

Edith Gutsche, Peter C. Hägele
und Hermann Hafner (Hrsg.)

**Im Vorfeld
wissenschaftlicher
Theorien**

Am Beispiel Albert
Einsteins

Herausgeber der Reihe PORTA-STUDIEN:
SMD – Netzwerk von Christen in Schule, Hochschule und Beruf

Unveränderte Ausgabe zum Download
unter Creative Commons CC BY-NC-ND 3.0 DE, 2019

3. Auflage 1991 – Nachdruck

© Studentenmission in Deutschland (SMD) 1986.
Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der SMD,
Postfach 20 05 54, 35017 Marburg

Inhalt

	Seite
• Vorwort	1
• HERMANN HAFNER	
Zur Bedeutung vorwissenschaftlicher Motivationen für die Wissenschaft. Eine Einführung in die Thematik	2
• PETER C. HÄGELE / EDITH GUTSCHE	
Zur speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins	13
• EDITH GUTSCHE	
Zur Theorienbildung bei Einstein	41
• REINHARD SCHINZER	
Über den Beitrag des Glaubens zur Naturwissenschaft. Predigt	65
• HERMANN HAFNER	
Christ sein im Gang der Wissenschaftsentwicklung. Einige Gesichtspunkte	69
• Literaturhinweise	76

Zu den Autoren:

Edith Gutsche, Dipl.-Phys., ist Studienrätin für Mathematik und Physik in Kassel.

Dr. rer. nat. Peter C. Hägele ist Professor der Physik an der Universität Ulm.

Pfr. Hermann Hafner, Marburg, arbeitet an den Fragen der Beziehung zwischen christlichem Glauben und wissenschaftlichem Denken.

Dr. theol. Reinhard Schinzer ist Gemeindepfarrer in Kassel.

Vorwort

Die FACHGRUPPE NATURWISSENSCHAFTEN der Akademiker-SMD veranstaltete vom 1. - 3. März 1985 im Schloß Höhnscheid bei Arolsen eine Tagung unter dem Thema:

Vorwissenschaftliche Motivation der Naturwissenschaftler –
Wie fördern, hemmen und verändern Leitlinien oder Paradigmen
die wissenschaftliche Arbeit und ihre Ergebnisse?
- Am Beispiel Albert Einsteins -

Die Vorträge dieser Tagung legen wir hier in überarbeiteter Fassung vor.

Die Thematik erwuchs aus dem Nachdenken über erkenntnistheoretische Grundfragen wissenschaftlichen Arbeitens. Wer sich mit den Grundlagen und Konsequenzen wissenschaftlichen Denkens auseinandersetzt, wird sich immer wieder zu einer objektiven erkenntnistheoretischen Rechenschaft über seine Überzeugungen genötigt sehen; das entspricht dem Anspruch der Wissenschaft, wohlbegründete, d.h. objektiv gesicherte und nicht von der Subjektivität des menschlichen Gedankenflusses abhängige Erkenntnis darzubieten. Was aber geschieht hinter dieser Kulisse der Objektivität? Wissenschaft wird von Menschen gemacht, deren Denken mit den Strömungen ihrer Zeit und mit persönlichen Erfahrungen und Neigungen verflochten ist. Woher nehmen die Wissenschaftler die Gedanken, aus denen sie ihre wissenschaftlichen Theorien formen? Steht die wissenschaftliche Erkenntnis bei allem Streben nach objektiver Sicherung nicht doch unter der Wirkung vor- und außerwissenschaftlicher Einflüsse, die zwar durch die Disziplin des wissenschaftlichen Vorgehens gezügelt werden, aber dennoch uneinholbar steuernde, prägende und gestaltende Kraft auf das wissenschaftliche Denken ausüben?

Im Einzelnen ergeben sich u. a. folgende Fragen:

- Wie entsteht eigentlich eine wissenschaftliche Theorie?
- Wie sind Entstehungsgeschichte einer Theorie und wissenschaftliche Bemühung um objektiv gesicherte Erkenntnis einander zugeordnet?
- Was ergibt sich daraus für das Verständnis von Wissenschaft und für die Beziehungen zwischen Wissenschaft, Glaube und Erfahrungswelt?

Solchen Fragen suchten wir am Beispiel Albert Einsteins nachzugehen. Dabei konnten wir nur einzelne Aspekte anreißen und erste Schneisen schlagen. Wir legen diese Materialien in der Hoffnung vor, dass unsere Beobachtungen und Überlegungen andere zur Mit- und Weiterarbeit anregen und auch darüber hinaus Anstöße zur Weiterführung eigener Gedanken bieten.

Edith Gutsche, Hermann Hafner

Zur Bedeutung vorwissenschaftlicher Motivation für die Wissenschaft

Eine Einführung in die Thematik

„Vorwissenschaftliche Motivation der Naturwissenschaftler“ haben wir als Thema auf die Einladung geschrieben. Der Untertitel präzisiert: „Wie fördern, hemmen und verändern Leitlinien oder Paradigmen die wissenschaftliche Arbeit und ihre Ergebnisse?“

Es soll also nicht darum gehen, aus welchen emotionalen Gründen Naturwissenschaftler sich ihrer Wissenschaft zugewendet haben und ob der eine durch einen eindrucksvollen Lehrer zur Chemie und der andere durch ein zündendes Sachbuch zur Physik oder zur Astronomie hingezogen wurde. Vielmehr richtet sich unsere Frage nach der Motivation darauf, ob es angebbare inhaltliche Gestimmtheiten gibt, die als Vorgaben das Bewusstsein des Wissenschaftlers formen und ihn bei der Erstellung und Gestaltung seiner Theorien bewusst oder unbewusst leiten und bestimmen. Es ist also die Frage, wieweit vorwissenschaftliche Bewusstseinsinhalte bei der Bildung oder Bewertung wissenschaftlicher Theorien bestimmend mitwirken und so auch Einfluss auf den Gang der Entwicklung einer Wissenschaft nehmen; und zwar nicht nur auf das Tempo des Fortschritts („fördern oder hemmen“), sondern auch auf die Fragerichtung, die Gestalt und vielleicht gar den Inhalt der wissenschaftlichen Erkenntnis („verändern“).

Wie soll man sich das vorstellen? Schiebt dem nicht die Objektivität naturwissenschaftlicher Erkenntnis und ihrer Verfahren einen wirksamen Riegel vor, so dass die wissenschaftlichen Sätze entweder richtig oder falsch sind, aber doch jedenfalls kein Wachs, das den unkontrollierten Launen vorwissenschaftlicher Gestaltungskräfte ausgesetzt wäre?!

Beginnen wir unsere Überlegungen bei der geläufigsten Weise, die Grundstruktur wissenschaftlicher Arbeit und Erkenntnis zu betrachten (das populäre Bild von der rein empirischen und streng induktiv vorgehenden Wissenschaft übergehe ich hier,

weil es offenkundig falsch bzw. mit der Forderung streng rational kontrollierter Vorgehensweise unverträglich ist): bei der Betrachtungsweise, die der logische Empirismus ausgearbeitet (jedoch nicht selbst erfunden) hat. Danach enthält die wissenschaftliche Erkenntnis im Wesentlichen zweierlei Bestandteile: 1) eine Reihe empirischer Elemente, die Beobachtungsdaten, und 2) eine rationale Verknüpfungsstruktur, durch die diese Daten systematisch miteinander verknüpft werden. So betrachtet, scheint in der Wissenschaft zunächst wenig Raum zu sein für substantiell verändernde Einflüsse von außen. Die rationalen bzw. mathematischen Verknüpfungsstrukturen müssen ja so gewählt werden, dass aus ihnen die unter den jeweils gewählten Bedingungen tatsächlich eintretenden Daten eindeutig abgeleitet werden können. Das mag durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Formeln und Theorien erreichbar sein – jede Theorie aber, die dieses Postulat wirklich erfüllt, sagt unter diesem Blickwinkel nichts anderes aus als alle anderen Theorien, die dieses Postulat ebenfalls erfüllen. Die internen theoretischen Strukturen einer Theorie sagen nach dieser Betrachtungsweise nichts über die Natur aus, sondern sie stellen lediglich einen Rechenweg dar, der von einigen vorgegebenen Daten mit einer dem Bestätigungsgrad der Theorie entsprechenden Sicherheit zur Voraussage einiger zu erwartender Daten führt. Und insoweit (1) ist eine wissenschaftliche Theorie objektiv, sicher und frei von allen subjektiven Einflüssen.

Der Naturwissenschaftler aber will mit seinen Theorien in der Regel doch etwas über die Natur sagen; mit seinen Messgrößen verbindet er normalerweise nicht nur mathematische Gedanken, die ihm sagen, an welcher Stelle er ihre Werte in welche Formeln einsetzen darf, und messtechnische Gedanken, die ihm sagen, durch welche Verfahren er zu den ihr zuzuordnenden Werten kommt, sondern auch z.B. physikalische Gedanken, die ihm irgendeine, wenn auch noch so abstrakte Vorstellung vermitteln, worum es sich der Sache nach handelt. Und entsprechend steht ihm normalerweise die Theorie und ihre mathematische Formel nicht nur für einen Rechenweg, sondern für einen „Naturzusammenhang“ zwischen den Messgrößen; denn die funktionalen Abhängigkeiten in der mathematischen Formel beziehen sich ja auf vorhersagbare und experimentell reproduzierbare, „reale“ Abhängigkeiten einer realen Größe von einer anderen. Insofern verbindet der Naturwissenschaftler mit seiner Theorie sehr wohl den Gedanken an reale Naturzusammenhänge und nicht nur den Gedanken an isolierte Daten in einem nichtssagenden mathematischen Zusammenhang. Am notwendigsten werden solche Vorstellungen und Gedanken über reale Zusammenhänge gerade da, wo eine neue Theorie formuliert werden soll – schon allein durch die Frage, welcherlei Daten und Messgrößen für das betreffende Problem relevant sein könnten. Die

Notwendigkeit, mit den mathematischen Formeln Gedanken über die wirklichen Zusammenhänge zu verknüpfen, betrifft also gerade nicht nur den wissenschaftlichen Tross, der zu dumm wäre, sich ohne solche Vorstellungskrücken zu behelfen, sondern sie betrifft am grundlegendsten die führenden Geister an der Spitze der Forschung.

Solche Gedanken, die der Naturwissenschaftler „sich dabei macht“, scheinen also nicht bloß eine private Träumerei zu sein, durch die er sein Vorgehen und seine Ergebnisse für sich persönlich deutet, sondern sie scheinen auch gute Chancen zu haben, Einfluss auf die Gestalt und den Inhalt der werdenden Theorien zu nehmen. So ergeben sich einige Fragen:

- Zunächst die Frage, ob, wie und inwieweit ein solcher Einfluss tatsächlich nachgewiesen werden kann. Die Frage soll hier offen bleiben.
- Weiter die Frage, ob der Einfluss solcher Vorstellungen nur den mehr oder weniger zufälligen Entstehungszusammenhang einer Theorie betrifft (wie z.B. Kekulé's Tagtraum zur Strukturformel des Benzols führte) und dann durch die wissenschaftlichen Begründungsforderungen nachträglich restlos neutralisiert wird, oder ob dieser Einfluss sachlich konstitutiv für die entstehenden Theorien ist und somit unüberholbar den Entwicklungsgang einer Wissenschaft bestimmt. Auch diese Frage soll hier nur mit auf den Weg gegeben, aber nicht beantwortet werden.
- Schließlich die Frage, die der Sache nach eigentlich die erste ist: Wodurch werden die grundlegenden Vorstellungen der Naturwissenschaftler von ihrem Fachgebiet geprägt und bestimmt? Und wodurch die steuernden Vorstellungen und Gedanken der Erfinder neuer Theorien? Machen sich hier etwa auch vorwissenschaftliche Prägungen, Inhalte und Ideale bemerkbar? Wenn ja: wie verhält sich dieser Tatbestand zu der Frage nach der Richtigkeit oder Falschheit einer von diesen Faktoren in ihrer Entstehung mitbestimmten Theorie? Und gibt es Kriterien für die Unterscheidung „erlaubter“ und „unerlaubter“ Einflussfaktoren?

Zu fragen wäre hier nach dem Einfluss geistiger Zeitströmungen und seinem Stellenwert (wie etwa nach der Bedeutung des Neuplatonismus und Pythagoreismus für die wissenschaftlichen Bemühungen Keplers und von da aus vielleicht für die Gestaltung der neuzeitlichen Wissenschaft überhaupt; oder die Frage danach, was dahintersteckt, wenn Kunst, Physik, Philosophie und Theologie in zeitlichem Zusammenhang zu so hoher Abstraktion gedeihen wie in unserem Jahrhundert –

siehe H.-R. Müller-Schwefe: Der Standort der Theologie in unserer Zeit. 1958, S. 30 f.).

Oder es wäre zu fragen, welcherlei Voraussetzungen sich in den jeweils gewählten Grundbegriffen und in grundlegenden methodologischen Entscheidungen niederschlagen, z.B. in der Entscheidung, nach „Naturgesetzen“ zu forschen. Welche Rolle spielen dabei ästhetische oder pragmatische Wünsche oder Vorurteile wie etwa der Wunsch nach Einfachheit, nach Symmetrie, nach einer Ökonomie des Denkens?

Oder wie weit spiegeln sich hier weltanschauliche Vorgaben und Vorurteile, etwa der Glaube an die Einheit der Natur, an ihre Berechenbarkeit und rationale bzw. mathematische Struktur (z.B. Galilei!), an die Beständigkeit ihrer Gesetze, an das Funktionieren der Welt ohne göttliche Eingriffe („methodischer Atheismus“)?

Welche Bedeutung haben (für den Christen, aber nicht nur für ihn!) in diesem Zusammenhang etwa christliche oder biblische Vorgaben? Inwieweit ist es angemessen, wenn wir die Wissenschaft „unbehelligt von religiösen Vorentscheidungen“ ihren Weg gehen lassen – und diesen Weg dann mitgehen? Wodurch würde sich umgekehrt ein angemessenes Zur-Geltung-Kommen der Glaubenswahrheit von einer klerikalen Bevormundung der Wissenschaft unterscheiden?

Einige Beispiele

Mit den bisherigen Ausführungen habe ich versucht, Sie anhand von Fragen ein wenig in die Grundlagen unserer Thematik einzuführen und einige der wesentlichen Fragen anzureißen.

Im Folgenden will ich dem Ganzen anhand von einigen Beispielen noch etwas mehr Anschaulichkeit und Vorstellbarkeit geben und zugleich die Vielfalt der Aspekte andeuten, die hier ins Spiel kommen.

1. Begonnen sei – unserem „Tagungspatron“ zu Ehren – mit einem Einstein-Zitat: „Wissenschaft als ein existierender, abgeschlossener (Wissensschatz) ist das objektivste, unpersönlichste (Ding), das die Menschen kennen; (aber) Wissenschaft in der Phase des Entstehens, als Ziel, ist genauso subjektiv und psychologisch bedingt wie alle anderen menschlichen Bestrebungen“ (zit. nach Gerald Holton: Themata. Zur Ideengeschichte der Physik. Vieweg 1984, S. 1). Wie man sieht, lässt sich Einstein

durch die Subjektivität des Prozesses keineswegs daran hindern, an die Objektivität der Ergebnisse zu glauben; beide Seiten gehören für ihn unmittelbar zusammen.

Doch nun zunächst einmal zurück in die Anfangsphase der neuzeitlichen Naturwissenschaft:

2. Galileis Überzeugung, dass das Buch der Natur in mathematischen Lettern geschrieben sei, habe ich schon gestreift – was hätte Galilei wohl ohne diese Überzeugung getan? Wäre die neuzeitliche Naturwissenschaft ohne sie zustande gekommen?

Das Gleiche finden wir noch einmal von einer etwas anderen Seite in dem folgenden Galilei-Zitat: „Ich kann nicht genug die Geisteshöhe derer bewundern, die sich ihr (der pythagoräischen Ansicht) angeschlossen und sie für wahr gehalten, die durch die Lebendigkeit ihres Geistes den eigenen Sinnen Gewalt angetan derart, dass sie, was die Vernunft gebot, über den offenbarsten gegenteiligen Sinnesschein zu stellen vermochten [...] Meine Bewunderung findet keine Grenzen, wie bei Aristarch und Kopernikus die Vernunft in dem Maße die Sinne hat überwinden können, dass ihnen zum Trotz die Vernunft über ihre Leichtgläubigkeit triumphiert hat“ (Salviati im „Dialog über die beiden Weltsysteme“; zit. nach Holton a.a.O. S. 20). Was wäre wohl geworden, wenn Galilei von der empiristischen Grundüberzeugung ausgegangen wäre, dass der Verstand keinen Inhalt haben könne, der ihm nicht über die Sinne zugekommen sei („nihil est in intellectu, quod non fuerit in sensu“) [...]? In der neuzeitlichen Naturwissenschaft haben sich rationalistische und empiristische Traditionen verbunden; aber in ihrem Werdegang scheinen derlei Grundüberzeugungen je ihren festen und unvertauschbaren Platz zu haben, an dem sie wesentlichen Einfluss auf den Gang der Entwicklung ausgeübt haben.

3. Wie schon erwähnt, ist aus Keplers Wissenschaft der pythagoreisch bestimmte Harmoniegedanke als bestimmender Faktor nicht wegzudenken. Aber auch noch einige andere Momente sind hier von Interesse:

Im Gegensatz zur antik-mittelalterlichen Tradition und auch zu Kopernikus teilte Kepler nicht mehr die Überzeugung, dass die Himmelskörper ganz anderer Natur seien als die irdische Welt; darum konnte er nach den physikalischen (!) Kräften und Gesetzen fragen, die den Gang der Himmelskörper regieren, auch wenn er in dieser Frage noch keinen Erfolg hatte (vgl. Holton S. 30 - 33).

Dabei hat die mechanistische Betrachtungsweise einen massiven theologischen Hintergrund: „Ich bin viel mit der Erforschung der physikalischen Ursachen beschäftigt. Mein Ziel hierbei ist es zu zeigen, dass die himmlische Maschine nicht eine Art göttlichen Lebewesens ist, sondern gleichsam ein Uhrwerk (wer glaubt, dass die Uhr beseelt ist, der überträgt die Ehre des Meisters auf das Werk), insofern darin nahezu alle die mannigfaltigen Bewegungen von einer einzigen ganz einfachen magnetischen Kraft besorgt werden, wie bei einem Uhrwerk alle die Bewegungen von dem so einfachen Gewicht. Und zwar zeige ich auch, wie diese physikalische Vorstellung rechnerisch und geometrisch darzustellen ist“ (Kepler, zit. nach Holton S. 30).

Dass Kepler sich dessen bewusst ist, dass sein Ansatz durch eine aktive Grundentscheidung bestimmt ist, wird deutlich an einer Formulierung, in der er sein Verhältnis zur alten Astronomie klarstellt: „Der Unterschied besteht allein darin, dass Ihr Kreise, ich körperliche Kräfte benütze“ (Brief vom 1. 8. 1607 an D. Fabricius, zit. nach Holton S. 35).

Holton zeigt (S. 34 - 38), dass für Kepler sowohl der mechanische Funktionszusammenhang wie die mathematische Harmonie regelrecht als Realitätskriterium wirksam sind und sich in dieser Funktion miteinander verbinden und für einander eintreten können. Auch in dieser Weise werden also gehegte Grundüberzeugungen eines Wissenschaftlers wirksam für sein wissenschaftliches Vorgehen.

Im Blick auf unser Weiterfragen nach dem Zusammenhang von Christsein und wissenschaftlicher Arbeit sei noch ein Punkt anvisiert, den Holton (S. 43) unter der Überschrift „Keplers zwei Gottheiten“ zugespitzt so formuliert: „Wie uns seine Arbeiten immer wieder zeigen, ist Keplers Seele auch in dieser Beziehung durch ein doppeltes Bild geprägt. Denn nächst dem lutherischen Gott, der sich ihm direkt in den Worten der Bibel offenbart, steht der pythagoreische Gott, verkörpert in der Unmittelbarkeit der beobachteten Natur und den mathematischen Harmonien des Sonnensystems, dessen Entwurf Kepler selbst nachgezeichnet hatte – ein Gott ‚den ich bei der Betrachtung des Weltalls geradezu mit Händen greife‘.“ Hier stellt sich also die Frage, wie die Grundüberzeugungen, von denen unsere wissenschaftliche Erkenntnis bestimmt und gesteuert wird, mit den Grundüberzeugungen, die uns durch die Bibel vermittelt werden, in Widerspruch, in Spannung oder in Einklang stehen.

4. Nach Descartes liegt den Bewegungen in der Welt das erhaltende Wirken Gottes zugrunde. Dabei bleibt in allen Veränderungen die Summe der Bewegungsgrößen

dieselbe (Erhaltung des Impulses). „Wie Descartes zeigt, entspringt dieses Gesetz aus der Unveränderlichkeit Gottes, kraft derer sogar Veränderungen so unveränderlich wie möglich ablaufen müssen“ (Holton S. 20).

5. Am Beginn des Buches III von Newtons „Principia mathematica“ finden sich als Maßgabe für die Anwendung der zuvor entwickelten mathematischen Methoden auf die Erkenntnis der Einrichtung des Weltsystems vier Regeln für das philosophische Vorgehen. In Holtons zusammenfassender Formulierung lauten sie wie folgt:

„I. Die Natur ist dem Wesen nach einfach; deshalb sollten nicht mehr Ursachen zur Erklärung der Naturdinge zugelassen werden, als zur Erklärung der Beobachtungstatsachen notwendig sind. Dies ist die Hypothese oder Regel der Einfachheit und verae causae.

II. Deshalb muss ähnlichen Folgeerscheinungen, soweit möglich, auch der gleiche Grund zugeordnet werden. Dies ist das Prinzip der Gleichförmigkeit der Natur.

III. Eigenschaften, die allen Körpern in unserer Umgebung zukommen, müssen versuchsweise auch allen Körpern im Allgemeinen zugesprochen werden. Dies ist eine Umformulierung der beiden ersten Hypothesen und wird zur Bildung von Universalien benötigt.

IV. Wissenschaftliche Annahmen, die sich aus dem Induktionsprozess ergeben, müssen als wahr oder zumindest annähernd wahr betrachtet werden, bis Phänomene oder Experimente zeigen, dass Korrekturen notwendig sind oder Ausnahmen auftreten. Diese Regel besagt, dass durch das Experiment untermauerte Annahmen nicht durch den bloßen Vorschlag gegenteiliger Hypothesen widerlegt werden sollten.“ (Holton S. 11 f.).

Diese Regeln stellen also methodologische Entscheidungen über die Vorgehensweise der Wissenschaft dar. Erkennbar gehen darin an einigen Stellen vorwissenschaftliche Annahmen über die Wirklichkeit ein und werden so im Prozess der Theorienbildung mit wirksam; in welcher Weise sie hier wirksam werden und ob ihre Mitwirkung dann später durch den wissenschaftlichen Prozess neutralisierend eingeholt werden kann bzw. eingeholt wurde, wäre näher zu untersuchen. Einige Denkanstöße dazu finden sich in dem, was Holton (S. 13) über Newtons Stellung zu Hypothesen schreibt, und in seinen Schlussfolgerungen dazu.

Auch zu Newton noch ein Schlaglicht, das die Beziehung zwischen Wissenschaft und christlichem Glauben betrifft: Zu Newtons Aussage, er habe die Ursache der Gravitation noch nicht enthüllen können, bemerken A. R. Hall und M. Boas Hall: „In einem Sinn ist dies offensichtlich richtig [...] In einem anderen Sinn ist dies aber falsch. Newton wusste, dass Gott die Ursache der Gravitation ist, genau wie aller anderen Naturkräfte [...] Dass diese Feststellung sowohl wahr als auch falsch sein musste, war Newtons Dilemma: Trotz seiner zuversichtlichen Erwartungen fügten sich Physik und Metaphysik (oder vielmehr die Theologie) nicht glatt aneinander. Letzten Endes konnten die Mechanische Naturauffassung und Newtons Gottesbegriff nicht miteinander versöhnt werden. [...] Vor die Wahl gestellt, wählte Newton Gott und nicht Leibniz“ (zit. nach Holton S. 14). Holton führt den Gedanken fort: eine explizite Aufnahme der Hypothese „Gott“ wäre mit den Zielsetzungen von Newtons Buch unvereinbar gewesen, aber: „Was seine Arbeit für Newton selbst bedeutend machte, war, dass seine Physik eine von Gott durchwaltete, reale Welt zum Gegenstand hatte: Gott selbst steht gleichsam als Puppenspieler hinter den Kulissen und bewegt an unsichtbaren Fäden die Marionetten, die Seine Gedanken in Seinem großen Sensorium ausführen. Dies aber ist eine Behauptung, die Newton nicht für Freund und Feind offen und angreifbar darstellen wollte, wenngleich diese Zurückhaltung eine eigenartige Spannung in seinen Principia und anderen Schriften erzeugte“ (Holton S. 14).

6. Damit wir nicht ganz in den Bannkreis der Physik eingeschlossen bleiben, soll zwischendurch einmal ein Beispiel aus einem anderen Bereich folgen. Durch nachbarschaftliche Beziehungen kamen mir einige Sonderdrucke des Geologen Reinhold Seemann (1888 - 1975) sowie ein Nachruf über ihn in die Hand. In dem Nachruf (Jh.Ges.Naturkde.Württ. 131, 1976, S. 203-206) steht gegen Ende über die Forschungsarbeit Seemanns zur Entstehung des Nördlinger Rieses: „Ausgehend von der völlig richtigen, freilich damals fast von niemandem sonst gehegten Einsicht, dass ein vulkanischer Krater solchen Ausmaßes in die Erdgeschichte und geologische Landschaft Süddeutschlands nicht passe, suchte Seemann das Riesphänomen in Anknüpfung an einen Gedanken Regelmanns als Folge eines im Allgäuer Alpenvorsprung wurzelnden tektonischen Druckkeils zu erklären. [...] Dass sich Seemann der Meteoritentheorie des Rieses nicht mehr anzuschließen vermochte [...], hing nicht nur mit der Schwierigkeit des Umdenkens im Alter zusammen. Es war vielmehr in einer persönlich bedingten (z.B. auch in Goethes geologischen Ansichten ausgeprägten) Neigung begründet, die Natur so weit wie möglich gewaltlos und die Erdgeschichte eines Gebiets in einem aus sich heraus verstehbaren historischen Zusammenhang zu erklären, in diesem Falle also im Trümmerchaos nach

tektonischer Kausalität und Ordnung zu suchen. Der gemessen an einer vulkanischen Explosion noch viel unberechenbarere und gewaltsamere Schlag aus dem Kosmos musste solchem Bestreben völlig unannehmbar erscheinen“ (S. 206). Im Bericht über einen Vortrag Seemanns zum Thema „Versuch einer vorwiegend tektonischen Erklärung des Nördlinger Rieses“ von 1937 (Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg 1937, S. XXXIII - XXXV) finden sich ein paar Sätze, die das schön illustrieren; die Bezugnahme auf eine Theorie, die das Ries rein durch eine Explosion hochgespannter Gase erklären will, wird hier wie folgt fortgeführt: „Diese Erklärung hat, durch neuere Untersuchungen gestützt, dank ihrer Anpassungsfähigkeit in verschiedentlich abgeänderter Form bis heute die meiste Anerkennung gefunden. Und in der Tat, bei einer solchen Sprengung, die das Chaos schafft, gibt es alle Möglichkeiten. Nur eine nicht, die einer gesetzmäßigen Lagerung und Ausbildung der Trümmermassen. Dem Nachweis, dass diese, allerdings durch spätere Abtragung und Umlagerung verhüllt, örtlich vorhanden sei, war der erste Teil des Vortrages gewidmet“ (S. XXXIII).

