

Äther

Physikalische Vorstellungen im Wandel der Zeit

von CHRISTIAN MOHRDIECK, Kiel

Inhalt

- I. Einführung
- II. Der Begriff „Äther“ in der Philosophie
- III. Äthervorstellungen Descartes' und Huygens'
- IV. Newtons Äthertheorie
- V. Äthermodelle und Äthermechanik im 18. und 19. Jahrhundert
- VI. Der Michelson-Morley-Versuch, Lorentzsche Elektronentheorie
- VII. Einsteins Relativitätstheorie und das „Ende“ des Äthers
- VIII. Sichtweise der gegenwärtigen Physik
- IX. Schlußbetrachtungen
- X. Literaturverzeichnis

I. Einführung

In der vorliegenden Arbeit soll der Begriff „Äther“ anhand seiner historischen Entwicklung und der mit ihm jeweils verbundenen Vorstellungen erläutert werden. Diese Vorstellungen geben natürlich auch Aufschluß über das Weltbild, dem sie entsprungen sind.

Während der Äther heute in der Naturwissenschaft allenfalls als historische Tatsache Bedeutung hat, zeugen umgangssprachliche Ausdrücke wie „hören, was über den Äther kommt“ noch von der Stellung des Äthers in Naturwissenschaft und Technik der nicht sehr fernen Vergangenheit. Auch in der Literatur ist das Wort „Äther“ häufig anzutreffen. Zwei Beispiele seien dazu angeführt:

So läßt Friedrich Hölderlin „Hyperion“ schreiben:

Süße Lüfte wehten, und in morgendlicher Frische glänzte noch das Land, und still in seinem heimatlichen Äther lächelte das Licht.”

Friedrich Hebbel schrieb ein Gedicht „An den Äther“.

II. Der Begriff „Äther“ in der Philosophie

Der Geschichte des Äthers läßt sich bis in die Antike zurückverfolgen. Zu der Zeit waren Philosophie und Naturwissenschaften noch keine voneinander getrennten

Wissenschaften. Deshalb soll zunächst der Begriff „Äther“ in der Philosophie erörtert werden.

Die Äthervorstellungen der alten Griechen lassen sich unter dem Oberbegriff „oberste Gottheit“ zusammenfassen. Aristoteles, Homer, Anaxagoras, Euripides, Hesiod, Zenon und andere sprachen vom Äther als Göttlichkeit des obersten Himmels, nannten ihn die Gottheit, den Allgott. Ähnliche Beschreibungen des Äthers findet man auch in den Orphischen Hymnen. Bei den genannten Autoren, aber auch bei den Pythagoreern und Platonikern, spielte der Äther die Rolle des Himmelslichtes, einer lichtartigen Materie, war die höchste und reinste Feuer- bzw. Luftschicht.

Aristoteles setzte Äther gleich mit der „Quintessenz“, dem fünften Element, das von den anderen vier Elementen getrennt und verschieden war. Später wurden Quintessenz und Äther Synonyma.

Dem Äther wurden die verschiedensten Eigenschaften zugeschrieben. Homer bezeichnete ihn als unermesslich und windstill. Parmenides sprach vom ätherischen Flammenfeuer, das mild, leicht und mit sich selbst überall identisch, aber mit den anderen nicht identisch war. Äther war der All-Gemeinsame.

Empedokles sah im Äther die alles umschnürende, zusammenhaltende göttliche Kraft, die Feuerkraft, den Titan-Äther.

Platon und Aristoteles vertraten schließlich eine „Dynamische Ätherauffassung“: Der Äther sollte ein Körper sein, der sich ohne Anfang und Ende bewegte, und den Stoff der lichtartigen Seelen darstellen. Andere redeten auch vom Stoff der Gottheit.

Die Synkretisten verschmolzen die verschiedenen Ätherlehren später zu einer Art „doctrina communis“. Den Äther, gleichzusetzen mit Quintessenz, stellte man sich als eine lichtartige, beseelte, himmlisch-astrale und überirdische Materie vor.

