehbare Unmöglichkeit.

Doch nur mit solchen Opfern, ja noch größeren, mit wirklichen sacrificia intellectus, konnte der Weg zum modernen Relativitätsprinzip erkaufte werden.

B. Die erste Untersuchungsreihe über den Weltäther.

§ 52.

Der Äther hat nun allerdings, seitdem er beanspruchte, außer den Lichtvorgängen die Gesamtheit aller elektrischen Erscheinungen zu erklären, nicht bei allen Physikern dauernd dasjenige Zutrauen erweckt und sich erhalten, das ihm zuerst im Hinblick auf seine anscheinend vollkommene Unentbehrlichkeit sowie die durch ihn erreichte großartige Vereinheitlichung des ganzen Weltbildes wohl allgemein entgegengebracht wurde.

Schon als Lichtäther hatte er eine merkwürdige Verständnisschwierigkeit dargeboten.

Man kann und konnte nämlich schon seit langer Zeit Lichtstrahlen herstellen, von denen man ganz genau weiß, daß sie auf ihrem ganzen Wege nur in einer einzigen Ebene schwingen; etwa wie die Zinken einer Stimmgabel, die sich auch nur gegen- und voneinander wegbewegen, aber nie schräg zu der ursprünglichen Richtung oder etwa gar senkrecht dazu. Solche Lichtstrahlen heißen polarisiert. Man wußte, wie gesagt, ganz genau, daß derartige Licht nur in einer ganz bestimmten Ebene schwingt; aber es war und blieb merkwürdigerweise trotz endloser Versuche und Auseinandersetzungen unmöglich; diese Schwingungsebene eindeutig zu bestimmen, es blieben in all und jedem Falle zwei verschiedene Richtungen zur Auswahl. Diese beiden Richtungen wichen so weit voneinander ab, wie zwei Richtungen nur irgend können: sie standen nämlich senkrecht aufeinander. Und es war und blieb schlechthin unmöglich festzustellen, in welcher von beiden Richtungen der (selber unwahrnehmbare) Äther schwang.

Als dann die elektrischen Erscheinungen hinzukamen, hätte man vielleicht meinen sollen, durch diese neuen Forderungen, die damit an den Äther gestellt wurden, würde die eigenartige Unbestimmtheit beseitigt und überhaupt die wirkliche Natur des Äthers eindeutig festgelegt werden. Aber es kam ganz anders.

Schon die Urheber der elektrischen Äthertheorien, Faraday und besonders Maxwell, arbeiteten mit verschiedenen Äthervorstellungen, die sich nicht miteinander vereinen ließen. Je mehr die Äthervorstellung als solche an Boden unter den Physikern gewann, desto zahlreicher und mannigfaltiger wurden die einzelnen Äthertheorien; was fehlte und keinen einzigen Schritt näherrücken wollte, war die Theorie vom Äther, d. h. die richtige, die alle anderen schlug.

So gab es z. B. eine Theorie, die erklärte (um nur die Hauptpunkte herauszugreifen) die sogenannten elektrischen Kraftlinien für Strömungslinien des Äthers, die magnetischen Kraftlinien für Drehspannungslinien; eine andere Theorie behauptete, daß der Äther längs der elektrischen Kraftlinien in einem bestimmten Längsspannungszustande sei, um die magnetischen Kraftlinien aber Wirbelbewegungen ausführe. Dann gab es wieder eine Theorie, die sowohl hinter den elektrischen wie gleichzeitig den magnetischen Kraftlinien Bewegungen des Äthers voraussetzte; wieder eine andere wollte in fast allen elektrischen und magnetischen Erscheinungen Spannungsvorgänge des Äthers sehen und Ätherbewegungen nur einem gewissen Anteil der rein elektrischen Kraftlinien vorbehalten; usw. usw. in ganz außerordentlich langer und bunt bewegter Reihenfolge.

Alle diese vielen verschiedenartigen Theorien waren im Laufe der Jahre von den verschiedensten Physikern aufgestellt, richtiger gesagt, meistens im Rohbau errichtet worden. Soweit sie ausgebaut waren, stimmten sie eigentlich dem Anschein nach alle, so daß man nun erst recht nicht wußte: welches von diesen zahlreichen und verschiedenen Bildern ist denn nun eigentlich der Äther selbst?

§ 53.

So kann es nicht wundernehmen, daß schließlich viele führende Physiker, vielfach auch gerade die Urheber der Ätherbilder selber, mißtrauisch wurden. Man konnte sich nicht ganz des Gedankens erwehren, als ob hier irgendein Zuviel in den

Grundvoraussetzungen stecke; als ob die Theorie irgendein Etwas zu den Erscheinungen hinzugetan hätte, wodurch eine künstliche subjektive Unbestimmtheit in das Weltbild hineingetragen wäre, die der Welt selber nicht eignete. Daß dieses Zuviel allerdings der Äther selber sei, das ist ein Gedanke, der doch nur ganz allmählich sich festigen konnte und, wie offen zugegeben werden muß, auch heute noch von einer nicht unbeträchtlichen Anzahl von Gelehrten für eigentlich nicht recht ausdenkbar gehalten wird.

Jedenfalls gelangte eine große Anzahl der führenden Physiker allmählich auf den Standpunkt, den Äther ruhig auf dem toten Gleise stehen zu lassen, auf das er augenscheinlich gefahren war. Man hörte immer weniger von den mechanischen Theorien der elektrischen Physikhälfte, und die schönen Träume der mechanischen Erklärung der ganzen Naturvorgänge fristeten nur mehr ein allerdings wenig beschauliches, sondern meistens recht anspruchsvoll-lärmendes Dasein in den Agitationsschriften der modernen Naturphilosophen. In der physikalischen Wissenschaft konnten diese letzteren Gedanken um so mehr zurücktreten, als für die Frage der Vereinheitlichung unseres Weltbildes inzwischen eine ganz andere Hoffnung in den Vordergrund getreten war: nicht mechanische Erklärung der elektrischen Naturhälfte, sondern Zurückführung der ganzen mechanischen Naturhälfte auf im Inneren der Körper sich abspielende elektrische Vorgänge, hieß etwa seit der Jahrhundertwende die neue Lösung ¹⁾.

§ 54.

Es ist dann mir selber vergönnt gewesen, die Frage der Äthertheorien, soweit der bisher beschrittene Weg in Betracht kam, zu einem gewissen Abschlusse zu bringen ²⁾. Es gelang mir, einerseits von den Gesetzen der Mechanik, andererseits denen der Elektrodynamik ausgehend, zunächst eine erschöpfende Übersicht der Gesamtheit aller derjenigen Äthertheorien aufzustellen, welche auf dem Grunde jener mechanischen und elektrischen Ausgangsannahmen überhaupt denkbar sind. Ich konnte die einzelnen Gattungen von Theorien sämtlich entwickeln, die im Rohbau vorhandenen Ansätze von Theorien einordnen und, immer unter den erwähnten, die derzeitigen Ergebnisse der Wissenschaft um-

¹⁾ W. Wien, Ann. d. Phys. 5. 501 (1901).

²⁾ Die Anregung zu diesem Unternehmen ging von M. Planck aus.

fassenden Grundvoraussetzungen nachweisen: Führt man die einzelnen Gattungen von Theorien bis in die Einzelheiten der verschiedenen elektrischen und magnetischen Einzelvorgänge durch und prüft nach, welche dieser Theorien wirklich alle Einzelheiten exakt richtig wiederzugeben gestatten, so besteht keine einzige dieser Theorien die Prüfung exakt. Jede einzelne der Theorien fordert irgendwo, sei es in der Elektrostatik, sei es beim Licht usw. usw., irgendwelche Folgerungen, die von der Wirklichkeit abweichen ¹⁾.

§ 55.

Waren also die von mir zugrunde gelegten wissenschaftlichen Fundamentalgesetze der Mechanik und der Elektrizität exakt richtig, so war der Verzicht auf die mechanische Erklärung der elektrischen Naturhälfte mehr als ein unangenehmer Ausweg aus einer allmählich drückend empfundenen Situation, es war eine in der Sache selber liegende Notwendigkeit.

Mochten die Vorstellungsschwierigkeiten noch so groß sein, man mußte sich zu dem Opfer entschließen: man mußte sich zwingen, sich fortgepflanzte Schwingungen ohne schwingenden Körper, elektrische Spannungen ohne gespanntes Medium vorzustellen, usw. usw. usw.

Ist man so weit gekommen, dann steht man allerdings auch hart vor dem letzten Aufstieg zum Relativitätsprinzip.

C. Zweite Untersuchungsreihe über den Äther. Der Michelson-Versuch.

§ 56. Die zweite Untersuchungsreihe über den Äther.

Die zwingende Entscheidung für den Verzicht auf den Äther hat, wenn wir der modernen Entwicklung weiter nachgehen, eine Reihe von Untersuchungen gebracht, welche auf dem Wege des Versuches die Daseinsfrage für den Äther aufgerollt haben.

Unsere Erde ist selber ein Schiff, das mit einer für menschliche Verhältnisse großen Geschwindigkeit durch den Äther dahinstreicht. Oder wenn wir eine physikalisch gleichwertige, aber für die Anschauung bequemere Ausdrucksweise wählen: die Erde be-

¹⁾ H. Witte, Mechanische Erklärung der elektrischen Erscheinungen, Berlin 1906; Verh. d. D. Phys. Ges. 8, 497—510 (1906); Ann. d. Phys. (4) 26, 235—311 (1908); Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 7, 205—261 (1910); Phys. Zeitschr. 12, 347—360 (1911); u. a. m.

findet sich stets und ständig — es sei denn, daß sie infolge des Gegeneinanderwirkens von Erden-, Sonnen- usw. Bewegung einmal kürzere oder längere Zeit im Äther ruht — von einem Ätherstrom oder Ätherwind um- und durchflutet. (Genau, wie wenn man in einem offenen Wagen fährt, vom Standpunkte des Wagens aus bewegt sich die Luft dem Insassen entgegengesetzt, mit um so größerer Geschwindigkeit, je schneller der Wagen die Luft durchschneidet; es „zieht“.)

Es ist das dieselbe Strömung bzw. Gegenströmung, von der wir oben bereits sagten, sie müßte bei hinreichend genauer Messung sich unter allen Umständen als Störung unserer sämtlichen elektrischen, magnetischen usw. Beobachtungen geltend machen. Die entscheidenden Versuche bestehen darin, daß man solche Messungen wirklich ausführt.

§ 57.

Das ist freilich leichter gesagt als getan. Wären die Störungen leicht festzustellen, dann hätte man sie natürlich schon viel früher entdecken müssen. Es hätten dann sogar diese Störungen dasjenige sein können, wodurch man überhaupt auf die Annahme des Daseins eines Äthers als Träger der elektrischen Erscheinungen gekommen wäre; tatsächlich ist es umgekehrt gegangen, die Strömungsstörungen sind die Probe auf das Dasein des Äthers geworden.

Vielleicht fällt es zunächst auf, daß die Störungen nur klein sein sollen; ist doch die Geschwindigkeit der Erde, unseres den Äther durchschneidenden Schiffes, oder umgekehrt, die uns umbrausende Ätherströmung, nach menschlichen Begriffen sehr groß, unendlich viel stärker als der stärkste Sturm. Aber im Äther gelten andere Maße; gewissermaßen das Normalmaß ist da 300 000 km in der Sekunde, nämlich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Erscheinungen im Äther, und dagegen ist selbst die Erdgeschwindigkeit bzw. die Gegengeschwindigkeit des Äthersturmes, den unsere Instrumente in Gestalt der zu erwartenden Störungen nachweisen sollen, recht klein. Die Äthersturmgeschwindigkeit¹⁾ beträgt nämlich (vgl. § 39) durchschnittlich nicht mehr als 30 km in der Sekunde, verhält sich also zu jener für den Äther kennzeichnenden „Lichtgeschwindigkeit“²⁾ rund wie 1:10000.

¹⁾ Kurze Bezeichnung für die Ätherorkangeschwindigkeit: v .

²⁾ Kurze Bezeichnung für die Lichtgeschwindigkeit: c .

§ 58.

Immerhin sind mit den Mitteln der neueren Physik eine ganze Reihe derartiger entscheidender Messungen möglich gewesen. Wir wollen eine von ihnen, die wichtigste, besprechen, nämlich den Versuch von Michelson.

§ 59.

Der Michelson-Versuch beruht auf folgendem, zunächst leichtverständlichen Grundgedanken:

Von einem bestimmten Punkt der Erde, z. B. dem flachen Dach der Technischen Hochschule zu Braunschweig, mögen in einem bestimmten Zeitpunkt nach allen Richtungen der Windrose Lichtstrahlen ausgesandt werden. Dann muß die Fortpflanzung des Lichtes, sobald die Erde in Bewegung ist, also der Äthersturm über das Beobachtungsgebiet hinbraust, anders erfolgen, als wenn die Erde ruht, der Äther also im Beobachtungsgebiet still steht (bei „Ätherstille“).

Im letzteren Falle, der ja ganz gelegentlich sehr wohl einmal verwirklicht sein könnte, möge sich das Licht nach allen Richtungen gleichmäßig schnell fortpflanzen; im ersteren Falle aber, der der weitaus häufigere sein wird, erfahren die Lichtstrahlen Hemmungen oder Förderungen. Am größten sind die Beträge dieser Hemmungen und Förderungen in den beiden Richtungen 1. genau entgegen dem Ätherstrom; 2. genau mit dem Ätherstrom. Sei die erste Richtung in dem Augenblicke der Beobachtung etwa Norden, dann ist die zweite gleichzeitig Süden. Der nach Norden laufende Lichtstrahl wird genau soviel gehemmt, wie während der Zeit des Lichttransportes der Ätherstrom dem Lichte entgegenflutet, denn der Äther ist der Träger des Lichtes; der Südstrahl wird in demselben Maße gefördert.

Der Betrag von Hemmung und Förderung des Lichtes, kurz gesagt, der zu beobachtenden Verkleinerung oder Vergrößerung der Lichtgeschwindigkeit, ist durch das obige Verhältnis 1:10000 gegeben. Die Lichtgeschwindigkeit müßte also in der einen Richtung den zehntausendsten Teil von 300 000 km — das sind eben die 30 km der Ätherstromgeschwindigkeit — kleiner, in der anderen ebensoviel größer ausfallen.

§ 60.

Leider läßt sich das Experiment in dieser Weise nicht ausführen. Es würde nämlich voraussetzen, daß man zugleich an zwei verschiedenen Punkten der Erdoberfläche genau vergleichbare Präzisions-Zeitmessungen anstellen könnte; das ist vorläufig unmöglich. Alle wirklichen irdischen Lichtmessungen (die astronomischen scheiden ohne weiteres aus, weil ihr Genauigkeitsgrad nicht groß genug ist) können nur so erfolgen, daß man einen und denselben Strahl durch Spiegelung nach dem Ausgangspunkte zurücklaufen läßt und die Gesamtzeit für Hin- und Rückweg zusammen mißt, ohne die beiden trennen zu können („Licht-Echo“; man vergleiche z. B. das bekannte Verfahren von Fizeau).

Wo bleibt da nun die Möglichkeit, die Wirkung des Ätherstromes wahrzunehmen?

§ 61.

Was nützt es uns, daß der Strahl in der einen Richtung, etwa auf dem Hinwege, gehemmt wird? in der umgekehrten Richtung, auf dem Rückwege, wird er genau in demselben Verhältnis wieder gefördert, also hebt sich selbstverständlich beides auf. Die Gesamtzeit für den Doppelweg bleibt immer dieselbe, mag die Geschwindigkeit des Äthersturmes („Ätherorkans“) so groß sein wie sie will!

Es ist das Verdienst von Maxwell, bereits darauf hingewiesen zu haben, daß diese naheliegende Schlußfolgerung übereilt wäre.

Merkwürdigerweise heben sich die beiden Wirkungen nicht auf, es überwiegt unter allen Umständen die Hemmung, der hin und her laufende Strahl kommt bei Vorhandensein des „Ätherstromes“ immer später an, als wenn der Ätherstrom einmal stille steht (bei „Ätherstille“).

Allerdings ist die Verspätung sehr gering; während man bei der leider nicht ausführbaren unmittelbaren Messung an zwei verschiedenen Erdpunkten auf einen Ertrag rechnen könnte, der durch das Zahlenverhältnis

$$\frac{1}{10000}$$

gegeben war, ist das Zahlenverhältnis hier

$$\frac{1}{100000000}$$

also ein Hundertmilliontel; es ist, in wissenschaftlicher Ausdrucksweise, nicht ein „Effekt erster Ordnung“, sondern ein „Effekt zweiter Ordnung“; dafür aber handelt es sich hier um Messung an einem und demselben Punkte, und dafür reichen unsere optischen Meßmethoden vollkommen, sogar überreichlich aus¹⁾.

§ 62.

Die Behauptung, daß der Hin- und Hereffekt, die Hemmung und die Förderung des Lichtes, sich gegenseitig nicht genau aufheben, erweckt jedesmal, wenn sie einem Unbefangenen vortragen wird, starkes Kopfschütteln. Ich will sie daher mit Hilfe meines Modells eingehend begründen²⁾.