7. Eine verblüffende Perspektive eröffnet eine Anekdote über Niels Bohr: Bohr habe kurz nach der Entstehung der Quantenmechanik einem Jugendfreund die philosophische Bedeutung dieser neuen Theorie erläutert und darauf die Antwort erhalten: „Ja, Bohr, das ist sicher wahr. Aber du musst doch zugeben, dass du das alles vor zwanzig Jahren auch schon gesagt hast.“ (C. F. v. Weizsäcker: Komplementarität und Logik. In: Ders.: Zum Weltbild der Physik, 11. Aufl. 1970, S. 281 - 331, dort S. 291). Die Quantentheorie als wissenschaftliche Frucht einer Pennäler-Philosophie?

8. Einen wiederum ganz anderen Aspekt berührt Werner Heisenberg in Beantwortung der Frage, wie Revolutionen in der Wissenschaft überhaupt möglich seien: „Die richtige Begründung lautet wohl: Weil die in der Wissenschaft Tätigen einsehen, dass sie mit der neuen Denkstruktur größere Erfolge in ihrer Wissenschaft erringen können als mit der alten; dass sich das Neue als fruchtbarer erweist. Denn wer sich einmal für die Wissenschaft entschieden hat, der will vor allem vorankommen, er will dabei sein, wenn neue Wege erschlossen werden. Es befriedigt ihn nicht, nur das Alte und oft Gesagte zu wiederholen. Daher wird er sich für die Fragestellungen interessieren, bei denen sozusagen „etwas zu machen ist“, bei denen ihm erfolgreiche Tätigkeit in Aussicht steht. In dieser Weise haben sich Relativitätstheorie und Quantentheorie durchgesetzt. Freilich wird damit ein pragmatisches Wertkriterium zur letzten Instanz erhoben, und man kann nicht absolut sicher sein, dass sich dabei immer das Richtige durchsetzt“ (W. Heisenberg:

Änderungen der Denkstruktur im Fortschritt der Wissenschaft. In: Ders.: Schritte über Grenzen. 2. erw. Aufl. 1973, S. 275 - 287, dort S. 284 f.).

Am Ende seines Vortrags „Die Bedeutung des Schönen in der exakten Naturwissenschaft“ (Schritte über Grenzen S. 288 - 305, dort S. 299 - 305) weist Heisenberg anhand zweier längerer Zitate von Kepler und von W. Pauli auf den Anteil hin, den vorrationale Bewusstseinschichten („archetypische Bilder“) am Zustandekommen neuer naturwissenschaftlicher Erkenntnisse haben: erst wo tatsächliche Strukturen der Wirklichkeit durch das Zusammentreffen mit solchen inneren Bildern, die ihnen analog sind, unmittelbar erfasst worden sind, sind die Grundlagen da, auf denen eine rationale Theorie konstruiert werden kann, die die empirischen Sachverhalte angemessen erfasst.

Nur hinweisen möchte ich auf eine Vorlesung von Heisenberg, in der er „Kritik und Gegenvorschläge zur Kopenhagener Deutung der Quantentheorie“ bespricht (Heisenberg: Physik und Philosophie. Ullstein 1959, S. 104 - 119). Hier könnte man Seite für Seite durchgehen, um sowohl im Blick auf die Gegenvorschläge wie im Blick auf Heisenberg selbst einer Reihe von Voraussetzungen ansichtig zu werden, die das jeweilige Vorgehen treiben und steuern.

9. Abschließend mögen einige Schlaglichter auf Albert Einstein uns den Gegenstand unserer morgigen Arbeit schon einmal ein wenig in den Blick rücken:

In seiner Rede zum 60. Geburtstag Plancks weist Einstein darauf hin, dass die Exaktheit der Physik erkaufte ist durch eine Beschränkung auf die allereinfachsten Vorgänge unter Ausblendung aller komplexeren, und er stellt die Frage, ob so ein beschränktes Gebilde den Namen „Weltbild“ verdiene. Seine Antwort: „Ich glaube, der stolze Name ist wohlverdient, denn die allgemeinen Gesetze, auf die das Gedankengebäude der theoretischen Physik gegründet ist, erheben den Anspruch, für jedes Naturgeschehen gültig zu sein. Auf ihnen sollte sich auf dem Wege reiner gedanklicher Deduktion die Abbildung, d.h. die Theorie eines jeden Naturprozesses einschließlich der Lebensvorgänge finden lassen, wenn jener Prozess der Deduktion nicht weit über die Leistungsfähigkeit menschlichen Denkens hinausginge. Der Verzicht des physikalischen Weltbildes auf Vollständigkeit ist also kein prinzipieller. Höchste Aufgabe der Physiker ist also das Aufsuchen jener allgemeinsten elementaren Gesetze, aus denen durch reine Deduktion das Weltbild zu gewinnen ist. Zu diesen elementaren Gesetzen führt kein logischer Weg, sondern nur die auf Einfühlung in die Erfahrung sich stützende Intuition“ (Einstein: Mein Weltbild. Ullstein 1983, S. 108 f.). Was hier als „höchste Aufgabe“ angesprochen ist, muss wohl

zugleich als Benennung von Einsteins tiefster Motivation zu seiner physikalischen Arbeit gelesen werden: ein mathematisch deduzierbares Weltbild zu gewinnen. Dabei ist Einstein fasziniert von dem Tatbestand, dass trotz der angesprochenen Unmöglichkeit eines logischen Weges von der Erfahrung zu den Gesetzen erfahrungsgemäß ein eindeutiges Bestimmen der wahren grundlegenden Gesetze möglich erscheint.

In einem anderen Vortrag geht er auf diese Frage nach der Möglichkeit eines richtigen und sicheren Weges zu den Grundlagen der Physik noch etwas näher ein: „Hierauf antworte ich mit aller Zuversicht, dass es den richtigen Weg nach meiner Meinung gibt und dass wir ihn auch zu finden vermögen. Nach unserer bisherigen Erfahrung sind wir nämlich zum Vertrauen berechtigt, dass die Natur die Realisierung des mathematisch denkbar Einfachsten ist. Durch rein mathematische Konstruktion vermögen wir nach meiner Überzeugung diejenigen Begriffe und diejenige gesetzliche Verknüpfung zwischen ihnen zu finden, die den Schlüssel für das Verstehen der Naturerscheinungen liefern [...] In einem gewissen Sinn halte ich es also für wahr, dass dem reinen Denken das Erfassen des Wirklichen möglich sei, wie es die Alten geträumt haben“ (ebd. S. 116 f.). Einstein hat also eine Leitidee bei seinem Vorgehen: Mathematische Einfachheit als Führerin zu den wahren Gesetzen, die sich dann nach ihrer Auffindung an der Erfahrung bewähren werden.

In einem Vortrag über „Geometrie und Erfahrung“ weist Einstein darauf hin, wie ein unterschiedliches Verständnis des Zusammenhangs von Geometrie und Erfahrungswelt einerseits ihm selbst den Zugang zur Relativitätstheorie eröffnet und andererseits Poincaré gehindert hat, hier Einsteins Konsequenzen zu ziehen (ebd. S. 121 - 123).

Nicht zuletzt wird man sich daran erinnern, wie hartnäckig Einstein sich bemüht hat, die bloß statistischen Gesetze der Quantentheorie doch noch auf deterministische Zusammenhänge zurückzuführen – auf der Grundlage einer elementaren Überzeugung vom Charakter der Welt („der Alte würfelt nicht“).

Zur speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins

1. Newtonsche Mechanik
2. Elektrodynamik
 - Informationskasten A: Der Äther
 - Informationskasten B: Das Experiment von Michelson und Morley und seine Konsequenzen
3. Einsteins spezielle Relativitätstheorie
 - 3.1 Gleichzeitigkeit
 - 3.2 Lorentz-Transformation
 - 3.3 Lorentzkontraktion
 - 3.4 Zeitdilatation
 - Zusammenfassung
 - Informationskasten C: Radioaktiver Zerfall bewegter Pionen
 - nur eine relativistische Rechnung führt zum Ziel
 - 3.5 Relativistische Masse
 - 3.6 Energie und Masse
4. Kurzer Ausblick auf die allgemeine Relativitätstheorie

ZUR SPEZIELLEN RELATIVITÄTSTHEORIE ALBERT EINSTEINS

Das Gebäude der Physik um 1900 ruhte im Wesentlichen auf der altherwürdigen Newtonschen Mechanik (Galilei 1632, Newton 1687) und der Elektrodynamik (Elektrizität, Magnetismus und Optik: Huygens 1675, Bradley 1728, Galvani 1780, Coulomb 1784/5, Volta 1797, Oersted 1820, Ohm 1789, Ampère 1775, Biot 1774, Savart 1791, Faraday 1831, Maxwell 1865).

Die beiden Gebiete hängen auf der einen Seite zusammen, besitzen auf der anderen Seite jedoch unvereinbare Eigenschaften (in Bezug auf die Galilei-Transformation). Diese Unvereinbarkeit wurde von Einstein durch seine spezielle Relativitätstheorie überwunden. Die neue Theorie brachte vor allem der Mechanik erhebliche Veränderungen. Für kleine Geschwindigkeiten stellt die Newtonsche Mechanik allerdings nach wie vor eine sehr gute Näherung dar.

DELTA PUBLICATIONS
7305, Aram Nagar, New Delhi-110055, INDIA

**A
BIG HOWLER**

**EINSTEIN'S THEORY OF
SPECIAL RELATIVITY**

Dr S. P. Gulati & Dr (Mrs) S. Gulati, Associate Professors, Cuttington University College, Liberia: January 1982; 106 pages; Price US\$12·50, STG·6·25 (Air Parcel Postage free).

This book is an open challenging invitation to 'Einsteinians'—particularly so to persons like Professor A. I. Miller of USA who in his recent book 'Albert Einstein's Theory of Special Relativity' (Addison-Wesley, 1981) has undertaken to apotheosize Einstein whose work if not an act of straight plagiarism is definitely 'A BIG HOWLER': infested with infidelities. The 'Transformation Maze' is another interesting feature of the book. Besides, it also contains outlines of the authors' 'SIMILARITY THEORY', perhaps, the only valid alternative.

The book is obtainable either directly from the publisher or through your book-seller or the authors.

Abb. 1 Special relativity in trouble? An advertisement from New Scientist magazine 27 May 1982.
(Spezielle Relativität in Not? Eine Anzeige im New Scientist Magazin 27. Mai 1982)

Im Folgenden soll zunächst das angerissene Problem kurz beschrieben und dann Einsteins Lösung skizziert werden.

1. Newtonsche Mechanik

Die Newtonsche Mechanik basiert auf den folgenden Axiomen:

N I:	„Trägheitsgesetz“:	$F = 0 \Rightarrow \vec{v} = \text{const.}$ (besser: Impuls $\vec{p} = m\vec{v} = \text{const.}$)
		Wirken keine äußeren (eingepprägten) Kräfte \vec{F}^1 , so bleibt die Geschwindigkeit \vec{v} eines Körpers konstant (Sonderfall $\vec{v} = 0$).
N II:	„Dynamisches Grundgesetz“:	$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ (besser: $\vec{F} = \frac{d}{dt}\vec{p}$)
		Die Beschleunigung \vec{a} eines Körpers mit der Masse m hängt von der auf ihn wirkenden Kraft \vec{F} ab.
N III:	„actio = reactio“:	$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ (besser: $d\vec{p}_{12} = d\vec{p}_{21}$)
		Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 die Kraft \vec{F}_{12} aus, so übt der Körper 2 auf den Körper 1 eine Kraft \vec{F}_{21} vom gleichen Betrag, aber entgegengesetzter Richtung aus.
Korollar:	„Superpositionsprinzip für Kräfte“:	Kräfte addieren sich wie Vektoren.
	„Gravitationsgesetz“:	$\vec{F} = -\gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$ (γ : Gravitationskonstante, \vec{r} : Radiusvektor vom Schwerpunkt der Masse m_1 zum Schwerpunkt der Masse m_2)
		\vec{F} ist die Kraft, die eine Masse m_1 auf eine Masse m_2 ausübt.

Aus den Axiomen folgen – in Übereinstimmung mit der Erfahrung – die bekannten Erhaltungssätze für Impuls, Drehimpuls und Energie. (Heute weiß man, dass diese Erhaltungssätze bereits aus fundamentalen Symmetrien ableitbar sind: z.B. folgt der Energieerhaltungssatz aus der Homogenität der Zeit.)

¹ Pfeile über Symbolen weisen auf den Vektorcharakter der zugehörigen Größen hin.

Aus den Axiomen folgt weiter, dass die Gesetze der Mechanik nicht vom *absoluten* Ort und von der *absoluten* Zeit abhängen, sondern nur vom *relativen* Ort und von der *relativen* Zeit. (Es treten nur Differenzen, Differentiale auf.) Dabei bedeutet

absolut – unabhängig von der Wahl eines Bezugssystems

relativ – abhängig von der Wahl eines Bezugssystems.

Nun ist wichtig, dass zwei der genannten Axiome (NI und NII) nicht in jedem Bezugssystem gelten. Alle Bezugssysteme, in denen das Trägheitsgesetz (NI) gilt, heißen „Inertialsysteme“. Ein im Fixsternhimmel befestigtes Koordinatensystem ist ein Inertialsystem, solange man weit genug von großen Massen entfernt ist. Jedes gegenüber diesem mit konstanter Geschwindigkeit bewegte Bezugssystem ist ebenfalls ein Inertialsystem. Die Bedeutung dieser Begriffsbildung wird durch den folgenden grundlegenden Erfahrungssatz der Mechanik deutlich:

Die Grundgesetze der Mechanik sind in allen Inertialsystemen gleich. (Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik – es wird uneingeschränkt in die Relativitätstheorie übernommen)

Mit Gesetzen sind die mathematischen Beziehungen zwischen den betrachteten physikalischen Größen gemeint. Der Wert der Größen kann sich beim Wechsel der Bezugssysteme ändern, die mathematische Form der Beziehung bleibt jedoch gleich. Konstanten behalten ihren Wert (Forminvarianz, Kovarianz der Gesetze).²

Zwei Inertialsysteme S und \bar{S} können eine Relativgeschwindigkeit besitzen – diese kann auch gemessen werden. Aber es ist nicht entscheidbar, ob eines der Systeme, z.B. S , ruht, während das zweite \bar{S} sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} entfernt, oder umgekehrt \bar{S} sich von S mit $-\vec{v}$ entfernt. Ein absoluter Raum ist so nicht feststellbar, kein Inertialsystem ist vor dem anderen ausgezeichnet.

Beim Übergang auf ein gegenüber einem Inertialsystem beschleunigtes System ändern sich jedoch die Gesetze der Mechanik. Beim zweiten Newtonschen Axiom (NIII müssen dann z.B. noch sogenannte Trägheitskräfte eingeführt werden. Newton meinte, die Beschleunigung solcher Bezugssysteme erfolge relativ zu einem „absoluten Raum“.

Aus dem Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik folgt unter der Annahme, dass Längen- und Zeitintervalle sowie Massen absolut, also von der Wahl des

² Die Phänomene können durchaus unterschiedlich sein. Beispiel: Ein Ball wird senkrecht nach oben geworfen und fällt anschließend senkrecht zurück auf eine Straße, vom vorbeifahrenden Auto aus wird die Bahn als Parabel beobachtet.

Bezugssystemen unabhängig sind, die Galilei-Transformation (vergl. Abb. 2). Diese ermöglicht die Umrechnung von Größen beim Wechsel von Inertialsystemen.

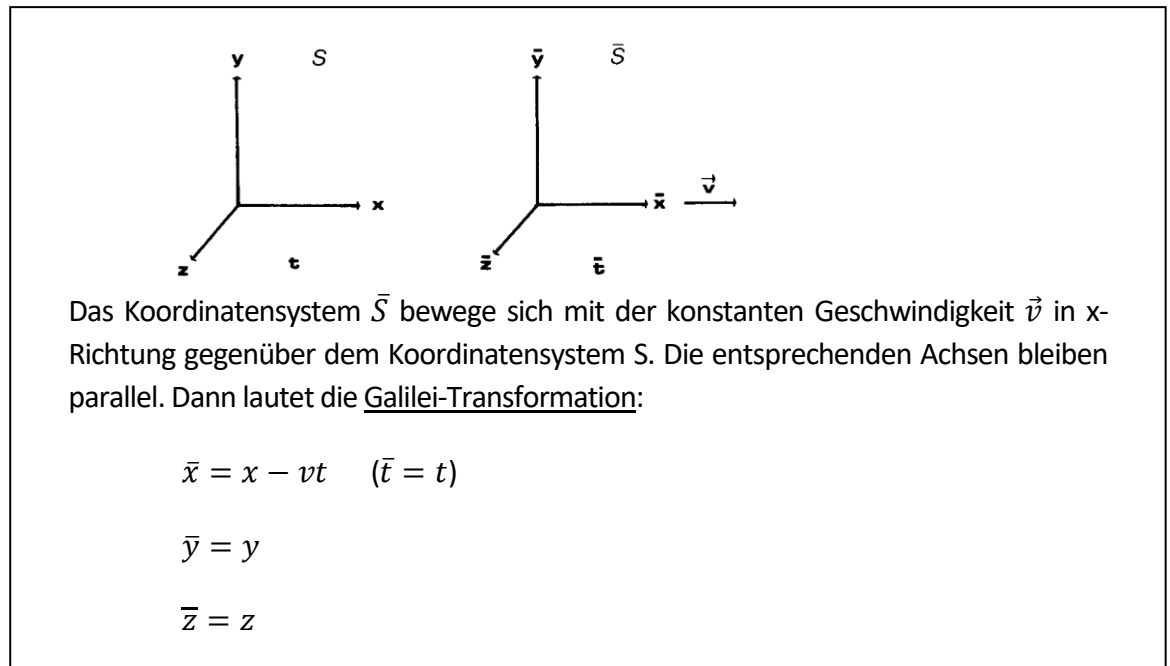


Abb. 2

Für den „normalen“ Erfahrungsraum hat sich die Galilei-Transformation der Mechanik immer wieder glänzend bestätigt und man formulierte:

- ▷ Die Gesetze der Mechanik sind Galilei-invariant.

Diese spezielle Form des Relativitätsprinzips wurde nicht in die Relativitätstheorie übernommen. Probleme treten nämlich auf, sobald man es mit großen Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit zu tun hat. Darüber hinaus tauchen Probleme bei der Übertragung dieses Prinzips auf die Elektrodynamik auf.

2. Elektrodynamik

Wie in der Newtonschen Mechanik lassen sich die Grundlagen der Elektrodynamik in einigen wenigen Gleichungen zusammenfassen, den „Maxwellschen Gleichungen“. Sie lauten für das Vakuum:

$$c^2 \cdot \nabla \times \vec{B} = \frac{\vec{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{„Durchflutungsgesetz“ (Schreibweise Feynman)}$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{„Induktionsgesetz“}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\text{Lorentzkraft: } \vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

(Kraft auf eine Ladung q im elektrischen und magnetischen Feld, \vec{v} : Geschwindigkeit der Ladung)

Die Maxwellschen Gleichungen stellen ein partielles Differentialgleichungssystem für zwei charakteristische Feldvektoren des magnetischen und elektrischen Feldes dar:

\vec{E} : elektrische Feldstärke

\vec{B} : magnetische Induktion (magnetische Kraftflußdichte, besser: magnetische Feldstärke).

\vec{j} ist die elektrische Stromdichte und ρ die elektrische Ladungsdichte.

Mit Hilfe des Symbols ∇ (Nablaoperator) wird im Fall des Kreuzproduktes die Wirbeldichte des betrachteten Feldes und im Fall des Skalarproduktes (Punkt) die Quelledichte angegeben. c ist die im Vakuum konstante Lichtgeschwindigkeit, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante.

! In der Elektrodynamik tauchen zwei für unsere Betrachtungen relevante Problemgruppen auf. Zum einen sind die im Übrigen experimentell äußerst gut bestätigten Gleichungen nicht invariant gegenüber Galilei-Transformationen und zum anderen warf die Größe „Lichtgeschwindigkeit“ um 1900 viele Fragen auf.

Zur Lichtgeschwindigkeit

Um 1900 herrschte die Vorstellung, dass Licht sich im Medium „Äther“ ähnlich wie Schall im Medium Luft ausbreitet. 1888 gelang Heinrich Hertz der experimentelle

Nachweis elektromagnetischer Wellen. Der Wellencharakter von Licht war damit gesichert.

Es musste ein Bezugssystem geben, in dem das Lichtmedium, der Äther, ruht. Der mit diesem Bezugssystem identifizierte absolute Raum sollte experimentell z.B. über den Dopplereffekt oder Lichtgeschwindigkeits- bzw. Lichtlaufzeitmessungen in unterschiedlichen Inertialsystemen nachweisbar sein.

- Für die Existenz eines Äthers sprachen Beobachtungen an Doppelsternen. Nimmt man im Gegensatz zur Äthertheorie an, Licht würde analog zu Geschossen mit der konstanten Vakuumlichtgeschwindigkeit c „abgefeuert“ (Emissionstheorie), so müsste man für die resultierende Geschwindigkeit den Bewegungszustand der Lichtquelle berücksichtigen. Bewegt sich diese mit der Geschwindigkeit v vom Beobachter fort, so müsste er eine Lichtgeschwindigkeit von $c - v$ messen. Bewegt sie sich mit v auf den Beobachter zu, so sollte er eine Lichtgeschwindigkeit von $c + v$ ermitteln. Bei Doppelsternen, die nahe beieinander stehen und um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen (vergl. Abb. 3), konnten solche Unterschiede in der Lichtgeschwindigkeit jedoch nicht nachgewiesen werden. Erwartete Unregelmäßigkeiten in den scheinbaren Bahnkurven (exzentrische Kreisbahnen) wurden nie beobachtet. Folglich müsste man von der Richtigkeit der Äthertheorie ausgehen, wonach die Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle im Ätherruhsystem konstant ist.

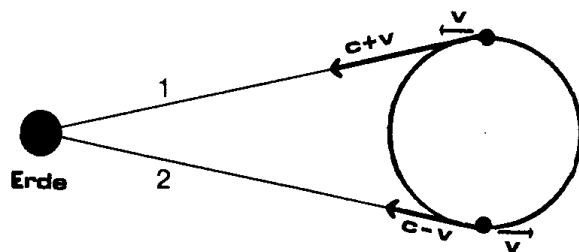


Abb. 3

Doppelsterne

Deutung im Rahmen der Emissionstheorie:

Wegen des großen Abstands zur Erde sollten auch kleine Sternengeschwindigkeiten v zu großen Laufzeitunterschieden der Lichtstrahlen 1 und 2 führen.

(Vergl. aber den zugehörigen Text.)

- Aber auch die Äthertheorie führte zu Widersprüchen. Historisch von besonderer Bedeutung sind die von Michelson und Morley durchgeführten Laufzeitmessungen von Licht. Sie werden im Informationskasten B ausführlicher beschrieben. Nimmt man an, dass die Sonne im Äther ruht, so müsste auf der mit $v = 30$ km/s sich auf einer Kreisbahn um die Sonne bewegendem Erde ein Ätherwind zu merken sein. In Richtung von v müsste Licht einen Gegenwind spüren, in der entgegengesetzten Richtung einen Rückenwind. Dies konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Nun könnte man annehmen, dass der Äther an der Erdoberfläche mitgeführt wird. Diese Hypothese lässt sich durch die beobachtete Aberration des Sternlichts (erstmalig durch Bradley, 1727) widerlegen. Trägt man die beobachtete Position eines Fixsterns – zur Vereinfachung soll er als fest über dem Zenit stehend angenommen werden – über ein ganzes Jahr hin in ein Koordinatensystem ein, so erhält man eine Kreisbahn. Dies lässt sich wie folgt verstehen: Ein senkrecht über der Erdoberfläche stehender Stern kann mit einem Fernrohr nur dann beobachtet werden, wenn dieses um einen Winkel α aus der Senkrechten in Richtung der Erdgeschwindigkeit \vec{v} (Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne: $v = 3 \cdot 10^4$ m/s – die aus der Rotation der Erde um die eigene Achse resultierende Geschwindigkeit an der Erdoberfläche von maximal 465 m/s kann dagegen vernachlässigt werden –) geschwenkt wird. Während ein Lichtstrahl das Fernrohr durchläuft, bewegt sich dieses mit der Erde weiter (vergl. Abb. 4). Würde der Äther in Bezug auf die Erdoberfläche ruhen, wäre ein Neigen des Fernrohrs nicht notwendig.

Aberration von Sternenlicht

Der Stern steht im Zenit. Ohne Erdbewegung müsste das Fernrohr direkt auf die wahre Position des Sterns gerichtet sein.

Durch die Erdbewegung ($v \neq 0$) legt das Fernrohr in der Zeit Δt , die das Licht zum Durchlaufen des Fernrohrs braucht, die Strecke $v \cdot \Delta t$ zurück. Soll ein zur Zeit $t = 0$ in das Fernrohr eintretender Lichtstrahl bis zum Auge gelangen, so darf das untere Ende des Fernrohrs zu diesem Zeitpunkt noch nicht unterhalb des Zenits stehen, sondern muss noch $v \cdot \Delta t$ vom Auftreffpunkt des Lichts entfernt sein. Das Fernrohr muss also um den Winkel $\alpha = 20,5$ Bogensekunden geneigt sein und beschreibt so im Laufe eines Jahres einen Kegel mit dem Öffnungswinkel 2α ($\tan \alpha = v/c = 10^{-4}$).