Die Neuplatoniker ordneten den Äther als Bestandteil der Dämonen und Engel in ihre Philosophie ein. Er diente den Seelen als Vehikel, bildete ihre Umhüllung und vermittelte auf diese Weise zwischen den Seelen und den irdischen Leibern. Man könnte vom „Dritten“ im Kantschen Sinne sprechen.

Im Mittelalter wurden die Ätherlehren aus der Antike wieder aufgegriffen. Die aristotelische und neuplatonische Ätherauffassung spiegelte sich in den Begriffen „materia caeli“ und „corpus spirituale“ wider. Die Äthersphäre wurde zwischen der Luft- und der Feuerschicht angesiedelt. Der Äther wurde als durchsichtig angenommen.

Die Philosophen der Renaissance sahen den Äther als den anderen vier Elementen übergeordnete, himmlisch-astrale und unsichtbare Quintessenz an, als das Verbindungsmedium zwischen Geist und Körper.

Agrippa setzte Quintessenz gleich mit „spiritus mundi“. Sie war die samenentfaltende Kraft, das Prinzip der ständigen Belebung und Veränderung. Paracelsus setzte alle Wesen als aus himmlisch-astralem und unsichtbarem Leib bestehend voraus. Er nannte diesen Leib auch Substrat aller Materie oder „spiritus“. Agrippa und Paracelsus versuchten sogar den „spiritus“ auf dem Wege der Alchimie abzusondern.

Für Giordano Bruno, einen der ersten neuzeitlichen Denker, der wegen seiner kopernikanischen Weltauffassung in Konflikt mit der Inquisition geriet, war der Äther unermesslich und beseelt, erfüllte das Weltall und durchdrang als „spiritus universi“ alle Körper. Brunos Äthervorstellung wurde später von den Naturwissenschaften übernommen und weiterentwickelt. Diese stoisch-neuplatonische Auffassung vom Äther findet man bei den Physikern und Chemikern Bacon, Gassendi und Boyle.

Newton erklärte die feinste Materie, den Äther, als notwendig zur Deutung der Licht- und Schwereerscheinungen. Daß diese einem historischen Wörterbuch der Philosophie entnommene Beschreibung der Äthervorstellung Newtons zu undifferenziert ist und daher Newton nicht ganz gerecht wird, wird sich im Abschnitt IV herausstellen.

In der Romantik fand der Äther Eingang in die naturphilosophischen Betrachtungen Schellings. Der Äther galt als Darstellung Gottes, als Urkraft.

Der Äther- und Quintessenz-Begriff lebt bis heute vor allem in den Lehren der Vitalisten, Theosophen und Spiritisten fort. Darauf soll aber im Rahmen der vorliegenden Darstellung nicht eingegangen werden.

III. Äthervorstellungen Descartes' und Huygens'

Dieser Abschnitt soll den Übergang der Ätherlehren von der Philosophie in die Physik aufzeigen. Descartes kam durch seine Konstruktion eines Weltsystems zur Ätherhypothese. Entgegengesetzt zu Aristoteles, sah er den Raum und den mit dem Raum identischen Stoff als homogen an. Körper definierte er als Raumteile mit derselben Geschwindigkeit. Die dynamische Wechselwirkung der Körper stellte er sich als durch ein Zwischenmedium übertragene Stöße vor. Die unbeobachtbaren Zwischenkörper sollten durch Verschiebungen gegeneinander die Wechselwirkung bestimmen. Mit Hilfe dieser Konstruktion erklärte er die Schall-, Wärme- und Lichtausbreitung. Die cartesische Ätherhypothese hat sich drei Jahrhunderte lang ausgewirkt. In der Gravitationslehre wurden die Äthertheorien durch Newton verdrängt, als Lichttheorie waren sie bis weit ins 19. Jahrhundert hinein sehr bedeutsam. Allerdings sind die Äthertheorien im Zusammenhang mit der Gravitation gerade historisch sehr interessant. Sie sind Ausdruck der Hoffnung, die Gravitation letztendlich mechanisch erklären zu können.