§ 63. Das mechanische Modell.

Mein Modell besteht aus folgenden Teilen (vgl. Bild 9).

Den Mittelraum nimmt ein langer flacher Holzkasten ein. Der Holzkasten trägt vorn fünf „Uhren“ U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 , die von rückwärts durch eine gemeinschaftliche Kuppelstange bewegt werden, deren Zeiger aber abnehmbar sind und in willkürlichen Nullstellungen aufgesetzt werden können

Dieser Kasten ist das (ruhende oder bewegte) System, in dem sich der Beobachter befindet; für uns also die Erde, bzw.

¹⁾ Herr G. Sagnac glaubte (1913) einen Versuch angestellt zu haben, der bei Messung an einem und demselben Punkte einen Effekt erster Ordnung ergäbe. Dies war ein Irrtum [vgl. H. Witte, Verh. d. D. Phys. Ges. 16, 142, 754, 755 (1914)]. Dagegen erscheint ein schon von Michelson herrührender Gedanke, statt der Bewegung der Erde um die Sonne die Drehung der Erde um sich selber nachzuprüfen, auch heute noch erwägenswert.

²⁾ Ein akademisch, aber nicht mathematisch geschulter Leser hatte die Güte, mich darauf aufmerksam zu machen, daß die Schwierigkeit an dieser Stelle auf den Laien allzu stark wirke, es sei hier noch eine besondere Hilfsüberlegung wünschenswert. Ohne eine solche Schwebe der Laie in der Gefahr, die nächsten Paragraphen mit einem „das ist mir zu hoch“ einfach zu überschlagen und damit die Grundlage für alles spätere zu verfehlen. Er selber, schreibt mein freundlicher Berater weiter, habe sich durch folgende Hilfsüberlegung geholfen: Die zurückgelegten Strecken sind zwar immer gleich; aber die Zeiten sind sicher insofern verschieden, als der gehemmte Strahl längere Zeit gebraucht, eben weil er gehemmt wird, und der geförderte kürzere, eben weil er gefördert wird. Also ist die Zeitdauer der hemmenden Einwirkung sicher eine längere als die Zeitdauer der fördernden Einwirkung. Denkt man sich nun, daß der Ertrag der Wirkung von dieser Zeitdauer abhängt, nicht von der Strecke, so kann man sich wohl erklären, daß die Hemmung stärker wirkt. — Ich gebe diese Überlegung gern und mit bestem Danke wieder. Ganz unanfechtbar ist sie allerdings nicht. Aber gewiß wird sie manchem helfen. (Anmerkung bei der 3. Auflage.)

der Bereich der Erdoberfläche, in dem wir unsere Messungen anstellen. Das Modell ist in der Weise eingerichtet, daß das „Erdsystem“ (der Kasten) bei den Modellexperimenten seinerseits nicht bewegt zu werden braucht, sondern auf dem Experimentiertisch fest stehen bleibt; d. h. wir reden, wenn sich unser Erdraum gegen den Äther bewegt, wieder nicht von unserer Bewegung gegen den Äther, sondern von dem Äthersturm, der die Erde den Sinnen unmerkbar durchbraust. Was dann mit den Lichtstrahlen geschieht, stellt das Modell dar, und zwar folgendermaßen.

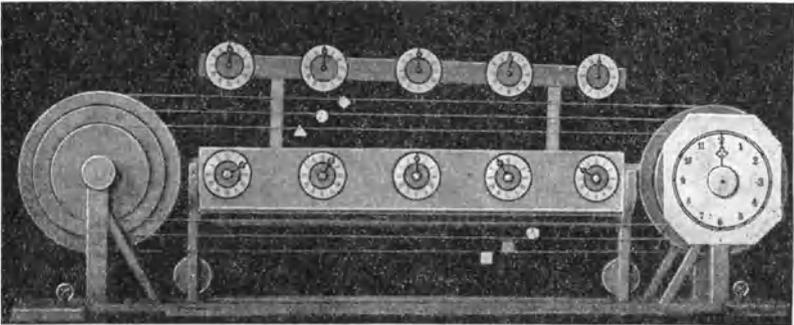


Bild 9.

Mechanisches Modell für Michelson-Versuch und Relativitätsprinzip.

Zu beiden Seiten des Kastens stehen je zwei starke Stützen, die jede eine Welle tragen mit je einem dreifachen Rade. Die Radachsen stehen auf der Zeichnungsebene senkrecht, das Rad dreht sich in der Ebene, die Durchmesser der Unterteilungen jedes Rades verhalten sich wie 3:4:5; die Teilräder sind symmetrisch durch Schnurläufe verbunden, die oberhalb und unterhalb des Kastens durchlaufen. Dreht man an einem oder an beiden Rädern, so bewegen sich die drei Schnurläufe mit, und zwar läuft die innere Schnur langsamer, die äußere genau in demselben Verhältnis schneller als die mittlere; die Geschwindigkeitsverminderung bei der inneren Schnur ist zahlenmäßig genau so groß wie die Geschwindigkeitsvermehrung bei der äußeren Schnur, denn die geringere Geschwindigkeit ist genau um eine Einheit kleiner, die größere genau um eine Einheit größer als die normale (3:4:5).

Die Schnurläufe stellen demnach ungestörte Lichtstrahlen, sowie in ganz bestimmtem Verhältnis (1:4) gehemmte und ge-

förderte Lichtstrahlen dar, und zwar bedeutet bei Rechtsdrehung der Räder (links herum alles umgekehrt):

1. oberhalb des Kastens die mittlere Schnur Lichtstrahl nach rechts, unterhalb dieselbe mittlere Schnur Lichtstrahl nach links laufend mit Normalgeschwindigkeit, also bei Ätherstille;
2. oberhalb des Kastens die untere Schnur (kleineres Rad) Lichtstrahl nach rechts, gehemmt; unterhalb des Kastens die untere Schnur (größeres Rad) Lichtstrahl nach links gefördert, beides gehört also zu Äthersturm von rechts nach links (oder Eigenbewegung des Systems von links nach rechts);
3. umgekehrt oberhalb des Kastens die obere Schnur (größeres Rad) Lichtstrahl nach rechts gefördert; unterhalb des Kastens die obere Schnur (kleineres Rad) Lichtstrahl nach links gehemmt, dies gehört also beides zu Äthersturm von links nach rechts (Eigenbewegung des Systems von rechts nach links).

Wir ziehen zum Vergleich mit 1, Ätherstille, vorzugsweise 2 heran, Äthersturm von rechts, Nr. 3 mit dem Äthersturm von links liefert überall ähnliche Ergebnisse.

Vor jedem der beiden Räder kann ein großes Zifferblatt mit beliebig aufsetzbaren Zeigern angebracht werden zum Ablesen der Zeit; die Räder werden der Regel nach mit der gemeinsamen Kurbelstange der Uhren U_1 bis U_5 gekoppelt.

Sämtliche Zeiger sollen der Anschaulichkeit halber als Minutenzeiger aufgefaßt werden. Die ungestörte Lichtwelle, bei Ätherstille, braucht dann von einer Uhr zur anderen „eine Viertelstunde“, also von U_1 bis zu U_5 oder unten von U_5 bis zu U_1 je „eine Stunde“ (vgl. hierzu Bild 13 bei § 81, sowie Bild 10 a, b und c). Der Abstand einer Uhr von der anderen müßte demnach in Wirklichkeit eigentlich so groß sein, daß er auf der Erde gar keinen Platz hat, nämlich ungefähr so groß, wie der doppelte Abstand der Erde von der Sonne. Aber das schadet nichts, denn es handelt sich hier nur um ein Bild, und das Bild ist eben so abgepaßt worden, daß für Raum und Zeit recht anschauliche Zahlen herauskommen. Wir wollen daher den Abstand ruhig mit den Maßeinheiten benennen, die er in dem Apparate hat, das sind je 60 cm, die Lichtgeschwindigkeit ist daher in unserem Modell in einer Viertelstunde oder 15 Minuten 60 cm, mithin 4 cm in einer Minute bei Ätherstille. Der

Äthersturm hat seinerseits, wie in den oben gegebenen Zahlen liegt, in unserem Modelle zur Lichtgeschwindigkeit das Zahlenverhältnis 1 : 4 (bei der Erde durchschnittlich 1:10000); die

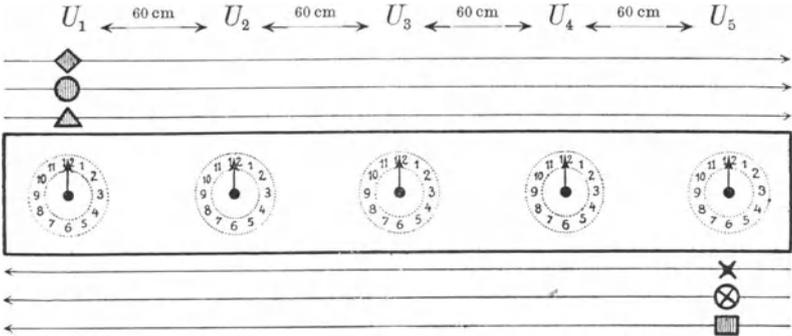


Bild 10a. Ungestörter, gehemmter und geförderter Strahl verlassen U_1 bzw. U_5 .

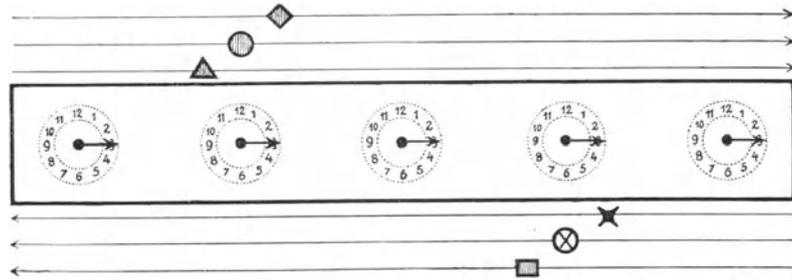


Bild 10b. Dieselben nach einer Viertelstunde.

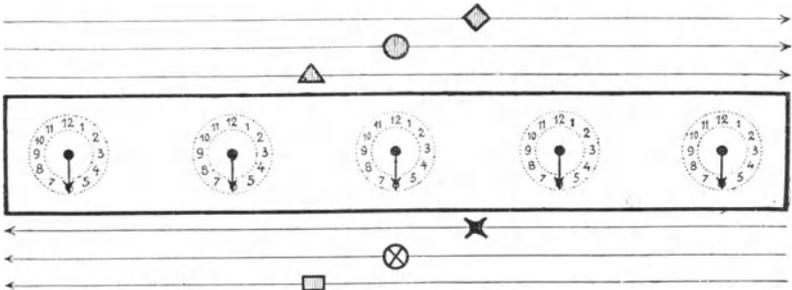


Bild 10c. Dieselben nach einer halben Stunde.

gehemmte Welle (kleineres Rad) läuft $\frac{1}{4}$ langsamer als der ungestörte Strahl, legt also in einer Viertelstunde 60 — 15 oder 45 cm zurück, das sind in einer Minute 3 cm, der geförderte

Strahl in einer Viertelstunde $60 + 15$ oder 75 cm, also in der Minute 5 cm. Der Äthersturm hat die Geschwindigkeit 1 cm in der Minute, von rechts oder links. Das sieht außerordentlich wenig aus, dieser Äthersturm ist aber auf die Wirklichkeit übertragen außerordentlich stark, viel stärker als der durchschnittliche Äthersturm, der die Erde durchbraust. Denn in unserem Modell ist die Lichtgeschwindigkeit ja selber nur 4 cm in der Minute, der Äthersturm im Modell also der vierte Teil der Lichtgeschwindigkeit; das wäre auf die Wirklichkeit übertragen eine Ätherorkangeschwindigkeit von $75\,000$ km in der Sekunde, also 2500 mal stärker, als tatsächlich der irdische Ätherorkan der Regel nach ist.

Zu dem Modell gehört außerdem noch eine Anzahl von Nebenapparaten; so z. B. die auf dem Bilde 9 sichtbaren fünf oberen Uhren, die für die zunächst folgenden Versuche abgenommen zu denken sind ¹⁾.

§ 64. Veranschaulichung des Michelson-Versuches.

Ein und derselbe Vorgang, nämlich Fortpflanzung eines Lichtstrahles von links nach rechts und Zurückbewegung von rechts nach links („Licht-Echo“), ist darzustellen

1. bei Ätherstille,
2. bei Ätherstrom.

Letzterer zunächst von rechts, nachher auch, zwecks Gegenüberstellung, von links.

Der Lichtstrahl werde durch eine auf die zugehörige Schnur aufgehängte Marke veranschaulicht, der ungestörte (Ätherstille) durch eine runde, der erst gehemmte, dann geförderte (bei Ätherstrom) durch eine dreieckige.

Der Ausgangs- und Endpunkt sei die Uhr U_1 , die Spiegelungsstelle die Uhr U_5 ; d. h. jeder der zwei Lichtstrahlen geht zu-

¹⁾ Die Anfertigung des Modells haben nach meinen Angaben die Herren Tischlermeister Kindervater und Schlossermeister Bahns in Wolfenbüttel in dankenswert sorgfältiger und genauer Weise ausgeführt. — Ich möchte nicht verfehlen, bei dieser Gelegenheit auf das auf einen anderen Grundgedanken aufgebaute außerordentlich lehrreiche Relativitätsmodell hinzu weisen, das Herr E. Cohn angegeben hat: Phys. Zeitschr. **12**, 1227 (1911); Himmel und Erde **33**, 117 (1910). — Ein bemerkenswerter Streit über die Verwendungsfähigkeit der Modelle ist seither zwischen den Herren J. Petzold und M. Jakob ausgefochten worden, Herr Petzold hat Bedenken geäußert Herr Jakob hat sie widerlegt [Verh. d. D. Phys. Ges. **20**, 129 (1918); **21** 159, 495, 501 (1919)].

nächst oberhalb des Kastens von U_1 bis U_5 , kommt er da an, so wird die Marke von oben nach unten umgesetzt und läuft nun unterhalb zurück bis genau senkrecht unter U_1 .

Dabei befindet sich:

1. die runde Marke (Ätherstille, ungestört) hin und zurück auf der Mittelschnur,
2. die dreieckige (Äthersturm, erst gehemmt, dann gefördert) hin auf der Schnur, die zum kleinen, zurück auf der, die zum großen Rad gehört.

Die beiden Bewegungen 1 und 2 können im Modell gleichzeitig vorgeführt werden, Zeitablesung ist dann unnötig, man kann das Überwiegen der Hemmung über die Förderung im Vergleich zum ungestörten Vorgang unmittelbar beobachten. Man sieht: Zunächst bewegen sich, oberhalb des Kastens, beide Marken von U_1 nach rechts, die runde mit der Geschwindigkeit 4 cm in der Minute, die dreieckige 3 cm in der Minute. Infolgedessen bleibt die dreieckige zurück, der Abstand wird allmählich immer größer. Wenn die runde Marke bei U_5 ankommt, also von oben nach unten umgesetzt werden muß, ist die dreieckige erst bei U_4 . Nun läuft die runde unten mit ihrer Normalgeschwindigkeit 4 cm pro Minute nach links weiter, die dreieckige muß ihre langsamere Geschwindigkeit 3 beibehalten, bis auch sie U_5 erreicht. Wenn dies geschieht, ist die runde schon wieder zwischen U_4 und U_3 . Jetzt wird auch die dreieckige nach unten umgesetzt und eilt nun mit der vergrößerten Geschwindigkeit von 5 cm pro Minute der runden nach; aber sie holt die runde nicht ein, d. h.: wenn die runde senkrecht unter U_1 ankommt, befindet sich die dreieckige noch weiter rechts.

Zur Veranschaulichung diene (neben 10 u. 13) besonders Bild 11.

Dies Bild ist eigentlich ein graphischer Fahrplan und sagt demjenigen, der solche graphischen Fahrpläne kennt, ohne weiteres alles. Wer nicht in dieser Lage ist, kann es kinematographenartig betrachten, indem er ein undurchsichtiges Blatt Papier, waagrecht gehalten, von oben nach unten über die Bildfläche hinüberschiebt und immer die beiden Markenbilder ins Auge faßt, die gerade über dem oberen Rand zum Vorschein kommen. (Noch besser hält man das Papierblatt fest und bewegt die Bildfläche.) Wenn man dann mit den Augen folgt, sieht man unmittelbar beide Marken zunächst nach rechts wandern, die runde voraneilen, usw. usw. Das Umsetzen von oben nach unten fällt hier weg.