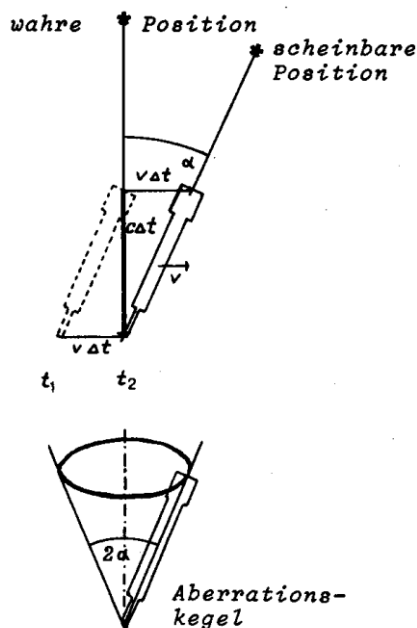


Abb. 4

Die aufgeführten Beispiele zeigen, welche Schwierigkeiten beim Verständnis der Lichtausbreitung auftraten, solange man an der Äthertheorie bzw. der klassischen Mechanik festhielt.

Die Abbildung 5 gibt einen schematischen Überblick über das Problem und zeigt die Lösungsalternativen. Ausgangspunkt ist die Unsymmetrie (im Sinne Einsteins) von

klassischer Mechanik und Elektrodynamik hinsichtlich ihres Transformationsverhaltens (Galilei-Transformation gilt bzw. gilt nicht).

PROBLEM: MAXWELL-GLEICHUNGEN NICHT GALILEI-INVARIANT.

Situation im letzten Jahrhundert:

	Galilei-invariant	klassisches Relativitätsprinzip
klass. Mechanik	gilt	gilt
Elektrodynamik	gilt nicht	?

Beide Gebiete hängen aber zusammen:
„Elektrodynamik bewegter Körper“.

Alternativen:

	Bereich	klass. Rel.prinzip	G-Transfo.	Gesetze	Konsequenzen
(1)	klass. Mech.	gilt	gilt	gelten	ausgezeichnetes Inertialsystem nachweisen! → <u>Äthertheorien</u>
	Elektrodyn.	gilt nicht	gilt	gelten	
(2)	klass. Mech.	gilt	gilt	gelten	Galilei-invariante Gesetze suchen! → <u>Emissionstheorie</u>
	Elektrodyn.	gilt	gilt	gelten nicht streng	
(3)	klass. Mech.	gilt	gilt nicht	gelten nicht streng	Lorentz-invariante Gesetze suchen!
	Elektrodyn.	gilt	gilt nicht	gelten	legt andere Transformation fest: Lorentz-Transformation → <u>spezielle Rel.theorie</u>

Systematik zusammengestellt nach R. Resnick: Einführung in die spezielle Relativitätstheorie. Klett Studienbücher, Stuttgart 1976.

Abb. 5 Lösungsalternativen zur „Unsymmetrie“ (Einstein) von klassischer Mechanik und Elektrodynamik.

3. Einsteins spezielle Relativitätstheorie

Einstein hält in seinem neuen Ansatz zur Lösung des oben beschriebenen Problems ; am Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik fest und fordert zusätzlich die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie

1. Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist für alle Beobachter eine absolute Konstante.).
2. Unabhängigkeit der Gesetze von der Wahl des Inertialsystems.

		Experimentelle Basis der speziellen Relativitätstheorie												
		Experimente zur Lichtausbreitung							Experimente aus anderen Gebieten					
Theorie		Aberration	Fizeauscher Konvektionsfaktor	Michelson-Morley	Kennedy-Thorndike	Bewegte Quellen und Spiegel	De Sitters Doppelsternbeobachtungen	Michelson-Morley, mit Sonnenlicht	Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse	Allgemeine Masse-Energie-Äquivalenz	Strahlung bewegter Ladungen	Mesonzerfall bei hoher Geschwindigkeit	Trouton-Noble	Einpolige Induktion mit Permanentmagnet
Äthertheorien	Stationärer Äther, keine Kontraktion	+	+	-	-	+	+	-	-	○	+	○	-	-
	Stationärer Äther, Lorentzkontraktion	+	+	+	-	+	+	+	+	○	+	○	+	-
	Äther, der wägbaren Körpern anhaftet	-	-	+	+	+	+	+	-	○	○	○	+	○
Emissionstheorien	ursprüngliche Quellentheorie	+	+	+	+	+	-	-	○	○	-	○	○	○
	Ballistische	+	○	+	+	-	-	-	○	○	-	○	○	○
	Neue Quellentheorie	+	○	+	+	-	-	+	○	○	-	○	○	○
Spezielle Relativitätstheorie		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Erklärung der Zeichen: + ... Die Theorie stimmt mit den experimentellen Ergebnissen überein.
 - ... Die Theorie stimmt mit den experimentellen Ergebnissen nicht überein.
 ○ ... Die Theorie läßt sich auf das Experiment nicht anwenden.

Quellennachweis. Aus Panofsky and Phillips, *Classical Electricity and Magnetism* (2nd ed.), Addison-Wesley, New York (1962).

Abb. 6

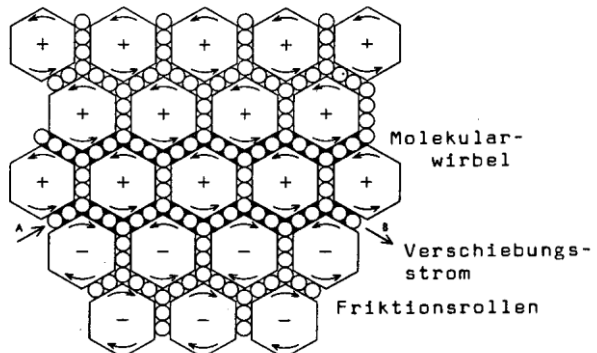
weiter auf S. 29

INFORMATIONSKASTEN A

Der Äther

Maxwellsches Äthermodell (Philos. Mag. 21, 281(1891))

Das Maxwellsche Äthermodell ist charakteristisch für die mechanischen Theorien des Äthers, die im 19. Jh. vorherrschten. Maxwell stellte sich ein Magnetfeld als Menge von „Molekularwirbeln vor, die um die Feldlinien rotieren.

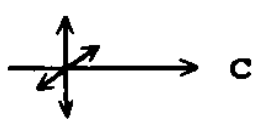


Ihre Rotationsgeschwindigkeit

ist dabei der Feldstärke proportional. Die „Kugellager“ zwischen den Wirbeln sollen aus Ladungsteilchen bestehen. Rotieren benachbarte Molekularwirbel verschieden schnell, so kommt es zur Verschiebung der Ladungsteilchen. Dieses Modell des Elektromagnetismus lag der Herleitung der Maxwellschen Gleichungen zugrunde. Die Aufstellung der Relativitätstheorie durch Albert Einstein im Jahre 1905 setzte derartigen mechanischen Erklärungsversuchen für elektromagnetische Erscheinungen ein Ende.

Quelle: R. U. Sexl, H. K. Urbantke: Relativität, Gruppen, Teilchen. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1976

Bei elastischen Wellen, die sich in einem Medium ausbreiten, lassen sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten nach den folgenden Formeln berechnen:



$$c_{transversal} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G: Schubmodul

ρ : Massendichte



$$c_{longitudinal} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

K: Kompressionsmodul

Lichtwellen sind transversal. Der Äther müsste demnach ein Festkörper sein, denn nur Festkörper besitzen ein nicht verschwindendes Schubmodul ($G \neq 0$). In einem Festkörper sollten aber auch longitudinale Wellen angeregt werden können. Es wurden jedoch nie freie longitudinale elektromagnetische Wellen gefunden. Eine endliche Lichtgeschwindigkeit folgt aus den oben angegebenen Formeln nur für eine nicht verschwindende Massendichte ($\rho \neq 0$). Der Äther muss jedoch masselos sein, da keine Gravitationswirkungen auf die Planeten und Monde bekannt sind.

Alle Äthermodelle mit solch widersprüchlichen Eigenschaften blieben unbefriedigend.

INFORMATIONSKASTEN B

Das Experiment von Michelson und Morley und seine Konsequenzen

Interferometer von Michelson und Morley (1887)

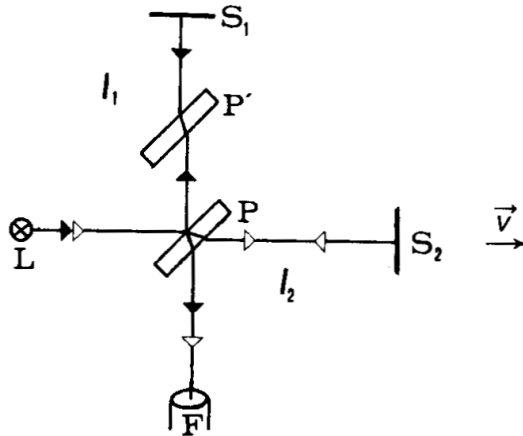


Abb. B 1 Das Interferometer war auf einer massiven Steinplatte aufgebaut und diese auf Quecksilber gelagert. Die Apparatur ließ sich vorsichtig um einen Mittelstift drehen.

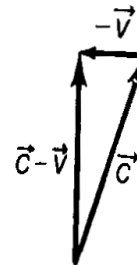


Abb. B 2 Lichtstrahl 1 \rightarrow bewegt sich zwischen P und S_1 mit der resultierenden Geschwindigkeit $\vec{c} - \vec{v}$.

Das Michelson-Morley-Experiment

Das von der Lichtquelle L ausgehende Licht wird an der halbdurchlässigen, planparallelen Platte P in zwei Strahlen 1 und 2 aufgeteilt (vergl. Abb. B 1:

\rightarrow Lichtstrahl 1; \rightarrow Lichtstrahl 2). Während Strahl 1 an der Oberfläche reflektiert wird, durchdringt Strahl 2 die Platte. Die Strahlen werden an den Spiegel S_1 bzw. S_2 reflektiert und treffen sich schließlich im Fernrohr F. Platte P' gewährleistet, dass der Lichtweg von Lichtstrahl 1 im durchsichtigen Medium genau so lang ist wie von Lichtstrahl 2. Die ganze Apparatur bewegt sich mit der Erde (Translationsgeschwindigkeit

$$v = 3 \cdot 10^4 \frac{m}{s} \cong \frac{v}{c} = 10^{-4} \text{ , c: Lichtgeschwindigkeit) nach rechts.}$$

Da die Spiegel nicht genau senkrecht zueinander angeordnet sind, werden im Fernrohr Interferenzstreifen beobachtet. („Streifen gleicher Dicke eines Keils“). Durch einen experimentellen „Trick“ – die Lichtstrahlen durchlaufen mit Hilfe zusätzlicher Spiegel mehrfach die Strecke l_1 bzw. l_2 – lassen sich die Interferometerarme quasi verlängern. Michelson und Morley erreichten so eine optische Weglänge von 11 m als effektiven Abstand von P und S_1 bzw. S_2 .

Beschreibung im Rahmen der Äthervorstellung:

Die Strahlen 1 und 2 sollten trotz gleicher Länge der beiden Interferometerarme

eine Laufzeitdifferenz $\Delta t = t_2 - t_1$ aufweisen. Die Apparatur bewegt sich gegen den Äther. Es müsste deshalb überall ein Ätherwind in Richtung von $-\vec{v}$ zu spüren sein. Lichtstrahl 2 kann sich auf dem Weg von P nach S_2 nur mit der Geschwindigkeit $c - v$ ausbreiten, auf dem Rückweg müsste er infolge des „Rückenwindes“ die Geschwindigkeit $c + v$ besitzen. Er braucht also für den Weg von P zu S_2 und zurück die Zeit

$$t_2 = \frac{l_2}{c-v} + \frac{l_2}{c+v} = \frac{2}{c} \frac{l_2}{1-\frac{v^2}{c^2}}. \quad (1)$$

Lichtstrahl 1 verläuft senkrecht zum Ätherwind. Er kann nur am gegenüberliegenden Spiegel S_1 ankommen, wenn er wie eine Fähre, die einen stark strömenden Fluss quert, ein wenig in den Wind dreht (vergl. Abb. B 2). Seine Geschwindigkeit in Richtung von l_1 beträgt dann $\sqrt{c^2 - v^2}$.

Strahl 1 benötigt für den Weg von P zu S_1 und zurück die Zeit

$$t_1 = \frac{2}{c} \frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Die Strahlen 1 und 2 haben also eine Laufzeitdifferenz von

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c} \left(\frac{l_2}{1-\frac{v^2}{c^2}} - \frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \right). \quad (3)$$

Da die beiden Interferometerarme bei Michelson und Morley gleich lang sind ($l_1 = l_2 =: l$) und $\frac{v^2}{c^2} \ll 1$ ist

$$\left(\Rightarrow \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{c^2} \text{ und } \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right), \text{ kann man in guter Näherung}$$

schreiben

$$\Delta t = \frac{l}{c} \frac{v^2}{c^2}. \quad (4)$$

Dieser Laufzeitdifferenz entspricht eine optische Weglängendifferenz von

$$\Delta s = c\Delta t = l \frac{v^2}{c^2}. \quad (5)$$

Gegenüber einer im Äther ruhenden Anordnung müsste das Interferenzstreifen-system im Fernrohr F um $\frac{\Delta s}{\lambda}$ Streifenabstände nach rechts verschoben sein. λ ist die Wellenlänge des benutzten Lichts.

Wird die gesamte Apparatur um eine senkrecht zur l_1, l_2 -Ebene stehende Achse um 90° geschwenkt, erhält man die Laufzeiten t_1 und t_2 der wie vorher nummerierten Strahlen durch Vertauschen der Indizes in den Formeln 1 und 2.

$$\text{Die Laufzeitdifferenz beträgt jetzt } \Delta t' = -\frac{l}{c} \frac{v^2}{c^2}, \quad (6)$$

was einer optischen Weglängendifferenz von $\Delta s' = -l \frac{v^2}{c^2}$ entspricht. (7)

Nach dem Schwenken der Apparatur müsste das Interferenzstreifensystem gegenüber einer im Äther ruhenden Anordnung um $\frac{\Delta s'}{\lambda}$ Streifenabstände nach links verschoben sein. Insgesamt muss also beim Schwenken der Apparatur auf der relativ zum Äther bewegten Erde eine Verschiebung um

$$\frac{\Delta s - \Delta s'}{\lambda} = \frac{2l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \quad (8)$$

Streifen erfolgen.

Mit $l = 11 \text{ m}$, $\frac{v}{c} = 10^{-4}$ und $\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ist eine Verschiebung um 0,4 Streifenbreite zu erwarten. 1/100 einer Streifenbreite wäre mit Hilfe der Apparatur noch erkennbar gewesen. Es wurde jedoch keine Verschiebung beobachtet.

Der negative Ausgang dieses Experiments bedeutet eine klare Absage an die Ätherhypothese und/oder einschneidende Änderungen in der Galilei-Transformation. Das Experiment wurde deshalb mehrfach wiederholt (vergl. Abb. B 3) und führte auch bei wesentlich gesteigerter Präzision immer zum selben Ergebnis.

Verschiedene Durchführungen des Michelson-Morley-Experiments

Beobachter	Jahr	Platz	l (in Metern)	Streifenverschiebung (in Streifenbreiten nach der Äthertheorie)	Obere Grenze der beobachteten Streifenverschiebung
Michelson	1881	Potsdam	1.2	0.04	0.02
Michelson und Morley	1887	Cleveland	11.0	0.40	0.01
Morley und Miller	1902-1904	Cleveland	32.2	1.13	0.015
Miller	1921	Mt. Wilson	32.0	1.12	0.08
Miller	1923-1924	Cleveland	32.0	1.12	0.030
Miller (Sonnenlicht)	1924	Cleveland	32.0	1.12	0.014
Tomaschek (Sternenlicht)	1924	Heidelberg	8.6	0.3	0.02
Miller	1925-1926	Mt. Wilson	32.0	1.12	0.088
Kennedy	1926	Pasadena and Mt. Wilson	2.0	0.07	0.002
Illingworth	1927	Pasadena	2.0	0.07	0.0004
Piccard und Stahel	1927	Mt. Rigi	2.8	0.13	0.006
Michelson et al	1929	Mt. Wilson	25.9	0.9	0.010
Joos	1930	Jena	21.0	0.75	0.002

Quellennachweis. Aus Shankland, McCuskey, Leone, and Kuerti, *Rev. Mod. Phys.*, 27, 167 (1955).

Abb. B 3

Deutungsversuche zum Michelson - Morley-Experiment

- **Im Rahmen der Äthertheorien:**

I. Der Äther wird von der Erde mitgeführt

- a) Zur Zeit des Experiments wird der Äther zufällig mit der Erdgeschwindigkeit v total mitgeführt. Dann bewegt sich das Licht relativ zur Erdoberfläche *zufällig* mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c .

Widerlegung: Eine Wiederholung der Messung nach 6 Monaten ergibt keine Änderung.

- b) Der Äther wird auf der Erdoberfläche *total* mitgeführt (Michelson, Stokes 1845).

Widerlegung: 1. Aus der beobachteten Aberration des Fixsternlichtes (Bradley 1728) folgt ein bezüglich der Fixsterne ruhender Äther und zwar auch auf der Erdoberfläche (vergl. S. 20).

2. In fließendem Wasser hängt die Lichtgeschwindigkeit c_v von der Geschwindigkeit v des Wassers ab. Dies kann experimentell bestätigt und auch aus einer Theorie abgeleitet werden, die einen bezüglich der Erde ruhenden Äther voraussetzt. Im bewegten Wasser wird der Äther also *partiell* und *nicht total* mitgeführt. (Formel für c_v : $c_v = \frac{c}{n} \pm v(1 - \frac{1}{n^2})$, wobei n der Brechungsindex von Wasser ist.)

- c) Der Äther wird *partiell* von der Erde mitgeführt. In größeren Höhen müsste es dann einen stärkeren Ätherwind geben als auf der Erdoberfläche.

Widerlegung: Messungen in verschiedenen Höhen ergaben keine Veränderungen.

II. Kontraktionshypothese (Fitzgerald 1892, Lorentz)

Die Interferometerarme verkürzen sich in Bewegungsrichtung in Abhängigkeit von der Erdgeschwindigkeit v um $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Widerlegung: Bei verschiedenen langen Interferometerarmen sollte eine Verschiebung der Interferenzstreifen ΔN in Abhängigkeit von einer Veränderung der Relativgeschwindigkeit ($v \rightarrow v'$) von Apparatur und Äther zu beobachten sein. Das von Kennedy und Thorndike 1932 durchgeführte Experiment ergab $\Delta N = 0$!

Aus Gleichung (3) von S. 25 folgt für $l_2 = l_2^0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ und

$l_1 = l_1^0$ (l_1^0 und l_2^0 sind die Längen der ruhenden Interferometerarme) näherungsweise eine Laufzeitdifferenz

$$\text{von } \Delta t = \frac{2}{c} (l_2^0 - l_1^0) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right)$$

$$\text{bzw. } \Delta t' = \frac{2}{c} (l_2^0 - l_1^0) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v'^2}{c^2} \right).$$

Daraus folgt eine Verschiebung der Interferenzstreifen von

$$\Delta N = \frac{\Delta s}{\lambda} - \frac{\Delta s'}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} (\Delta t - \Delta t') = \frac{l_2^0 - l_1^0}{\lambda} \cdot \frac{v^2 - v'^2}{c^2}.$$

Δs und $\Delta s'$ sind die optischen Weglängendifferenzen, die zu den Laufzeitdifferenzen Δt und $\Delta t'$ gehören.

- **Im Rahmen der Emissionstheorien:**

Die Lichtgeschwindigkeit c ist bezüglich der Quelle konstant (Ritz 1908).

Widerlegung: 1. Michelson-Morley-Experiment mit außerirdischen Lichtquellen.

Sterne (**R. Tomaschek**) oder die Sonne (**D. C. Miller**) führen relativ zu einem irdischen Interferometer komplizierte Bewegungen aus (Überlagerung von Kreis- und Translationsbewegungen). Das von diesen Himmelskörpern ausgesandte Licht müsste in einem Michelson-Morley-Interferometer zu unterschiedlichen Interferenzstreifen je nach momentaner Relativgeschwindigkeit führen. Eine Verschiebung der Interferenzstreifen wurde jedoch nicht beobachtet.

2. Beobachtung von Doppelsternen (vergl. S. 19).

3. π^0 -mesonen wurden im CERN (**Alväger** 1964) auf eine Geschwindigkeit von 0,99975 c beschleunigt. Die von diesen Quellen ausgesandten Lichtquanten hatten eine Geschwindigkeit, die höchstens um 0,013 % von der Lichtgeschwindigkeit abweicht.

4. Unter bestimmten Bedingungen treten beim Beschuss von Elektronen mit Positronen zwei Lichtquanten auf, die unter 180° abgestrahlt werden (γ -Quanten, Vernichtungsstrahlung). Bei Positronen mit einer Energie von 600 keV ($v = 0,89 c$) hat das Schwerpunktsystem die Geschwindigkeit $v = 0,6 c$. Klassisch müssten die Quanten also die Geschwindigkeiten 1,6 c und 0,4 c besitzen (großer Effekt!). Mit direkten Laufzeitmessungen wird aber auch hier für beide Quanten $c \pm 10\%$ gemessen (**Sadeh** 1963).

Zusammenfassung: Das Michelson-Morley-Experiment kann zwar alleine für sich durch Zusatzannahmen „erklärt“ werden, zusammen mit anderen experimentellen Befunden ist es aber weder im Rahmen der Äthertheorie noch im Rahmen von Emissionstheorien deutbar (Alternativen 1 und 2 von Abb. 5, vergl. auch Abb. 6). Erst Einstein brachte (mit Alternative 3 von Abb. 5) mit seiner speziellen Relativitätstheorie die gesuchte Lösung.

Der Ätherbegriff entfällt. Prinzip 2 auf Prinzip 1 angewandt bedeutet, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum in allen Inertialsystemen gleich groß ist. Sie ist sowohl von der Geschwindigkeit des Beobachters als auch derjenigen der Lichtquelle unabhängig.

Die beiden Prinzipien haben einschneidende Folgen für das Gebäude der Newtonschen Mechanik. Die Übereinstimmung von Experiment und neuer Theorie konnte jedoch im Laufe der Zeit auf vielfältige Weise bestätigt werden. Abbildung 6 gibt einen Überblick. Eine Synopse alternativer Theorien gibt Abbildung 7.

Grundannahmen und Schlüsse alternativer Theorien

	Emissionstheorie	Klassische Äthertheorie	Spezielle Relativitätstheorie
Bezugssystem	Kein spezielles Bezugssystem	Der stationäre Äther ist ein spezielles Bezugssystem	Kein spezielles Bezugssystem
Geschwindigkeitsabhängigkeit	Die Lichtgeschwindigkeit hängt von der Bewegung der Quelle ab	Die Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig von der Bewegung der Quelle	Die Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig von der Bewegung
Raum – Zeit – Abhängigkeit	Raum und Zeit sind unabhängig	Raum und Zeit sind unabhängig	Raum und Zeit greifen ineinander über
Transformationsgleichungen	Relativ zueinander bewegte Inertialsysteme werden durch die Galilei-transformation verbunden	Relativ zueinander bewegte Inertialsysteme werden durch die Galilei-transformation verbunden	Relativ zueinander bewegte Inertialsysteme werden durch die Lorentz-transformation verbunden

Quellennachweis. Aus Panofsky and Phillips, *Classical Electricity and Magnetism* (2nd Ed.), Addison-Wesley, New York (1962).

Abb. 7

Im Folgenden sollen einige wichtige Folgerungen aus den beiden genannten Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie kurz dargestellt werden.³ Sie betreffen vor allem Größen aus der Newtonschen Mechanik. Die zur Elektrodynamik gehörenden Maxwell'schen Gleichungen sind invariant gegenüber den aus den Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie folgenden Lorentztransformationen.

³ Die Beschäftigung mit der Relativitätstheorie braucht eine Eingewöhnungszeit, da man sich vielfach nicht mehr auf das Raum-Zeit-„Gefühl“ stützen kann. Die folgenden Ausführungen können nur einen ersten Einblick in die Ergebnisse der Theorie geben. Für eine weitere Beschäftigung wird auf die vielen guten Darstellungen (mit unterschiedlichem mathematischem Niveau) verwiesen (z.B. Nelcher, Resnik und Born; vergl. die Literaturhinweise auf S. 77).

3.1 Gleichzeitigkeit

Einstein erkannte erstmalig, dass der Begriff „Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse“ einer Definition bedarf. Da die Lichtgeschwindigkeit im (Vakuum) unabhängig vom Bewegungszustand des Beobachters und der Lichtquelle immer den gleichen Wert hat, kommt er zu folgender Definition:

- | Zwei räumlich voneinander entfernte Ereignisse sind gleichzeitig, wenn von ihnen
- | ausgehende Lichtblitze sich in der Mitte der Verbindungsstrecke treffen.

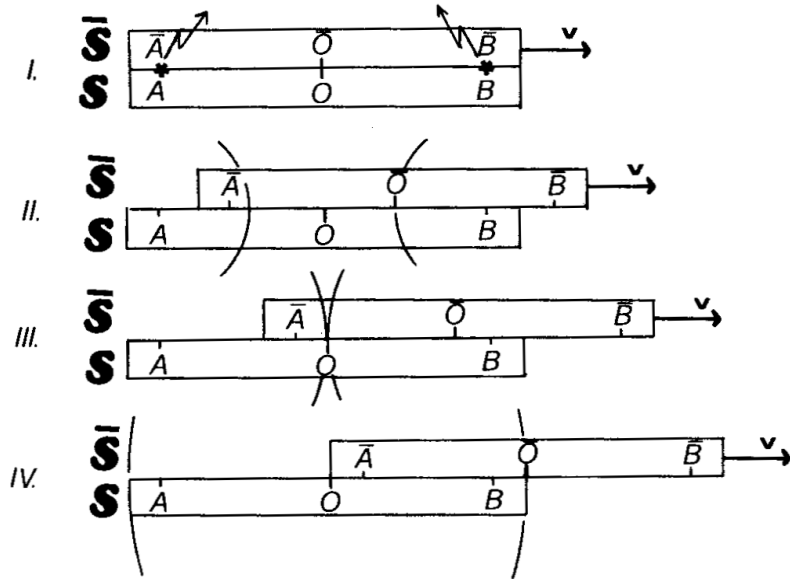
So lassen sich (im Prinzip) Uhren synchronisieren. Zwei Ereignisse, die in einem Inertialsystem S gleichzeitig sind, erscheinen dann jedoch in einem relativ zu S mit der Geschwindigkeit v bewegten System \bar{S} nicht mehr gleichzeitig. Absolute Zeitmessungen sind deshalb nicht möglich. Auch die Zeit ist eine vom gewählten Inertialsystem abhängige Größe. Dies lässt sich am folgenden Beispiel verdeutlichen.