Descartes sieht im Äther die Ursache der Schwerkraft. Der Äther erfüllt den Raum absolut. Die Zentrifugalkraft reißt das zweite Element mit den Körpern fort. Er verdeutlicht das Phänomen an folgendem Versuch: In einem mit Wasser gefüllten, rotierenden Becherglas treiben Bleikugeln an den Außenrand, während sich Holzkugeln im Vergleich zu den bleierneren näher an der Rotationsachse befinden. So soll die Schwerkraft entstehen. Die Theorie enthält aber mehrere willkürliche Annahmen, ist streng mechanistisch und schließt eine Fernwirkungstheorie aus. Daher stellt Newton sich später gegen Descartes' Wirbeltheorie. Auf den heutigen Betrachter machen Descartes' Vorstellungen vom Lichtausbreitungsprozeß einen provisorischen Eindruck. Descartes benutzt das Bild eines Blinden, der mit Hilfe eines Stockes die um ihn liegende Welt abtastet. Genauso tasten die Augen mit einem Stab aus Ätherteilchen, dem Licht, die Gegenstände ab, um sie zu erblicken. Die Lichtausbreitung geschieht durch Verschiebung der Ätherteilchen. Die Lichtge-

schwindigkeit ist unendlich groß. Descartes schrieb einmal, daß er im Falle endlicher Lichtgeschwindigkeit seine ganze Philosophie aufgeben müßte. Die konkrete Erfahrung wäre auf diesem Gebiet unwichtig gegenüber der zugrundegelegten Metaphysik. Damals zeigte die Erfahrung aber auch eine im Rahmen der Meßmöglichkeiten instantane Lichtausbreitung.

Huygens war ein holländischer Physiker, der heute sicherlich vielen durch seine Pendeluhr oder sein Wellenprinzip bekannt sein dürfte. Huygens entwickelte eine Äther- und Wellentheorie des Lichtes. Er verwendete im wesentlichen die Methodologie Descartes', war aber gegen eine Wirbelachse. Vielmehr ordnete er – abgeleitet aus der Sternstellung – der Welt ein Wirbelzentrum zu. Widersprüchlich erschien ihm die Tatsache, daß in Descartes' Wirbeln die Körper umso mehr nach außen getrieben wurden, je größer ihre Dichte war. Anders als Descartes ging Huygens von einer endlichen Lichtgeschwindigkeit aus und war ein Gegner der Korpuskulartheorie des Lichtes. Er fühlte sich darin durch Grimaldis Beugungsexperimente bestätigt. Das Licht sollte Bewegung von Materie sein, die aber wegen der Eigenschaften des Lichtes keinen materiellen Charakter haben durfte. Licht wurde beschrieben als der Impuls der sogenannten „Ätherteilchen“. Huygens ersann einen Lichtäther, in dem sich Lichtwellen wie Wasserwellen in Wasser ausbreiten sollten, denn man konnte sich die Existenz einer Welle ohne Ausbreitungsmedium nicht vorstellen. Der Äther mußte elastisch und durchsichtig sein. Wegen der sehr großen Lichtgeschwindigkeit sollte die Elastizitätskonstante des Äthers nach einem Gesetz aus der Elastizitätstheorie sehr groß sein. Daher schloß man auf einen äußerst „festen“ Äther. Dies stand im Widerspruch zu anderen seiner Eigenschaften wie z. B., daß er kaum spürbar sein durfte. Huygens sagte, daß die Möglichkeit, sich einen solchen Äther vorzustellen, ausreichen würde. Der Äther müßte nicht auf chemisch/physikalischem Wege nachgewiesen werden. Huygens ging von zusammengesetzten Ätherteilchen aus, unter denen eine gewisse Hierarchie bestand. Die dadurch hervorgerufenen mannigfaltigen Abstufungen versetzten die Natur in die Lage, die Vielzahl der beobachtbaren Erscheinungen hervorzubringen.

Huygens Wellentheorie besteht aus zwei Prinzipien:

1. Das Elementarwellenprinzip: Von jedem Punkt einer Wellenfront geht eine Elementarwelle (etwa eine Kugelwelle) aus.
2. Überlagerungsprinzip: Die neue Wellenfront ist die Einhüllende der Elementarwellen.