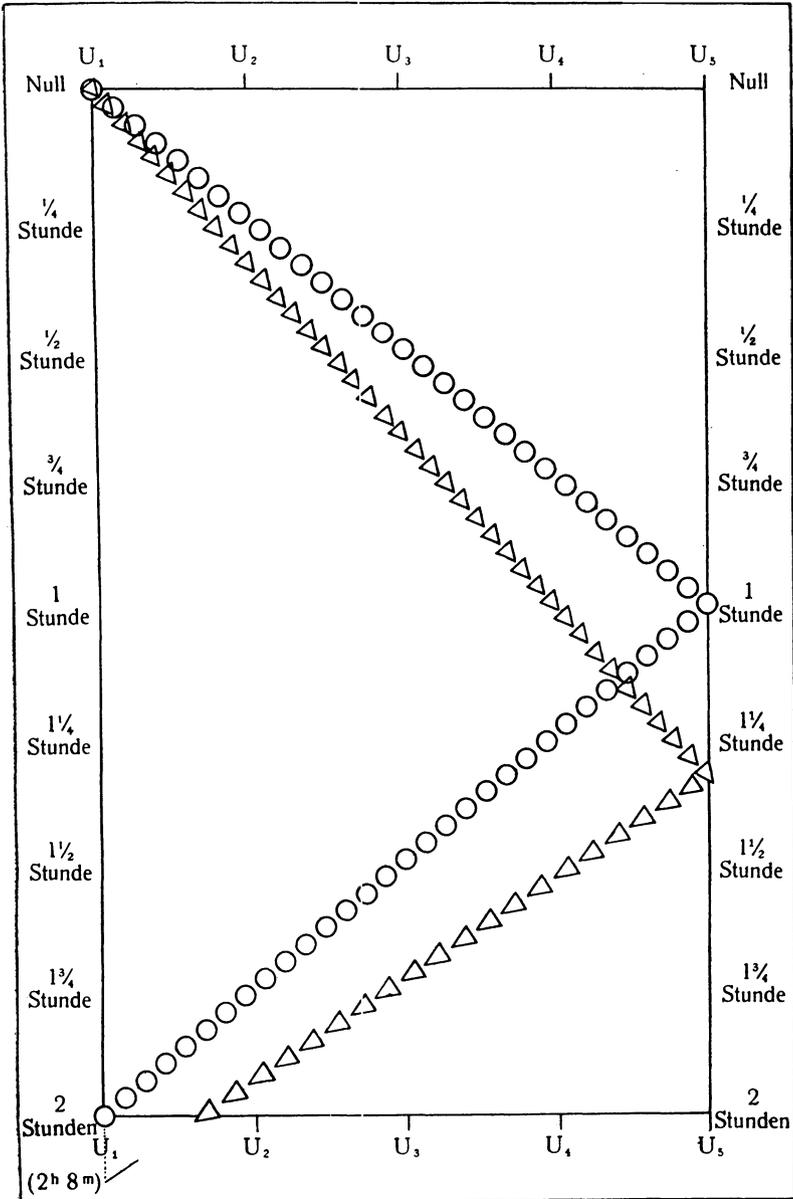


Bild 11.

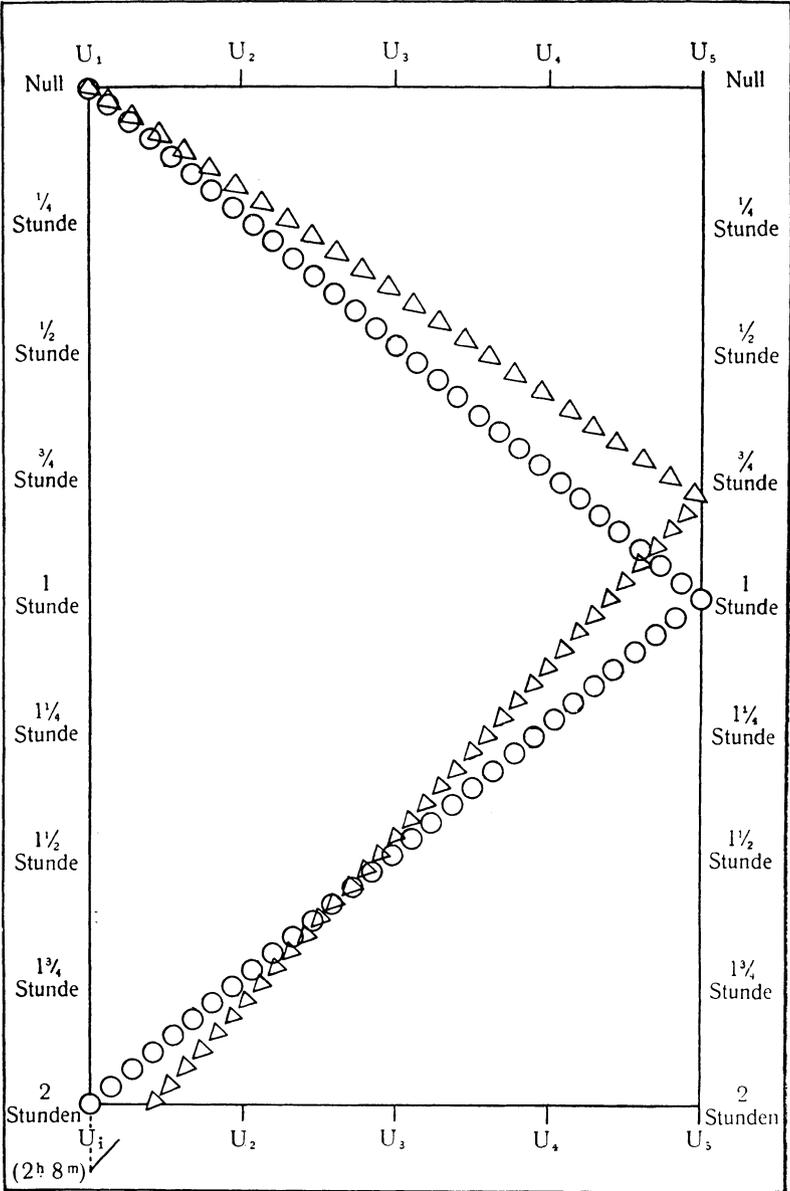


Bild 12.

Es überwiegt also in der Tat die Hemmung die Förderung: Bei Ätherwind kommt der hin und her laufende Strahl etwas später zurück als bei Ätherstille.

§ 65.

Der Vollständigkeit halber sei auch noch auf die umgekehrte Möglichkeit eingegangen, bei Ätherström den Lichtstrahl erst mit dem Äther und nachher gegen den Äther laufen zu lassen; auch hier überwiegt die Hemmung, und zwar auch zahlenmäßig in genau gleichem Maße.

Dieser Fall ist fast noch kennzeichnender, man vergleiche dazu das Bild 12, das ebenso zu verstehen und zu handhaben ist wie Bild 11. Hier eilt das dreieckige Zeichen zuerst voran (Geschwindigkeit 5), das runde (Geschwindigkeit 4) erreicht die Uhr U_6 später, dann aber auf dem Rückweg überholt der Kreis das mit der Geschwindigkeit 3 voranlaufende Dreieck und trifft wieder früher bei U_1 ein.

§ 66.

Die zahlenmäßige Verfolgung beseitigt jeden Zweifel an der Richtigkeit.

Der einfache Weg hin oder her für sich allein ist in jedem Falle 240 cm, nämlich U_1 bis U_6 .

Der ungestörte Strahl legt in einer Minute 4 cm zurück, also die 240 cm in 60 Minuten.

Jeder gehemmte Strahl braucht für 3 cm eine Minute oder für die 240 cm 80 Minuten.

Jeder geförderte Strahl braucht für 5 cm eine Minute oder für die 240 cm 48 Minuten.

Wir haben also:

1. bei Ätherstille: 2mal 60 Minuten für den Gesamtweg hin und her, im ganzen also 120 Minuten;
2. bei Ätherwind: einmal 80 und einmal 48 Minuten für jeden Halbweg, also im ganzen (einerlei, ob erst gehemmt und dann gefördert oder umgekehrt) 128 Minuten oder 2 Stunden und 8 Minuten, d. h. Überwiegen der Hemmung und 8 Minuten.

§ 67.

Der innere Grund ergibt sich sofort, wenn man die Art des soeben stillschweigend angewandten Rechnungsverfahrens näher prüft.

Es ist nämlich ein Regeldetrivverfahren, und zwar der folgenden Art:

1. Bei Ätherstille (ungestörter Strahl) werden gebraucht:

für 4 cm 1 Minute,

folglich für 240 cm . . . $\frac{240}{4}$ Minuten.

2. Bei Ätherwind werden gebraucht:

a) beim gehemmten Strahl

für 3 cm 1 Minute,

folglich für 240 cm . . . $\frac{240}{3}$ Minuten;

b) beim geförderten Strahl

für 5 cm 1 Minute,

folglich für 240 cm . . . $\frac{240}{5}$ Minuten.

Daher ist die Zeit hin und her

1. bei Ätherstille: $\frac{240}{4} + \frac{240}{4}$;

2. bei Ätherwind: $\frac{240}{3} + \frac{240}{5}$.

Es ist nun eine ganz einfache Eigenschaft der Zahlenreihe, daß

$$\frac{1}{4} + \frac{1}{4}$$

nicht dasselbe ist wie

$$\frac{1}{3} + \frac{1}{5}.$$

Wenn ich eine Reihe von drei Zahlen in gleichem Abstände habe,

$$3 \qquad 4 \qquad 5$$

so ist allerdings $4 + 4$ dasselbe wie $3 + 5$, dagegen ist $\frac{1}{4} + \frac{1}{4}$ unter allen Umständen weniger als $\frac{1}{3} + \frac{1}{5}$.

§ 68.

Vielleicht kann ich zur besseren Veranschaulichung noch ein Beispiel aus dem täglichen Leben anführen.

Ein größerer Haushalt, vielleicht ein Gasthof, bekommt jeden Morgen 120 Bröte, und zwar 60 Bröte vom Bäcker A und 60 Bröte vom Bäcker B. Der Preis beträgt bei Bäcker A 5 Bröte für 10 ₤, bei Bäcker B ebenfalls 5 Bröte für 10 ₤. Demnach wird an Bäcker A täglich bezahlt 1,20 *M*, an Bäcker B ebenfalls 1,20 *M*; im ganzen also 2,40 *M*. Eines Tages schlägt Bäcker A seinen Preis auf, er behauptet nämlich, nur 4 Bröte für 10 ₤ liefern zu können, Bäcker B dagegen geht genau um ebensoviel nach der anderen Seite und liefert 6 Bröte für 10 ₤. Dann muß also, wenn nach wie vor von jedem 60 Bröte genommen werden, an A mehr bezahlt werden, an B weniger. Hebt sich die Vermehrung und Verminderung im ganzen auf?

An A wird bezahlt für 4 Bröte 10 ₤, also für 60 Bröte 1,50 *M*, an B für 6 Bröte 10 ₤, also für 60 Bröte 1 *M*, im ganzen also 2,50 *M* gegen 2,40 *M* vorher, das sind 10 ₤ mehr.

§ 69. Wirkliche Ausführung.

Die tatsächliche Ausführung des Experimentes gestaltet sich in einem Punkte anders. Man macht nicht erstens die Messung bei Ätherstille und dann zweitens bei Ätherwind; es wäre nicht möglich, auf diese Weise so geringe Zeitunterschiede zu messen, wie hier in Betracht kommen. Denn in Wirklichkeit handelt es sich ja nicht wie bei unserem Modell um einen Zeitunterschied von mehreren Minuten, sondern, da der ganze experimentelle Aufbau im Laboratorium Platz findet, um eine Zeitdifferenz von weniger als

1

10 000 000 000 000 000

Sekunde. Nebenbei läge auch eine gewisse Schwierigkeit darin, daß man auf die Ätherstille unter Umständen recht lange warten müßte.

Es ist aber möglich, beide Messungen, Ätherwind und Ätherstille, gewissermaßen in demselben Augenblick zu machen. Die Messung bei Ätherstille wird dann durch folgende ersetzt: Während der gehemmte und gefährdete Strahl naturgemäß genau in der Richtung des strömenden Äthers laufen muß, schickt man gleichzeitig einen zweiten Strahl genau senkrecht zu dieser Richtung zu einem zweiten gleichweit entfernten Spiegel hin und zurück. Allerdings erfährt dieser zweite hin und her gehende

Strahl ebenfalls eine gewisse Verzögerung gegenüber der Zeit, die er bei Ätherstille brauchen würde, aber diese Verzögerung ist kleiner als die des ersten Strahles, infolgedessen kann der zweite Strahl sehr wohl als Ersatz für den Strahl bei Ätherstille eintreten.

Bei diesem Verfahren reicht die Genauigkeit der Versuchsanordnung bei weitem hin, um den gesuchten Zeitunterschied festzustellen. Sie ist sogar noch beträchtlich größer. Es wird nämlich, wie bei allen solchen optischen Experimenten, eine Interferenzerscheinung benutzt, und diese liefert beim Michelson-Versuch noch eine mehr als 20mal größere Genauigkeit.

§ 70. Das Ergebnis.

Die sorgfältigsten und mehrfach mit noch gesteigerter Genauigkeit wiederholten Messungen¹⁾ haben übereinstimmend das folgende überraschende Resultat geliefert: Der gesuchte Zeitunterschied ist Null.

Das heißt, die Erde verhält sich so, als ob immer Ätherstille herrschte.

Dieses Ergebnis ist im Hinblick auf die früher angeführten Experimente über den freien Durchgang der Stoffe durch den Äther (§ 47), sowie andererseits auf die gesicherten astronomischen Kenntnisse der heutigen Wissenschaft völlig unannehmbar; nur in ganz seltenen Ausnahmefällen kann infolge Gegeneinanderwirkens verschiedener himmlischer Bewegungen die Erde im absoluten Raume, und damit im Weltäther, ruhen.

§ 71. Ein Ausweg.

Es liegt dem Leser jetzt vielleicht schon nahe, in dem Ausbleiben des Michelson-Effektes unmittelbar das entscheidende Beweismittel gegen das Dasein des Äthers zu sehen.

Indessen ist es im Hinblick auf den mannigfachen Nutzen der Äthervorstellung ebensowohl zu verstehen, daß die Forschung diesen Weg zunächst nicht beschritten hat. Es gelang H. A. Lorentz²⁾ und Fitzgerald³⁾, diejenige einzige Annahme ausfindig zu machen, durch die das verneinende Ergebnis des Michelson-Versuchs mit dem Äther in Einklang gebracht werden konnte.

¹⁾ Zusammenstellungen in den Lehrbüchern von Laue und Weinstein.

²⁾ H. A. Lorentz, *De relatieve beweging van de aarde en den aether*, Amsterdam Zittingsverslag Akad. v. Wet. (1892), S. 74.

³⁾ Vgl. O. Lodge, *Aberration problems*, London Trans. A. 184, 727 (1893).

Die Annahme lautet: Infolge der Bewegung der Erde durch den Äther selber (oder infolge des „Ätherorkans“) erfährt die ganze Erde mit allem, was darin und darauf ist, in der Bewegungsrichtung entsprechend der Stärke des Äthersturmes eine bestimmte Zusammendrückung. Im Modell: Der die Uhren tragende Kasten wird in seiner Längsrichtung zusammengedrückt, die Uhr U_5 , bei der die Spiegelung erfolgt, wird um einige Zentimeter nach links verschoben; dadurch wird der Weg verkürzt und so die Verlängerung der Zeit gerade aufgehoben. Wird der Äthersturm doppelt so stark, also die zu erwartende Verspätung doppelt so groß, so wird von selber auch die Zusammendrückung die doppelte usw. Der Erdbewohner selber merkt von der Zusammendrückung nichts, da sie alles auf der Erde befindliche betrifft, also die Vergleichsmöglichkeit fehlt. Der Zahlenwert der Zusammendrückung ist bei der Erde natürlich durch das obige Zahlenverhältnis ein hundertmilliontel gegeben.

§ 72.

Diese Annahme greift ganz außerordentlich tief in die innerste Natur der Körperwelt ein. Denn was sie für die Erde fordert, müßte für jeden anderen bewegten Körper in gleicher Weise gelten. Die Größe oder die Ausmessungen eines jeden Körpers wären danach durchaus veränderlich, auch der festeste Körper müßte infolge der Bewegung genau dieselben Zusammendrückungen erfahren. Mit dieser allumfassenden Forderung ist die „Kontraktionshypothese“ in der Tat der Vorbote des Relativitätsprinzips geworden. Wenn wir bei der letzten der Relativitätsbehauptungen ankommen, werden wir sehen, daß der Schlußstein des Relativitätsgebäudes gerade dieser Lorentzschen Zusammendrückungsannahme entspricht.

Jedoch geht das Relativitätsprinzip selber im ganzen weit über die Zusammendrückungshypothese hinaus.

§ 73. Übergang.

Der Michelson-Versuch ist, wie erwähnt, der auffälligste, jedoch immerhin nur ein einziger aus einer langen Reihe von Versuchen. Alle diese anderen Versuche verfolgten die gleiche Absicht, Störungen zu ermitteln, welche die Vorgänge der elektrischen Naturhälfte durch den Äthersturm erfahren sollten. Kein

einziges aus der ganzen Reihe hat die geringste Störung gezeigt. Alle sind „negativ“, „verneinend“ ausgefallen.