In zwei relativ zueinander bewegten Inertialsystemen S und \bar{S} sind jeweils Meterstäbe und synchronisierte Uhren vorhanden. An den Stellen A und B bzw. \bar{A} und \bar{B} werden Lichtblitze ausgesandt (vergl. Abb. 8 I). Wir nehmen an, der Beobachter im System S befinde sich im Punkt O , der Mitte der Strecke AB , und der Beobachter im System \bar{S} im Punkt \bar{O} , der Mitte der Strecke $\bar{A}\bar{B}$ (vergl. Abb. 8 I). Die Signale gelten für den Beobachter in O genau dann als gleichzeitig ausgesandt, wenn sie zur gleichen Zeit in O registriert werden, für den Beobachte in \bar{O} genau dann, wenn sie in \bar{O} gleichzeitig registriert werden. Diese Definition der Gleichzeitigkeit ist unabhängig vom Bewegungszustand des betrachteten Inertialsystems, denn die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit ist in allen Inertialsystemen gleich groß.

Wir nehmen nun z.B. an, dass die Wellenfronten in O zum gleichen Zeitpunkt eintreffen (vergl. Abb. 8 III). Dann wären die Ereignisse in A und B (Abb. 8 I) für den in O befindlichen Beobachter gleichzeitig. Dieser Beobachter im System S kann über die Vorgänge im System \bar{S} folgende Überlegungen anstellen: Wäre die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht unendlich groß, so käme der Beobachter in \bar{O} ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Ereignisse gleichzeitig sind. Da jedoch eine gewisse Zeit vergeht, bis die Signale bei den Beobachtern eintreffen, hat sich das System \bar{S} in der Zwischenzeit z.B. nach rechts bewegt. Die von \bar{B} ausgegangene Wellenfront erreicht den Beobachter in \bar{O} (Abb. 8 II) eher als die von \bar{A} ausgegangene. Da dieser Beobachter sich in der Mitte der Strecke $\bar{A}\bar{B}$ befindet und die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit in jedem Inertialsystem konstant ist, muss er definitionsgemäß schließen, dass das Ereignis in \bar{B} früher als das in \bar{A} stattgefunden hat.

\bar{S} bewegt sich relativ zu S mit der Geschwindigkeit v nach rechts.

- I. Eine Lichtwelle verlässt A, \bar{A} und eine zweite B, \bar{B} .
- II. Die von B, \bar{B} ausgehende Wellenfront erreicht \bar{O} .
- III. Beide Wellenfronten treffen O. Ein Beobachter in



O folgert daraus, dass die Lichtblitze in A und B gleichzeitig ausgelöst wurden, denn O ist die Mitte der Verbindungsstrecke AB.

- IV. Die von A, \bar{A} ausgehende Wellenfront erreicht \bar{O} . Für einen Beobachter in \bar{O} ist also der Lichtblitz in \bar{B} früher ausgelöst worden als der in \bar{A} . Da sich die Wellenfronten der beiden Lichtblitze nicht in der Mitte der Verbindungsstrecke $\bar{A}\bar{B}$ treffen, sind die Blitze nicht gleichzeitig ausgelöst worden.

Abb. 8 Relativierung der Gleichzeitigkeit

Zwei Ereignisse, die bezüglich eines Inertialsystems gleichzeitig sind, brauchen dies nicht auch bezüglich eines anderen sein. Zeitmessungen sind nur relativ zu einem Bezugssystem möglich, es gibt keine absolute Zeit. Kein Inertialsystem ist vor dem anderen ausgezeichnet. Diese letzte Aussage lässt sich an dem gerade skizzierten Beispiel verdeutlichen. Man kann das System \bar{S} als ruhend auffassen, dann bewegt sich S mit der Geschwindigkeit v nach links. Sind die Signale für den Beobachter in \bar{O} gleichzeitig, so scheint dem Beobachter in O das Signal in A früher zu sein als das in B. Eine genauere Untersuchung zeigt, dass bei kausal verknüpften Ereignissen die zeitliche Reihenfolge unabhängig vom Bezugssystem, also absolut ist.

3.2 Lorentz-Transformation

Die beiden Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie erfordern ein Abändern der Galilei-Transformation. Letztere sollte jedoch im Grenzfall kleiner Relativgeschwindigkeiten v noch richtig sein. Da die Zeit ebenfalls vom gewählten Inertialsystem abhängt, muss auch für sie eine nicht triviale Transformationsgleichung aufgestellt

werden. Das System \bar{S} bewege sich mit der Geschwindigkeit v gegenüber dem System S in x -Richtung.

Statt $\bar{x} = x - vt$ und $x = \bar{x} + vt$ (Galilei-Transformation) (1)

muss gelten $\bar{x} = k(x - vt)$ und $x = k(\bar{x} + v\bar{t})$, wobei $x = ct$ und $\bar{x} = c\bar{t}$. (2)

Für $k = 1$ und $t = \bar{t}$ folgt aus (2) die Galilei-Transformation (1).

Aus den Gleichungen (2) lässt sich der Faktor k bestimmen.

$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ (strebt für kleine v gegen 1!), und für \bar{t} die Beziehung

$\bar{t} = k(t - \frac{vx}{c^2})$ (strebt für kleine v gegen t !) ableiten.

Die so genannte Lorentz-Transformation lautet: (3)

$\bar{x} = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$		$x = \frac{\bar{x}+v\bar{t}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$	
$\bar{y} = y$	und	$y = \bar{y}$	
$\bar{z} = z$		$z = \bar{z}$	
$\bar{t} = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$		$t = \frac{\bar{t} + \frac{v}{c^2}\bar{x}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$	

Aus den angegebenen Gleichungen für die Lorentz-Transformation folgen wichtige im Vergleich zur Newtonschen Mechanik neue Ergebnisse für Zeit- und Längenmessungen. Die Ergebnisse solcher Messungen hängen jetzt von der Relativbewegung zwischen betrachtetem Körper und Beobachter ab.

3.3 Lorentzkontraktion

Ein Beobachter misst die Länge eines Körpers. Er erhält die größte Länge, wenn der Körper relativ zu ihm in Ruhe ist. Die gemessene Länge wird um so kleiner, je schneller sich der Körper in Messrichtung relativ zum Beobachter bewegt. Sie

verkürzt sich auf das $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ -fache.

Senkrecht zur Bewegungsrichtung bleibt die Länge konstant.

Dies lässt sich wie folgt herleiten. Das System \bar{S} bewegt sich relativ zum System S mit der Geschwindigkeit v. Die Endpunkte eines mit \bar{S} mitbewegten Maßstabs liegen bei \bar{x}_1 und \bar{x}_2 , seine Länge beträgt in diesem System also $\Delta\bar{x} = \bar{x}_2 - \bar{x}_1$. Aus den im System S zur gleichen Zeit t (= $t_1 = t_2$) gemessenen Endpunkten x_1 und x_2 ergibt sich im S-System die Länge $\Delta x = x_2 - x_1$. Zwischen den beiden Längen $\Delta\bar{x}$ und Δx besteht die Beziehung

$$\Delta x = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \Delta\bar{x} \quad (\text{Lorentzkontraktion}).$$

Sie lässt sich aus den Formeln

$$\bar{x}_2 = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \bar{x}_1 = \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{und} \quad t = t_1 = t_2 \quad \text{herleiten.}$$

Die Beziehung $\Delta y = \Delta\bar{y}$ folgt direkt aus der Lorentz-Transformation. (3)

3.4 Zeitdilatation

Eine relativ zu einem Beobachter ruhende Uhr läuft schneller als eine relativ zu ihm bewegte.

Bleibt also von zwei synchronisierten Uhren eine beim Beobachter, während sich die andere mit der Geschwindigkeit v bewegt, so ist die auf der bewegten Uhr jeweils abgelesene Zeitspanne kleiner als die auf der ruhenden. Die bewegte Uhr geht langsamer, und zwar um das $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ -fache.

Die auf der ruhenden Uhr gemessene Zeitspanne $\Delta t = t_2 - t_1$ ist mit der auf der bewegten Uhr vom ruhenden Beobachter abgelesenen Zeitspanne $\Delta\bar{t} = \bar{t}_2 - \bar{t}_1$ durch

$$\Delta t = \frac{\Delta\bar{t}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (\text{Zeitdilatation}) \quad \text{verknüpft.}$$

Sie folgt aus den Gleichungen für die Lorentz-Transformation (3) unter der Voraussetzung, dass die Uhr im bewegten \bar{S} -System sich an einem festen Ort \bar{x} befindet. Im ruhenden S-System werden zwei synchronisierte Uhren an unterschiedlichen Orten benötigt. Uhr 1 befindet sich zur Zeit t_1 am Ort der \bar{S} -Uhr und Uhr 2 zur Zeit t_2 am Ort der \bar{S} -Uhr. Dann gilt

$$t_1 = \frac{\bar{t}_1 + \frac{v}{c^2}\bar{x}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{und} \quad t_2 = \frac{\bar{t}_2 + \frac{v}{c^2}\bar{x}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Zusammenfassung

- Die Zeitspanne $d\tau$, die von einer am beobachteten Körper befestigten Uhr gemessen wird, heißt *Eigenzeit*. Ein Beobachter, der sich relativ zum Ort einer Folge von Ereignissen bewegt, misst die Zeitintervalle dt zwischen den Ereignissen länger als ein relativ zu den Ereignissen ruhender Beobachter. Bei der Messung der Zeitintervalle dt wird die Zeit jeweils am Ort des Ereignisses gestoppt. Der bewegte Beobachter muss also im Besitz einer mitgeführten Uhrenkette sein. Es gilt:

$$dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

- Ein System, in dem der beobachtete Körper ruht, heißt *Ruhsystem*. In diesem System hat der Körper eine *Ruhlänge*. Bewegt sich der Körper relativ zum Beobachter, so erscheint er in der Bewegungsrichtung verkürzt, senkrecht zur Bewegungsrichtung bleibt die Länge unverändert.
- Zwei an einem Ort synchronisierte Uhren werden an verschiedene Orte gebracht. Sie bewegen sich gemeinsam relativ zum Beobachter. Für diesen scheinen die Uhren nicht nur langsamer als seine eigene zu gehen, sondern auch je nach dem Ort der beobachteten Uhr eine unterschiedliche Phasenkonstante zu besitzen, d.h. die beiden bewegten Uhren laufen nicht mehr synchron. Gleichzeitigkeit im ruhenden System bedeutet nicht Gleichzeitigkeit im bewegten.

Zu einem bestimmten Zeitpunkt im ruhenden System hat $t = \frac{\bar{t} + \frac{v}{c^2}\bar{x}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ einen

bestimmten Wert. Je nach dem Ort \bar{x} im bewegten System ergibt sich entsprechend der Formel eine unterschiedliche Zeit t . Je größer der Wert von \bar{x} ist, um so kleiner muss \bar{t} sein, damit der Ausdruck $\bar{t} + \frac{v}{c^2}\bar{x}$ seinen Wert behält.

- Die Größen *Eigenzeit* und *Ruhlänge* stellen in der speziellen Relativitätstheorie Invarianten dar. Sie charakterisieren einen Körper. Beispiele sind die Zerfallszeit eines radioaktiven Teilchens und die Länge eines Stabes jeweils im Ruhsystem.

- Anstelle der alten absoluten Größen Δx und Δt tritt die Invariante $\Delta x^2 - c^2(\Delta t)^2$ (dreidimensional: $(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - c^2(\Delta t)^2$) auf. Sie ist das Quadrat des „Raum-Zeit-Abstands“ zweier Ereignisse. Er ist absolut, während der rein räumliche oder zeitliche Abstand relativ ist. Raum und Zeit sind zur Raum-Zeit („Welt“) vereinigt. Die spezielle Relativitätstheorie vereinigt noch andere Größen, z.B. Energie-Impuls, Frequenz-Wellenzahl und elektrisches Feld-magnetisches Feld.

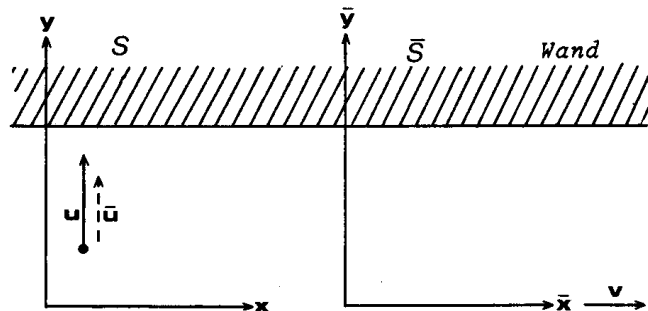
Zur Verdeutlichung von Längenkontraktion und Zeitdilatation gibt der Informationskasten C ein Beispiel.

3.5 Relativistische Masse

Auch die Masse ist infolge der beiden Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie keine systemunabhängige Konstante mehr. Die Masse ist im Ruhesystem am kleinsten und vergrößert sich mit wachsender Relativgeschwindigkeit v zum Beobachter um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

Abb. 9

Im System S misst man die Geschwindigkeit u (Massenpunkt, der parallel zur y-Achse auf die Wand zufliegt). Im bewegten System \bar{S} (bewegt sich mit der Geschwindigkeit v relativ zum System S) misst man dagegen die kleinere Geschwindigkeit \bar{u} .



Dies soll an einem Beispiel gezeigt werden (vergl. Abb. 9). Ein Massenpunkt m fliegt mit einer relativ zu c kleinen Geschwindigkeit u senkrecht auf eine Wand zu und bleibt darin hängen (unelastischer Stoß). Er überträgt dabei den Impuls $p = mu$ auf die Wand. Das zur Beschreibung benutzte Inertialsystem S liegt so, dass u parallel zur y -Achse ist, d.h. $u = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ gilt. Nun soll dieser Vorgang von einem gegenüber S mit der Geschwindigkeit v in x -Richtung bewegten System \bar{S} aus beschrieben werden. Ein Streckenabschnitt Δy erscheint in \bar{S} genau so groß $\Delta \bar{y} = \Delta y$. Die für diesen Streckenabschnitt benötigte Zeit ist jedoch im \bar{S} -System größer: $\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$. Im

bewegten \bar{S} -System misst man deshalb die Geschwindigkeit $\bar{u} = \frac{\Delta \bar{y}}{\Delta \bar{t}} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = u \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Der übertragene Impuls $\bar{p} = m\bar{u}$ sollte demnach kleiner sein als der im ruhenden S-System gemessene. Das wäre eine Verletzung des Impulserhaltungssatzes. $\bar{p} = p$ lässt sich nur erreichen, wenn für die Masse im bewegten System der Ausdruck $\frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ benutzt wird.

Es ist üblich, die Masse eines Körpers im Ruhesystem als Ruhmasse m_0 zu bezeichnen. Dann ist die relativistische Masse m in einem mit der Geschwindigkeit v bewegten Inertialsystem durch

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (\text{relativistische Masse}) \text{ gegeben}^4. \text{ Die Formel wurde durch zahlreiche Experimente bestätigt.}^5$$

3.6 Energie und Masse

So wie der Impulserhaltungssatz sollte auch der Energieerhaltungssatz Gültigkeit behalten. Für die Gesamtenergie E errechnete Einstein die Formel $E = m c^2$. Eine Energieänderung ΔE hat demnach eine Massenänderung $\Delta m (= \frac{\Delta E}{c^2})$ zur Folge und umgekehrt. Es besteht eine Äquivalenz zwischen Masse und Energie, wobei mit m die relativistische Masse gemeint ist.

Die Formel $E = m c^2$ kann wie folgt plausibel gemacht werden.⁶ Die kinetische Energie eines Teilchens sollte für relativ zu c kleine Geschwindigkeiten v durch die Formel $W_{kin} = \frac{1}{2} m_0 v^2$ aus der klassischen Mechanik gegeben sein. Für die relativistische Masse kann man bei kleinen Geschwindigkeiten näherungsweise schreiben

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx m_0 + \frac{m_0}{2} \frac{v^2}{c^2}, \text{ also } m = m_0 + \frac{W_{kin}}{c^2}, \text{ woraus}$$

⁴ Eine allgemeine Herleitung, die die relativistische Gleichung für die Addition von Geschwindigkeiten benutzt, kommt zum gleichen Ergebnis. Vergl. z.B. R. Resnick: Einführung in die spezielle Relativitätstheorie. Klett Studienbücher, Stuttgart 1976, S. 108 ff.

⁵ Z.B. Bestimmen der spezifischen Elektronenladung $\frac{e}{m}$; in Abhängigkeit von $\frac{v}{c}$ durch Ablenken von bewegten Elektronen im elektrischen Feld eines Plattenkondensators.

⁶ Vergl. zur exakten Herleitung z.B. Resnick S. 115 ff (a.a.O.).

$$\boxed{mc^2 = m_0c^2 + W_{kin}} \text{ folgt.}$$

Die letzte Gleichung kann so interpretiert werden, dass mc^2 die Gesamtenergie und m_0c^2 die Ruhenergie des bewegten Teilchens ist, seine innere Energie. Sie gilt auch für große Geschwindigkeiten, nur ist dann die kinetische Energie durch die relativistische Formel

$$W_{kin} = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \text{ gegeben. Diese strebt für kleine } v$$

gegen den klassischen Ausdruck für die kinetische Energie.

Eine der vielen experimentell belegten Konsequenzen der Einsteinschen Formel ist der sogenannte Massendefekt. Die Masse zweier weit entfernter Nukleonen (Kernbausteine wie Protonen oder Neutronen) ist größer als die zweier gebundener. Die zum Massendefekt Δm_0 gehörende Energie Δm_0c^2 wird zum größten Teil mit Hilfe von Lichtquanten (ohne Ruhmasse!) abgestrahlt. Die zur Ruhmasse eines Elektron-Positron-Paares gehörende Energie kann sogar vollständig in Photonenenergie verwandelt werden. Es gibt also für die Ruhenergie keinen Erhaltungssatz, die relativistische Masse und entsprechend die Energie bleiben jedoch erhalten.

INFORMATIONSKASTEN C

Radioaktiver Zerfall bewegter Pionen –
nur eine relativistische Rechnung führt zum Ziel

Radioaktive Pionen – positiv oder negativ geladene Elementarteilchen, die in Beschleunigern durch Beschießen von geeigneten Targets mit beschleunigten Protonen erzeugt werden – haben in ihrem Ruhssystem eine Halbwertszeit von $1,77 \cdot 10^{-8}$ s. In dieser Zeit ist die Anfangsintensität der Pionen auf die Hälfte abgesunken. Bei Pionen, die das Target mit einer Geschwindigkeit von $0,99 c$ verlassen, wurde 37 m hinter dem Target ein Absinken der Intensität auf die Hälfte beobachtet.

- In der klassischen Physik sind diese Ergebnisse widersprüchlich. Nach deren Gesetzen müsste die Intensität des Pionenstrahls schon nach $5,3$ m auf die Hälfte abgesunken sein, denn aus den angegebenen Werten errechnet man

$$d = v \cdot t_{\frac{1}{2}} = 0,99 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 1,77 \cdot 10^{-8} s = 5,3 m.$$

- In der speziellen Relativitätstheorie gibt es zwei Möglichkeiten, das experimentelle Ergebnis theoretisch zu bestätigen.

I. Rechnung im Laborsystem

Ein Beobachter im Labor misst die Zeit $\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ während im relativ zu ihm mit den Pionen mitbewegten System die Zeit $\Delta \tau$ vergeht (Zeitdilatation). Man berechnet

$$\Delta t = \frac{1,77 \cdot 10^{-8} s}{\sqrt{1 - 0,99^2}} = 1,255 \cdot 10^{-7} s.$$

In dieser Zeit legen die Pionen den Weg

$$d = v \cdot \Delta t = 2,97 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 1,255 \cdot 10^{-7} s = 37,3 m \text{ zurück.}$$

II. Rechnung im Ruhssystem der Pionen

Vom Ruhssystem der Pionen aus erscheint die Laborstrecke von $37,3$ m verkürzt (Längenkontraktion):

$$d' = d \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 37,3 m \cdot \sqrt{1 - 0,99^2} = 5,26 m.$$

Bis diese Strecke sich an den Pionen vorbeibewegt hat, vergeht die Zeit

$$\Delta \tau = \frac{d'}{v} = \frac{5,26 m}{2,97 \cdot 10^8 \frac{m}{s}} = 1,77 \cdot 10^{-8} s.$$

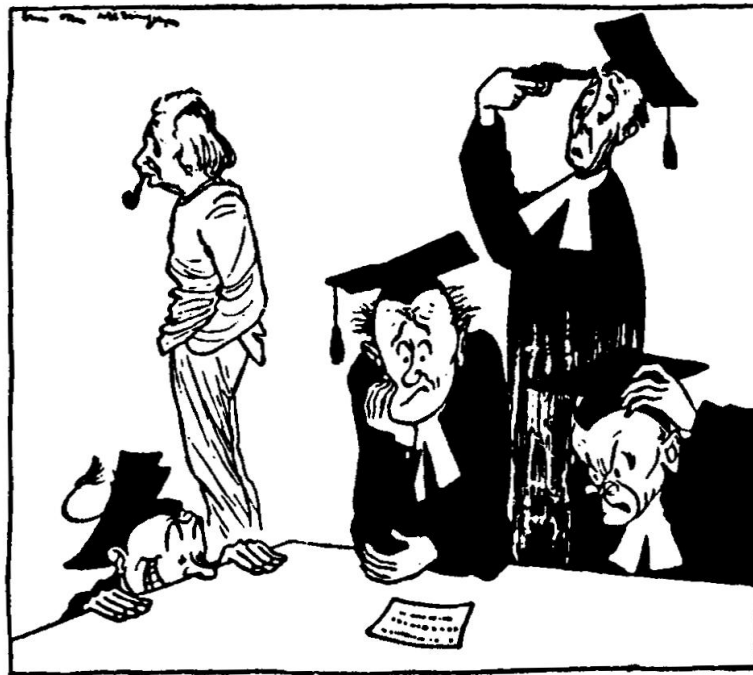


Abb. 10

Unsere wissenschaftlichen Koryphäen beim Studium eines Einstein-Problems. Angeblich Lieblings-Karikatur von Einstein: Sie stammt von dem Niederländer Wim van Wieringer und erschien 1950 in der Zeitung „De Groene Amsterdamer“ mit der angegebenen Unterschrift.

4. Kurzer Ausblick auf die allgemeine Relativitätstheorie (ART)

Die spezielle Relativitätstheorie (SRT) hat sich in einem sehr großen Erfahrungsbereich hervorragend bewährt. Dennoch erkannte bereits Einstein ihre Grenzen:

- Beschränkung auf Inertialsysteme
- Beschränkung auf Galilei-Koordinaten (keine krummlinigen Koordinaten)
- Nichterfassen der Gravitation

Durch das Aufstellen der ART⁷ konnte sich Einstein (1916) von diesen Einschränkungen lösen. Das allgemeine Relativitätsprinzip fordert die prinzipielle Gleichwertigkeit aller Bezugssysteme (z.B. auch beschleunigter) für die Formulierung von physikalischen Gesetzen:

⁷ Vergl. z.B. H. Melcher: Relativitätstheorie in elementarer Darstellung, Dt. Verlag der Wiss., Berlin Ost 1974 oder E. Schmutzer: Relativitätstheorie aktuell, Verlag Harry Deutsch, Thun und Frankfurt (Main) 1981.

„Die Grundgesetze der Physik besitzen für zwei in beliebigem Bewegungszustand befindliche Beobachter bei Benutzung beliebiger, kontinuierlich auseinander hervorgehender Koordinatensysteme dieselbe Form“ (Formulierung nach Schmutzer).

Für die Einbeziehung der Gravitation war die experimentell sehr gut bestätigte Gleichheit von träger und schwerer Masse entscheidend: Einstein verdeutlicht in seinem Fahrstuhlexperiment die (lokale) Äquivalenz von Gravitations- und Beschleunigungsfeld. (In einem geschlossenen Kasten im Weltraum ist prinzipiell nicht unterscheidbar, ob ein Gravitationsfeld („nach unten“) oder ein Beschleunigungsfeld („nach oben“) wirkt.) Die ART verknüpft Raum-Zeit und Materie auf neue Weise, indem die Masseverteilung die Geometrie des Raumes bestimmt. Der Raum ist nicht mehr einfach „Behälter“ der Dinge. Gravitationsfelder werden aus der Krümmung des Raumes erklärt. Die ART führt zu einem Verständnis des Newtonschen Gravitationsgesetzes und sagt zugleich kleine Abweichungen von der klassischen Theorie voraus (Lichtablenkung an der Sonne, Periheldrehung des Merkur, Gravitationsrotverschiebung, Laufzeitmessung von Radar-Echos (Shapiro), Uhren im Gravitationsfeld (Nafele-Keating) u.a.). Obwohl der Bestätigungsgrad der ART noch nicht so groß ist wie der der SRT, sprechen bisher alle Experimente quantitativ für ihre Gültigkeit. Die ART ist nicht zuletzt auch quantitativ Grundlage der modernen Kosmologie.

Zur Theorienbildung bei Albert Einstein

1. Fragen, die zur speziellen Relativitätstheorie führten
 - 1.1 Eine störende Asymmetrie und ein überflüssiger Begriff
 - 1.2 Zur Quantenhypothese
 - 1.3 Stolpersteine in der Physiklandschaft um 1900
 - 1.4 Zu Einsteins Denkweise
 - 1.5 Auf der Suche nach einer neuen Physik
 - 1.6 Aufstellen der speziellen Relativitätstheorie
 - 1.7 Das Machsche Prinzip
2. Zur Entstehung einer Prinzipientheorie
 - 2.1 Einsteins Modell einer Prinzipientheorie
 - 2.2 Zwei Teilaufgaben für den Theoretiker
 - 2.3 Das Verhältnis von Ratio und Erfahrung in einer Theorie
 - 2.4 Zwei Kriterien für die Güte einer physikalischen Theorie
 - 2.5 Ausbau oder Neubau einer Theorie
 - 2.6 Vorurteile hemmen oder fördern die Theorienbildung

Um wesentliche Momente, die bei der Entstehung einer neuen wissenschaftlichen Theorie eine Rolle spielen können, zu entdecken, wollen wir versuchen, Einstein bei seiner Suche nach einem neuen Verständnis von Raum und Zeit ein wenig „auf die Finger zu sehen“.