Da nach der Wellentheorie die Wellengeschwindigkeit im optisch dichten Medium kleiner als im optisch dünnen Medium ist, steht Huygens Theorie im Gegensatz zu Newtons Korpuskulartheorie. Das Experiment entschied schließlich zugunsten der Wellentheorie, die auch Reflexion und Beugung richtig erklärte.

IV. Newtons Äthertheorie

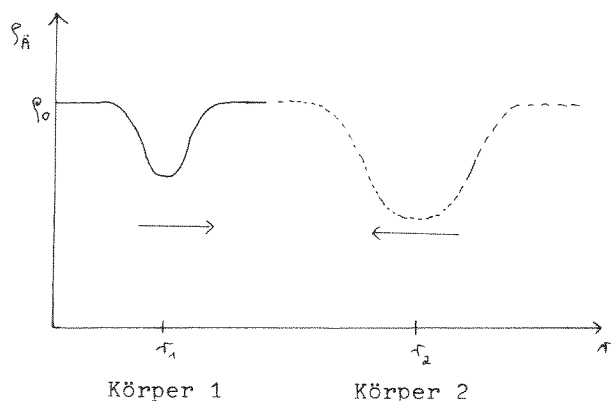
Im 17. Jahrhundert waren die Eigenschaften von Materie im Gaszustand (Gasgesetz) Gegenstand intensiver Untersuchungen, wie sie z. B. Boyle durchführte. Am Beispiel Newtons sollen einige der typischen Elemente der damaligen Äthertheorien behandelt werden. Alle Phänomene wurden Modifikationen eines feinen Gases, des Äthers, zugeschrieben. Dagegen war Newtons umfassende Mechanik von den

Begriffen Kraft und Trägheit geprägt. Aus seinen Beobachtungen des Lichtes folgerte er, daß man einen lichtartigen Äther fordern mußte, um die Dispersion, d. h. die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge, und andere Erscheinungen erklären zu können. Zur Deutung der Gravitation verlangte er eine Fernwirkungstheorie (mit instantaner Wirkungsausbreitung) oder einen gasartigen Vermittler zwischen sich anziehenden Körpern. Die letzte Hypothese diskutierte Newton mit Boyle, einem berühmten Chemiker der damaligen Zeit. Sie kamen schließlich dazu, die Existenz eines universellen Äthergases als eine Art „Deus ex machina“ der physikalischen Welt zu fordern. Newton sandte Boyle auf dessen Bitte hin einen Brief mit seinen Äthervorstellungen. Dieser Brief gilt als ein grundlegendes Zeugnis der mechanistischen Philosophie des 17. und 18. Jahrhunderts. Der Brief beginnt mit einer Entschuldigung für die Unordnung und Unausgegorenheit der in ihm geäußerten Gedanken. Darauf folgen jedoch recht genaue Angaben zum Äther, die Newton wegen seiner starken Vorbehalte allerdings in Form von Annahmen ausspricht:

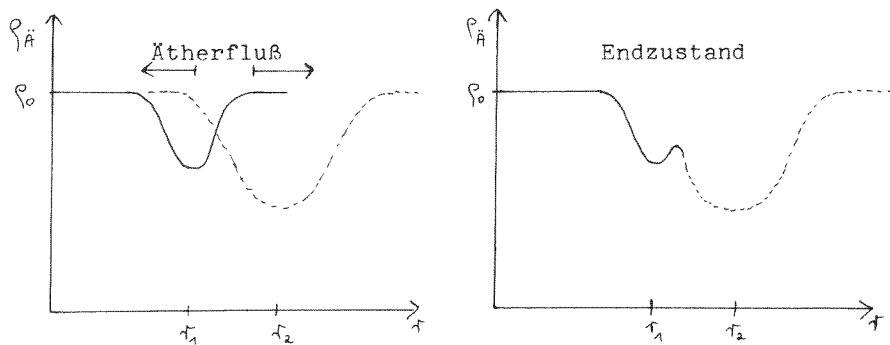
1. Annahme: Es existiert ein alle Orte und Körper durchdringender Äther, der ausdehnbar und kontrahierbar wie ein Gas, aber sehr viel „feiner“ ist.
2. Annahme: Die Ätherdichte ist in Körpern kleiner als außerhalb von ihnen. Der Äther ist in den Körpern feiner als außerhalb. Dahinter steht die Vorstellung von Körperporen. Ausgehend von dieser Annahme, kann Newton eine Theorie der Lichtbrechung, Kohäsion und der Lösungsvorgänge entwickeln.
3. Annahme: Der Übergang der Ätherdichte vom Innern der Körper zum Außenraum ist fließend. Daraus begründen sich die Lichtbeugung an undurchsichtigen Objekten, wie sie Grimaldis Experimente zeigten, und die unterschiedliche Brechung der einzelnen Farbbestandteile des weißen Lichtes.
4. Annahme: Wenn zwei Körper sich einander nähern, wird der Äther zwischen ihnen laufend feiner. Das geschieht unmerklich langsam, weil der Äther zwischen den Körpern sich nicht mehr so „frei“ bewegen kann.
5. Annahme: Wegen der vierten Annahme stoßen zwei sich einander nähernde Körper sich voneinander ab, weil der Äther zwischen ihnen wegströmt. Die abstoßende Kraft wächst dabei mit der Annäherung der Körper aneinander. Wenn die beiden Körper allerdings so nah beieinander sind, daß der Druck des externen Äthers größer als der des verdünnten zwischen den Körpern ist, werden die Körper kräftig aufeinander zu gezogen. Auf diese Art und Weise erklärt Newton das Laufen einer Fliege auf Wasser, die Tatsache, daß zwei polierte Glasflächen nur mit Druck zusammengebracht werden können, und daß in einer Flüssigkeit gelöste Substanzen sich nicht von selbst zu größeren Klumpen zusammenballen, sondern sich gleichmäßig über die ganze Flüssigkeitsmenge verteilen. Ebenso war dadurch das Bestreben von Gasen begründet, sich im ihnen zur Verfügung stehenden Volumen gleichmäßig auszubreiten.

Letzte Annahme bezüglich der Gravitation: Wie oben geschildert, ist die Ätherdichte nicht konstant, sondern variiert kontinuierlich. So befindet sich in der Erde weniger grober Äther als in den Luftregionen der Atmosphäre. Innerhalb der Erde wird der Äther zum Erdmittelpunkt hin in kontinuierlicher Weise immer feiner. Man stelle sich nun einen in der Luft hängenden oder auf der Erde liegenden Körper vor.

Dann muß der Äther in den der Erde abgewandten „Poren“ des Körpers gröber bzw. dichter als in den der Erde zugewandten sein. Dies folgt aus den Annahmen zwei und drei. Um diese Verteilung der Ätherdichte zu realisieren, wird der dichte Äther danach streben, aus dem Körper hinauszufließen und dem leichteren Äther Platz zu machen. Dies wiederum kann nur dadurch bewerkstelligt werden, daß die Körper aufeinander zu fallen, um den Raum „über“ ihnen für den dichten Äther freizumachen. Anhand dreier Skizzen läßt sich der Sachverhalt sehr anschaulich darstellen. Die Abszisse r steht dabei stellvertretend für die drei Raumdimensionen. Die Ordinate ist die Ätherdichte $\rho_{\text{Ä}}$. ρ_0 ist die Ätherdichte des Vakuums.



Man könnte einen Körper als Gebiet definieren, in dem die Ätherdichte ρ kleiner als die Vakuumätherdichte ρ_0 ist. Große Körper hätten dann im Vergleich zu ihren Ausmaßen exakte Grenzen. Wo wäre aber die Begrenzung eines sehr kleinen Objektes zu lokalisieren? Etwa an Orten bestimmter Ätherdichte, z. B. $0,9\rho_0$? Eine ähnliche Situation bei der Begrenzung von Korpuskeln kennt man heute aus der Quantenmechanik, in der das Betragsquadrat der sogenannten Wellenfunktion als Maß für die Dichte der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchen interpretiert wird. Der Vergleich von Newtons Äthervorstellungen mit der Quantenmechanik ist allerdings nicht zu ernst zu nehmen.