So wiederholte sich eine ganze Reihe von Malen die Lage, in die die Forschung durch das Fehlschlagen des Michelson-Versuches versetzt war: Für jeden einzelnen Versuch mußte eine neue Erklärungshypothese gesucht werden, um die nicht vorhandene Einwirkung des Äthers mit dem vorausgesetzten Dasein des Äthers in Einklang zu bringen.

Dem Scharfsinn hervorragender Physiker ist es nun bis auf den heutigen Tag gelungen, für alle die bisher verneinend ausgefallenen Versuche Ergänzungshypothesen ausfindig zu machen¹⁾. Man kann nicht eigentlich sagen, daß das wirkliche Fehlen von Erklärungen für die immer wiederholten verneinenden Ergebnisse die zwingende Ursache für die Aufstellung des Relativitätsprinzips gewesen sei. Erklärungen hatte man wohl, aber was man nicht hatte, war eine Erklärung; die Erklärung, welche die ganze Reihe aus einem einzigen Gesichtspunkte erklärte. Dies war der Antrieb, der weiter führte. Hinzu kam die Erwägung, daß das Aufstellen von Ergänzungshypothesen von nun an eigentlich kein Ende nehmen würde, denn jeder neue verneinende Erfolg mußte eine neue Hilfsannahme nötig machen, wenn es nicht gelang, das erlösende Gesamtgesetz zu finden.

Achter Abschnitt.

Das neue Relativitätsprinzip.

A. Grundlegung. Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit.

§ 74.

Der Grundgedanke des neuen, den absoluten Raum nebst Weltäther sowie die absolute Zeit vollständig aufgebenden Relativitätsprinzips ist folgender:

Bisher sind alle Versuche fehlgeschlagen, die eine Bewegung der Erde durch den Äther nachzuweisen imstande gewesen wären. Es ist wahrscheinlich, daß auch alle späteren Versuche fehlgeschlagen werden. Wir wollen annehmen, daß wirklich die Natur

¹⁾ Das ist hauptsächlich das Verdienst von H. A. Lorentz, vgl. z. B. Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Bd. V (2), Heft 1. Leipzig, Teubner, 1904.

so eingerichtet ist, daß jeder derartige Versuch fehlschlagen muß. Wir wollen versuchen, eine gemeinsame Erklärung zu finden, die mit Notwendigkeit zu dem verneinenden Ergebnisse aller und jeder derartigen Versuche führt.

§ 75.

Wir dürfen dabei von vornherein eine wichtige Einschränkung machen. Allerdings sind die bisher angestellten verneinenden Versuche sämtlich auf der Erde ausgeführt worden, also in einem Raume, welcher sich dreht und Beschleunigungen erfährt. Indessen läßt sich streng beweisen, daß bei allen diesen optisch-elektrischen Versuchen die Drehung und die Beschleunigung der Erde nicht in Betracht kommt, sondern nur die reine gleichförmigeradlinige Fortbewegungsgeschwindigkeit des Augenblicks. (Der Hauptgrund ist leichtverständlicherweise die ungemein kurze Zeitdauer aller elektrisch-optischen Veränderungen.)

Infolgedessen nötigen die Tatsachen in keiner Weise zu der Annahme, daß der verneinende Ausfall der Ätherexperimente auch gedrehten und beschleunigten Räumen zukommt. Gesichert ist nur, daß geradlinig-gleichförmig bewegte Räume (Trägheitsräume) den Nulleffekt zeigen. Infolgedessen bezieht das Relativitätsprinzip seine Forderung nur auf die Gesamtheit aller Trägheitsräume. Daß für beschleunigte und sich drehende Räume ebenfalls eine Gleichwertigkeit bestände, braucht nicht gefordert zu werden, und wird daher auch nicht gefordert. Im Gegenteil behauptet das Relativitätsprinzip für jedes nicht geradlinig-gleichförmig bewegte System Abweichungen von den für Trägheitssysteme geltenden Ergebnissen, genau wie das ja das alte mechanische Relativitätsprinzip in seinem Geltungsbereiche auch getan hatte¹⁾.

Beschleunigte und sich drehende Räume scheiden daher für unsere folgenden Betrachtungen aus, denn die entscheidenden Grundgedanken des Relativitätsprinzips gründen sich eben darauf, daß in der Gesamtheit aller Trägheitsräume jede Wirkung des Ätherstromes Null sein soll.

Nach wie vor kann dabei der Erdraum angenähert als Trägheitsraum aufgefaßt werden.

¹⁾ Vgl. H. Witte, Verh. d. D. Phys. Ges. **16**, 142—150 (1914).

§ 76.

Es liegt auf der Hand, daß es ein Ding der Unmöglichkeit sein muß, alle irgendwie denkbaren ausgeführten und noch auszuführenden Versuche, alle irgendwie möglicherweise zum Entscheid brauchbaren Ätherwirkungen gewissermaßen mit einem einzigen Griff zusammenzufassen und mit einem Schlage unter gleichzeitigem Berücksichtigen aller Einzelercheinungen zugleich den neuen Unterbau hinzuzaubern.

Es ist nur der folgende Weg denkbar: Man greift irgendeinen Erscheinungsbereich heraus, der für die elektrische Hälfte der Natur kennzeichnend ist und möglichst viele Einzelheiten umfaßt. Diesem Bereich paßt man die neue Theorie an; daß es dann wirklich die alles umfassende Universaltheorie wird, ist, wenn man will, Glücksache, richtiger Intuition.

Umfassen muß das neue Prinzip selbstverständlich die ganze Natur, sowohl die elektrische wie auch die mechanische Hälfte. Denn wenn es nicht alles umfaßt, können, genau wie beim alten Relativitätsprinzip, die Folgerungen wieder nicht für „Den Raum“ und „Die Zeit“ selber ausgesprochen werden.

In dieser Forderung des Allumfassens liegt eine besondere Schwierigkeit. Denn für die gesamte mechanische Naturhälfte gilt ja nach bisheriger wissenschaftlicher Einsicht das alte Relativitätsprinzip; wird jetzt ein anderes Prinzip als allgemein verbindlich gefordert — und das neue Relativitätsprinzip ist, wie wir sehr bald sehen werden, in der Tat anders als das alte —, so liegt darin die Behauptung eingeschlossen: die ganzen bisher für gesichert gehaltenen Gesetze der mechanischen Naturhälfte beruhen auf mehr oder weniger ungenauen Beobachtungen und sind nur angenähert richtig.

§ 77.

Heben wir nochmals scharf hervor:

Erstens: Ob die Theorie, welche wir jetzt skizzieren werden, also „Das Relativitätsprinzip“, wirklich alle Naturvorgänge umfaßt, das müssen wir hier offen lassen und das ist zugleich diejenige große Frage, welche auch für die Wissenschaft zurzeit noch offen steht und an deren vollständiger Beantwortung die Richtigkeit der neuen Theorie hängt. In unserer früheren Ausdrucksweise: Ob das materielle Kennzeichen M , Erfülltheit der Natur-

gesetze, in all den Systemen, die gleichwertig sein sollen, wirklich erfüllt ist, das steht zum Teil noch dahin.

Zweitens: Unsere eigene Darstellung hat sich daher im wesentlichen mit dem Kennzeichen F der formellen Gleichwertigkeit der neuen Raum-Zeitsysteme zu befassen. Diese formell gleichwertigen neuen raumzeitlichen Systeme rein als Raum- und Zeitgebilde selber aufzufinden und zu durchdenken, das ist jetzt der Kern unserer Aufgabe.

Drittens dasjenige eine Stück vorausgesetzter materieller Gleichwertigkeit, auf dem die Herleitung beruht: Für die Entwicklung der Systeme selber mit ihren neuen raumzeitlichen Eigenschaften brauchen wir irgendeinen Erscheinungsbereich als Grundlage. Einstein, der Schöpfer des Relativitätsprinzips, hat dazu denselben Erscheinungsbereich gewählt, auf dessen Boden der Michelson-Versuch gewachsen war, also die Optik. Einstein stellt für diesen ganzen Erscheinungsbereich die umfassende Grundannahme auf: Wir wissen, daß der Michelson-Effekt — die Verspätung des Licht-Echos bei Ätherstrom, das Überwiegen der Hemmung über die Förderung — im Trägheitsraum Null ist; wir kennen einige nahe verwandte Versuche, bei denen ebenfalls die Wirkung der Ätherströmung im Trägheitsraum ausbleibt; wir nehmen an, im bewegten Trägheitsraum hat die „Ätherströmung“ überhaupt keinen irgendwie beobachtbaren Einfluß auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes; die wirklich gemessene „Lichtgeschwindigkeit“ — die man unmittelbar nicht messen kann — ist bei beliebig starkem Ätherstrom dieselbe wie bei Ätherstille¹⁾.

Es ist aber wohl zu bemerken, daß in dieser Verallgemeinerung eine Annahme liegt. Man nennt sie kurz das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Dies Hilfsprinzip ist also für Einstein bewußtermaßen der Führer zum Relativitätsprinzip gewesen und soll auch uns als Leitfaden dienen.

§ 78.

Vier verschiedene Forderungen sind es, die auf diesem Wege gewonnen werden und, in festem gedanklichen Zusammenhange miteinander stehend, das neue Relativitätsprinzip verkörpern. Zwei beziehen sich auf den Raum, zwei auf die Zeit. Wir bezeichnen

¹⁾ A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Ann. d. Phys. 12, 891 (1905); u. a. a. O.

die beiden ersten mit R I und R II, die beiden anderen mit Z I und Z II; wir deuten damit an, daß sie die Relativierungen der oben angestellten vier absoluten Raum- und Zeitforderungen R I, R II, Z I, Z II sind.

Nach den dort geleisteten Vorarbeiten und mit Hilfe des Modells ergeben sich diese abschließenden Entwicklungen verhältnismäßig schnell.

B. Die Relativierungen von der ersten Ordnung.

§ 79. Die Relativierung der Raumeigenschaft R I.

Wir gehen hier wie im folgenden von der Erde aus, die wir uns ja als Trägheitsraum denken dürfen. Unser Modell bedeutet also die Erde, zunächst mit Ätherstille, dann mit Ätherstrom (immer von rechts nach links).

Der Lichtvorgang soll derselbe sein bei Ätherstille wie bei Ätherstrom. Nehmen wir die Forderung zunächst als solche hin, ohne zu prüfen, durch welche weiteren Annahmen sie materiell erfüllt werden kann, dann sagt die Forderung als solche: der bewegte Trägheitsraum (bei Ätherstrom) soll dem ruhenden (Ätherstille) gleichwertig sein. Das ist zunächst, rein formell, genau wieder die uns schon bekannte Forderung R I des alten Relativitätsprinzips.

Die formelle räumliche Gleichwertigkeit, ohne Rücksicht auf die neue Forderung der konstanten Lichtgeschwindigkeit, ist beim alten Relativitätsprinzip bereits bewiesen worden (vgl. § 43, Bild 8).

§ 80.

Nun kommt allerdings hier neu hinzu, daß die Gleichwertigkeit überhaupt erst hergestellt werden muß rücksichtlich der materiellen Forderung: die Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit soll bei Ätherstrom nicht kleiner (Hemmung) und nicht größer (Förderung) gemessen werden wie bei Ätherstille.

Vorläufig ist diese Forderung ganz und gar nicht erfüllt. Wie die Halbvorgänge des Michelson-Versuches zeigten, ist gegen den Ätherstrom eine beträchtliche Hemmung und mit dem Ätherstrom eine beträchtliche Förderung vorhanden, beide gegeben durch das Größenverhältnis 1:10000. Die Lorentzsche Zusammendrückungshypothese nützt hier gar nichts, denn sie kann nur das geringe Überwiegen der Hemmung über die Förderung wettmachen (1:100000000, Effekt zweiter Ordnung). Die Hemmung allein und

die Förderung allein bestehen noch unvermindert fort. Im Modell ist die Größenordnung die folgende (vgl. nochmals Bild 10a, b und c):

Die ungestörte Welle legt in einer Minute 4 cm zurück, also die 60 cm von einer Uhr zur anderen in 15 Minuten (einer Viertelstunde). Die gehemmte Welle legt in einer Minute nur 3 cm zurück, braucht also für denselben Uhrenabstand 20 Minuten. (Geförderte Welle entsprechend.) Die Verspätung der gehemmten Welle ist also außerordentlich groß, nämlich 5 Minuten auf eine Viertelstunde. Das ist im Modell die „erste Größenordnung“. (Die zweite ist eine Minute auf eine Viertelstunde, denn die Michelson-Verspätung war 8 Minuten auf 2 Stunden.)

Welches ist die Grundannahme, die diesen Effekt erster Ordnung und alles, was sich darauf aufbaut, mit einem Schlage vernichtet?

§ 81. Die Relativierung der Zeiteigenschaft Z I.

Wir setzen auf die sämtlichen fünf Uhren die Zeiger auf, natürlich mit gleicher Nullpunktstellung, entsprechend der absoluten Zeiteigenschaft Z I, und betrachten weiter die gehemmte Welle, denken uns also umbraust vom Äthersturm. Unsere fünf Uhren müssen deshalb nach früherer Festsetzung¹⁾ jetzt mit Strichen bezeichnet werden, $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5$.

Die Welle verläßt die Uhr U'_1 um voll, kommt 5 Minuten zu spät zur Uhr U'_2 , 10 Minuten zu spät nach U'_3 usw. Das ist der Effekt des Ätherorkans.

Soll dieser Effekt für uns unwahrnehmbar werden, so ist die Lösung nur eine: unsere Uhren müssen falsch gehen. Und zwar muß die Uhr U'_2 5 Minuten nachgehen gegen die Uhr U'_1 , die Uhr U'_3 wieder 5 Minuten nach gegen die Uhr U'_2 , U'_4 5 Minuten nach gegen U'_3 usw.

Es muß also, als die Welle um voll von U'_1 abging, die Uhr U'_2 5 Minuten vor voll gezeigt haben, die Uhr U'_3 10 Minuten vor voll usw., jede „Vorderuhr“ (denn der Äther strömt von rechts nach links, das System bewegt sich von links nach rechts, U'_5 ist also „vorn“) muß von selber 5 Minuten gegen die „Hinteruhr“ nachgehen: Bild 14 oberste Zeile a, von Punkt zu Punkt ver-

¹⁾ Vgl. die Anmerkung zu § 8, wir sind im bewegten System x', y', z' , nicht im Ruhssystem x, y, z .

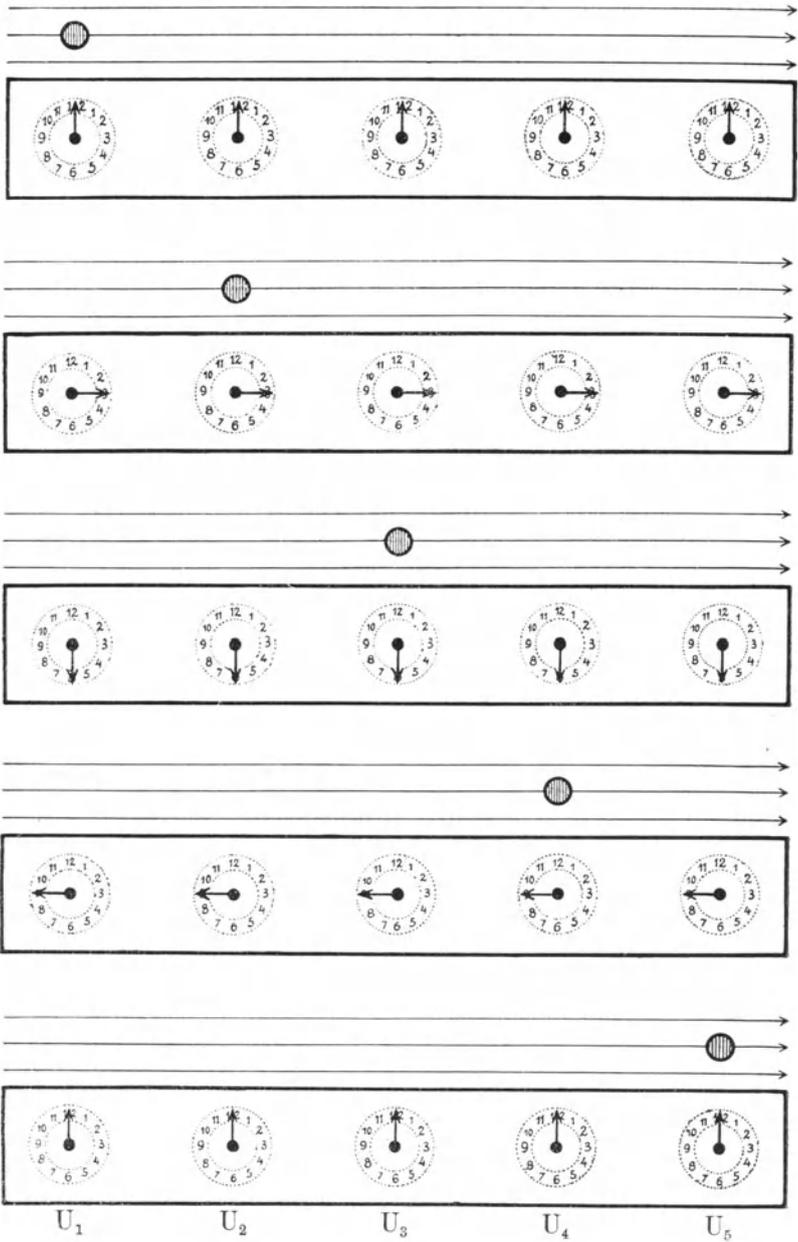


Bild 13 a, b, c, d, e. Ätherstille.