Im ersten Teil dieses Referates soll das physikalische Umfeld um 1900 aus der Sicht Einsteins erhellt werden. Dort gab es eine ganze Reihe von Stolpersteinen für die zeitgenössischen Theoretiker, einige davon scheinen jedoch Einstein stärker beschäftigt zu haben als die übrigen Physiker. Einstein besaß den Mut, statt einer theoretischen Flickschusterei, bei der durch Ad-hoc-Hypothesen die Theorie den experimentellen Ergebnissen angepasst werden soll, einen Neubau zu wagen. Er musste sich für einen von zwei scheinbar möglichen Wegen, den induktiven oder deduktiven entscheiden, d.h. für das Aufstellen einer konstruktiven oder einer Prinzipientheorie. Einstein wählte den Weg

einer Prinzipientheorie und wurde nicht müde, immer wieder diesen Weg als den für eine übergreifende Theorie einzig möglichen zu verteidigen.

Im zweiten Teil dieses Referats soll ausgehend von einem Modell der Entstehung und des Aufbaus einer Prinzipientheorie die Bedeutung von außer- und vorwissenschaftlichen Vorstellungen (thematisch geformten Vorurteilen) am Beispiel Einsteins aufgezeigt werden.

1. Fragen, die zur speziellen Relativitätstheorie führten

1.1 Eine störende Asymmetrie und ein überflüssiger Begriff

Einsteins Denken war stark von gewissen Grundvorstellungen geprägt. Sie bilden quasi ein Raster zur Beurteilung physikalischer Erklärungsmodelle. Zwei Beispiele sollen das verdeutlichen. Die zugehörigen Grundvorstellungen (thematisch geformte Vorurteile) sind mit den Schlagworten Symmetrie und Denkökonomie verbunden.

Ein Beispiel zum Thema Symmetrie:

Einstein schreibt im Alter von 67 Jahren in seiner Autobiographie:¹ „Der faszinierendste Gegenstand zur Zeit meines Studiums war die Maxwellsche Theorie“ (Autob. S. 12). Gerade sie wurde jedoch in den von Einstein besuchten Vorlesungen an der ETH Zürich ausgelassen. Diese Lücke füllte Einstein selber durch die Lektüre einiger Werke von Kirchhoff, Helmholtz und Hertz sowie Föppls „Einführung in die Maxwellsche Elektrizitätslehre“ aus dem Jahr 1894 aus.² Föppl hatte sich bemüht, möglichst allgemeinverständlich gerade für Studenten mit wenig Vorkenntnissen zu schreiben, ohne dabei auf wissenschaftliche Strenge zu verzichten. Darüber hinaus macht er an unterschiedlichen Stellen auf offene Fragen aufmerksam, so auch auf ein physikalisches Problem bei Induktionsexperimenten. Es bezieht sich auf die gleichen experimentellen Situationen, mit denen Einstein seine erste Arbeit zur Relativitätstheorie beginnt.³ In der Maxwellschen Theorie benötigte man zwei verschiedene Gleichungen, um die induzierte Spannung in einem Leiter zu berechnen, die eine für den Fall, dass der Leiter relativ zu einem ruhenden

¹ Albert Einstein: Autobiographisches in Paul Arthur Schilpp (Hrsg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Vieweg, Braunschweig 1979. Im weiteren Text zitiert mit Autob.

² Gerald Holton: Themata. Zur Ideengeschichte der Physik. Vieweg, Braunschweig 1984 in der Reihe Facetten der Physik. Im weiteren Text zitiert mit Holton. Hier: Holton S. 71.

³ Albert Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik 17, 891 (1905).

Magnetfeld bewegt wird, die andere für den Fall, dass der Leiter ruht, während der Feldmagnet bewegt wird.

Föppl schreibt: „Wenn wir im Folgenden von den Sätzen der Kinematik über die Relativbewegung Gebrauch machen wollen, müssen wir bei dieser Sachlage mit Vorsicht verfahren. Wir dürfen es nicht a priori als feststehend ansehen, dass es z.B. gleichgültig ist, ob ein Magnet sich in der Nähe eines ruhenden elektrischen Stromkreises oder ob dieser sich bewegt, während der Magnet ruht, falls nur in beiden Fällen die Relativbewegung die gleiche ist“ (Holton S. 73 f).

Nach Einstein sollte es allerdings allein auf die Relativbewegung ankommen. Seine Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ beginnt mit dem Satz: „Dass die Elektrodynamik Maxwells – wie dieselbe gegenwärtig aufgefasst zu werden pflegt – in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt“ (Holton S. 117).

Hier wird ein wichtiger Ansatz Einsteins deutlich. Ihn stören Asymmetrien in der vorliegenden Naturbeschreibung, „welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen.“ Etwa 1919 formuliert er: „Der Gedanke, dass es sich hier um zwei wesensverschiedene Fälle handele, war mir aber unerträglich.“⁴

Ein Beispiel zum Thema Denkökonomie:

Zentrale Begriffe der Maxwellschen Theorie sind das elektrische und magnetische Feld. Es gibt wellenförmig sich ausbreitende und statische Felder. In jedem Fall üben die Felder auf elektrische Ladungen bzw. magnetische Pole *an deren Ort* elektrische bzw. magnetische Kräfte aus („Nahwirkung von Kräften“). Dieser Feldbegriff ließ sich später auch auf Gravitationswirkungen übertragen. In der Newtonschen Physik dagegen konnte das Phänomen der Massenanziehung nur über den Begriff „Fernwirkung von Kräften“ beschrieben werden. Man meinte in der Elektrodynamik allerdings, noch einen Träger für die Felder zu brauchen, den „Äther“. Dieser sollte den gesamten Raum erfüllen, die materiellen Teilchen schwimmen dann gleichsam in ihm herum. Diese Forderung nach einem Äther war notwendig, da es „den Physikern des 19. Jahrhunderts völlig absurd erschienen wäre, dem Raum selbst physikalische Funktionen bzw. Zustände zuzuschreiben!“ (Weltb. S. 142)⁵. So wie der

⁴ A. Einstein: „Grundlegende Ideen und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt“, erstmals zitiert von Holton (S. 92) aus einem unveröffentlichten Manuskript aus dem Einstein-Archiv des Princeton Institute of Advanced Study.

⁵ A. Einstein: Mein Weltbild. Ullstein Buch Nr. 65, Berlin 1957. Im weiteren Text zitiert mit Weltb.

Schall die Luft als Träger braucht, benötigen elektrische, magnetische und Gravitationsfelder den Äther.

Probleme bereiteten die vermuteten mechanischen Eigenschaften des Äthers. Wird z.B. der Äther im Innern von bewegter Materie mit dieser ganz oder teilweise mitgeführt? Fizeau (1851) und – mit größerer Genauigkeit – Hoek (1868) konnten in ihren Versuchen eine partielle Mitführung nachweisen. Die Experimente von Michelson und Morley (1887) brachten jedoch einen Widerspruch zur scheinbar durch die Versuche von Fizeau und Hoek bestätigten Form der Äthertheorie. Im Vakuum sollte es entsprechend dieser Theorie keine Mitführung geben, auf der Erdoberfläche müsste also ein Ätherwind zu spüren sein. Dieser konnte in den Versuchen von Michelson und Morley nicht nachgewiesen werden.⁶

Obwohl Einstein dieses entscheidende Experiment von Michelson und Morley wohl nicht kannte (Holton S. 78), verzichtet er in seiner ersten Relativitätsarbeit 1905 auf den Ätherbegriff.⁷ *Es muss ihm auch ohne Kenntnis dieses Experiments klar gewesen sein, dass „Felder physikalische Zustände des Raumes“ (Weltb. S. 143) sind.*

Sein Interesse an tatsächlich durchgeführten Experimenten war im Übrigen gering. Ihn fesselten mehr grundlegende physikalische Probleme und Gedankenexperimente. So konnte ihn ein unmittelbar auf seine Relativitätsarbeit von 1905 folgender, in den Annalen der Physik 1906 veröffentlichter Bericht⁸ des berühmten Göttinger Experimentalphysikers Kaufmann nicht beirren. Darin wurden Messergebnisse bekanntgegeben, die Einsteins Theorie zu widerlegen schienen und die Äthertheorie untermauerten. Erst zehn Jahre später stellte sich heraus, dass Kaufmanns Apparatur fehlerhaft war – im benutzten Vakuumsystem befand sich ein Leck. Einstein war von seinem Entwurf so überzeugt, dass er seine Publikationen fortsetzte, „als ob nichts geschehen wäre“ (Holton S. 122).

⁶ Die Versuche von Fizeau und Hoek prüfen die Theorie nur bis zur Größenordnung v/c , während die Experimente von Michelson und Morley auch Terme der Größenordnung $(v/c)^2$ überprüfen. (c : Vakuumlichtgeschwindigkeit, v z.B. bei Michelson und Morley: Geschwindigkeit der Erde relativ zum Fixsternhimmel).

⁷ Einstein schreibt (1905): „Die Einführung eines „Lichtäthers“ wird sich insofern als überflüssig erweisen, als nach der zu entwickelten Auffassung weder ein mit besonderen Eigenschaften ausgestatteter „absoluter Raum“ eingeführt, noch einem Punkt des leeren Raumes, in welchem elektromagnetische Prozesse stattfinden, ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet wird.“ (a.a.O.)

⁸ Walter Kaufmann: über die Konstitution des Elektrons. Annalen der Physik 19, 487-553, 1906. Vorbericht zum gleichen Thema im Sitzungsbericht der 4. preuß. Akademie d. Wiss. 45, S. 949 - 956, 1905. Vergl. Holton S. 122 f.

Offenbar waren ihm die Widersprüche im Bild der klassischen Physik – sie werden in den beiden folgenden Kapiteln beschrieben – viel zu fundamental, als dass ihn der Ausgang eines Experiments die neu gewonnene Erkenntnis über Raum und Zeit, die einen viel befriedigenderen Erklärungshorizont für die Physik lieferte, in Frage stellen ließ.

Während H. A. Lorentz die Äthertheorie durch Ad-hoc-Annahmen wie die Lorentz-Kontraktion den experimentellen Ergebnissen anzupassen versuchte⁹, folgert Einstein, dass der Äther keine vom Raum unterscheidbaren Eigenschaften hat und daher ein überflüssiger Begriff ist. Entsprechend der Forderung nach größtmöglicher Einfachheit einer Theorie musste der Ätherbegriff entfallen. Hierin ist der Einfluss Ernst Machs (vergl. Kapitel 1.7) zu spüren.

1.2 Zur Quantenhypothese

Nach der Vorarbeit von Boltzmann gelang es Max Planck im Jahr 1900, eine Formel für die spektrale Strahlungsdichte eines „schwarzen Körpers“ (Energie pro Zeit-, Flächen- und Frequenzeinheit, die in einen Kegel vom Öffnungswinkel 1 ausgestrahlt wird) aus dem reichlich vorliegenden experimentellen Datenmaterial abzuleiten. Aus dieser Formel ließ sich mit Hilfe der Maxwellschen Theorie die mittlere Energie eines quasi-monochromatischen Oszillators berechnen, die dieser dem Strahlungsfeld entnehmen oder an es abgeben kann.

Für hohe Temperaturen folgte „derselbe Ausdruck, den die kinetische Gastheorie für die mittlere Energie eines in einer Dimension elastisch schwingungsfähigen Massenpunktes liefert“ (Autob. S. 15). Für tiefe Temperaturen ergab sich jedoch keine Übereinstimmung. Da die Strahlungsformel empirisch belegt war, gab es für Einstein nur zwei Konsequenzen: „Die mittlere kinetische Energie des Oszillators wird entweder durch die Gastheorie falsch geliefert, was eine Widerlegung der Mechanik bedeuten würde; oder die mittlere Energie des Oszillators ergibt sich unrichtig aus der Maxwellschen Theorie, was eine Widerlegung der letzteren bedeuten würde“ (Autob. S. 16). Bei der Herleitung der Planckschen Strahlungsformel müssen Energieportionen hf (h : Plancksches Wirkungsquantum, f : Frequenz) verwendet werden, womit unterstellt wird, dass die Oszillatoren nur ganze Energieportionen

⁹ H. A. Lorentz: *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Less than that of Light*. Proceedings of the Academy of Sciences of Amsterdam 6, 1904. Diese Arbeit zeigt starke Überschneidungen mit Einsteins Relativitätsartikel, war Einstein jedoch vor der Veröffentlichung des eigenen Artikels nicht bekannt. (Holton S. 111).

(Quanten) absorbieren und emittieren können. Diese Annahme stellt einen Widerspruch zur klassischen Mechanik dar. (Sie ermöglichte Einstein jedoch 1905¹⁰ eine Deutung des Fotoeffekts, wofür ihm am 11. Dezember 1922 der Nobelpreis verliehen wurde.) Kurz nach dem Erscheinen von Plancks grundlegender Arbeit war Einstein schon klar, „dass weder die Mechanik noch die Elektrodynamik (außer in Grenzfällen) exakte Gültigkeit beanspruchen können“ (Autob. S. 19).

Ein Verständnis des aufgerissenen Problems wurde insbesondere durch Bohr in der Quantenmechanik möglich. Für Einstein bildeten die durch Plancks Arbeiten aufgerissenen Fragen zusammen mit weiteren offenen Fragen den Motor, der ihn trieb, nach einem tieferen Verständnis der Mechanik und Thermodynamik zu suchen. „Es war, wie wenn einem der Boden unter den Füßen weggezogen worden wäre, ohne dass sich irgendwo fester Grund zeigte, auf dem man hätte bauen können“ (Autob. S. 17).

1.3 Stolpersteine in der Physiklandschaft um 1900

Es gab neben den genannten noch eine Reihe weiterer Widersprüche bzw. „Ungereimtheiten“ in der Physik, wie Einstein sie vorfand. In Autobiographisches nennt er u.a. folgende Punkte:

- ▶ In der Newtonschen Mechanik verhilft das Bewegungsgesetz (Kraft = Masse · Beschleunigung, falls die Masse konstant ist) erst zu physikalischen Aussagen, wie dem Weg-Zeit-Gesetz, wenn das jeweils zuständige Kraftgesetz (z.B. bei einer geeigneten Feder das lineare Kraftgesetz $\vec{F} = D \vec{s}$, wobei \vec{F} die Kraft, D die Federhärte und \vec{s} die Ausdehnung bezeichnen) bekannt ist. Es lässt sich nicht aus der Theorie ableiten, muss also anderweitig (experimentell) gefunden werden. Dies empfand Einstein als „Willkür“ (Autob. S. 11).

Im ladungs- bzw. materiefreien Raum kann jedoch ein allgemeines Gesetz angegeben werden, aus dem das jeweils zugehörige Kraftgesetz folgt: Bei der Gravitationskraft oder auch elektrischen Kraft lässt sich eine skalare Potentialfunktion φ finden, deren Gradient die Kraft ergibt und für die im materiefreien Raum das Gesetz $\Delta\varphi = 0$ (Laplacesche Differentialgleichung) gilt. Rückblickend schreibt Einstein dazu in Autobiographisches S. 11: „Es wäre also

¹⁰ A. Einstein: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. Annalen der Physik 17, 132, 1905. Abgedruckt in D. Ter Haar (Hrsg.): Quantentheorie, Einführung und Originaltexte. Berlin 1969.

naheliegend gewesen, dies als ein Anzeichen dafür zu betrachten, dass man diese Funktion als durch ein Raumgesetz bestimmte anzusehen hätte, wodurch die Willkür in der Wahl des Kraftgesetzes beseitigt worden wäre.“ Auch hat der Begriff Fernkraft in solch einer Theorie keinen Platz mehr. Die auftretenden Kräfte sind Feldkräfte.

- ▶ In Theorien auftretende *Unsymmetrien* haben Einstein immer gestört. Dies wird an zwei Beispielen deutlich.

Im Newtonschen Bewegungsgesetz tritt die träge Masse auf, in den zugehörigen Kraftgesetzen dagegen nicht bis auf eine Ausnahme, das Gravitationsgesetz. Das war für Einstein Ausdruck einer „inneren Unsymmetrie“ der Newtonschen Theorie (Autob. S. 12).

Die Maxwellsche Theorie unterscheidet – wie in Kapitel 1.1 schon ausgeführt – bei der elektromagnetischen Induktion die beiden Fälle, Bewegung eines elektrischen Leiters relativ zu einem Magnetfeld und Bewegung eines Magneten relativ zu einem elektrischen Leiter. Diese Asymmetrie störte Einstein, da ihr die Erfahrung nicht zu entsprechen scheint.

- ▶ Weiter konnte sich Einstein nicht mit dem Dualismus je zweier nebeneinander verwendeter elementarer Begriffe, wie der „materielle Punkt im Newtonschen Sinne und das Feld als Kontinuum“ oder die „kinetische Energie“ und die „Feldenergie“ – zwei jeweils prinzipiell verschiedene Dinge – abfinden. Er gibt zu bedenken, dass auch beispielsweise das Magnetfeld einer bewegten elektrischen Ladung Trägheit repräsentiert. „Warum also nicht die ganze Trägheit?“ fragt er. Dann gibt es nur noch Feldenergie und ein Teilchen ist dann ein „Gebiet besonders großer Dichte der Feldenergie“ (Autob. S. 14).
- ▶ Die Elektrizitätslehre wurde von den meisten Physikern als Teil der Mechanik angesehen. Die elektrischen Kräfte erforderten die Einführung sogenannter „elektrischer Massen“ (mit elektrischer Ladung behaftete Massen¹¹), die im Gegensatz zu schweren Massen bei der Gravitation polare Wechselwirkungen aufeinander ausüben. Dies ließ sich nicht aus der Newtonschen Mechanik ableiten, *es stellt vielmehr etwas Neues dar*.
- ▶ Bemerkenswert ist für Einstein der Umstand, dass die Physiker halb unbemerkt sich daran gewöhnt hatten, mit elektromagnetischen Feldern „als selbständigen

¹¹ Der damals übliche und von Einstein in Autob. S. 9 benutzte Begriff spiegelt wohl den Versuch der zeitgenössischen Physiker wieder, die Elektrodynamik auf die Mechanik zurückzuführen.

Wesenheiten zu operieren“ (Autob. S. 10) und damit die Newtonsche Mechanik als Basis der Physik praktisch schon verlassen hatten.

1.4 Zu Einsteins Denkweise

Auffällig bei Einstein ist einerseits sein Beharren auf gewissen Sichtweisen der Physik, so seine Vorliebe für das Kontinuum, das Feld, für Symmetrien und Einfachheit und auf der anderen Seite seine Fähigkeit, Neues zu denken, so die Einführung eines neuen Zeit- und Raumbegriffs und als Folgerung aus dem Planckschen Strahlungsgesetz diskrete Energiequanten für das Licht.

Einsteins Denken war in starkem Maß *visuell* geprägt. Erst spät lernt er als Kind sprechen. Seine Schwester Maja schreibt im Jahr 1924 (Holton S. 96): „In der Kindheit verlief seine allgemeine Entwicklung sehr langsam und das Sprechen fiel ihm so schwer, dass seine Umgebung fürchtete, er würde es nie erlernen.“ Auch das Erlernen einer Fremdsprache machte dem Schüler Einstein große Mühe. So steht Sprache bei Einstein in der Regel erst am Ende eines Denkprozesses, wenn dieser mitgeteilt werden soll.

Das Denken selber ist ein Spiel mit *Bildern*. Einstein sagt über sich:¹² „Die Worte oder die Sprache, wie sie geschrieben oder gesprochen wird, scheinen keine Rolle in meinen Denkmechanismen zu spielen. Die psychischen Größen, die mir als Elemente des Denkens zu dienen scheinen, sind bestimmte Zeichen oder mehr oder weniger klare Bilder, die „willentlich“ reproduziert und kombiniert werden können [...] Vom psychologischen Gesichtspunkt scheint dieses kombinatorische Spiel das wesentliche Element produktiven Denkens – bevor es überhaupt irgendeine Verbindung mit logischen Konstruktionen in Worten oder anderen Zeichen gibt, die anderen mitgeteilt werden können. Die oben erwähnten Elemente sind, in meinem Fall, von visueller und einige von taktile Art.¹³ Konventionelle Worte und andere Zeichen müssen erst in einem zweiten Stadium mühsam gesucht werden, wenn das Spiel der Assoziationen hinreichend etabliert ist und willentlich reproduziert werden kann.“

¹² J Hadamard: *The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, (Princeton 1945), S. 142 f., zitiert in Holton (a.a.O.) S. 97.

¹³ Holton (a.a.O. S. 105,14) merkt dazu an: „Einstein hätte hier auch „audiovisuell“ schreiben können. Siehe seine Bemerkungen zu R. S. Shankland (*American Journal of Physics* 31, 50 1963): „Wenn ich lese, so höre ich die Worte. Schreiben fällt mir schwer und ich kommuniziere auf diese Art sehr schlecht.“

Einstein erinnert sich an zwei Schlüsselerlebnisse, die schon früh wichtige Bilder quasi in sein Denken eingepflanzt haben. Als erstes schildert er (Autob. S. 3) das Staunen über eine Kompassnadel, die sein Vater ihm mit vier oder fünf Jahren zeigte: „Dass diese Nadel in so bestimmter Weise sich benahm, passte so gar nicht in die Art des Geschehens hinein, die in der unbewussten Begriffswelt Platz finden konnte (an „Berührung“ geknüpftes Wirken). Ich erinnere mich noch jetzt – oder glaube mich zu erinnern –, dass dies Erlebnis tiefen und bleibenden Eindruck auf mich gemacht hat. Da musste etwas hinter den Dingen sein, das tief verborgen war.“

Ein zweites Schlüsselerlebnis hat der zwölfjährige Einstein beim Lesen eines kleinen Buchs über Euklidische Geometrie der Ebene. Die Klarheit und Sicherheit, mit der geometrische Aussagen bewiesen werden können – Aussagen, die für den jungen Einstein zugleich Eigenschaften von sinnlich wahrnehmbaren Gegenständen beschrieben –, machten auf ihn einen „unbeschreiblichen Eindruck“ (Autob. S. 3). Rückblickend schreibt Einstein dazu: „Wenn es so scheint, dass man durch bloßes Denken sichere Erkenntnis über Erfahrungsgegenstände erlangen könne, so beruhte dies „Wunder“ auf einem Irrtum. Aber es ist für den, der es zum ersten Mal erlebt, wunderbar genug, dass der Mensch überhaupt imstande ist, einen solchen Grad von Sicherheit und Reinheit im bloßen Denken zu erlangen, wie es uns die Griechen erstmalig in der Geometrie gezeigt haben“ (Autob. S. 4).

Eine wichtige Rolle spielen in Einsteins Theorie jeweils Gedankenexperimente. Auch der Weg zu neuen Theorien führt in entscheidendem Maß bei ihm über Gedankenexperimente. So beschäftigte ihn seit seinem 17. Lebensjahr ein Gedankenexperiment zur Natur des Lichts. Es wird in Kapitel 1.6 beschrieben. Gerade dieses Experiment liefert Einstein einen entscheidenden Anstoß zum Finden der speziellen Relativitätstheorie.

1.5 Auf der Suche nach einer neuen Physik

Alle Versuche, die Mechanik aufgrund der inzwischen bekannten neuen Tatsachen weiterzuentwickeln, scheiterten. Ansätze zu einem Ausbau der Mechanik gab es durchaus, insbesondere bei Georg Fitzgerald (Trinity College, Dublin), Hendrik Antoon Lorentz (Leiden) und Henri Poincaré (französischer Mathematiker).

Fitzgerald stellte die These auf, alle in Bewegung befindlichen Objekte verkürzen sich in ihrer Bewegungsrichtung. Ein Zollstock beispielsweise wird um so kürzer, je schneller er sich bewegt. Lorentz versuchte die geforderte Verkürzung als direktes

Ergebnis elektromagnetischer Kräfte zu erklären.¹⁴ Die Zunahme der trägen Masse mit der Geschwindigkeit, sowie die oberste Grenze möglicher Geschwindigkeiten, mit der Massen bewegt werden können, nämlich die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c , waren ebenfalls bekannt. Selbst eine veränderliche sogenannte „lokale Zeitkoordinate“ wurde schon von Lorentz 1895 eingeführt. Man fasste sie jedoch als unphysikalische, rein mathematische Koordinate auf. Poincaré (1900) und Hasenöhl (1904) trafen für die elektromagnetische Strahlung auf eine Äquivalenz von Masse und Energie.¹⁵

Poincaré formuliert 1904 (auf einem Kongress der Künste und Wissenschaften in St. Louis): „Vielleicht sollten wir eine ganz neue Mechanik konstruieren, von der wir nur einen flüchtigen Blick erhaschen können und wo, wenn die träge Masse mit der Geschwindigkeit zunimmt, die Lichtgeschwindigkeit die oberste Grenze darstellen wird.“ Die neuen Vorstellungen sollten jedoch in die bestehenden Grundbegriffe eingefügt werden: „Und bis jetzt beweist noch nichts, dass diese Grundbegriffe nicht siegreich und intakt aus dem Kampf hervorgehen werden.“¹⁶

Die neue Mechanik sollte also aus der alten unter Berücksichtigung aller bekannten neuen Tatsachen konstruiert werden. Dazu Einstein (Autob. S. 19 f.): „*Nach und nach verzweifelte ich an der Möglichkeit, die wahren Gesetze durch auf bekannte Tatsachen sich stützende konstruktive Bemühungen herauszufinden. Je länger und verzweifelter ich mich bemühte, desto mehr kam ich zu der Überzeugung, dass nur die Auffindung eines allgemeinen formalen Prinzips uns zu gesicherten Ergebnissen führen könnte.*“

1.6 Aufstellen der speziellen Relativitätstheorie

Das zunächst zu lösende und wohl schwerste Problem bestand für Einstein im Auffinden eines geeigneten Prinzips: „Wie aber ein solches allgemeines Prinzip finden? Ein solches Prinzip ergab sich nach zehn Jahren Nachdenkens aus einem Paradoxon, auf das ich schon mit 16 Jahren gestoßen bin: Wenn ich einem

¹⁴ Seine Erklärung: Bewegen sich elektrisch geladene Teilchen durch den Äther, so bewirken die dabei erzeugten elektromagnetischen Kräfte eine Störung des vorher vorhandenen Gleichgewichts. Eine neue Zuordnung der Partikelchen wird nötig, der Körper verformt sich. (Ronald W. Clark: Albert Einstein, Leben und Werk, Bechtle Verlag, Esslingen, 1974, S. 62.)