Nach diesem Exkurs sollen noch einige Bemerkungen zu Newtons Brief an Boyle angeführt werden. Obwohl die in dem Brief dargestellte Äthertheorie manche Erscheinungen erklären könne, schließt Newton den Brief, lege er großen Wert auf die Feststellung, daß seine Theorie sehr vage und auf Vermutungen gestützt sei. Er fordert Boyle auf, Fehler aufzudecken und sie ihm zu verzeihen. Er sei im übrigen nur durch Boyle dazu angeregt worden, Gedanken zu einem Bereich schriftlich zu äußern, für den er zu wenig Phantasie habe, um sich sicher in ihm zu bewegen. Der Brief trägt das Datum des 28. Februars 1678.

Der letzte Satz des Briefes deutet auf einen Grundsatz Newtons hin, den er später in seinen „Prinzipien“ in die Worte „hypotheses non fingo“ faßt. Auch zur Erklärung des Lichtes und seiner Ausbreitung wollte er keine Hypothesen heranziehen. Er strebte vielmehr eine anschauliche physikalische Theorie an, bediente sich schließlich aber doch verschiedener Hypothesen zum Licht. Auch Äther- und Wellenmodell schloß er nicht aus. In seiner Korpuskulartheorie des Lichtes waren Ätherschwingungen nötig, um bestimmte Erscheinungen zu deuten. Im luftleeren Raum stellte er sich einen feinen Äther vor, der elastisch und dünn sein sollte, um die Phänomene des Magnetismus und der Elektrizität erklären zu können. Die Erde sollte den Äther teilweise aufsaugen, und in ihr sollten komplizierte Äther/Stoff- und Stoff/Äther-Reaktionen ablaufen. Nach seiner Vorstellung erwärmte das aus Ätherwellen gedachte Licht den Äther, der seinerseits Druck auf das Licht ausübte. Daher wich das Licht in seiner Theorie vom dichten zum dünnen Äther zurück, wie man es in Brechungs- und Beugungsexperimenten beobachtet hatte. Auch in den Muskeln der Lebewesen liefen Ätherprozesse ab.

Je mehr Newton sich jedoch mit der Gravitation befaßte, desto unzulänglicher erschienen ihm die Äthertheorien zur Erklärung der Schwerkraft. Die Widersprüchlichkeit und das Unbehagen, mit dem Newton den Äther behandelte, läßt sich auch an der Tatsache ablesen, daß der Begriff Äther in seinen Schriften in von Auflage zu Auflage wechselnder Intensität anzutreffen ist. Letztlich bleiben aber immer gewisse Erscheinungen nur mit Hilfe eines Äthermodells vorstellbar. Newton verwarf sogar wieder die Fernwirkungstheorie der Gravitation und sah die Schwerkraft als nur durch ein „Agens“ vermittelbar an. Ob dieses Agens materielle oder immaterielle Eigenschaften haben sollte, blieb dem Leser überlassen. Schließlich klammerte er den Äther aus seinem Weltbild aus und verwendete ihn lediglich als didaktische Hypothese, die Leere mit Agens füllt, oder wie in den „Mathematischen Prinzipien“ als hypothetische Konstruktion in seiner Theorie der Kohäsion und einiger optischer Erscheinungen.

Nach Newton oblag es der Wissenschaft, induktiv vorzugehen. Er hielt stets eine strikte Trennung der Modellvorstellungen von den Prinzipien aufrecht und wollte durch Gesetze und Schlußfolgerungen, von Ursache zu Ursache fortschreiten. Die erste Ursache stand für ihn von vornherein fest: Gott, der überall, auch im leeren Raum war. Die Körper waren demnach schon an und für sich schwer. Wo Gesetze herrschten, wären nur Leere und bewegte Körper. Die Körper bewegten sich in einem absoluten ruhenden Raum und in einer absoluten Zeit.

Für den heutigen Betrachter, der – wie KUZNECOV in seinem Buch „Von Galilei bis Einstein“ etwas pathetisch sagt – „durch den Schmelztiegel der Relativitäts- und Quantentheorie gegangen ist“, muß gerade die intuitive, widersprüchliche Seite Newtons verständlich und interessant sein.