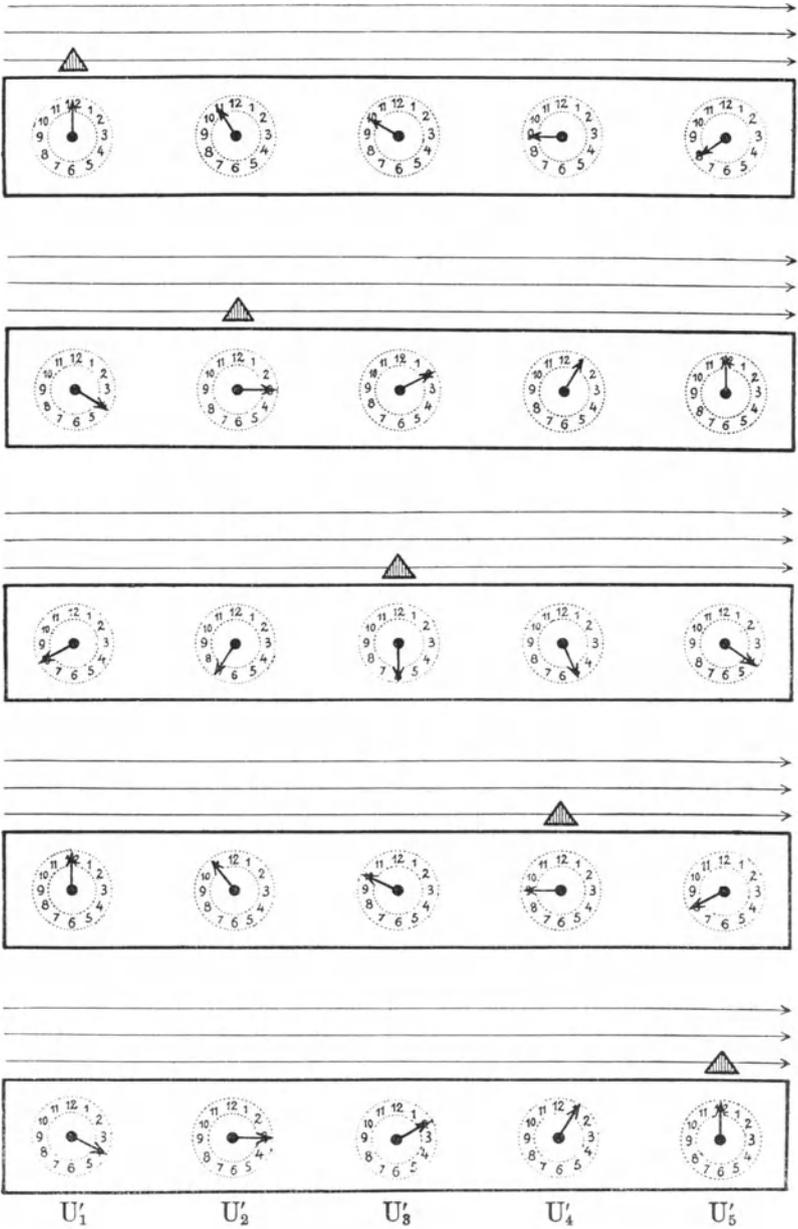


Bild 14 a, b, c, d, e. Äthersturm von rechts.

schiedene, subjektive „Ortszeit“ anstatt der wahren, allerorts gleichen, absoluten Zeit ¹⁾, Bild 13 a.

In der Tat kommt dann die Welle nach U'_2 , wenn U_2 ein viertel zeigt, nach U'_3 , wenn es dort halb ist usw.; die Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit ergibt also in der Tat denselben Wert wie bei Ätherstille: von Uhr zu Uhr eine Viertelstunde (man vgl. dazu die Bilder 13 und 14 a, b, c, d, e).

Man mißt auch bei Ätherstrom diesen Wert, weil die eigenen Uhren falsch gehen. Das Falschgehen selber kann man sich verständlich machen, indem man von einem früheren Zeitpunkt ausgeht, wo Ätherstille geherrscht hat; als dann der Ätherstrom begann, sind die sämtlichen Uhren (und entsprechenden Meßinstrumente) in der Umdrehung ihres Räderwerks gehemmt worden, und zwar ganz naturgemäß die vorn befindlichen, die den Hauptprall abzuhalten hatten, am meisten. So kommt es, daß jetzt, beim gleichmäßigen Ätherstrom, die Uhren, jede Vorderuhr gegen die Hinteruhr, nachgehen.

Das ist die erste Stufe der neuen Einsicht, die Stufe der Falschmessung; genau wie in § 43, als bei dem alten Relativitätsprinzip die absolute Eigenschaft R I in Frage gestellt wurde, der Augenblick, wo es hieß: mein System ruht, du bewegst dich, ich habe allezeit gleichen „Zeitort“, du veränderlichen, ich messe richtig, du falsch — aber ebenso, wie wir von da aus nur noch zwei kleine Schritte bis zur Relativierung der Eigenschaft R I hatten, genau so ist es hier mit der Eigenschaft Z I. Wir stehen unmittelbar vor ihrer Relativierung.

§ 82.

Wir selber, im Ätherstrom, mit falsch gehenden Uhren, können deren Falschgehen nicht merken. Aber wir müßten es doch sehen! Ja, was heißt „sehen“? Wenn ich etwa von U_2 nach U'_1 hinsehe, wenn U_2 ein viertel zeigt, sehe ich dann, U'_1 steht in Wirklichkeit 5 Minuten weiter? Was ich sehe, in diesem Augenblick, wo meine Uhr U_2 ein viertel zeigt, von U'_2 aus sehe,

¹⁾ t' statt t . Von nun an darf das „System“ nicht mehr Raum heißen, Trägheits-Raum, Inertial-Raum, sondern nur noch „System“, nämlich „Gesamtheit aus Raum und Zeit“. Bewegtes System, bewegtes Trägheitssystem, bewegtes Inertialsystem mit falschen Raum- und Zeitmaßen x', y', z', t' . Ebenso absolutes System, ruhendes System, Ruhäthersystem mit wahren Raum- und Zeitmaßen x, y, z, t . — „Das Raumzeit“; das bewegte Raumzeit; das ruhende Raumzeit.

das ist der Lichtstrahl, der in diesem Augenblick von U_1 aus ankommt. Dem Lichtstrahl ist ja aber gerade der ganze Uhrengang, die Ortszeit, angepaßt; dieser Lichtstrahl kann mir weiter gar nichts sagen, als daß er um voll von U_1 abgegangen ist; das sehe ich in diesem „Augenblick“ von U_2 aus: das „Sehen“ kann mir also gerade nur die Täuschung bestätigen, daß das Licht in meinem System trotz des Ätherstroms mit ungestörter Geschwindigkeit liefe; nicht aber mir dazu dienen, das Falschgehen meiner eigenen Uhren zu erkennen¹⁾.

§ 83.

Gibt es denn überhaupt gar kein Mittel, um die eigene Falschmessung wahrzunehmen?

Das eigene System scheidet aus. Wie ist es aber, wenn uns fremde Systeme (Weltkörper) begegnen? wenn wir deren Uhren mit den unseren vergleichen, da müßten wir doch unsere Falschmessung bemerken!

Aber die Uhren der fremden Systeme gehen selber alle falsch, sie können uns keine Norm geben.

Nur in einem Falle wäre das möglich, nämlich wenn wir einem fremden System begegnen, das zufällig gerade im Äther ruht. Dessen Uhren müßten wegen der Ätherstille alle richtig, mit gleicher Zeitangabe (gleicher Nullpunkteinstellung), gehen; das müßten wir sehen, das würde uns auffallen, so würden wir durch Vergleich unsere eigene Falschmessung erkennen.

§ 84.

Gewiß, das sollte man denken.

Doch —

..... harret ihr,
Bis daß der rechte Ring den Mund eröffne?

Die Sache liegt jetzt ganz genau so, wie vorher bei der Wechselrede über R I, als der Insasse des bewegten Systems sagte: Nun

¹⁾ Jedes Einstellen einer Uhr nach einem Lichtsignal (z. B. „Zeitball“) ist, genau genommen, außer der Ruhäther-Lichtstrahlverspätung, die man einrechnen kann, noch mit diesem „Fehler“ infolge der Erdbewegung verknüpft. Merkbar kann der Fehler bei Einstellung nach einem Schallsignal werden, wenn starker Wind weht. (Einer freundlichen Mitteilung von Herrn Prof. Bruncke in Wolfenbüttel zufolge kann ich als Beispiel anführen, daß die Einwohner von Rom ihre Uhren vielfach nach einem auf der Engelsburg um 12 Uhr mittags abgefeuerten Kanonenschuß stellen.)

ja, daß ich bewegt bin, kann ich an meinem eigenen System nicht merken; auch an anderen bewegten Systemen nicht, denn die sind ja selber bewegt; aber wenn ich an einem ruhenden Körper vorbeikomme, dann müßte ich es doch merken, denn der andere ruht ja eben, und ich bin bewegt . . .

Was sieht man wirklich? Der zufällig im Äther ruhende Körper bewegt sich von uns aus gesehen von rechts nach links, mit der Geschwindigkeit des Ätherstromes (1 cm in der Minute), denn indem er im Äther ruht, teilt er, von uns aus beurteilt, die strömende Bewegung des Äthers. Wir wollen diesen Ruhätherkörper durch einen eben solchen Kasten mit fünf Uhren veranschaulicht denken wie unser Erdsystem; und zwar soll der Ruhätherkörper ganz hart über unser System weggleiten, letzteres deshalb, damit wir nicht noch die Zeit in Rechnung setzen müssen, die das Licht braucht, wenn zwei unmittelbar übereinander befindliche Uhren verglichen werden sollen. Allerdings können wir das wegen der drei Schnurläufe nicht gut so herstellen, im ausgeführten Modell ist der zweite Kasten ungefähr ebenso hoch angebracht, wie die Uhren voneinander abstehen. Indessen haben wir uns ja bereits daran gewöhnt, in dieser Beziehung das Modell eben als Modell zu betrachten.

§ 85.

Gehen wir nun etwa von der Uhr U'_3 aus. Die Uhr des Ruhäthersystems, die sich in einem bestimmten Zeitpunkt darüber befindet, heiße U_3 . Über U'_1 sei die Uhr U_1 , über U'_2 U_2 usw. Um vergleichen zu können, nehmen wir an, U_3 und U'_3 ständen zufällig im Beobachtungszeitpunkt gleich, etwa beide auf halb. Dann zeigt U'_1 in diesem Zeitpunkt 10 Minuten über halb, U'_2 5 Minuten über, U'_4 5 Minuten vor und U'_5 10 Minuten vor halb; dagegen alle Uhren im Ruhäthersystem U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 übereinstimmend genau halb (vgl. Bild 15).

Was sieht man nun im irdischen, „gestrichenen“, was im „ungestrichenen“, im Ruhäthersystem?

„Hinsehen“ nach den Uhren weiter vorn und weiter hinten kommt aus den oben angegebenen Gründen wieder nicht in Betracht. Es bleibt allein übrig der unmittelbare gegenseitige Vergleich zweier genau untereinander befindlicher Uhren.

Das Ruhäthersystem erklärt selbstverständlich: Vergleiche ich eure Uhr U'_1 mit meiner U_1 , so steht eure U'_1 10 Minuten über halb, also 10 Minuten zu früh; eure U'_2 geht vor meiner U_2 5 Minuten vor; eure U'_3 geht zufällig richtig, eure U'_4 hinter meiner U_4 5 Minuten, U'_5 hinter U_5 10 Minuten nach, usw., eure Uhren gehen also allesamt, Vorderuhr gegenüber der Hinteruhr, um je 5 Minuten nach.

Muß nun der untere, „gestrichene“ Beobachter das zugeben? Nein!

Gewiß kann er sagen: Jawohl, meine U'_1 geht vor eurer U_1 10 Minuten vor, U'_2 5 Minuten vor, U'_4 5 Minuten nach usw. Aber

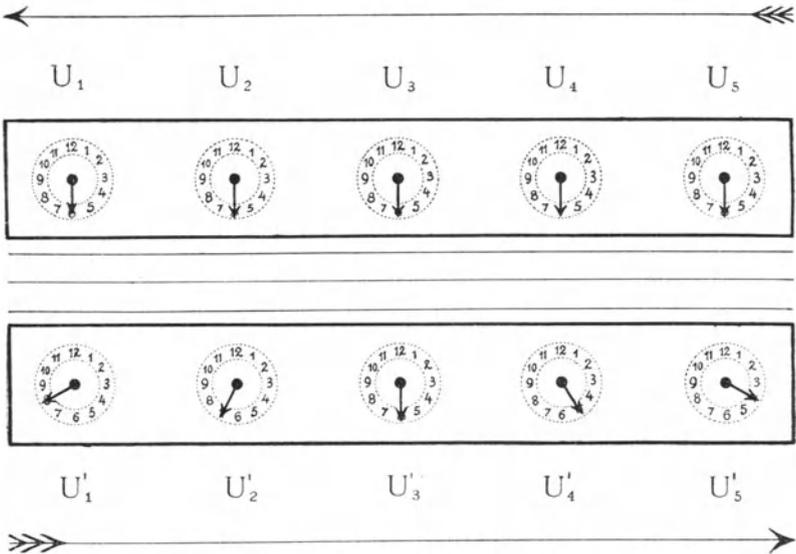


Bild 15.

es kann ihm keine Macht der Welt verwehren, das auch umgekehrt auszudrücken und zu sagen: eure U_1 geht hinter unserer U'_1 10 Minuten nach, eure U_2 hinter unserer U'_2 5 Minuten nach, eure U_3 zufällig richtig, U_4 5 Minuten vor, usw. usw. Und dann weiter auch die umgekehrte Zusammenfassung hinzustellen: eure Uhren gehen (oben, im Normalsystem, Ätherstrom, ist links vorn) von vorn nach hinten jede Vorderuhr gegenüber der Hinteruhr 5 Minuten nach; unsere Uhren gehen alle richtig, gehen alle gleichzeitig, haben übereinstimmende Nullpunktslage —

denn die einzigen, die uns das streitig machen wollen, seid ja ihr; und eure Uhren gehen eben falsch¹⁾.

¹⁾ Die Uhreneinstellung selber kann man am kürzesten so kennzeichnen (vgl. § 82, Anmerkung): Von einer Uhr aus werden in jedem System alle Uhren durch Lichtsignal eingestellt, überall unter Anrechnung der festgegebenen Ruhäther-Lichtgeschwindigkeit. So erscheint die Lichtgeschwindigkeit c als das Ursprüngliche, Erste, Feste, die Einstellung der Zeit t als das Zweite, Abgeleitete, Abhängige. In dieser Umwertung liegt der innerste Kern von Einsteins Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit. Daß man sie widerspruchsfrei vollziehen kann und daß man sie dem innersten Wesen der Natur gemäß sogar vollziehen muß: diese Möglichkeit zu sehen, dies zu glauben, war der begnadete Blick und die außerordentliche Tat.

So betrachtet, spielt von den später zu erwähnenden hauptsächlichlichen Folgerungen eine die Rolle einer grundlegenden Voraussetzung: Es müssen (§ 97 Mitte) in der Natur größere Stoff- und Wirkungsgeschwindigkeiten als die Lichtgeschwindigkeit c ausgeschlossen sein. Gerade diese Bedingung erfüllt unser Modell nicht. In einem „Augenblick“, in dem wir das Modell betrachten (abzeichnen, photographieren), kommt das abbildende Licht zu unserem Auge mit der wahren natürlichen Lichtgeschwindigkeit 300 000 km in der Sekunde, das Modell rechnet mit 4 cm in der Minute. Daher angesichts der Bilder immer wieder jenes leise Befremden: Aber ich sehe doch auf den ersten Blick, unten stehen die Uhren verschieden, oben stehen sie



Bild 16. Ein „Augenblick“

von U_5 bzw. U'_5 aus. Zugleich Einstellung durch Lichtsignal von U_1 oder U'_1 aus.

wirklich gleich! — Was die Bilder zeigen, kann man eben in einem Wirklichkeitsaugenblick nicht sehen. Macht man den Kasten in zutreffenden Längenmaßen, $U_5^{(C)}$ bei uns auf der Erde, $U_1^{(C)}$ etwa auf dem Saturn, so wird der „Augenblick“ wirklich so lang wie im Modell, nämlich eine Stunde; von U'_5 oder U_5 um voll, Bild 14 e und genau so 13 e, sieht man in diesem „Augenblick“ stehen $U_4^{(C)}$ auf drei viertel, $U_3^{(C)}$ auf halb, $U_2^{(C)}$ auf ein viertel, $U_1^{(C)}$ eine Stunde früher auf voll, Bild 14 d, c, b, a und genau so 13 d, c, b, a: von jeder Reihe die Diagonaluhr, über der die Marke steht, und nur diese. Damit verschwindet das Auffällige in der Bevorzugung des Ätherruhsystems. (Hübsch ist auch, hier wie sonst, ein Schallvergleich, Schallzeit $\frac{1}{4}$ Stunde wie im Modell, bei wahrer Schallgeschwindigkeit $\frac{1}{3}$ km in der Sekunde Uhrenabstand 300 km, Kastenlänge gleich Ostfront gegen Rußland, man hört bei Windstille, wenn man so weit hören kann, die Uhren zugleich $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, voll schlagen; fällt am 26. November 1917 überall gleichzeitig der letzte Schuß, so hört man den Schall eine Stunde lang; beides bei Wind ebenso, falls Uhrennullpunkte dem angepaßt; Vorstellung einer Welt, in der das Licht so langsam läuft wie der Schall; wie Wasserwellen; u. a. m.)