¹⁵ Poincaré fand für den Zusammenhang zwischen Energiestromdichte (Pointing-Vektor) \vec{S} und Impulsdichte \vec{g} des elektrischen Feldes die Beziehung $\vec{S} = c^2 \vec{g}$. Sie kann in die Gleichung $E = mc^2$ umgerechnet werden.

¹⁶ https://en.wikisource.org/wiki/The_Principles_of_Mathematical_Physics, abgerufen am 13. 3. 2018.

Lichtstrahl naheile mit der Geschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum), so sollte ich einen Lichtstrahl als ruhendes, räumlich oszillatorisches, elektromagnetisches Feld wahrnehmen. So etwas scheint es aber nicht zu geben, weder aufgrund der Erfahrung noch gemäß den Maxwellschen Gleichungen.¹⁷ Intuitiv klar erschien es mir von vornherein, dass von einem solchen Beobachter aus beurteilt alles sich nach denselben Gesetzen abspielen müsse wie für einen relativ zur Erde ruhenden Beobachter. Denn wie sollte der erste Beobachter wissen, bzw. konstatieren können, dass er sich im Zustand rascher gleichförmiger Bewegung befindet?“ (Autob. S. 20) Es bedurfte „nur“ noch der Einsicht, dass auch die Zeit eine relative Größe ist, dass also beim Übergang vom ruhenden Koordinatensystem zu einem gegenüber diesem mit konstanter Geschwindigkeit bewegten auch die Zeit transformiert werden muss, nicht nur jede Ortskoordinate.

Einstein stellt die beiden Prinzipien auf:

1. Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit
2. Unabhängigkeit (Kovarianz, Forminvarianz) der Gesetze von der Wahl des Inertialsystems (spezielles Relativitätsprinzip)

In der klassischen Physik waren diese beiden Prinzipien nicht miteinander vereinbar, da man beim Wechsel von Inertialsystemen zur Umrechnung der Größen die Galilei-Transformation benutzte. Die Vereinbarkeit kann aber erreicht werden, wenn für die Umrechnung von Koordinaten und Zeiten die „Lorentz-Transformation“ zugrunde gelegt wird. Insbesondere gilt dann Prinzip 2 auch für die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, d.h. Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom gewählten Koordinatensystem.

Aus den beiden Prinzipien folgen zum einen im Ansatz schon bekannte Eigenschaften, so die Erkenntnis, dass die Maxwellschen Gleichungen eine

¹⁷ Dies macht Einsteins hohe Wertschätzung der Maxwellschen Gleichungen deutlich: „Die spezielle Relativitätstheorie verdankt ihre Entstehung den Maxwellschen Gleichungen des elektromagnetischen Feldes“ (Autob. S. 23) und das obwohl die Maxwellschen Gleichungen den energetischen Eigenschaften der Strahlung nicht gerecht werden (Quantenerscheinungen). Einstein zur Thermodynamik: „Es ist die einzige physikalische Theorie allgemeinen Inhalts, von der ich überzeugt bin, dass sie im Rahmen der Anwendbarkeit ihrer Grundbegriffe niemals umgestoßen werden wird“ (Autob. S. 12). In der Tat besitzen die Maxwellschen Gleichungen eine höhere theoretische Entwicklungsstufe als die Newtonschen, denn sie sind forminvariant gegenüber der Lorentz-Transformation, während dies für die Newtonschen Gleichungen nur im Grenzfall sehr kleiner Geschwindigkeiten verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit gilt.

kovariante Form besitzen¹⁸, die Lorentzkontraktion von Strecken und die Abhängigkeit der Impulsmasse von ihrer Geschwindigkeit. Aber es folgen auch so neue Einsichten wie die Zeitdilatation und die global geltende Äquivalenz von Masse und Energie. Dies macht neben der Brisanz der neuen Erkenntnisse – alle konnten im Laufe der Zeit eindeutig experimentell bestätigt werden – die Stärken einer auf Prinzipien beruhenden Theorie aus: Recht unerwartete Folgerungen sowie eine klare, knappe Darstellung der Zusammenhänge wird möglich. Darin unterscheidet sich Einsteins Arbeit von 1905 deutlich von den übrigen und dies zeigt auch seine eigenständige Denkarbeit.

1.7 Das Machsche Prinzip

Großen Einfluss auf den Studenten Einstein hatte Ernst Mach, insbesondere durch seine historisch-kritische Darstellung der Mechanik. Er forderte, bei der Darstellung wissenschaftlicher Sachverhalte alle „metaphysischen“ Elemente zu vermeiden – modern ausgedrückt, nur von „prinzipiell beobachtbaren“ Größen auszugehen. Folgerichtig kritisierte Mach die von Newton eingeführten Begriffe des absoluten Raums und der absoluten Zeit, denen, wie Newton sagt, „ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand“ physikalische Bedeutung zukommt.

Mach hat die Hypothese eingeführt – sie wurde später von Einstein „Machsches Prinzip“ genannt –, dass es „in Wahrheit“ eben nicht Newtons absoluter Raum, sondern die im Raum eingestreuten „fernen Massen“ seien, welche beispielsweise die Ebene des Foucaultschen Pendels festzuhalten suchen und den Ursprung der Trägheitskräfte bilden.¹⁹

Mach war der Überzeugung, dass es jeweils einen direkten Weg von den Erfahrungen zu den Begriffen und Grundgesetzen der Physik gibt. Gute Theorien geben ökonomisch geordnete Erfahrung wieder und sollten den begrifflich

¹⁸ Dies wurde von Lorentz 1895 durch eine modifizierte Galilei-Transformation theoretisch begründet. Unter dieser Transformation haben die Maxwellschen Gleichungen bis zur ersten Ordnung von $\frac{v}{c}$ nach der Transformation die gleich Form wie vorher. (Vergl. Arthur I. Keller: Zur Geschichte der speziellen Relativitätstheorie in P. C. Aichelburg und R. U. Sexl (Hrsg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik. Vieweg, Braunschweig 1979, S. 93.)

¹⁹ Helmut Hönl: Albert Einstein und Ernst Mach. Das Machsche Prinzip und die Krise des logischen Positivismus. Phys. Blätter, 11, 1979, S. 488. Für Newton war der Begriff „absoluter Raum“ notwendig, da gegen ihn die Beschleunigungen zu messen waren. Das Machsche Prinzip lässt sich nur aufrechterhalten für ein endliches Weltall. Aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgen jedoch zwei Möglichkeiten, Endlichkeit und Unendlichkeit. Dann könnte dem Machschen Prinzip eine regulative Funktion zukommen, die das endliche Weltall als wahrscheinlicher dem unendlichen vorzieht.

einfachsten Ausdruck von Tatsachen bilden. Dass es solch einen direkten Weg von den Erfahrungen zur Theorie gibt, hat Einstein später entschieden bestritten. Er führt als Gegenbeispiel die Newtonsche Mechanik und die allgemeine Relativitätstheorie an, die beide „mit der Erfahrung weitgehend übereinstimmen“, obwohl sie „wesentlich verschiedene Grundlagen“ besitzen. Dies ist auch ein Hinweis auf den vorläufigen Charakter jeder Theorie.

KONSTRUKTIVE THEORIEN UND PRINZIPIENTHEORIEN

(EINE ERKLÄRUNG NACH A. EINSTEIN)

Konstruktive Theorien (Synthetische Methode, induktive Methode)

(Weltb. S. 127 f.)

Aus einem relativ einfachen zugrunde gelegten Mechanismus wird ein Bild der komplexeren Erscheinungen konstruiert.

Beispiel: Kinetische Gastheorie

Aus der Hypothese der Molekularbewegung wird ein Bild für die mechanischen, thermischen und Diffusionsvorgänge konstruiert.

Hypothetische Konstruktionselemente – durch experimentelle Tatsachen untermauert – ermöglichen also über erlaubte Verknüpfungsschritte, die logisch und experimentell abgesichert sind, die Konstruktion einer Theorie.

Prinziptheorie (Analytische Methode, deduktive Methode)

(Weltb. S. 128)

Ausgangspunkt und Basis einer Prinziptheorie bilden empirisch gefundene, allgemeine Eigenschaften der Naturvorgänge, Prinzipien, aus denen dann mathematisch formulierte Kriterien folgen, denen die einzelnen Vorgänge bzw. deren theoretische Bilder zu genügen haben.

Beispiel: Thermodynamik

Aus dem Prinzip (allgemeines Erfahrungsergebnis), dass ein Perpetuum mobile unmöglich sei, werden auf analytischem Weg Gesetze ermittelt, denen die einzelnen Vorgänge genügen müssen.

2. Zur Entstehung einer Prinzipientheorie

2.1 Einsteins Modell einer Prinzipientheorie

Aufgabe der Wissenschaft ist es, „die chaotische Vielfalt unserer Sinneserfahrungen in ein logisch einheitliches Gedankensystem einzubauen“ (Einstein, zit. von G. Holton²⁰). „In diesem System müssen einzelne Erfahrungen mit der theoretischen Struktur so in Beziehung gesetzt werden, dass das Ergebnis eindeutig und überzeugend ist.“ (Einstein, Theorienb. S. 115)

Wie gelangt man aber von den unmittelbaren Sinneserfahrungen zu solch einem theoretischen System? Dazu Einstein in einem Brief vom 7. Mai 1952 an seinen Freund Solovine (vergl. Abb. 1): „1. Die E (Erlebnisse) sind uns gegeben. 2. A sind die Axiome, aus denen wir Folgerungen ziehen. Psychologisch beruhen die A auf E. Es gibt aber keinen logischen Weg von den E zu A, sondern nur einen intuitiven (psychologischen) Zusammenhang, der immer nur „auf Widerruf“ ist.“ Statt eines Weges von den Erfahrungen E zu den Axiomen A gibt es nur einen Sprung. Dies wird in Einsteins Zeichnung (Abb. 1) durch einen Bogen dargestellt, der zwar bei den Axiomen A endet, aber parallel zur die Erlebnisse E symbolisierenden Geraden beginnt.

Ist das Aufstellen eines Axiomensystems gelungen, so folgen die Einzelaussagen S (gefolgerte Sätze) durch reine Deduktion: „3. Aus A werden auf logischem Wege Einzel-Aussagen S abgeleitet, welche Ableitungen den Anspruch auf Richtigkeit erheben können.“ (Abb. 1) Diese Aussagen müssen an den Erlebnissen überprüft werden: „4. Die S werden mit den E in Beziehung gebracht (Prüfung an der Erfahrung). Diese Prozedur gehört genau betrachtet ebenfalls der extralogischen (intuitiven) Sphäre an, weil die Beziehung der in den S auftretenden Begriffe zu den Erlebnissen E nicht logischer Natur sind. Diese Beziehung der S zu den E ist aber (pragmatisch) viel weniger unsicher als die Beziehung der A zu den E. (Beispiel der Begriff Hund und die entsprechenden Erlebnisse). Wäre solches Entsprechen nicht mit großer Sicherheit erzielbar, (obwohl nicht logisch fassbar), so würde die logische Maschinerie für das „Begreifen der Wirklichkeit“ völlig wertlos (Beispiel Theologie). – Die Grundessenz ist der ewig problematische Zusammenhang alles Gedanklichen mit dem Erlebbar (Sinnes-Erlebnisse).“ (Abb. 1)

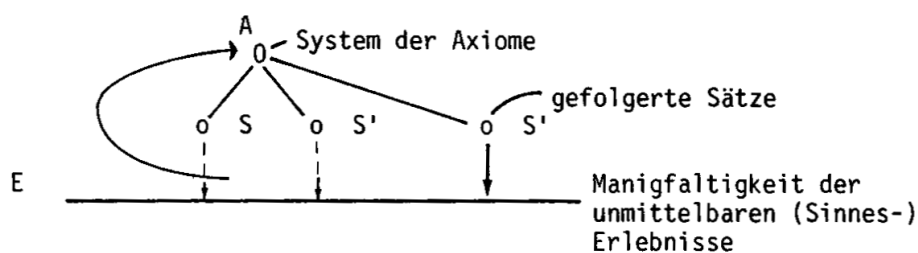
²⁰ Gerhard Holton: Einsteins Methoden zur Theorienbildung. In P. C. Aichelburg und R. U. Sexl (Hrsg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1979, S. 115. Im Folgenden zit. mit Theorienb.

Solovine, ein guter Freund Einsteins, soll einen Artikel von Einstein ins Französische übersetzen. Er hat dabei Verständnisschwierigkeiten und schreibt am 25. April 1952 an Einstein. In diesem Brief bittet er, „einen Absatz genau zu erklären, der nicht ganz klar ist. Du schreibst: Die Rechtfertigung (Wahrheitsgehalt) des Systems beruht auf dem Beweis der Nützlichkeit der resultierenden Theoreme auf der Grundlage der Sinneserfahrung, wobei die Beziehung der letzteren zu den ersteren nur intuitiv verstanden werden kann [...].“*)

Antwort von Einstein am 7. Mai 1952:

„Lieber Solo! In Ihrem Brief geben Sie mir's für zwei Sünden auf den Popo. [...] Mit der erkenntnistheoretischen Sache haben Sie mich gründlich missverstanden. Wahrscheinlich habe ich mich schlecht ausgedrückt [...].

Ich sehe die Sache schematisch so



1. Die E (Erlebnisse) sind uns gegeben.
2. A sind die Axiome, aus denen wir Folgerungen ziehen. Psychologisch beruhen die A auf E. Es gibt aber keinen logischen Weg von den E zu A, sondern nur einen intuitiven (psychologischen) Zusammenhang, der immer „auf Widerruf ist“.
3. Aus A werden auf logischem Wege Einzel-Aussagen S abgeleitet, welche Ableitungen den Anspruch auf Richtigkeit erheben können.
4. Die S werden mit den E in Beziehung gebracht (Prüfung an der Erfahrung). Diese Prozedur gehört genau betrachtet ebenfalls der extralogischen (intuitiven) Sphäre an, weil die Beziehung der in den S auftretenden Begriffe zu den Erlebnissen E nicht logischer Natur sind. Diese Beziehung der S zu den E ist aber (pragmatisch) viel weniger unsicher als die Beziehung der A zu den E. (Beispiel der Begriff Hund und die entsprechenden Erlebnisse). Wäre solches Entsprechen nicht mit großer Sicherheit erzielbar, (obwohl nicht logisch fassbar), so würde die logische Maschinerie für das „Begreifen der Wirklichkeit“ völlig wertlos (Beispiel Theologie). – Die Grundessenz ist der ewig problematische Zusammenhang alles Gedanklichen mit dem Erlebbar (Sinnes-Erlebnisse).“

* Zit. nach G. Holton: Einsteins Methoden zur Theorienbildung in: P. C. Aichelburg und R. U. Sexl (Hrsg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik, Vieweg Braunschweig 1979, S. 112 ff.

Abb. 1

2.2 Zwei Teilaufgaben für den Theoretiker

Die Aufgabe des Theoretikers besteht demnach aus zwei Teilen:

- I. Die Axiome (Prinzipien) aufspüren und
- II. aus diesen Axiomen (Prinzipien) ableitbare Folgerungen entwickeln.

1. Teilaufgabe:

Die Methode zur Bewältigung der ersten Aufgabe kann nicht erlernt werden. Der Forscher muss der Natur die allgemeinen Prinzipien „gleichsam ablauschen, indem er an größeren Komplexen von Erfahrungstatsachen gewisse allgemeine Züge erschaut, die sich scharf formulieren lassen.“ (Weltb. S. 111) „Zu diesen elementaren Gesetzen führt kein logischer Weg, sondern nur die auf Einfühlung in die Erfahrung sich stützende Intuition.“ (Weltb. S. 109) Einsteins Auffassung steht hier im krassen Widerspruch zu Ernst Mach, der überzeugt war, dass ein direkter Weg von den Erfahrungen zu den Grundbegriffen und Grundgesetzen der Physik führt, der durch logische Analyse des Beobachteten, durch Induktion, gefunden werden kann.

Auch Newton war der Meinung, er benutze nur die Erscheinungen zum Aufstellen seiner Mechanik: „Hypotheses non fingo. (Hypothesen erfinde ich nicht) Alles nämlich, was nicht aus den Erscheinungen folgt, ist eine Hypothese, und Hypothesen, seien sie nun metaphysische oder physische, mechanische oder diejenigen der verborgenen Eigenschaften, dürfen nicht in die Experimentalphysik aufgenommen werden.“²¹

Newtons Begriffe des „absoluten Raums“ und der „Fernkräfte“ entsprechen jedoch keiner Erfahrung. Newton selber muss darüber Unbehagen gespürt haben, der Erfolg seiner Theorie hat ihn und die Physiker des 18. und 19. Jahrhunderts vermutlich daran gehindert, den „fiktiven Charakter der Grundlagen seines Systems zu erkennen.“ (Weltb. S. 116)

Für Einstein wird der fiktive Charakter der Grundlagen einer Theorie insbesondere daran deutlich, dass mit der speziellen Relativitätstheorie und der Newtonschen Mechanik „zwei wesentlich verschiedene Grundlagen aufgezeigt werden können, die mit der Erfahrung weitgehend übereinstimmen.“²² Es wird dadurch jedenfalls bewiesen, dass jeder Versuch einer Ableitung der Grundbegriffe und Grundgesetze

²¹ Philosophia naturalis principia mathematica 1686 übersetzt in: E. Hunger: Die naturwissenschaftliche Erkenntnis I, Studienausgabe. Vieweg Braunschweig 1966, S. 19.

²² Die spezielle Relativitätstheorie bietet jedoch ein Fundament, das „dem einschlägigen Kreis von Erfahrungstatsachen sogar in befriedigenderer und vollkommenerer Weise gerecht werden konnte, als es mit Newtons Fundament möglich war.“ (Weltb. S. 116)

der Mechanik aus elementaren Erfahrungen zum Scheitern verurteilt ist.“ (Weltb. S. 116)

Wenn die Axiome einer Theorie im logischen Sinne „freie Erfindungen des menschlichen Geistes“ (Weltb. S. 115) sind, können dann die so entwickelten Theorien in irgend einer Weise eine Sicherheit der Erkenntnis bieten und müsste es nicht eine Vielzahl konkurrierender Theorien geben? Hierzu verweist Einstein auf die herausragende Bedeutung der Mathematik. Die Axiome der Mathematik – darüber besteht Übereinstimmung – sind „freie Schöpfungen des menschlichen Geistes“ (Weltb. S. 120). Die Gegenstände der Mathematik werden erst implizit durch die Axiome definiert. Die Verbindung zur Naturwissenschaft besteht in dem „Vertrauen [...], dass die Natur die Realisierung des mathematisch denkbar Einfachsten ist“.²³ (Weltb. S. 116) Dies wird gestützt durch die Erfahrung, dass „von allen denkbaren Konstruktionen eine einzige sich jeweils als unbedingt überlegen über alle anderen erwies. Dadurch bestimmt die Welt der Wahrnehmungen das theoretische System praktisch eindeutig.“ (Weltb. S. 109)

Der schöpferische Akt beim Aufstellen der Prinzipien einer naturwissenschaftlichen Theorie besteht aus zwei Teilen, dem Finden eines geeigneten Begriffssystems und dem Formulieren eines Axiomensystems, das die Beziehungen zwischen den „primären Begriffen“ (Theorienb. S. 118) aussagt.

2. Teilaufgabe:

Die vom Theoretiker zu leistende zweite Aufgabe nach dem Aufspüren der Prinzipien, das Entwickeln der aus den Prinzipien fließenden Folgerungen, ist im Gegensatz zum Auffinden der Prinzipien erlernbar. Es ist dazu meist großer Fleiß und ein hinreichender Verstand erforderlich, da „große und schwierige Denkarbeit“ (Weltb. S. 144) geleistet werden muss.

Die so gewonnenen Folgerungen (Sätze) liefern oft „ungeahnte Zusammenhänge [...], welche über das Tatsachengebiet, an dem die Prinzipie gewonnen sind, weit hinausreichen.“ (Weltb. S. 111) So führen die beiden Prinzipien der speziellen

²³ Einstein in Weltb. S. 117: „In einem gewissen Sinne halte ich es also für wahr, dass dem reinen Denken das Erfassen des Wirklichen möglich sei, wie es die Alten geträumt haben.“

Leibniz: „[...] dass, wie auch Gott die Welt geschaffen hätte, sie immer regelmäßig gewesen wäre und eine bestimmte Ordnung gehabt hätte. Faktisch hat Gott diejenige gewählt, die am vollkommensten ist, d.h. diejenige, die gleichzeitig die größte Einfachheit in den Voraussetzungen und den größten Reichtum in den Erscheinungen aufweist [...].“ *Metaphysische Abhandlungen* (1686) zitiert in E. Hunger: *Die naturwissenschaftliche Erkenntnis I*, Studienausgabe, Vieweg Braunschweig 1966, S. 83.

Relativitätstheorie (vergl. 1.6) u.a. zur Erkenntnis der Zeitdilatation und der Äquivalenz von Masse und Energie.

Die aus den Prinzipien gefolgerten Sätze müssen eindeutig mit den Erfahrungen in Beziehung gebracht werden können. Dies verdeutlichen die Pfeile von den S zur Geraden E in Einsteins Zeichnung (Abb. 1). Zwischen dem Ableiten der Sätze und deren experimenteller Bestätigung kann manchmal sehr viel Zeit vergehen (vergl. dazu Kap. 2.5). Erst durch die Forderung nach einer eindeutigen Zuordnung der Begriffe sowie ihrer Verknüpfungen zu den Erfahrungen gewinnt eine Theorie an naturwissenschaftlicher Aussagekraft. Dazu Einstein (1916): „Begriffe haben nach dem gesagten nur Sinn, sofern die Dinge aufgezeigt werden können, auf die sie sich beziehen, sowie die Gesichtspunkte, gemäß welchen sie diesen Dingen zugeordnet sind.“ (Theorienb. S. 120) Die Zuordnung von Begriffen und Erfahrungen ist nach Einstein (Abb. 1) jedoch weniger problematisch als die Beziehung der Prinzipien zu den Erlebnissen. Er zeigt dies am Beispiel des Begriffs Hund. Schon kleine Kinder vermögen eine sichere Zuordnung dieses Begriffs zu konkreten Erfahrungen zu leisten.

2.3 Das Verhältnis von Ratio und Erfahrung in einer Theorie

Das Verhältnis von Ratio und Erfahrung in einer physikalischen Theorie verdeutlicht noch einmal das folgende Zitat von Einstein: „Die Ratio gibt den Aufbau des Systems; die Erfahrungsinhalte und ihre gegenseitigen Beziehungen sollen durch die Folgesätze der Theorie ihre Darstellung finden. In der Möglichkeit einer solchen Darstellung allein liegt der Wert und die Berechtigung des ganzen Systems und im Besonderen auch der ihm zugrunde liegenden Begriffe und Grundgesetze. Im Übrigen sind diese freie Erfindungen des menschlichen Geistes, die sich weder durch die Natur des menschlichen Geistes noch sonst in irgendeiner Weise a priori rechtfertigen lassen.“ (Weltb. S. 115)

2.4 Zwei Kriterien für die Güte einer physikalischen Theorie

In Autobiographisches nennt Einstein zwei Kriterien, nach denen physikalische Theorien beurteilt werden können, es ist dies zum einen die „äußere Bewährung“ und zum anderen die „innere Vollkommenheit“.

Der erste dieser Gesichtspunkte hat es „mit der Bewährung der theoretischen Grundlagen an einem vorliegenden Erfahrungsmaterial zu tun“: „Die Theorie darf Erfahrungstatsachen nicht widersprechen.“ (Autob. S. 8) Wichtiger noch, als

Übereinstimmung von Beobachtungen mit der Theorie in möglichst vielen unterschiedlich konzipierten Experimenten zu erreichen, sind wiederholte und beharrliche Versuche, die Theorie zu widerlegen. Die Feuerprobe einer Theorie wird erst durch Falsifizierungsversuche bestanden. So hat Einstein immer wieder neue, raffinierte Gedankenexperimente zur Widerlegung der von ihm ungeliebten Quantentheorie präsentiert.

Zum zweiten Kriterium, der inneren Vollkommenheit einer Theorie formuliert Einstein: „Der zweite Gesichtspunkt hat nichts zu schaffen mit der Beziehung zu dem Beobachtungsmaterial, sondern mit den Prämissen der Theorie selbst, mit dem, was man kurz aber undeutlich als „Natürlichkeit“ oder „logische Einfachheit“ der Prämissen (der Grundbegriffe und zugrunde gelegten Beziehungen zwischen diesen) bezeichnen kann. Dieser Gesichtspunkt, dessen exakte Formulierung auf große Schwierigkeiten stößt, hat von jeher bei der Wahl und Wertung der Theorien eine wichtige Rolle gespielt. Es handelt sich dabei nicht einfach um eine Art Abzählung der logisch unabhängigen Prämissen (wenn eine solche überhaupt eindeutig möglich wäre), sondern um eine Art gegenseitiger Abwägung inkommensurabler Qualitäten. Ferner ist von Theorien mit gleich „einfacher“ Grundlage diejenige als die überlegene zu betrachten, welche die an sich möglichen Qualitäten von Systemen am stärksten einschränkt (d.h. die bestimmtesten Aussagen enthält).“ (Autob. S. 8)

So unscharf auch nach Einsteins Meinung die Erklärung des Begriffs der inneren Vollkommenheit ist, in der Praxis besteht „zwischen den „Auguren“ meist Übereinstimmung [...] bezüglich der Beurteilung.“ (Autob. S. 9) Es ist mehr ein „Wunderglaube“ (Theorienb. S. 127) denn eine beweisbare Annahme, dass jeweils die aussagekräftigsten Theorien zugleich größtmögliche Einfachheit besitzen. Die Entwicklung der Wissenschaft hat jedoch diese Annahme, so Einstein, „in erstaunlichem Maße bestätigt.“ (Theorienb. S. 127)

2.5 Ausbau oder Neubau einer Theorie

In der Regel wird versucht, eine bestehende physikalische Theorie an neue experimentelle Befunde dadurch anzupassen, dass man sie ausbaut, erweitert, ohne das Bestehende zu verändern. Dies ist meist eine legitime und erfolgreiche Methode („normale“ Phase einer Theorie). Es kann jedoch vorkommen, dass ein solcher Ausbau nicht mehr zum gewünschten Erfolg führt. Dies zu erkennen bedarf eines Gespürs, einer „guten Nase“. Dann hilft nur eine tiefgreifende Änderung der gesamten Theorie, ein Neubau („revolutionäre“ Phase).