V. Äthermodelle und Äthermechanik im 18. und 19. Jahrhundert

Im 18. und 19. Jahrhundert kam es zu einer Art Hochkonjunktur der Äthervorstellungen, die einerseits in der Fülle von Experimenten begründet lag und andererseits durch theoretische Modelle genährt wurde. Optische Versuche, unternommen von Young und Fresnel, bestätigten die Wellentheorie des Lichtes. Beide Forscher gingen von der Existenz des oben erläuterten Lichtäthers aus, der als ruhend angenommen wurde. Eine große Zahl von Interferenzversuchen bestätigte die Aussagen der Wellentheorie.

Es traten allerdings auch Gegner der Äthertheorie auf den Plan, wie z. B. Faraday, der dem bekannten Faraday-Käfig seinen Namen gab. Faraday leugnete die Existenz des Äthers und erklärte Schwingungs- und Wellenerscheinungen wie das Licht als Schwingungen bzw. Wellen eines substantiellen Kraftfeldes, das den zentralen Begriff seiner Theorie bildete und für das eine Art Krafterhaltung galt. Das Feld stellte er durch sogenannte Kraftlinien dar, die heute jeder Schüler in Versuchen mit Magneten und Eisenfeilspänen anschaulich gemacht bekommt. Durch die Einführung des Feldbegriffes umging Faraday etliche Schwierigkeiten der Äthertheorien, wie z. B. die Entstehung longitudinaler Wellen. Dagegen war das Licht als polarisierbar erkannt worden, mußte also eine transversale Welle sein. „Transversal“ bedeutet dabei, daß die „Teilchen“ des Ausbreitungsmediums senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen. „Longitudinal“ heißt entsprechend, daß die Schwingung in Ausbreitungsrichtung erfolgt. Faraday hielt den Äther nicht für überflüssig, aber seine Theorie für eine Alternative, die von einem materiellen Kraftfeld ausging, das nicht-Newtonschen Gesetzen gehorchen sollte.

Neben den Erfolgen der Wellentheorie bei der Deutung der Interferenzversuche gab es jedoch auch große Schwierigkeiten mit der Lichtätherhypothese und mühevollen Versuche, die Probleme, die daraus entstanden, zu lösen. Da die Lichtwellen sich als transversal herausgestellt hatten, kam nur ein fester Ätherstoff in Frage. Auf der anderen Seite hatte das sogenannte Siegelack- oder Harzmodell gewisse Anerkennung gefunden. In Siegelack oder Harz fallen Bleikugeln fast ungehindert, bewegen sich nahezu reibungsfrei wie in einem Gas. Einem kurzen und heftigen Schlag setzt der Lack jedoch einen Widerstand entgegen, der demjenigen durch einen Festkörper vergleichbar ist. Ähnlich wie die Kugeln im Lack bewegen sich die Planeten und Sterne durch den Äther, ohne ihn zu spüren, während der Äther für das Licht wegen der hohen Lichtgeschwindigkeit – dem Schlag auf Harz vergleichbar – einen relativ großen Widerstand darstellt. Da auch in einem festen Körper longitudinale Wellen möglich sind, suchte man neue Beweise für die Existenz des Äthers in elektrischen Erscheinungen. Die Gravitation blieb im Dunkeln.

Maxwell nahm den Äther als Arbeitshypothese zur Hilfe. Er sollte der Newtonschen Mechanik unterworfen sein. Maxwell wandte sich gegen Fernwirkungstheorien und fand später seine vier berühmten Gleichungen der Elektrodynamik, die alle experimentellen Befunde der vorausgegangenen Jahre mathematisch zusammenfassen und bis heute als „Kaffeesatz“ der Elektrodynamik gelten. Maxwell suchte aber auch nach einer „besseren“ Theorie, die er über genauere Kenntnis des Äthers zu finden hoffte. Sein System von Gleichungen erwies sich immer wieder als richtig zur Beschreibung der elektromagnetischen Erscheinungen und war nicht an die Existenz eines Äthers gebunden. Eine mathematische Konsequenz seiner