§ 86.

Es ist nicht möglich, den Streit zugunsten einer der beiden Parteien zu schlichten; es bleibt nur eine Lösung: beide haben recht.

So glaube jeder sicher seinen Ring
Den echten!

Genau dieselbe Relativierung, die wir oben an der Raumeigenschaft R I vollzogen haben, erfährt damit auch die absolute Eigenschaft Z I der Zeit. Wie bei R I die Ruhe, d. i. dauernde Nullstellung „Des Raumes“, so wird jetzt bei Z I die gleiche Nullpunkts-Einstellung „Der Zeit“ an verschiedenen Orten relativiert. Jedes Trägheitssystem hat eine andere räumliche Einstellung der Uhren; jedes kann seine Uhreneinstellung für richtig und die aller anderen Systeme für falsch erklären; das Ruh-Trägheitssystem (Ruhäther-system!) geht in der unendlichen Gesamtschar unter als ein auch in der Zeitmessung nicht im geringsten bevorzugtes Glied der Gesamtheit; ebensowenig wie einen absoluten Raum gibt es eine absolute Zeit, denn bei beiden ist die absolute Nullpunkts-Eigenschaft, R I wie Z I, gefallen.

Soviel an dieser Stelle; über die außerordentlichen Folgen dieses neuen Schrittes nachher im Zusammenhang.

Jetzt erst zu der Relativierung der Eigenschaften II, durch welche der Kreis geschlossen wird.

C. Die Relativierungen von der zweiten Ordnung.

§ 87.

Die Änderungen, welche die Eigenschaften R II und Z II erfahren, sind von kleinerer Größenordnung, nämlich von der zweiten; also in Wirklichkeit 1:100 000 000; im Modell 1:16, rund 1 Minute auf 1 Viertelstunde, während die erste Größenordnung in Wirklichkeit durch 1:10 000, im Modell in der bisherigen Betrachtung durch 5 Minuten auf 1 Viertelstunde gegeben ist.

Es läßt sich leicht einsehen, daß die bisherige Betrachtung eine Ungenauigkeit enthält, und zwar gerade von der zweiten Größenordnung (1 Minute).

Wir versetzen uns zu diesem Zweck noch einmal auf den Standpunkt zurück, für den die Uhrenstellung im Erdsystem S' „falsch“ war, jede Vorderuhr gegenüber der Hinteruhr 5 Minuten zurück (§ 81), und betrachten zunächst wieder nur das Erdsystem S' .

Diese Annahme, eine Uhrenverstellung um je 5 Minuten, gründete sich auf eine Welle, die gegen den Ätherstrom lief, von links nach rechts. Diese Welle wurde gehemmt und brauchte für den Uhrenabstand statt 15 Minuten 20 Minuten; daher die Verstellung von vorn nach hinten um 5 Minuten. Nun hat aber das gleiche Recht ein Strahl, den man umgekehrt laufen läßt, von U'_5 nach U'_1 . Dieser wird durch den Ätherstrom gefördert, er braucht nach § 66 von Uhr zu Uhr nur 12 Minuten, also 3 Minuten zu wenig. Soll die Zeit wieder als „15 Minuten“ gemessen werden, so muß U'_4 gegen U'_5 3 Minuten vorgehen, ebenso U'_3 gegen U'_4 usw. Man gelangt also, umgekehrt ausgedrückt, wieder zu der Forderung, daß die Uhren im gestrichenen System, jede Vorderuhr gegenüber der Hinteruhr, nachgehen, aber der Unterschied ist jetzt nicht 5, sondern 3 Minuten.

Die beiden Forderungen sind offenbar miteinander unverträglich. Es geht nur so, daß man sich auf einen Mittelwert für den Uhrennullpunktsunterschied einigt, also 4 Minuten, und die entstandene Lücke anderweitig zustopft.

Dies geschieht durch die Glieder zweiter Ordnung.

§ 88. Eine Zeitbetrachtung.

Ich will zunächst zeigen, wie man an der Hand des Modells selber die Notwendigkeit gerade des Einführens derjenigen beiden Effekte zweiter Ordnung, die das Relativitätsprinzip fordert, einsehen kann.

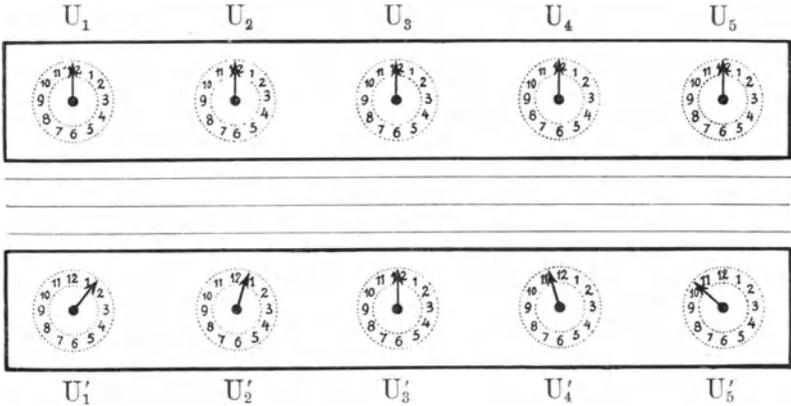
Wir gehen zurück zu der Begegnung des Erdsystems und eines Ätherruhsystems und beginnen mit der Zeit. Ob wir für die „falsche“ Uhrstellung unseres Erdsystems von Uhr zu Uhr 5 oder 4 oder 3 Minuten einsetzen, ist für das Grundsätzliche der folgenden eigenartigen Betrachtung gleichgültig; wir wollen daher gleich den Mittelwert 4 Minuten nehmen (so in Bild 17 a).

Es ist richtig, wenn man in einem bestimmten Zeitpunkt hin- und herüber die Uhren vergleicht, dann ist völlige Gleichwertigkeit der beiden Systeme vorhanden.

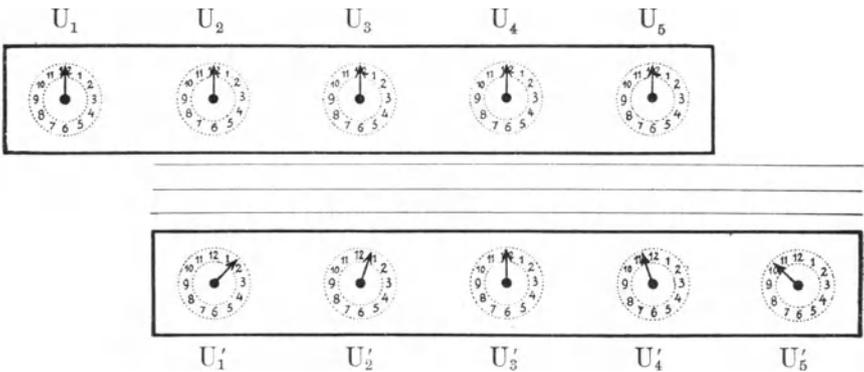
Wir sagten oben, eine andere Vergleichung ist unmöglich, denn das Hinsehen nach den anderen Uhren nützt uns nicht. Indessen ist dabei eins außer acht gelassen. Gehen wir etwa wieder aus von U'_5 , so ist die Uhr U'_3 ja nur in dem einen Beobachtungszeitpunkt über dieser unserer Uhr U'_5 ; eine gewisse Zeit

später schwebt dieselbe Uhr U_3 über unserer Uhr U_2 , wieder ebensoviel später über U_1 usw.; was beobachten wir dann?

Stellen wir zunächst fest: diese Zeit bis zum Erreichen der nächsten Uhr beträgt „in Wirklichkeit“ eine Stunde. Denn der obere



Kasten folgt dem Ätherstrom und legt daher in der Minute 1 cm nach links zurück; den Uhrenabstand, 60 cm, also in einer Stunde (im Modell ist vermittelt eines mit den beiderseitigen großen dreifachen Rädern koaxialen kleinen Rades eine entsprechende Zugvorrichtung



vorgesehen; der Durchmesser des kleinen Rades ist $\frac{1}{4}$ vom Durchmesser des zum ungestörten Lichtstrahl gehörenden Mittelrades).

Was urteilt man nun von der Erde aus (unterer Kasten), die falsche Uhrenstellung hat (Unterschied je 4 Minuten), aber diese

ihre falsche Einstellung der Nullpunkte nicht weiß, über die von Ort zu Ort weiter verfolgte Uhr U_3 ? (man vgl. Bild 17a und b).

Als die Uhr U_3 über U'_3 stand, mögen, der Einfachheit halber, beide gerade „voll“ gezeigt haben. Dann zeigt U_3 , wenn sie über U'_2 ankommt, wieder voll, denn die verflossene Zeit ist wirklich eine Stunde. Aber vom gestrichenen System aus fällt man notwendigerweise ein ganz anderes Urteil. Denn wenn U_3 über U'_2 ankommt, dann steht allerdings U'_3 wieder auf voll, denn U'_3 zeigte vor einer Stunde voll, jetzt ist eine Stunde vergangen, also muß sie wieder voll zeigen. Die Uhr U'_2 aber, auf die es jetzt ankommt, ging vor einer Stunde gegenüber U'_3 4 Minuten vor und geht daher auch jetzt 4 Minuten vor, steht also auf 4 Minuten über voll. Infolgedessen muß jetzt das gestrichene System (Erde) über die Uhren des ungestrichenen folgendes Zusatzurteil fällen: eure Uhrzeiger laufen zu langsam; denn wenn meine, richtigen, Uhren 1 Stunde 4 Minuten weiter sind, hat einer von euren Uhrzeigern, den wir fortwährend verfolgt haben, erst eine Stunde zurückgelegt. Also laufen eure Uhren wirklich zu langsam, und zwar rund auf 1 Stunde 4 Minuten, oder, wie oben immer verglichen wurde, auf 1 Viertelstunde 1 Minute. Demnach ein Fehler zwar von der zweiten Ordnung¹⁾, aber deutlich zu bemerken.

Von hervorragender Wichtigkeit ist dabei dies: dies Urteil bildet sich das Erdsystem, im Ätherstrom, nur infolge des Falschgehens seiner Uhren; von dem Ätherruhsystem aus erfolgt ein entsprechendes Urteil nicht. Vergleicht man von dort aus etwa die Uhr U'_2 nacheinander während der Vorbeibewegung mit den Uhren U_2, U_3, U_4 usw., so konstatiert man gleichmäßig immer oben wie unten Ablauf einer Stunde, denn oben gehen alle Uhren wirklich überein.

Infolgedessen ist damit die Symmetrie zwischen den beiden Systemen gestört; um die Gleichwertigkeit wieder herzustellen, ist gerade die Einführung eines neuen Zeiteffektes eben dieser zweiten Größenordnung eine zwingende Notwendigkeit.

¹⁾ Eigentlich 4 Minuten auf 64 Minuten (nämlich Eigenminuten des Systems S') oder 1 Minute auf 16 Minuten, Zahlenverhältnis 1:16; das Zahlenmaß der ersten Größenordnung ist genau 1:4 (Verhältnis der Ätherstromgeschwindigkeit 1 cm zur Lichtgeschwindigkeit 4 cm).

§ 89. Eine Raumbetrachtung.

Ganz entsprechend beim Raume.

Was ist die der vorigen Zeitbetrachtung „entsprechende“ räumliche Überlegung?

Bei der Zeit hieß es: Wir, im Erdsystem S' , fassen eine Uhr des Ätherruhsystems S , das sich an uns durchschiebt, ins Auge, und zwar zu verschiedenen Zeiten;

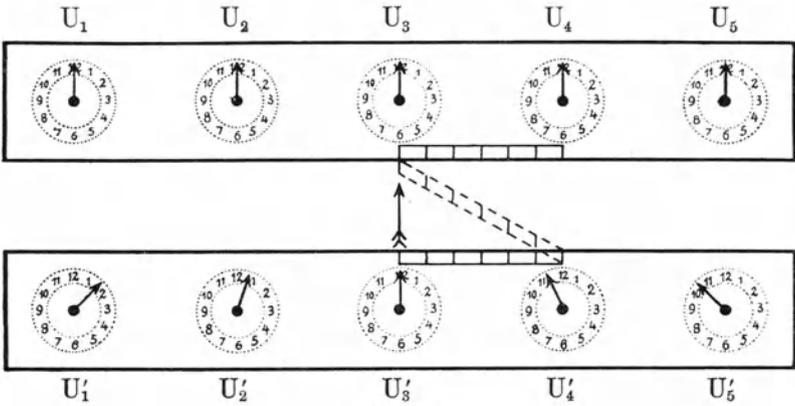


Bild 18 a.

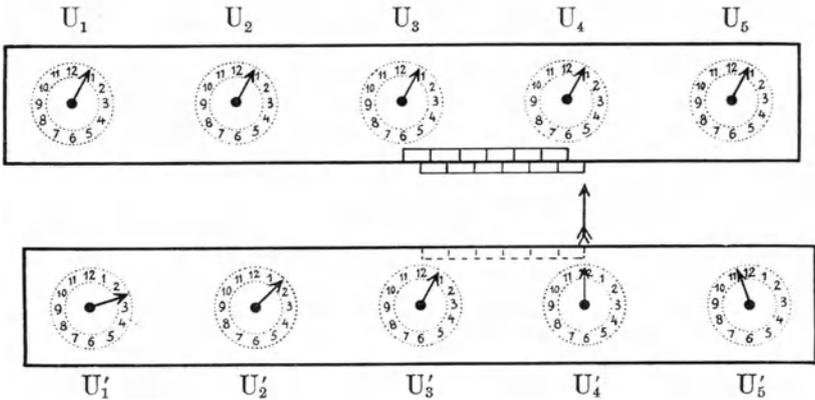


Bild 18 b.

1. wir lesen ab, wieviel die betreffende Uhr unseres Systems in den beiden Zeitpunkten zeigt;
2. wir lesen ab, wieviel die betrachtete Uhr des anderen Systems in den beiden Zeitpunkten zeigt;

so stellten wir fest, wie groß der zeitliche Abstand der beiden Zeitpunkte in den beiden Systemen ist, und dadurch gelangten wir, von uns aus, zu dem Ergebnis: im anderen System läuft die Zeit langsamer. Das Wesentliche in der Ausführung war: wir verglichen den zeitlichen Abstand zwischen zwei Zeitpunkten im System S' mit dem zeitlichen Abstand zwischen zwei entsprechenden Zeitpunkten im System S (und umgekehrt).

Die entsprechende räumliche Betrachtung lautet: Wir vergleichen den räumlichen Abstand zwischen zwei Raumpunkten im System S' mit dem räumlichen Abstand zwischen zwei entsprechenden Raumpunkten im System S (und wieder umgekehrt). Die Ausführung ist fast noch einfacher als bei der Zeit.

Wir nehmen als zu vergleichenden Abstand den objektiv gleichen Abstand zweier Uhren, in jedem der beiden Systeme nach Voraussetzung 60 cm. Jedes der beiden Systeme legt sich also einen 60-cm-Maßstab bereit, er liege etwa bei der Mitteluhr beiderseits mit dem Punkt Null und bei der nächsten nach rechts mit dem Punkt 60. Man vergleiche für die folgende Überlegung Bild 18 a und 18 b.