Die Lorentzsche Elektronentheorie entging eine Weile lang nur dadurch einer Falsifikation, dass zusätzliche Annahmen eingeführt wurden (z.B. die Längenkontraktion²⁴). Erst die spezielle Relativitätstheorie gab einen befriedigenden Erklärungsrahmen. Große Theorien gelingen kaum im ersten Durchgang. Sie erfordern eine Reihe von Anpassungsversuchen. In „Mein Weltbild“ (S. 134) schildert Einstein ein von 1905 bis 1912 dauerndes Ringen, das schließlich in die Aufstellung der Prinzipien der allgemeinen Relativitätstheorie einmündete. Befriedigend gelöst werden konnte das Problem der prinzipiellen Gleichwertigkeit aller Koordinatensysteme (es sollte keine Rolle spielen, ob sie sich relativ zueinander mit einer konstanten Geschwindigkeit oder beliebigen Beschleunigung bewegen) in Bezug auf das Gravitationsgesetz erst durch den Neubau einer Theorie, bekanntlich der allgemeinen Relativitätstheorie.

Der Preis für die dabei gewonnene Einfachheit und Vollkommenheit ist jedoch, dass „die Ausgangshypothesen [...] immer abstrakter, erlebnisferner werden“ und „der gedankliche Weg von den Axiomen zu den Erlebnisinhalten bzw. zu den prüfbareren Konsequenzen ein immer längerer, subtilerer“ (Weltb. S. 144) wird. Erst 1919 wurde zum ersten Mal eine aus der 1915²⁵ formulierten allgemeinen Relativitätstheorie folgende Konsequenz mit Erfolg nachgeprüft (Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne, nachgewiesen während einer totalen Sonnenfinsternis). Es dauerte noch einmal 60 Jahre bis eine auch quantitativ befriedigende Bestätigung 1975 von Fomalund und Sramek über ein Radiointerferometer gewonnen wurde.²⁶

Die allgemeine Relativitätstheorie ist auf breiter Basis Einsteins Leistung und es bleibt fraglich, ob sie ohne Einstein bis heute gefunden worden wäre. Einstein verweist gerade für diese Theorie in Autobiographisches (S. 33) auf die erkenntnistheoretische Bedeutung des zugrunde liegenden Prinzips: „Noch etwas anderes habe ich

²⁴ Erst 1923 wurde durch ein Experiment von Kennedy und Thorndike (Michelson-Experiment mit unterschiedlich langen Interferenzarmen) gezeigt, dass die alte Theorie auch durch Lorentz' Zusatzannahme der Lorentzkontraktion nicht zu retten war. (Es hätte in diesem Experiment zu einer Verschiebung der Interferenzstreifen durch die sich ändernde Geschwindigkeit des Labors gegenüber dem Fixsternhimmel kommen müssen. Trotz ausreichend langer Beobachtungszeit und Messgenauigkeit konnte jedoch keine Verschiebung beobachtet werden.)

²⁵ Am 28. November teilte Einstein erstmalig die (bis auf das kosmologische Glied) richtige Formel der allgemeinen Relativitätstheorie in einem Brief an Sommerfeld mit.

²⁶ Das benutzte Radiointerferometer ermöglichte mit einer Basislänge von 35 km sehr genaue Winkelmessungen. Es wurde die Änderung der gegenseitigen Lage dreier auf einer Gerade liegenden Radioquellen beobachtet, wenn eine davon ihre Wellen nahe am Sonnenrand entlang sendet und danach verdeckt wird. Statt der erwarteten Ablenkung von 1,75" wurde eine von 1,761" \pm 0,016" gemessen, mit 0,6 % Abweichung eine sehr gute Bestätigung des theoretischen Wertes. (Bergmann/Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. III Optik, 7. Aufl. Walter de Gruyter, Berlin, New York 1978, S. 966 und E. 8. Fomalund, R. A. Sramek: Phys. Rev. Lett. 36, 1475 (1976).)

aus der Gravitationstheorie gelernt: Eine noch so umfangreiche Sammlung empirischer Fakten kann nicht zur Aufstellung so verwickelter Gleichungen führen. Eine Theorie kann an der Erfahrung geprüft werden, aber es gibt keinen Weg von der Erfahrung zur Aufstellung einer Theorie. Gleichungen von solcher Kompliziertheit wie die Gleichungen des Gravitationsfeldes können nur dadurch gefunden werden, dass eine logisch einfache mathematische Bedingung gefunden wird, welche die Gleichungen nahezu oder vollständig determiniert. Hat man aber jene hinreichend starken formalen Bedingungen, so braucht man nur wenig Tatsachenwissen für die Aufstellung der Theorie: bei den Gravitationsgleichungen ist es die Vierdimensionalität und der symmetrische Tensor als Ausdruck für die Raumstrukturen, welche zusammen mit der Invarianz bezüglich der kontinuierlichen Transformationsgruppe die Gleichungen praktisch vollkommen determinieren.“ Genau genommen gibt es noch unendlich viele mögliche Feldgleichungen, die den angegebenen Bedingungen genügen. Einsteins Gleichungen sind jedoch die einfachsten aller möglichen und dadurch ausgezeichnet.

Auch nach Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie bleiben bis heute eine ganze Reihe offener Fragen zurück.²⁷ Dazu C. F. von Weizsäcker²⁸: „Philosophisch aber muss man bedenken, dass der Physik seither nicht einmal eine deutliche Formulierung dafür gelungen ist, was der Kern der Frage ist, die hier unbeantwortet auf uns wartet. Uns fehlt hier – wie einst vor der speziellen Relativitätstheorie – nicht die Antwort sondern die Einfachheit der Fragestellung.“

2.6 Vorurteile hemmen oder fördern die Theorienbildung

Wenn es wahr ist, dass die Basis einer neuen Theorie – die Axiome, die Prinzipien – nur über ein intuitives Erfassen der inneren Zusammenhänge gewonnen werden kann, dann ist die Entstehung einer Theorie eng verbunden mit der Biographie des Forschers und mit der Geistesgeschichte des ihn umgebenden Kulturkreises. Dies macht Einstein an Machs und Ostwalds Schwierigkeiten deutlich, die Realität von Atomen anzuerkennen: „Die Abneigung dieser Forscher gegen die Atomtheorie ist ohne Zweifel auf ihre positivistische Einstellung zurückzuführen. Es ist dies ein interessantes Beispiel dafür, dass selbst Forscher von kühnem Geist und feinem Instinkt durch philosophische Vorurteile für die Interpretation von Tatsachen

²⁷ C. F. von Weizsäcker: Einsteins Bedeutung in Physik, Philosophie und Politik in P. C. Aichelburg und R. U. Sexl (Hrsg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik. Vieweg Braunschweig 1979, S. 169 f.

²⁸ a.a.O. S. 170.

gehemmt werden können. Das Vorurteil – welches seither keineswegs ausgestorben ist – liegt in dem Glauben, dass die Tatsachen allein ohne freie begriffliche Konstruktion wissenschaftliche Erkenntnis liefern könnten und sollten.“ (Autob. S. 18)

Ist es Einstein nicht selber ähnlich ergangen mit seiner grundsätzlichen Skepsis gegenüber der Quantentheorie? Die Quantentheorie arbeitet mit Funktionen, die nicht mehr ein direktes Abbild der Wirklichkeit sind, sondern die es nur gestatten, Wahrscheinlichkeiten dafür zu bestimmen, „atomistische Gebilde [...] im Fall einer Messung an einem gewissen Ort bzw. in einem gewissen Bewegungszustand vorzufinden.“ (Weltb. S. 118) Dazu Einstein: „Ich kann nicht umhin, zu bekennen, dass ich dieser Interpretation nur eine vorübergehende Bedeutung beimesse. Ich glaube noch an die Möglichkeit eines Modells der Wirklichkeit, d.h. einer Theorie, die die Dinge selbst und nicht nur die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens darstellt.“ (Weltb. S. 118)

Zur angesprochenen Kontroverse zwischen der Bohrschen Schule und Einstein meint C. F. von Weizsäcker: „Ich vermute, dass diese Fragen philosophisch erst voll geklärt werden können durch die Analyse des wesentlich zeitlichen Charakters aller Erkenntnis. Einsteins Realitätsbegriff orientiert sich am Phänomen der Faktizität, d.h. der Vergangenheit, der Wahrscheinlichkeitsbegriff der Quantentheorie aber am Phänomen der Möglichkeit, d.h. der Zukunft.“ (Weizsäcker a.a.O. S. 173)

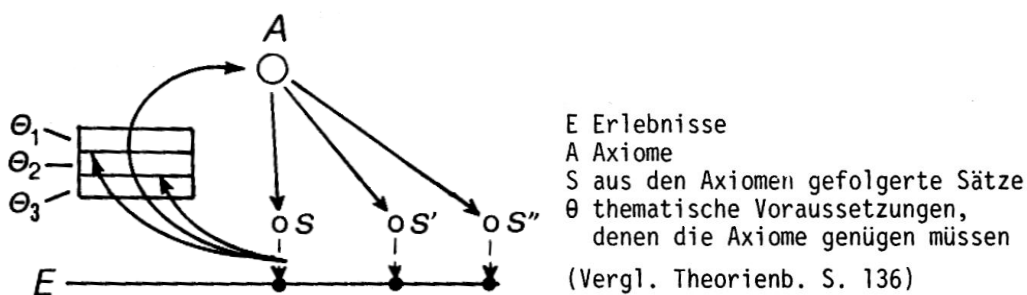


Abb. 2

Je nach der Zeit und dem geistigen Umfeld, in dem ein Forscher lebt, hat er ein anderes Filter von Vorurteilen, von Themata, das mögliche Ansätze zu einer neuen Theorie durchlaufen müssen. Themata sind grundsätzliche Annahmen, Begriffe, methodische Urteile und Entscheidungen, die selbst nicht aus objektiv beobachtbaren Tatbeständen oder logisch mathematischen oder anderen Überlegungen ableitbar sind. (Holton S. 19) Aus der Vielzahl möglicher Sprünge von

den Erlebnissen E zum gesuchten Axiomensystem A (vergl. Abb. 2) werden durch diese Vorurteile, d.h. die thematischen Voraussetzungen, denen die Axiome genügen müssen, die meisten herausgefiltert. In der Praxis bleibt zum Schluss nur eine Möglichkeit übrig.

Einsteins Themata waren u.a. (vergl. Holton S. 136):

1. Bevorzugung von formalen Strukturen (Mathematik!) gegenüber mechanischen Modellen.
2. Einheit (oder Vereinheitlichung) und kosmische Reichweite (gleiche Anwendbarkeit aller Gesetze in der gesamten Mannigfaltigkeit der Sinneserfahrungen).
3. Sparsamkeit in der Wahl der logisch von einander unabhängigen Basiselemente: „Vornehmstes Ziel aller Theorie ist es, jene irreduziblen Grundelemente so einfach und so wenig zahlreich als möglich zu machen, ohne auf die zutreffende Darstellung irgendwelcher Erfahrungsinhalte verzichten zu müssen.“ (Weltb. S. 115)
4. Einfachheit: „Nach unserer bisherigen Erfahrung sind wir nämlich zum Vertrauen berechtigt, dass die Natur die Realisierung des mathematisch denkbar Einfachsten ist.“ (Weltb. S. 116 f.)
5. Symmetrie (vergl. 1.1 und 1.3).
6. Kausalität: strenge (nicht statistische) Kausalität in der Natur. „Der Wunder größtes ist, dass es keine Wunder gibt.“²⁹ An Max Born: „In unserer wissenschaftlichen Erwartung haben wir uns zu Antipoden entwickelt. Du glaubst an den würfelnden Gott und ich an die volle Gesetzmäßigkeit in einer Welt von etwas objektiv Seiendem, das ich auf wild spekulative Weise zu erhaschen suche.“³⁰
7. Vollständigkeit: „Höchste Aufgabe der Physiker ist also das Aufsuchen jener allgemeinsten elementaren Gesetze, aus denen durch reine Deduktion das Weltbild zu gewinnen ist.“ (Weltb. S. 109)

²⁹ Albert Einstein zitiert in Peter G. Bergmann: Die Entwicklung der Relativitätstheorie in P. C. Aichelburg und R. U. Sexl (Hrsg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik. Vieweg Braunschweig 1979, S. 17.

³⁰ Albert Einstein zitiert in Glaube und Naturwissenschaft, Quellenstücke. 2. Aufl. Vandenhoeck Ruprecht Göttingen 1962, S. 70.

8. Das Kontinuum als Fundamentalkonzept, d.h. es galt., die atomistische Diskretheit aus einer Feldtheorie abzuleiten: „Der schwierigste Punkt für eine derartige Feldtheorie liegt einstweilen in dem Begreifen der atomistischen Struktur der Materie und der Energie.“ (Weltb. S. 118 – vergl. 1.3)
9. Konstanz und Unveränderlichkeit.

Zur Bedeutung thematisch geformter Vorurteile noch ein Zitat von Einstein: „Schon ein Blick auf die tatsächliche Entwicklung lehrt, dass die großen Fortschritte wissenschaftlicher Erkenntnis nur zum kleinen Teil auf diese (induktive) Weise entstanden sind. Wenn nämlich der Forscher ohne irgendwelche vorgefasste Meinung an die Dinge heranginge, wie sollte er aus der ungeheuren Fülle kompliziertester Erfahrung überhaupt Tatsachen herausgreifen können, die einfach genug sind, um gesetzmäßige Zusammenhänge offenbar werden zu lassen?“ (Holton S. 149)

Im Vorangehenden ist auf den fördernden Einfluss einzelner Themata bei der Entwicklung der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie hingewiesen worden. Es wurden auch Einsteins Probleme mit dem statistischen Charakter der Quantentheorie angesprochen. Sie basieren u.a. auf den durch die Themata „Vollständigkeit der Beschreibung“ und „kausaler Determinismus“ umrissenen Forderungen an eine Theorie. Wenn auch feststeht, dass Einstein am weiteren Ausbau der Quantentheorie nur noch durch seine Kritik beteiligt war, so kann bis heute kein endgültiges Urteil darüber abgegeben werden, ob die beiden genannten Themata unter die Rubrik „hemmen“ eingeordnet werden müssen. Dirac vermutet im Jahr 1979:³¹ „Es kann gut sein, dass die neue Quantenmechanik einen Determinismus im Einsteinschen Sinne aufweisen wird.“

³¹ P. A. M. Dirac: Unification: Aims and Principles, Ansprache am 21. März 1979 beim Jerusalem Einstein Centennial Symposium. Zitiert in Holton S. 130.

Über den Beitrag des Glaubens zur Naturwissenschaft

Liebe Schwestern und Brüder!

Was trägt der Glaube zur Naturwissenschaft bei? Ist es nicht das griechische Denken, dem wir die Wissenschaft verdanken? Hat sich der Glaube nicht immer wieder als Hemmschuh erwiesen? Der Fall Galilei erweckt diesen Eindruck, denn Galilei wurde von kirchlichen Behörden zum Widerruf gezwungen. Andererseits sind es in Galileis Schriften immer die Aristoteliker, die sich als seine Gegner erweisen und mit lächerlicher Sturheit sich allen neuen Einsichten widersetzen. Sie überzieht er mit beißendem Spott, und so werden es wohl auch ihre Kreise gewesen sein, von denen die Verurteilung Galileis betrieben wurde. Wenn man die Dinge so betrachtet, dann ist es nicht so sehr die christliche Theologie und der Glaube selbst, sondern vielmehr seine unglückliche Festlegung auf aristotelische Lehren, die den Papst hinderte, der Wissenschaft positiv weiterzuhelfen. Geht man in frühere Zeiten, vor allem das späte Mittelalter, so ist zu erkennen, dass der christliche Glaube erheblichen Einfluss auf die Entstehung der Naturwissenschaften genommen hat, und zwar aus sehr zentralen Glaubensinhalten heraus. Nach griechischem Denken ist ja nur das Allgemeine, das Unveränderliche und Ewige erkennbar. Das Einzelding in seiner Einmaligkeit ist zufällig und daher der Erkenntnis entzogen. So konnte sich dieses Denken nicht eigentlich der Welt und ihren einzelnen Dingen zuwenden, sondern blieb immer bei Ideen, bei Genera und Species stehen, die als allgemeine erkennbar sein sollten, während die konkreten Einzelwesen verschlossen blieben.

Es war erst im Rahmen der christlichen Theologie möglich, diese Ausblendung des Einzeldinges zu überwinden. Und zwar gelang es in dem Werk des Duns Scotus (gest. 1308), diesen Schritt auf das Einzelne hin zu tun. Eberhard Wölfel hat das sehr schön beschrieben (Seinsstruktur und Trinitätsproblem, Münster 1965, S. 68): Es sei im Christentum, "wo das Individuum der Anonymität des ‚Werdeseins‘ entrissen und in seinem ewigen Wert wahrhaft begründet wurde: Im Weltbild des biblischen Glaubens, wo Gott zu jedem Einzelnen spricht: ‚Ich habe dich bei deinem Namen gerufen, du bist mein‘. Jedes Wort dieses Satzes meint Anruf, Vereinzelung, Individuation [...] Hier mehr als anderswo verspürt man einen lauterer Zusammenhang von Metaphysik und christlichem Glauben: Erstere schuldet dem Letzteren nicht nur die Entdeckung einer neuen, fundamentsetzenden Stufe des

Seins, welche das antike Denken nicht in die Klarheit des Bewusstseins heben konnte, sondern auch das rechte Verständnis für die eigentliche Würde und den Anspruch individuellen Seins."

Heinz Heimsoeth hat diese Entdeckung des Individuums im spätmittelalterlichen Denken ebenfalls und breiter verfolgt (Die sechs großen Themen der abendländischen Metaphysik und der Ausgang des Mittelalters, Darmstadt 1981, S. 181 - 187). Nach Duns kommt es bald zu der Erkenntnis: "Die Natur bringt überhaupt nur Individuen hervor; die Einzeldinge sind allein die wahren Sachen" (ebd. S. 183). Dadurch wendet sich der Blick nun erstmals auf die natürlichen Gegebenheiten und ihre Zusammenhänge.

Aber diese Entdeckung des Einzelnen, des individuellen Seins und damit der Wirklichkeit, ist eigentlich erst der Anfang einer Bewegung auf die Wirklichkeit zu. Ein zweiter Schritt besteht darin, dass unter den verschiedenen Wesen der Welt nun gerade auch die kleinen und kleinsten Beachtung finden. Bis hin zur Physikotheologie¹) der Aufklärung wendet sich die christliche Theologie den kleinsten Geschöpfen zu und spricht gerade ihnen eine Gottebenbildlichkeit zu. Die griechischen Denker arbeiteten hier mit dem Begriff des Zufälligen, in den man alle die kleinen Belanglosigkeiten hineinnahm, die so oft unsere großartigen Theorien durchkreuzen. Seit aber Jesus seine Jünger als "die Kleinen und Geringsten" (Mt 18,10) bezeichnet hat, kommt gerade dem Geringfügigen und den kleinen Abweichungen eine große Bedeutung zu. Neuzeitliche Wissenschaft entsteht erst, wenn wir in dieser Weise dem Kleinen genauso viel Aufmerksamkeit schenken wie den großen Zusammenhängen.

Übrigens hat Umberto Eco seinen Erfolgsroman „Der Name der Rose“ in die Zeit der Franziskaner verlegt, weil erst diese "eine gute Beobachtungsgabe und einen ausgeprägten Sinn für die Interpretation von Indizien besaßen." Denn "erst zwischen Bacon und Ockham wurden die Zeichen als Mittel zur Erkenntnis der Individuen benutzt" (Nachschrift zum „Namen der Rose“, 4. Aufl. 1984, S. 34). Es könnte also kein Zufall sein, dass Duns und Ockham, die Entdecker des Einzelnen, Franziskaner waren. Diese verstanden sich selbst als die Kleinen, die Armen und Geringen. Sie entdeckten das Geringe und Kleine nicht in einer abstrakten Theorie, sondern indem sie sich selbst als die Kleinen und Geringen verstanden. So entdeckten sie an sich selbst, dass es Gott in seiner Schöpfung nicht um das Allgemeine, sondern um die

¹ Die Physikotheologen im 18. Jahrhundert wollten Gott z.B. aus der Schönheit der Mücken und anderer kleiner Dinge beweisen, deren Vollkommenheit trotz ihrer Kleinheit so sehr ins Auge sticht.

kleinen Einzeldinge ging, ja dass er gerade die kleinen Dinge besonders liebt. All' das, was der griechischen Denkweise als zu gering erschien, zu unscheinbar und von der Materie getrübt, steht unter Gottes besonderer Liebe und Fürsorge. Deswegen ist es wert, auch vom Menschen bedacht und betrachtet zu werden.

Es ist nicht der Sinn einer Predigt, die Folgen dieses Umdenkens, dieser Bekehrung zu den kleinen Dingen im Einzelnen zu verfolgen. Es genügt zu zeigen, dass hier die Botschaft Jesu von Gottes Liebe zu den Kleinen, Unscheinbaren und Vergessenen auch für die Einstellung zur Natur grundlegende Konsequenzen gehabt hat. Wandte man sich nun von den spekulativen allgemeinen Wesenheiten ab und zu den wirklichen Dingen, versuchte man nicht mehr, scheinbar Nebensächliches einfach als Störung aufgrund materieller Verunreinigung wegzuerklären, sondern nahm es ernst, so musste daraus ein neuer Umgang mit der Natur entstehen.

Dass dies der Fall war, zeigt ein Wort, das erst im Spätmittelalter aufkam: Kontingenz. Das Kontingente ist das Nicht-notwendige, das Zufällige. Die Griechen hatten überall nach dem Notwendigen, dem Gesetzmäßigen gesucht und dieses in den Ideen bzw. den Substanzen gefunden, den ewigen, unveränderlichen Formen. Nun erkannten die christlichen Theologen, dass Gott alles geschaffen hatte und dass also alle Dinge „kontingent“, nicht notwendig sind. Wie aber kann man das Kontingente erkennen? Wenn man auf den logischen Begriff der Notwendigkeit verzichten muss, dann kann man nur noch empirisch, durch Beobachtung der Dinge, wie sie wirklich sind, ihr Verhalten feststellen. Dieser Gedankengang, ebenfalls begründet in der christlichen Schöpfungslehre, löste also die notwendigen Begriffe auf, mit denen die Griechen operiert hatten, und lenkte die Blicke auf die wirklichen Vorgänge. Das stimmte gut mit der Entdeckung des Individuums zusammen, so dass beide Glaubensregeln sich ergänzen und stützen konnten. Die Erkenntnis vermag nun nicht mehr aus vernünftigen Begriffen notwendige Aussagen hervorzuzaubern, sondern muss sich der Wirklichkeit stellen.

Im Neuen Testament gibt es auch das Wort, dass Gott "was nicht ist, erwählt hat, damit er das, was ist, zunichte mache" (1. Kor 1,28). Vor ihm sind alle Geschöpfe nicht nur kontingent, sondern ein Nichts, wie Meister Eckhart sagt. So wurde es denkbar, dass es die Wissenschaft gar nicht mit Seiendem (und das waren die Substanzen!), sondern mit Nichtseiendem zu tun habe. Hugolin von Orvieto (gest. 1373) zieht in seinem Physikkommentar ernstlich die Konsequenz, die Physik habe es nicht mit Gegenständen, sondern mit den zwischen ihnen waltenden Ordnungen und Beziehungen zu tun. Das Objekt der Wissenschaft ist einerseits ein „Nichts“ und doch wirklich als eine feststehende Beziehung zwischen den Dingen. So lernt es die

Wissenschaft vom Glauben, dass man nicht mehr nach den Substanzen und ihren Eigenschaften fragt, sondern nach ewigen Gesetzen, die keine dingliche Realität mehr haben und nur noch sozusagen als „Gedanken Gottes“ anzusehen sind.

Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, um z.B. die Bewegung zu erfassen. Der Weg bis zur Entdeckung der Fallgesetze und anderer Bewegungsgesetze ist abenteuerlich und von zahlreichen Forschern in all' seinen Stufen untersucht worden. An ihm lässt sich besonders gut verfolgen, wie mühsam es war, sich von den Vorurteilen der Griechen zu lösen und unvoreingenommen zu beschreiben, was Bewegung ist. Das konnte aber erst geschehen, als man gelernt hatte, den einzelnen sich bewegenden Gegenstand wirklich zu beobachten, dabei auch kleinste Beobachtungen nicht einfach zu vernachlässigen, und vor allem, eine Wirklichkeit zu erfassen, die nicht mehr ein Ding, sondern ein Nichts war.

Alle diese Voraussetzungen aber entspringen dem christlichen Glauben. Er hat uns gelehrt, die Einzeldinge als Geschöpfe Gottes und damit als die einzigen Realitäten anzuerkennen. Er hat uns gelehrt, auf das Kleine, Unbedeutende und Unscheinbare zu achten und gerade darin Gottes Güte zu erkennen. Und er hat uns geholfen, nicht mehr nach ewigen Realitäten zu fragen, sondern nach dem „Nichts“, das als Gottes Gesetz die Dinge zusammenhält. So steht am Anfang der Wissenschaft in ihrer neuzeitlichen Form, was Paulus in die Worte gefasst hat:

"Das Törichte in der Welt hat Gott auserwählt,
damit er die Weisen zuschanden mache
und das Schwache der Welt hat Gott auserwählt,
damit er das Starke zuschanden mache.
Und das Unedle der Welt und das Verachtete hat Gott auserwählt,
das, was nicht ist,
damit er das, was ist, zunichte mache,
dass sich vor Gott kein Fleisch rühme" (1. Kor 1,27-29).

Amen.

Christ sein im Gang der Wissenschaftsentwicklung

Einige Gesichtspunkte

►1. Zunächst ein Hinweis auf ein Buch:

Richard Schaeffler: Glaubensreflexion und Wissenschaftslehre. Thesen zur Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte der Theologie. (Quaestiones disputatae 82). Herder, Freiburg 1980.