Das System S' kann nicht zu dem Urteil gelangen, daß die Uhren in S wirklich 60 cm voneinander abständen. Das kommt wieder von dem, S' nicht bekannten, Nullpunktsunterschied der Uhren des Systems S' , es geht so zu: Wenn S' messen will, ob die Uhren in S wirklich auch 60 cm voneinander abstehen, wie er es bei seinen eigenen S' -Uhren jeden Augenblick nachmessen kann, dann muß er eben in irgendeinem Zeitpunkt — wann er nun gerade die Messung ausführen will — den Abstand zweier über ihm schwebenden Uhren des Systems S messen. Was heißt aber für S' „in einem Zeitpunkt“? Sagen wir, die Messung soll geschehen, „um voll“, und zwar sollen die Endpunkte des Maßstabes etwa die Uhren U'_3 und U'_4 sein. Es ist nun ganz einerlei, welche zwei benachbarten Uhren wir nehmen, immer ist der Zeitpunkt „voll“ bei den beiden Uhren überhaupt nicht derselbe, denn die rechte geht gegen die linke (bei dem immer vorausgesetzten Äthersturm von rechts) einige Minuten nach. Unserer neuerlichen Festsetzung zufolge sind es 4 Minuten, es könnten aber ruhig auch 3 oder 5 sein, darauf kommt es gar nicht an, das Wesentliche ist nur: die rechte Uhr geht gegen die linke, U'_4 gegen U'_3 , ein paar Minuten nach. Wenn es in U'_3 voll ist, also von U'_3 aus das linke Ende des 60-cm-Maßstabes hinübergehalten wird

(Bild 18 a), ist es in U_4 erst etwa 4 Minuten vor voll, erst 4 Minuten später wird das rechte Ende, bei U_4 , an das System S angelegt (Bild 18 b). Entsprechendes gilt dann natürlich für alle Zwischenpunkte des Maßstabes, der Maßstabspunkt 30 cm kommt nach 2 Minuten hinüber. Der ganze Maßstab wird also von selber, ohne daß man es weiß, mit einer leichten Drehung hinübergeführt, so daß von links nach rechts jeder Punkt später mißt; der letzte Punkt, ganz rechts, volle 4 Minuten zu spät.

Diese 4 Minuten reichen aber wieder hin, um die ganze Messung um einen Betrag zweiter Ordnung zu fälschen. Denn 4 Minuten später schwebt die obere Uhr U_4 nicht mehr über U_4 , das ganze System S bewegt sich ja gegen uns in einer Minute 1, also in 4 Minuten 4 cm nach links; infolgedessen treffen wir mit unserem Punkt 60' nicht den Punkt 60 von S , sondern den Punkt 64 (ebenso unser Punkt 30' den Punkt 32 usw.). So müssen wir urteilen: unseren 60' cm — die wir natürlich für „wirkliche 60 cm“ halten, genau wie unsere Uhrangaben für wirkliche Zeit — entsprechen im System S 64 cm, also — es bleibt kein anderes Urteil übrig — das System S hat eine Zusammendrückung erfahren, und zwar im Verhältnis 4 auf 64, das ist 1:16, also von der zweiten Größenordnung.

S kann wieder seinerseits zu einem solchen Urteil über S' nicht kommen, denn dies merkwürdige Zusammendrückungsurteil von uns, S' , über das Ätherruhsystem S kommt ja wieder nur davon, daß unsere Uhren falsch gehen. Die Uhren von S haben richtige Nullpunktstellung, deshalb ist von S aus ein solches Subjektivitäts-Urteil unmöglich; der Nachweis im einzelnen kann als selbstverständlich wohl unterbleiben.

§ 90.

Dagegen wollen wir eins hervorheben: es erscheint hier, bei den Gliedern zweiter Ordnung, eine Zusammendrückung; dem Zahlenwert nach genau solch eine Zusammendrückung, wie sie Lorentz und Fitzgerald angenommen hatten, um gegenüber dem verneinenden Michelson-Versuch den Äther zu retten. Hier tritt plötzlich eine ebensolche Kontraktion bei der Anti-Äthertheorie auf; freilich in ganz anderem Gewande, nämlich vorläufig als subjektives Fehlurteil infolge subjektiver Falschstellung der Uhren unseres Eigensystems S' . Nun ist es aber an der Zeit, uns

zu erinnern, daß wir über die Auffassung, unsere Uhren gingen „falsch“, im Grunde schon hinausgeschritten waren; gerade diese anfänglich anscheinende Falschmessung hatte ja die Pforte zu dem Höhenstandpunkt der Relativität aufgetan. Es eröffnet sich die Möglichkeit, daß auch die alte, bisher einzige, Erklärung des Michelson-Effektes in neuer, relativistisch geläuterter Form in die neue Theorie, sie stützend und vervollständigend, eingeht: Der Ring beginnt sich zu schließen.

§ 91. Die Relativierung der Zeiteigenschaft Z II.

Unser System S' fällt über die Uhrsgeschwindigkeit von S das Selbsttrug-Urteil: eure Uhren laufen um $\frac{1}{16}$ zu langsam; das „Ätherruhsystem“ S fällt dies Urteil über S' nicht.

Dadurch ist die Gleichberechtigung gestört. Das System S nimmt gegenüber diesem S' und gegenüber allen anderen Systemen wieder eine Sonderstellung ein: denn es ist das einzige System, von dem aus betrachtet alle anderen Systeme ebenso schnellen Uhrablauf haben, wie das Beobachtungssystem selber.

Die Bevorzugung verschwindet, sobald für jedes System S' die Zusatzannahme gemacht wird: Das System S' hat seinerseits wirklich einen um einen entsprechenden Betrag langsameren Uhrengang.

Denn dann fällt S' über S das Urteil: deine Uhren gehen zu langsam: auf Grund der im vorigen Paragraphen durchgeführten Fälschung des Eigenurteils durch die eigene Zeitnullpunktsdifferenz.

S über S' dasselbe Urteil: deine Uhren gehen zu langsam: weil sie „wirklich“ langsamer gehen.

(Der Betrag des wirklichen Langsamergehens muß natürlich die Hälfte von $\frac{1}{16}$ sein, also $\frac{1}{32}$; wäre es $\frac{1}{16}$, so würde das Falschurteil von S' über S , wie leicht einzusehen, aufgehoben. So wird das Falschurteil ebenfalls gerade auf $\frac{1}{32}$ herabgedrückt, in Zahlen je rund eine Minute auf eine halbe Stunde.)

Nun sofort wieder die Relativierung: Das Urteil selber ist von S' über S jetzt genau dasselbe wie von S über S' , nur der subjektive Rechtsgrund unterscheidet sich; in Anbetracht der vollen formellen Gleichwertigkeit haben wir aber objektiv kein Recht mehr, das eine System vor dem anderen zu bevorzugen — die Eigenschaft Z II, Geschwindigkeit des Zeitablaufes, ist relativiert.

§ 92. Die Relativierung der Raumeigenschaft R II.

Die Relativierung der Raumeigenschaft R II ergibt sich entsprechend: im Urteil von S' über S ist die Selbsttrug-Behauptung enthalten: Deine Längenausdehnung in der Bewegungsrichtung ist im Verhältnis 1 : 16 zusammengedrückt; es genügt, für S' eine wirkliche Zusammenziehung im Verhältnis 1 : 32 einzuführen, um, unter Herabdrücken jener vermeintlichen Zusammenziehung ebenfalls auf $\frac{1}{32}$, zwischen S und S' auch in dieser letzten Beziehung volle Gleichwertigkeit herzustellen.

Jeder mißt mit seinen Maßen, erklärt die des anderen für zu kurz, jeder hat recht.

Die Annahme der Lorentz-Kontraktion geht darin auf; die Lorentz-Zusammendrückung ist ein integrierender Bestandteil der Raum- und Zeitfestsetzungen des Relativitätsprinzips geworden.

D. Zusammenfassung.

§ 93.

Das ist, in seinen vier Bestandteilen, der gesamte formelle Inhalt unseres Relativitätsprinzips.

Fassen wir kurz zusammen:

Es gibt weder einen absoluten Raum noch eine absolute Zeit, sondern unendlich viele durchaus verschiedene, aber untereinander völlig gleichwertige Raumzeitsysteme.

Die Träger dieser Standpunkträume und -zeiten sind die Trägheitssysteme:

Jedes Trägheitssystem S kann seinen Raum und seine Zeit für den wahren Raum und die wahre Zeit halten, indem es erklärt:

R I ich ruhe (mein Raum bleibt gleichortig),

Z I meine Uhren gehen gleichzeitig,

R II ich habe allseitig die wahren Längenabmessungen,

Z II ich habe die richtige Zeitgeschwindigkeit,

es kann und es muß dann den Raum und die Zeit jedes anderen Systems S' für falsch halten, indem es erklärt,

R I du bewegst dich (hast keine Gleichortigkeit),

Z I du hast keine Gleichzeitigkeit,

R II du bist längs der Bewegungsrichtung verkürzt,

Z II deine Uhrgeschwindigkeit ist zu klein.

Aber das Urteil ist vollkommen umkehrbar; jedes der anderen Trägheitssysteme S' kann für sich geltend machen

$$\left. \begin{array}{l} R \ I \\ Z \ I \\ R \ II \\ Z \ II \end{array} \right\} \text{als bei ihm, } S', \text{ stimmend}$$

und kann und muß dann dem ersten, S , zuschreiben:

$$\left. \begin{array}{l} R \ I \\ Z \ I \\ R \ II \\ Z \ II \end{array} \right\} \text{als bei jenem, } S, \text{ falsch}$$

und zwar — das ist der Hauptpunkt — genau in demselben Betrage und Sinne falsch, in dem vorher S über S' das Urteil falsch gefällt hatte.

Es besteht allseitig volle zahlenmäßige und gedankliche Gleichwertigkeit. Jeder Trägheitsraumzeitbeobachter hat mit seiner raumzeitlichen Auffassung recht und kann und muß die aller anderen Trägheitsraumzeitsysteme für falsch halten.

§ 94.

Daß sich wirklich mit diesen vier Relativierungen $R \ I$, $Z \ I$, $R \ II$, $Z \ II$ der ganze formelle Gedanken- und Begriffsbereich lückenlos zu einem völlig einheitlichen Ganzen schließt, das zeigt dem Fachmann die mathematische Formulierung; wer das mechanische Modell selber vorgeführt sieht, ist in der Lage, das ebenfalls experimentell nachzuprüfen, nur entziehen sich diese Experimente allerdings der beschreibenden Wiedergabe.

Uns selber in unserer Darstellung war ein vortreffliches Anzeichen für den lückenlosen Zusammenschluß das Aufgehen der Lorentz-Kontraktion in der neuen Theorie.

§ 95.

Soweit die grundstürzende neue raumzeitliche Begriffsgesamtheit unseres Relativitätsprinzips in ihrem gedanklich-formellen Gefüge und Zusammenhang.

Ob dieses neue Relativitätsprinzip nun auch „materiell“ stimmt, ob es wirklich das gesuchte Universalprinzip ist, das die ganzen außerordentlichen Schwierigkeiten der theoretischen Physik hebt und die ganze Natur einheitlich umfaßt und durchdringt — ob dieser große Wurf gelungen ist, das wurde mit dem ersten Jahrzehnt des zwanzigsten Jahrhunderts die große Tagesfrage der Physik.

Neunter Abschnitt.

Folgerungen. Schluß.

§ 96.

Materiell stimmt das Prinzip, wie die Herleitung ergibt, mit denjenigen Grundtatsachen der Optik überein, auf die es aufgebaut ist (Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit nebst physikalischen Folgerungen); es stimmt außerdem in ganz außerordentlich vielen Teilgebieten besonders der elektrischen Hälfte der Natur schlechthin überraschend.

Aber was es im ganzen fordert und behauptet, das ist außerordentlich viel mehr. Es gibt keinen noch so entlegenen Winkel der Physik, in den es nicht hineinleuchtet; und namentlich in der mechanischen Naturhälfte zieht es überall die Forderung nach sich, daß bei Verfeinerung der Messungen die bisher für richtig gehaltenen Naturgesetze sich nur als Annäherungen herausstellen sollten und durch neue, eben die vom Relativitätsprinzip bedingten, ersetzt werden müssen.

Wir haben bereits angedeutet, wie diese weitergehenden Forderungen zustande kommen. Bisher genügten die mechanischen Naturgesetze dem alten Relativitätsprinzip. Das neue Relativitätsprinzip ist anders. Für die Erde, etwa im Verhältnis zur Sonne oder zum Fixsternhimmel, ist es nicht viel anders, denn die Änderungen in den subjektiven Raum- und Zeitmessungen der Erde sind wegen ihrer verhältnismäßig kleinen Geschwindigkeit, etwa 30 km pro Sekunde, nicht sehr groß. Aber es erhebt sich doch die Forderung, daß die Naturgesetze nun mit diesen neuen subjektiven Raum- und Zeitmessungen stimmen müssen, und deshalb müssen sie um Beträge von eben dieser Größenordnung anders sein.

Hierzu kommt, daß jeder auf der Erde wieder bewegte Körper wieder ein System ist und daher wieder entsprechenden Folgerungen unterliegt; das gleiche gilt für die Bewegungen der Himmelskörper.

§ 97. Einzelheiten.

Einigermaßen vollständig die Fülle der höchst überraschenden neuen Folgerungen und Forderungen ausmalen zu wollen, wäre schon im Hinblick auf die hervorgehobene Unabgeschlossen-

heit des theoretischen und experimentellen Materials unmöglich; einem tieferen Eindringen selbst in die verhältnismäßig einfachen Probleme steht überdies unser Vorhaben, mathematikfrei bleiben zu wollen, als unüberwindliches Hindernis im Wege.

Es muß daher genügen, einige wenige besonders kennzeichnende, grundlegende Einzelheiten anzudeuten.

Schon das Trägheitsgesetz erfährt Änderungen. Allerdings bleibt erhalten, daß der kräftefreie Körper sich geradlinig-gleichförmig bewegt; das ist ja auch die Grundlage der ganzen Inertialsystemtheorie. Aber die alte Mechanik machte außerdem noch stillschweigend eine uns allen von jeher in Fleisch und Blut übergegangene Grundvoraussetzung über den Zahlenwert der Trägheit: der Zahlenwert der Trägheit, die sogenannte „träge Masse“, sollte durchaus unveränderlich sein, eine vollkommen feste innere Grundeigenschaft der Materie. Diese anscheinend so völlig gesicherte, im innersten Wesen des Stoffes liegende Grundvoraussetzung gilt nach unserem Relativitätsprinzip nur angenähert: bewegt sich ein Körper, etwa auf der Erde, so nimmt seine Trägheit, von der Erde aus gemessen, nach Maßgabe seiner Geschwindigkeit um einen geringeren oder größeren Bruchteil zu; ja noch mehr, die Trägheit des bewegten Körpers wächst nach verschiedenen Richtungen verschieden, weniger stark senkrecht zur Bewegungsrichtung, am stärksten in der Bewegungsrichtung selber.

Eine weitere bekannte Grundannahme der bisherigen Mechanik war der Satz vom Geschwindigkeitsparallelogramm; im einfachsten Falle: Angenommen, man habe z. B. ein Gewehr, dessen Geschoß in der ersten Sekunde genau 400 m weit fliegt. Nun werde das Gewehr nicht vom festen Erdboden, sondern aus einem fahrenden Eisenbahnzuge (etwa von der Lokomotive aus) in der Fahrtrichtung, genau nach vorn hin, abgefeuert. Die Fahrtgeschwindigkeit betrage genau 25 m in der Sekunde. Dann erhält nach der alten Mechanik (vom Luftwiderstand hier und im folgenden wieder abgesehen) das Geschoß zu seinen 400 m die 25 m unvermindert hinzu; es überstreicht also auf der Erde genau einen Raum von 425 m in der Sekunde. Nach unserem Relativitätsprinzip ist das nicht genau richtig; die „resultierende“ Geschwindigkeit ist um einen ganz bestimmten Betrag kleiner. Bei der geringen Geschwindigkeit solcher irdischen Massenbewegungen ist der Betrag

der Änderung natürlich wieder so klein, daß er sich den bisherigen Meßmöglichkeiten entzieht; handelt es sich aber um schnellere Bewegungen, so wächst er wieder nach Maßgabe der Geschwindigkeit.

In engem Zusammenhang mit beiden Neuforderungen steht die folgende dritte: nach unserem neuen Relativitätsprinzip ist es durchaus unmöglich, die Geschwindigkeit irgendwelcher Bewegungen von Körpern und Ausbreitungen von Kräften ohne Ende immer mehr zu steigern; es gibt eine Grenze, über die hinaus keine körperliche und ebenso keine Energiegeschwindigkeit wachsen kann, mag man noch so viele und noch so starke Mittel anwenden, so viel und so lange man will. Und zwar ist diese Grenzgeschwindigkeit merkwürdigerweise dem Zahlenwerte nach dieselbe Geschwindigkeitsgröße, die überhaupt die eigentliche Grund- und Ausgangszahl des Relativitätsprinzips ist: nämlich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes, 300 000 km in der Sekunde.

Diese letzte Neuforderung ist zugleich der schlagendste äußere Beleg für den wirklich allumfassenden Charakter des neuen Relativitätsprinzips als Grundgesetzes der gesamten Natur: gerade diejenige Zahl, die man bisher lediglich als elektrisch-optische Grundziffer kannte, taucht jetzt plötzlich ebenfalls in der mechanischen Naturhälfte auf als mechanische Naturkonstante von gleicher grundlegender Bedeutung.

In der Tat fällt, zugleich mit dem „Weltäther“, die Scheidewand zwischen mechanischer und elektrischer Naturhälfte vollkommen.

Auf der elektrischen Seite selber nur ein einziger Beleg dafür, wie auch hier das Relativitätsprinzip eine Umwertung aller Werte bewirkt: Ein und derselbe elektrisch geladene Körper ist, wenn ihn das eine System S' messend verfolgt, von einem magnetischen Felde umgeben; für ein zweites, ihn gleichzeitig messend beobachtendes System S existiert das magnetische Feld nicht; auch der Begriff des magnetischen Feldes wird in einer ganz bestimmten Weise relativiert. — — —

§ 98.

Eine kleine Gruppe von Folgerungen verdient übrigens noch besondere Erwähnung.

Es gibt einige Neuforderungen, die man unmittelbar aus den neuen Aufstellungen für Raum und Zeit ablesen kann. Das muß

so sein. Raum und Zeit sollen sich ändern: Wir nehmen Raum und Zeit nur wahr durch körperliche, stoffliche Erscheinungen und Vorgänge, im besonderen durch die eigentlichen „Meßinstrumente“; folglich müssen sich alle Meßinstrumente und zugleich alles, was solchen gleichwertig ist, allesamt in entsprechender Weise bei Bewegung „ändern“. Das heißt, von einem System betrachtet, müssen diese Änderungen des anderen zum Vorschein kommen.

Für den Laien sind solche unmittelbare Materialisierungen der neuen Raum- und Zeitzusammenhänge vielleicht die erstaunlichsten der Neuforderungen. Die behaupteten gegenseitigen Änderungen der Meßinstrumente (Maßstäbe, Uhren) sind in der Darstellung selber schon überall benutzt worden; alle diese Änderungen, die von selber, als reine Folge der gegenseitigen Bewegung, zustande kommen, zeigen sich an den rechten, eigentlichen, allgemein gebräuchlichen Maßstäben und den rechten, eigentlichen, allgemein gebräuchlichen Uhren. Aber es tritt nun dazu ein Heer von gleichwertigen Vorgängen. Jede regelmäßige Bewegung irgendeines großen oder kleinen Teiles, von den Bewegungen der Gestirne bis hinunter zu den Drehungen und Schwingungen der Elektronen im Atom, ist eine Uhr; jeder Körper ersetzt einen Maßstab. Daraus drei Hauptfolgerungen:

Alle regelmäßigen Vorgänge ändern, wenn man die ganze Welt von irgendeinem beliebigen System aus betrachtet, ihre Ablaufgeschwindigkeit je nach dem System, dem sie angehören (Z II): — die physikalische Unterlage der ursprünglichsten Sinneswirklichkeiten Farbe, Tonhöhe usw. usw. wird relativiert.

Alle Körper ändern ihre Größe, je nach dem System, in dem sie sich bewegen (R II): — — der Begriff der körperlichen Größe wird relativiert.

Schließlich stellt sich die Zusammendrückung in verschiedenen Richtungen ungleich dar (Bewegungsrichtung, R II); drehen sich Körper (z. B. die Erde), so ist jeder Drehring (Gürtel, Zone) für sich eine Uhr, bei Bewegung des Ganzen bleibt, was „vorn“ ist (etwa Nordpol usw.), gegen die hinteren Teile in der Drehung zurück (Z I); und genau dem entsprechend (nochmals Z I) zeigen sich bei jeder Unterbewegung in einem bewegten Ganzen überhaupt alle für sich bewegten Einzelkörper, Einzelglieder, Einzelstücke von vorn nach hinten verzerrt (man verfolge aufmerksam den bewegten Maßstab des Bildes 18, § 89!) — — auch der Begriff der körperlichen Form wird relativiert.

§ 99. „Die Welt“.

Was die formelle Gleichwertigkeit der Trägheitsraumzeit-systeme für Raum und Zeit selber, die untersten Grundbestandteile unserer Wirklichkeit, rein formell fordert, ergänzt so die inhaltliche Prüfung für die ganze gegenständliche Wirklichkeit selber: Mit dem Raume und der Zeit wird das ganze Weltbild relativiert. „Die Welt“ hört auf zu existieren, es gibt nur mehr unendlich viele verschiedene, gleichberechtigte „Standpunkts-welten“ oder „-weltbilder“.

Selbstverständlich ist dieses Relativieren der Welt himmelweit entfernt von Auflösen in völlige Willkür. Denn alle die unendlich vielen gleichberechtigten Standpunkträume, -zeiten und -welten sind verbunden, wie jede einzelne der obigen Relativitätsbetrachtungen unverkennbar gezeigt hat, durch gemeinsames Gesetz.

Der Mathematiker kann, in der abstrakten Sprache seiner Begriffe, auch das noch zu einem unmittelbaren Ausdruck bringen; er faßt die Zeit, in einer eigentümlichen rechnerischen Verbindung, als „vierte Dimension“ auf und schließt dadurch die unendlich vielen gleichberechtigten Standpunktswelten zu einer abstrakt-begrifflichen vierdimensionalen Einheit zusammen.

Diese mathematisch hochbedeutsame Entdeckung ist das Vermächtnis von Minkowski¹⁾. Die heutige relativitätstheoretische Literatur, so z. B. das grundlegende Lehrbuch von Laue²⁾, arbeitet nur noch mit vierdimensionalen Begriffen. Unsere Darstellung muß wegen des rein mathematischen Charakters dieser Begriffsbildungen auf eine Wiedergabe derselben verzichten.

§ 100.

Noch einmal kehren wir danach zu unseren unmittelbaren raumzeitlichen Forderungen zurück und stellen noch einmal zusammen. Es ist nicht unangebracht, daß wir den Inhalt des Relativitätsprinzips zum Schluß einmal nach der Neuheit der Forderungen und dem

¹⁾ H. Minkowski, Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. Gött. Nachr. 1907, S. 1. Math. Annalen **68**, 472 (1910).

²⁾ Das Relativitätsprinzip. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1913, 2. Auflage. Vgl. ferner die betreffenden Abschnitte in den Lehrbüchern von Chwolson (Lehrbuch der Physik, 4. Bd. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1913) und G. Mie (Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Stuttgart, Enke, 1910).

Schwierigkeitsgrad für unser, mit den alten Vorstellungen mehr oder weniger fest verwachsenes, Vorstellungsvermögen anordnen.

Daß die Relativierung von R I besteht: Ruhe und Bewegung in den Trägheitssystemen gleichwertig, ist und bleibt der Punkt, der dem verhältnismäßig geringsten Widerstande begegnet. Denn die übereilte, „metaphysische“ Lehre: alle Bewegungen seien gleichwertig, hat hier den Boden vorbereitet.

Alles andere ist ganz neu.

Schon die zweite räumliche Relativierung, R II, die Relativierung der Größe, ist außerordentlich. Daß die räumliche Abmessung in diesem Sinne ein relativer Begriff sein soll: je nach dem Bezugssystem ist der Raum selber (einseitig!) größer oder kleiner: damit wird unsere bisherige Vorstellung vom Raume als dem festen „Behälter“ der Welt vollständig und endgültig aufgehoben.

Ganz ungeheuerlich aber sind uns Menschen aus dem neunzehnten und dem Anfange des zwanzigsten Jahrhunderts die Forderungen für die Zeit.

Die Zeitmaßstabsrelativierung Z II widerstrebt unserem heutigen Verständnis von vornherein und offenbar; noch weit offener als die entsprechende Forderung R II beim Raume. Denn beim Raume hat man immerhin das (allerdings trügerische) Empfinden, als würde mit dem Heranziehen des Stoffes, als des Trägers der Veränderungen, die abstrakte Neuforderung tatsächlich ins Greifbar-Stoffliche übersetzt. Bei der Zeit liegt das Irrige einer solchen Unterschiebung von vornherein auf der Hand: es gibt nur ein entweder — oder, und die unentrinnbare Behauptung ist, daß die Zeit selber je nach dem Bezugssystem schneller läuft oder langsamer; jedes System hat mit seiner Zeitgeschwindigkeit recht.

Alle Grenzen des uns Vorstellbaren überschreitet schließlich die Forderung Z I: Der Begriff der Gleichzeitigkeit wird relativiert. Er behält nur Geltung immer für ein bestimmtes System. Was in einem System gleichzeitig ist, findet in allen anderen zu verschiedenen Zeiten statt, je nach der räumlichen Lage früher oder später. Infolgedessen werden schließlich auch die Begriffe früher und später selber relativiert. Sie gelten nur jeweilig für ein System. Zieht man die Gesamtheit aller gleichberechtigten Systemanschauungen mit in Betracht, so werden, in gewissen geregelten

Zusammenhängen, aber doch unter voller Aufhebung ihres absoluten Charakters, früher, jetzt und später, **Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft relative Begriffe.**

§ 101. **Schluß (1914).**

Das ist das Relativitätsprinzip mit seinen grundstürzenden Behauptungen über das Wesen des Raumes und der Zeit.

Ob es schon als völlig unbezweifelbares, endgültiges Besitztum der Wissenschaft angesehen werden darf — mit abschließender Sicherheit wissen wir das, wie gesagt, heute noch nicht. Das wissen wir bei keiner Theorie. Daß bei solchen außerordentlichen Neuforderungen besondere Vorsicht obwalten muß, versteht sich von selber, und die Wissenschaft ist in der Tat gerade hier auch auf ein Fehlschlagen gefaßt.

Das Relativitätsprinzip kennen gelernt zu haben, ist auch im ungünstigen Falle ein unverlierbarer Gewinn. Selbst wenn Raum und Zeit im nächsten Stadium der Wissenschaft wieder ein anderes Kleid angezogen bekommen sollten: dem Denker ist, für die Erweiterung seines Gesichtskreises, fast ebenso wichtig, Möglichkeiten kennen zu lernen wie Wirklichkeiten; dem Forscher bleibt und wächst die Gewißheit, daß auch der Irrtum der Wahrheit näher führt.

So ist die geschichtliche Entwicklung des raumzeitlichen Relativitätsgedankens unter allen Umständen ein wahrhaft glänzendes Beispiel für das sieghafte Aufsteigen der Wissenschaft aus den dumpfen Niederungen menschlicher Voreingenommenheit zu den lichten Höhen freier Erkenntnis; das Relativitätsprinzip selber einer der geistesgeschichtlichen Gipfelpunkte, auf denen die Naturwissenschaft gern und stolz dessen inne wird, daß es für sie doch nicht bloß heißt:

„Wir können nur raten und meinen“,
sondern daß ihr jenes andere, äußerlich so ganz einfach-schlicht-werktägliche, im letzten Grunde den höchsten Preis menschlicher Arbeit und geistigen Strebens in sich schließende Wort verheißen ist:

Stets geforscht und stets gegründet,
Nie geschlossen, oft geründet,
Ältestes bewahrt mit Treue,
Freundlich aufgefaßtes Neue,
Heitern Sinn und reine Zwecke:
Nun, man kommt wohl eine Strecke!

Nachwort zur zweiten Auflage.

Nun, man kommt wohl eine Strecke!

Theorien sind Gedichte. Immer fragt sich, ob die Wirklichkeit ihnen gleicht. Die Theorie, welche in den letzten Jahren vor dem Kriege unter dem Namen „Das Relativitätsprinzip“ so außerordentliches Aufsehen erregte, konnte unmöglich die Wirklichkeit restlos genau abbilden.

Die Theorie setzte eine idealisierte Welt voraus. Eine Welt, in der die Träger der Beobachtungsräume — Erde, Sonne, Mond und Sterne und alle Bezugskörper überhaupt — sich geradlinig und gleichförmig bewegen: die Welt der Trägheitsräume. Nur da konnte die Theorie eine mögliche Geltung beanspruchen.

In Wirklichkeit aber halten mächtige Bande himmlische wie irdische Körper in krummlinigen und wechselnd schnellen Bahnen gefangen, die geradlinig-gleichförmige Bewegung ist ein genau schier unerreichbarer Ausnahmefall.

So hieß es erst weiter dichten, ehe der Anspruch überhaupt erhoben werden durfte: Das Gedicht enträttele die Wirklichkeit.

Gab es aber überhaupt einen Weg, der hinüberführte aus jener Idealwelt in die wirkliche Welt?

Wohin der Schritt sich wandte, verschlossene Tore, pfadlose Wirrnisse, dunkle Abgründe!

Ein Beispiel statt vieler. Die erste neue Relativierung, die Relativierung der Zeiteigenschaft ZI mit dem örtlichen Vor- und Nachgehen der Uhren. Wem müßte es nicht erste und einfachste Aufgabe scheinen, sie zu übertragen aus der idealen Geradlinigkeit der Theorie etwa auf diejenige allereinfachste krumme Bewegung, an der wir alle täglich teilnehmen, die Achsendrehung der Erde? Also etwa längs des Erdäquators von Grad zu Grad Uhren aufgestellt und einen Lichtstrahl herumgespiegelt um die

ganze Erde. Was folgt? Jede Vorderuhr geht hinter ihrer Hinteruhr ihren festen Betrag nach, nicht wahr? Also die Ausgangsuhr den 360fachen Gradbetrag hinter sich selber???

Eine Schwierigkeit, und nur eine erste, oberflächliche! Noch sehr viel mehr und sehr viel größere offenbaren sich dem geschärften Blick. Die größten außerhalb des eigentlichen Raum- und Zeitbereichs, in allgemeinen Fragen über Zusammenhang und Wesen der Naturkräfte. Das kann ja auch kaum anders sein. Es gilt die wechselnd bewegte Welt der Wirklichkeit zu gewinnen, so heißt es diejenigen Wirklichkeitskräfte mit einrechnen, die das Idealbild nicht aufweist. Voran diejenige allverbreitete Naturkraft, die recht eigentlich das Abkrümmen der großen Weltbewegungen von der geradlinig-gleichförmigen Trägheitsbewegung bewirkt: Die uralte Rätselkraft der Physik, der Trägheit zahlenmäßig verwandt und zugleich augenscheinlich entgegengesetzt, die allgemeine Anziehung aller Massen, die Gravitation.

Es ist kein Wunder, wenn sehr viele Fachgelehrte hier ein „unmöglich“ aussprachen. Die erste Auflage dieses Heftes, die den damaligen Stand (1914) wiedergeben sollte, durfte den zweifelnden Unterton zum wenigsten nicht ganz verschweigen.

Und nun der Krieg!

Wird irgendwo und -wie die Menschheit Zeit und Kraft finden, sich hinaufzuschwingen zu den Höhen der reinen Forschung?

Wird insbesondere Deutschland, die weltbelagerte Festung, Raum gewähren und Muße geistigster Arbeit?

Aber im stillen Gemach entwirft bedeutende Zirkel
Sinnend der Weise, beschleicht forschend den schaffenden Geist,
Prüft der Stoffe Gewalt, der Magnete Hassen und Lieben,
Folgt durch die Lüfte dem Klang, folgt durch den Äther dem Strahl,
Sucht das vertraute Gesetz in des Zufalls grausenden Wundern,
Sucht den ruhenden Pol in der Erscheinungen Flucht.

Einstein selber hat sein Weltgedicht vollendet. Die „allgemeine“ Relativitätstheorie, die stolz beansprucht, nicht nur eine gedachte Welt, sondern die Wirklichkeit selber nachzuzeichnen. Wer in die neueste wissenschaftliche Weltanschauungsarbeit eindringen will, muß auch diese allgemeine Relativitätstheorie kennen lernen.

Für die vorliegende Schrift erwuchs daraus die Aufgabe, sich zu dehnen bis über diese neue allgemeine Relativitätstheorie hin.

Sie als Abschluß darzustellen mit derselben, nicht mühelos zu erreichenden, breitesten mathematikfreien Allgemeinverständlichkeit, die sie bis dahin angestrebt hatte. Ich würde mich gern dieser Arbeit unterzogen haben, bin aber zu meinem Bedauern durch Verwundung daran gehindert.

Ich muß daher den Leser bitten, nach anderen Bearbeitungen Umschau zu halten. Er braucht nicht weit zu schweifen. Der Meister hat sein Werk in einem Bändchen der Sammlung Vieweg (38) selber dargestellt. Zwar nicht ohne Mathematik, aber mit einem außerordentlichen Mindestmaß mathematischer Mittel. Wer meine geebneten Wege aufwärts geschritten ist, wird für die seinen gerüstet sein. Genußreich wird ihm der Aufstieg werden durch die lichtvolle Klarheit und diejenige höchste Art der Formvollendung, wie sie da entsteht, wo der Kündler großer Gedanken selber ihr Wachsen und Werden enthüllt.

Als im Jahre 1914 die Fachgenossen sich sammelten, um Julius Elster und Hans Geitel zu ihren 60. Geburtstagen eine Festschrift darzubringen, hoffte ich unter den ersten zu sein, die einen Beitrag schrieben. Auch das war mir unmöglich. Den allverehrten Forschern, meinen Lehrern dies bescheidene Büchlein zueignen zu dürfen, ist mir ein kleiner Ersatz für das schmerzliche Gefühl, in jenem Kreise gefehlt zu haben.

Wolfenbüttel, im Dezember 1917.

H. W.