Schaeffler geht die Hauptepochen der Theologiegeschichte durch und untersucht, wie die Theologie jeweils auf die wissenschaftlichen und wissenschaftstheoretischen Herausforderungen der betreffenden Zeit reagiert hat und wie sie im Gesamtfeld der Wissenschaften jeweils wirksam wurde. Jedes Kapitel wird dabei in einer längeren These zusammen gefasst. Schaeffler zeigt, wie die Theologie stets einen kritisch weiterführenden und vorantreibenden Beitrag zum Wissenschaftsverständnis der jeweiligen Zeit einzubringen hatte und – mehr oder weniger – auch tatsächlich einbrachte. Hier die sachlich zusammenfassende letzte These des Buches (S. 195): "Die Theologie bewährt sich als Wissenschaft nicht dadurch, dass sie sich an das Wissenschaftsideal der jeweiligen Epoche anpasst, sondern dadurch, dass sie fähig ist, wissenschaftskritisch und zugleich wissenschaftsgeschichtlich vorantreibend auf das jeweils gültige Wissenschaftsverständnis einzuwirken. Die Wissenschaftstheorie der Theologie verfehlt daher ihre Aufgabe, wenn sie sich darauf beschränkt, die Fragestellungen und Methoden der theologischen Disziplinen am jeweils vorfindlichen, außerhalb der Theologie entwickelten Wissenschaftsideal zu orientieren und nachzuweisen, dass auch die Theologie das leisten kann, was diese Ideale von einer „Wissenschaft“ verlangen. Wissenschaftstheorie der Theologie hat zugleich und vor allem die Aufgabe, aus einer Reflexion auf die spezifische Aufgabe und die besondere Geschichte der Theologie die Gründe dafür freizulegen, dass die Theologie einen aktiven und

vorantreibenden Beitrag zur Diskussion um die regulative Idee von Wissenschaft leisten kann."

Worin sachlich dieser Beitrag bestand und besteht, das kann Schaeffler zusammenfassend so formulieren: "Dabei war es jedesmal der Gesichtspunkt der Personalität und Freiheit, welcher der Theologie diese wissenschaftskritischen und zugleich wissenschaftsgeschichtlich vorantreibenden Impulse vermittelt hat" (S. 194).

Was Schaeffler hier im Blick auf die Aufgabe der Theologie im Gesamtzusammenhang der Wissenschaften schreibt, ist ja im Grunde nur ein spezieller Fall der Aufgabe der Christenheit im Bereich der Wissenschaften und sollte sich daher – mutatis mutandis – auch auf die Frage übertragen und zuspitzen lassen, was ein Naturwissenschaftler als Christ in seine Wissenschaft einzubringen hat. Und auch der angesprochene inhaltliche Punkt wird sich sicherlich dabei immer wiederfinden: dass auch exakt-naturwissenschaftliche Erkenntnis gerade in ihrer Objektivität und objektivierenden Intention niemals dem Zusammenhang der persönlichen Entscheidung und Verantwortung dessen entnommen ist, der sie erarbeitet und der sie verstehend und deutend in sich aufnimmt.

- ▶2. Ich möchte auf eine Ambivalenz hinweisen, die das gesamte Weltverhältnis des Menschen durchzieht und damit auch für unsere Frage von Bedeutung ist: der Mensch existiert auf Wirklichkeit hin; er ist auf sie angewiesen und öffnet sich ihr – er ist von ihr bedroht und versucht sich vor ihr zu sichern, indem er sie bannt und dingfest, also beherrschbar macht. Diese Ambivalenz ist im Bereich der Religion ebenso wirksam wie im Bereich der Lebenspraxis und der alltäglichen Wirklichkeitsbegegnung. Alle Erkenntnis steht unter dieser Ambivalenz: sie kann Öffnung zur Wirklichkeit hin sein oder als Gehäuse dienen, in dem man sich vor den Undurchschaubarkeiten der Wirklichkeit in Sicherheit bringt (u.a. in der Form, dass man sich zum vermeintlichen unumschränkten Beherrscher der Wirklichkeit aufwirft).

Die Verbarrikadierung des Menschen bedarf immer wieder der kritischen Aufsprenzung. Insbesondere die biblische Geschichte ist voll von Beispielen, wie Menschen sich vor ihrer wahren Situation vor Gott verschließen und wie Gott mit seinen Gerichten und mit seinem Wort gegen solche Verschlossenheit anrennt, sie Lügen straft und aufsprengt.

- ▶3. Auch die neuzeitliche Wissenschaft hat teil an dieser Ambivalenz. In ihr kann sich aufgeschlossene Weltbetrachtung vollziehen und sie wird als sicherndes Gehäuse gegen die Undurchschaubarkeit Gottes und der Welt benutzt. Mehr noch: sie ist ambivalent im Blick auf dieses Sicherungsstreben des Menschen; sie dient als sicherndes Gehäuse, in dem der Mensch sich abschirmt, als Weltanschauung – aber sie hat auch die kritische Kraft, solche Gehäuse und Weltanschauungen anzugreifen und aufzusprengen. Sie hat teil an der sichernden wie an der kritischen Struktur – und diese doppelte Teilhabe ist so sehr eins, dass sogar noch die Kritik selbst zum sichernden Bollwerk werden kann! All dies ist im Auge zu behalten.

- ▶4. Im Blick auf die angerissenen Zusammenhänge lassen sich – ohne Anspruch auf Vollständigkeit! – drei Momente aussprechen, die für die Aufgabe des Christen im Bereich der Wissenschaft wesentlich sind:
 - Zum Leben im Geist, durch das der Christ bestimmt ist, gehört die Demut vor Gott (Micha 6,8). Daran ist festzuhalten gegen das selbstherrliche Autonomiebewusstsein des wissenschaftlichen Denkens der Neuzeit. Die Demut vor Gott will unmittelbar im Raum der Wissenschaft ebenso bewährt werden wie anderswo. Unter solchem Vorzeichen wird man die methodische Autonomie der Wissenschaft in ihrem wahren Sinnzusammenhang annehmen können (also darauf verzichten, unqualifiziert von außen fremde Maßstäbe geltend zu machen), zugleich aber auch ihre Grenzen realistisch sehen lernen und ihren Verfälschungen widerstehen.
 - Dass wir vor Gott aus dem Empfangen leben, gilt auch für unser wissenschaftliches Tun. Auch wissenschaftliche Erkenntnis ist so nichts Erzwingbares, sondern etwas Empfangenes. Das Festhalten an dieser Einsicht trägt auch noch den Umgang mit den Bestandteilen wissenschaftlicher Erkenntnis, die operationalisierbar und somit tatsächlich erzwingbar sind, und verwandelt ihn.
 - Aus diesen Wurzeln steht der Christ, der im Bereich der Wissenschaft tätig ist, durch sein Sein, durch sein Handeln und durch sein Wort als Zeuge Gottes gegen die Abschließung der Wissenschaft in eine geschlossene „wissenschaftliche Weltanschauung“; er hält an seinem Teil Wissenschaft offen – nicht durch Geltendmachung fremder dogmatischer Setzungen, sondern dadurch, dass er die Wissenschaft bei ihrer eigensten Wahrheit festhält, bei ihrer Erkenntnisaufgabe und bei der Einsicht in ihre wahren Grundlagen und Möglichkeiten.

- ▶5. Dies alles sind primär Fragen der „Einstellung“, Fragen, die sich darauf beziehen, wer und was ich als Mensch und auch als Wissenschaftler in meiner Wissenschaft bin – lauter Dinge, die sich zunächst vielleicht gar nicht auf die Theorien und den Gang der Wissenschaft auswirken, sondern „nur“ damit zu tun haben, wie ich mit Wissenschaft umgehe und wie ich Wissenschaft auf mich nehme.

- ▶6. Das entspricht jenem anderen Sachverhalt, dass die Bezugnahme auf Gott und sein Handeln niemals so in eine wissenschaftliche Weltbetrachtung einging, dass damit ein Faktor an bestimmten Stellen des innerweltlichen Zusammenhanges benannt sein sollte. Dies ist nicht erst eine Folge des „methodischen Atheismus“ der neuzeitlichen Wissenschaft, sondern war stets grundsätzlich so und liegt gewissermaßen an der grundlegenden Intention wissenschaftlichen Denkens: gesetzmäßige Zusammenhänge innerweltlicher Sachverhalte zu erfassen. Wo Gott ins wissenschaftliche Spiel gebracht wird, geschieht dies immer nur entweder in der Vermittlung durch irgendwelche Mittelbegriffe (wie z.B. in Descartes Begründung der Unveränderlichkeit der Summe der Bewegungsgrößen durch die Unveränderlichkeit Gottes: Gottes Eigenschaft charakterisiert sein Wirken in der Welt und muss sich insofern in den Merkmalen des Weltgeschehens spiegeln; es geht also nicht unmittelbar Gott oder sein Handeln in die Wissenschaft ein, sondern nur seine Eigenschaft der Unveränderlichkeit) oder als letzte fundierende Ursache der Welt in ihrem Gesamtzusammenhang – und beides ist letztlich das gleiche: beidemale geht es um die letzte Fundierung des vorgefundenen Weltzusammenhanges in seinem So-Sein. Wo im wissenschaftlichen (!) Zusammenhang von einem speziellen Handeln Gottes gesprochen wird (wie etwa bei Galilei und bei Newton in der Frage, wie die Planeten auf ihre Bahnen kamen), da ist dies im Grunde der Ausdruck für eine Lücke im wissenschaftlichen Zusammenhang und dafür, dass man keine wissenschaftliche, d.h. gesetzmäßige Erklärung für den Vorgang kennt (wo das wissenschaftliche Denken als die letztlich entscheidende Instanz gilt, entwickelt sich hieraus dann die Problematik Gottes als eines Lückenbüßers, der zunehmend in Wohnungs- und Existenznot gerät).

- ▶7. Wir können also nicht davon ausgehen, dass es religiöse oder glaubensmäßige Direktiven für die Gestaltung wissenschaftlicher Theorien gäbe, die man unmittelbar ins Spiel bringen und wie ein Rezept anwenden könnte. Welcher Einfluss auf den Gang der Wissenschaft von einem auf Gott ausgerichteten Wissenschaftler ausgeht, wird man insofern niemals vorhersagen oder auch nur

der Richtung der Theorienentwicklung nach vorher abstecken können, sondern das wird sich stets erst herausstellen müssen.

- ▶8. An unserer Betrachtung Einsteins konnte uns deutlich werden, dass persönliche Motivationen und Leitvorstellungen nicht dadurch für den Gang der Wissenschaft fruchtbar und maßgebend werden, dass man sie von außen als Anspruch an die Wissenschaft geltend macht, sondern nur dadurch, dass man sie ganz in die Erforschung der Sache investiert, sie daran ausprobiert und aufs Spiel setzt; und zwar in solidem Anschluss an die gegebenen gegenwärtigen Problemstellungen einer Wissenschaft.

Man vergleiche W. Heisenberg zur Struktur wissenschaftlicher Revolutionen: Am Anfang steht "immer ein sehr spezielles, eng umgrenztes Problem, das im traditionellen Rahmen keine Lösung finden kann. Die Revolution wird herbeigeführt durch Forscher, die dieses spezielle Problem wirklich zu lösen versuchen, die aber sonst in der bisherigen Wissenschaft so wenig wie möglich ändern wollen. Gerade der Wunsch, so wenig wie möglich zu ändern, macht deutlich, dass es sich bei dem Neuen um einen Sachzwang handelt; dass die Änderung in der Denkstruktur von den Phänomenen, von der Natur selbst erzwungen wird, nicht von irgendwelchen menschlichen Autoritäten" (Änderungen der Denkstruktur im Fortschritt der Wissenschaft. In: Schritte über Grenzen. 2. erw. Aufl. 1973, S. 275-287, dort S. 285).

- ▶9. Dementsprechend ist der in der Wissenschaft tätige Christ also zur intensiven Anknüpfung an den gegebenen Stand der Wissenschaft berufen – es sei denn, er würde speziell zum Propheten berufen, der von außen das Gericht über die Unternehmungen dieser Wissenschaft anzusagen und zur Umkehr und grundsätzlichen Abkehr von ihren Wegen aufzurufen hätte.

Dass sich mit solcher intensiven Anknüpfung auch die Freiheit zu unkonventionellen Denkansätzen sinnvoll verbinden kann, haben wir ebenfalls an Einstein gesehen – aber solche Freiheit ist im Raum der Wissenschaft normalerweise nur auf der Grundlage solcher Anknüpfung sinnvoll.

- ▶10. In summa: Christen können ein Segen im Gang der Wissenschaft nur sein durch ihr Gebet, ihren Glauben, die Verwurzelung ihres Lebens in Christus und dadurch, dass sie sich von da her ganz in den forschenden Dienst an der Wahrheit im Zusammenhang der Wissenschaft hineingeben.

- ▶11. Zum letzteren gehört gleichermaßen, dass sie einerseits die zu bearbeitenden Spezialfragen immer wieder im Gesamtzusammenhang erkannter Wahrheit und im Gesamtzusammenhang des Lebens zu sehen versuchen, wie dass sie andererseits jeder Versuchung zur Ideologisierung dieses Gesamtzusammenhangs wachsam widerstehen.

- ▶12. Es dürfte deutlich sein, dass die so beschriebene Aufgabenstellung in ihrer Struktur nicht nur für christliche Einsteinen zugeschnitten ist, sondern eine gemeinschaftliche Aufgabe für alle Christen im Umgang mit Wissenschaft ist, eine Aufgabe, die im Prinzip gleichermaßen wie den Spitzenforscher auch den letzten christlichen Dorfschullehrer und den Familienvater angeht, der mit den Hausaufgaben seiner Kinder zu tun hat. Jeder ist an seinem Teil unmittelbar daran beteiligt gemäß seinen spezifischen Gaben, seiner Aufgabe und dem Maß seiner Kompetenz und seines Durchblicks. Und jeder bedarf der Handreichung durch die anderen Glieder der Gemeinde, die ebenfalls in dieser gemeinsamen Aufgabe stehen.

- ▶13. Abschließend eine Klarstellung: Es mag zunächst so scheinen, als führte das Gesagte sanft und sicher von der Frage weg, ob und inwieweit die vorwissenschaftlichen Überzeugungen des Christen Momente enthielten, die inhaltlich für den Gang der Theorienentwicklung einer Wissenschaft wirksam werden könnten und sollten; als reduziere sich nun doch alles auf die Frage, mit welcher „Einstellung“ der Christ sich in den Gang einer Wissenschaft hineinstellt, zu deren Inhalten und Ausgestaltungen von seinem Glauben her nichts weiter zu sagen wäre. Ein solcher Schein trügt jedoch; wer so verstanden hat, hätte missverstanden. Was ich mit den obigen Gesichtspunkten beschrieben oder angedeutet habe, sind Ausgangspunkte und erste Schritte eines Weges, der, wenn wir ihn unter die Füße nehmen, allererst dahin führen kann, dass wir konkreter Punkte ansichtig werden, an denen es etwas vom christlichen Glauben her in den Gang der Wissenschaft einzubringen gilt. Ich habe also versucht zu zeigen, von welcher Seite her die Frage nach der Relevanz vorwissenschaftlicher Motivationen und Überzeugungen für den rechten Gang der Wissenschaft von Christen – Schritt um Schritt! – anzugehen ist. Wie der zweite Schritt auszusehen hat, wird sich zeigen, wenn der erste getan ist.

Auch hier geht es nach den Gesetzen des Gottesreichs: "Womit soll ich das Reich Gottes vergleichen? Es ist wie der Sauerteig, den eine Frau unter einen großen Trog Mehl mischte, bis das Ganze durchsäuert war" (Luk. 13, 20f.

Einheitsübersetzung). Das Druntermischen machts, nicht eine ausgeklügelte Umwandlungstechnik!

Literaturhinweise

Vorbemerkung: Die nachfolgende Zusammenstellung enthält nicht alle in den Beiträgen dieses Heftes zitierten Titel und stellt auch sonst keinen Anspruch auf Vollständigkeit; sie beschränkt sich darauf, einige wichtige Titel zu unterschiedlichen Aspekten der Thematik zu nennen und so Anregungen und Anhaltspunkte zum weiteren Studium zu geben. Angegeben sind jeweils – soweit vorhanden – neue Auflagen (Stand: 2018).

1. Allgemeine Literatur zur Fragestellung:

HANS BLUMENBERG: Die kopernikanische Wende. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1965. (edition suhrkamp 138).

HANS BLUMENBERG: Die Legitimität der Neuzeit. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1966. – erneuerte Auflage 1988.

HANS BLUMENBERG: Die Genesis der kopernikanischen Welt. 3 Bände. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1981 (stw 352).

HANS BLUMENBERG: Die Lesbarkeit der Welt. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1986.

GERNOT BÖHME/WOLFGANG van den DAELE/WOLFGANG KROHN:
Experimentelle Philosophie. Ursprünge autonomer
Wissenschaftsentwicklung. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1977 (stw 205).

FRANZ BORKENAU: Der Übergang vom feudalen zum bürgerlichen Weltbild.
Studien zur Geschichte der Philosophie der Manufakturperiode. Paris
1934. Unv.ND Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1971.

WILLIAM BROAD/NICHOLAS WADE: Betrug und Täuschung in der
Wissenschaft. Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Stuttgart 1984.

GÜNTER DUX: Strukturwandel der Legitimation. Alber, Freiburg/München
1976.

GÜNTER DUX: Die Logik der Weltbilder. Sinnstrukturen im Wandel der
Geschichte. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1990 (stw 370).

KLAUS FISCHER: Rationale Heuristik. Die Funktion der Kritik im "Context of
Discovery". In: Z. f. allg. Wissenschaftstheorie 14, 1983, H. 2, S. 234-272.

STEPHEN JAY GOULD: Der falsch vermessene Mensch. Irrwege der
Bestimmung von Intelligenz. Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Stuttgart
1988.

- MICHAEL HEIDELBERGER: Wandlungstypen in den Baconischen Wissenschaften im Deutschland des frühen 19. Jahrhunderts. In: *Philosophia naturalis* 20, 1983. H. 1, S. 112-126.
- MICHAEL HEIDELBERGER/SIGRUN THIESSEN: Natur und Erfahrung. Von der mittelalterlichen zur neuzeitlichen Naturwissenschaft. Deutsches Museum/Rowohlt, Reinbek 1990 (rororo Sachbuch 7705).
- GERALD HOLTON: Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts 1973.
- GERALD HOLTON: The Scientific Imagination. Case Studies, Cambridge 1979.
- GERALD HOLTON: Thematische Analyse der Wissenschaft. Die Physik Einsteins und seiner Zeit. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1981. (stw 293) (eine neu bearbeitete Auswahl aus den beiden vorigen Titeln).
- GERALD HOLTON: Themata. Zur Ideengeschichte der Physik. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1984.
- JÜRGEN HÜBNER: Die Theologie Johannes Keplers zwischen Orthodoxie und Naturwissenschaft. Mohr, Tübingen 1975 (Beiträge zur Historischen Theologie 50).
- KURT HÜBNER: Kritik der wissenschaftlichen Vernunft. Alber, Freiburg/München 2002.
- ALEXANDRE KOYRÉ: Von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum. (1957). Suhrkamp, Frankfurt/M. 1980 (stw 320).
- THOMAS S. KUHN: Die kopernikanische Revolution. (1957). Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1981.
- THOMAS S. KUHN: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. (1962). Suhrkamp, Frankfurt/M. 1996.
- IMRE LAKATOS/ALAN MUSGRAVE (Hg.): Kritik und Erkenntnisfortschritt. (1970). Vieweg, Braunschweig 1974.
- WOLF LEPENIES: Das Ende der Naturgeschichte. Wandel kultureller Selbstverständlichkeiten in den Wissenschaften des 18. und 19. Jahrhunderts. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1978 (stw 227).
- SERGE MOSCOVICI: Versuch über die menschliche Geschichte der Natur. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1990.

HORST-EBERHARD RICHTER: Der Gotteskomplex. Die Geburt und die Krise des Glaubens an die Allmacht des Menschen. Psychosozial-Verlag, Gießen 2012.

HEINRICH ROMBACH: Substanz, System, Struktur. Die Hauptepochen der europäischen Geistesgeschichte Verlag Karl Alber 2010.

WERNER SCHNITKER: Wissenschaft und Lebensgefühl. Grundlagen der klassischen Elektrodynamik und der Leben-Jesu-Forschung in ihrer Entwicklung. (Arbeiten der Melanchthon-Akademie Köln, Bd. 4). Weiden 1968.

HUGO STAUDINGER/WOLFGANG BEHLER: Chance und Risiko der Gegenwart. Eine kritische Analyse der wissenschaftlich-technischen Welt. Schöningh, Paderborn 1976.

THOMAS F. TORRANCE: Das Verhältnis zwischen christlichem Glauben und moderner Naturwissenschaft. Die geistesgeschichtliche Bedeutung von James Clerk Maxwell. Sonderbeilage zum ibw-Journal zu Heft 2/1982 (Deutsches Institut für Bildung und Wissen, Busdorfwall 16, 33098 Paderborn).

STEPHEN TOULMIN: Kritik der kollektiven Vernunft. (1972). Suhrkamp, Frankfurt/M. 1983 (stw 437).

STEPHEN TOULMIN: Voraussicht und Verstehen. Ein Versuch über die Ziele der Wissenschaft. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1981 (stw 358).

FRIEDRICH WAGNER: Die Wissenschaft und die gefährdete Welt. Eine Wissenschaftssoziologie der Atomphysik. C. H. Beck, München 1964, 2. Aufl. 1969.

FRIEDRICH WAGNER: Weg und Abweg der Naturwissenschaft. Denk- und Strukturformen, Fortschrittsglaube und Wissenschaftsreligion. C. H. Beck, München 1970. (Beck'sche Schwarze Reihe 67). (enthält die ersten 4 Kapitel des vorigen Titels in z.T. gekürzter Fassung)

2. Über Einstein:

PETER C. AICHELBURG/ROMAN SEXL (Hg.): Albert Einstein. Sein Einfluss auf Physik, Philosophie und Politik. Vieweg, Braunschweig 1979.

Darin u. a.:

Holton: Einsteins Methoden zur Theorienbildung.

C. F. v. Weizsäcker: Einsteins Bedeutung in Physik, Philosophie und Politik.

B. Kanitscheider: Einsteins Behandlung theoretischer Größen.

KLAUS FISCHER: (s. oben Abschnitt I) S. 252 ff.

PHILIPP FRANK: Einstein – Sein Leben und seine Zeit. (1949). Vieweg, Braunschweig 1979.

PETER C. HÄGELE: Leitideen steuern wissenschaftliche Erkenntnisse. Einsteins Überzeugungen als Triebfeder und Begrenzung seiner Theoriebildung. In Breuninger, R. (Hrsg.): Bausteine zur Philosophie, Heft 27. Interdisziplinäre Schriftenreihe Humboldt-Studienzentrum für Philosophie und Geisteswissenschaften, Universität Ulm 2011.

HELMUT HÖNL: Albert Einstein und Ernst Mach. In: Phys. Blätter 35, 1979, H. 11, S. 485 – 494.

FRIEDRICH HUND: Geschichte der physikalischen Begriffe. Teil 2. B. I., Mannheim/Wien/Zürich, 2. A. 1978, S. 62 – 88.

PETER JANICH: Die erkenntnistheoretischen Quellen Einsteins. In: Lecture Notes in Physics, Bd. 100: Einstein Symposion Berlin. Berlin/Heidelberg/New York 1979, S. 412 – 427.

HORST MELCHER: Albert Einstein wider Vorurteile und Denkgewohnheiten. Vieweg Braunschweig 1979 (Lizenz Akademie-Verlag Berlin-Ost). (enthält viele Zitate Einsteins zu erkenntnistheoretischen Fragen).

PAUL ARTHUR SCHILPP (Hg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. (1955). Vieweg, Braunschweig 1979.

Darin u. a :

A. Einstein: Autobiographisches.

N. Bohr: Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik.

Margenau: Einsteins Auffassung von der Wirklichkeit.

K. Gödel: Eine Bemerkung über die Beziehungen zwischen der Relativitätstheorie und der idealistischen Philosophie.

PAUL ARTHUR SCHILPP (Hg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. – Eine Auswahl: Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1983. (Facetten der Physik, Bd. 8). VI, 249 S. (die genannten Beiträge sind von der Weglassung nicht betroffen).

NIKLAS STILLER: Albert Einstein. Dressel, Hamburg 1988. (Reihe: Menschen)

JOHANNES WICKERT: Albert Einstein. (Rowohlt Monographie) 2005.

3. Von Einstein:

Autobiographisches. In: P. A. Schilpp (Hg.) – siehe oben Abschnitt II.

Mein Weltbild. (Herausgegeben von Carl Seelig) Ullstein, Frankfurt/M. 2005 (Aufsätze).

Aus meinen späten Jahren. Melzer Verlag, Neu Isenburg 2005 (Aufsätze).

Grundzüge der Relativitätstheorie. (1922/1956). Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 5. A. 1969 und spätere Nachdrucke). (Wiss. Taschenbücher 58). Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. (1917/1954/1956 Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 21. A. 1969 (und spätere Nachdrucke, z.B. Springer 2002).

Albert Einstein/Leopold Infeld: Die Evolution der Physik. Zsolnay, Wien/Hamburg 1950, Neudruck Anaconda, Köln 2014 (früher auch als rde 12 bei Rowohlt).

Hinweis:

Die Universitätsbibliothek der Universität Ulm führte 1985 eine Buchausstellung „Albert Einstein zum 30. Todestag“ durch und stellte eine Literaturliste mit 73 Titeln von und über Einstein vor.

4. Einführung in die Relativitätstheorie:

MAX BORN: Die Relativitätstheorie Einsteins. (Herausgegeben von Jürgen Ehlers, Markus Pössel) Springer, Berlin/Göttingen/ Heidelberg 2003.

ALBERT EINSTEIN: Über die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie. Springer, Berlin/Göttingen/ Heidelberg, 2012 (24. Aufl.).

G. FALK/W. RUPPEL: Mechanik, Relativität, Gravitation. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1983.

JÜRGEN FREUND: Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 2007.

C. KACSER: Einführung in die spezielle Relativitätstheorie. Berliner Union, Stuttgart 1970.

CH. KITTEL/W.D. KNIGHT/M. A. RUDERMANN: Mechanics (Berkeley Physics Course, Vol. 1). McGraw-Hill, N.Y. Deutsche Übersetzung: W. D. Knight/M. A. Rudermann: Mechanik. Vieweg, Braunschweig/ Wiesbaden 2001.

HORST MELCHER: Relativitätstheorie in elementarer Darstellung, mit Aufgaben und Lösungen. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1974.

ROBERT RESNICK: Einführung in die spezielle Relativitätstheorie. Klett-Studienbücher, Stuttgart 1996.

ERNST SCHMUTZER: Relativitätstheorie – aktuell. Ein Beitrag zur Einheit der Physik. Springer, Berlin/ Göttingen/Heidelberg 1996.

ROMAN SEXL: Relativitätstheorie in der Kollegstufe. Ein Kursvorschlag. Beiträge zum Math.-Nat. Unterricht, Heft 26, Vieweg, Braunschweig 1973.