Gleichungen war die Möglichkeit elektromagnetischer Wellen, die Hertz einige Jahre später tatsächlich im Experiment nachwies. Diese Wellen sollten sich ebenfalls in einem Äther ausbreiten, weil sie sich auch durch den anscheinend leeren Raum fortpflanzen. Maxwell forderte die Identität von Licht- und Elektrizitätsäther, d. h. er deutete Licht als elektromagnetische Welle. Er blieb aber bei seinem mechanischen Äthermodell und billigte auch den Faradayschen Kraftlinien eine Bedeutung zu.

Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts blieben zwei Probleme in der Äthertheorie ungeklärt: 1. Alle Licht- und Elektrizitätserscheinungen waren durch die Maxwellgleichungen hinreichend genau beschrieben, ohne daß ein Äther überhaupt notwendig war. Der Äther erwies sich vielmehr in vielen Fällen als ungeeignetes Modell. 2. Die Frage nach der Mitführung des Äthers durch Materie. Im Falle einer Mitführung wäre zu klären, wie sich die elektrische und magnetische Feldstärke dadurch ändern. Auf die Mitführung des Äthers wird am Ende dieses und im nächsten Abschnitt ausführlich eingegangen werden.

Im letzten Jahrhundert wurden Äthermechaniken entwickelt, die oft aus aufwendigen Getrieben bestanden. Gemeinsam ist ihnen, daß sie mathematisch sehr kompliziert sind. Die Mechaniken und Modelle lassen sich im wesentlichen in zwei Klassen einteilen:

a) Modelle mit superfluidem Äther: Die Vibrationen der Flüssigkeit bewirken Anziehung und Abstoßung der Körper, ähnlich wie auf einer Wasserwelle schwimmende Gegenstände in Abhängigkeit ihrer Größe und der Wellenlänge der Welle aufeinander zu oder voneinander weg getrieben werden. Die dazugehörigen Differentialgleichungen sind jedoch nie gelöst worden. Während für viele Äthermodelle eine strikte Trennung von Äther und Materie kennzeichnend war, entwarf Thomson eine Wirbeltheorie des Äthers, in der die Materie aus Ätherwirbeln bestehen sollte, die dem Helmholtzschen Wirbelsatz unterlagen.

b) Modelle mit festem Äther: Lord Kelvin, wie Thomson später hieß, stellte sich den Äther als einen elastischen Festkörper vor, wobei allerdings das bereits erwähnte Problem mit der Entstehung longitudinaler Wellen auftrat. Die longitudinalen Wellen schloß Kelvin aus, indem er seinen Äther unter negativen Druck setzte – eine vom physikalischen Standpunkt her unsinnige Hypothese, weil sie den Begriff des Drucks seiner eigentlichen Bedeutung ganz beraubte. In Analogie zu den Wirbeln in seinem Flüssigkeitsmodell stellten hier Verdrillungen des festen Äthers Materie dar.

Trotz umfangreicher Anstrengungen ist es nie gelungen, Elektrizität und Magnetismus auf einen mechanischen Äther zurückzuführen. Lediglich die nüchterne Maxwellsche Interpretation hatte Erfolg. Die Äthertheorien verwickelten sich in Widersprüche. Fundamentale Probleme wie das einer sich bewegenden elektrischen Ladung blieben ungeklärt. Im Zusammenhang mit dieser Frage schob sich dann das Problem der Mitführung des Äthers durch Materie in den Vordergrund des Interesses. Einen Anstoß dazu gab die sogenannte Aberration, der Vorhaltewinkel, bei Sternbeobachtungen. Bei der Betrachtung von Fixsternen müssen die Fernrohre innerhalb eines halben Jahres um einen gewissen Winkel gekippt werden, weil die Erde sich nach sechs Monaten jeweils in entgegengesetzter Richtung quer zum Fernrohr bewegt. Das Korpuskularmodell für das Licht gab eine einfache Erklärung für die Aberration. Fresnel folgerte aus der Aberration, daß der

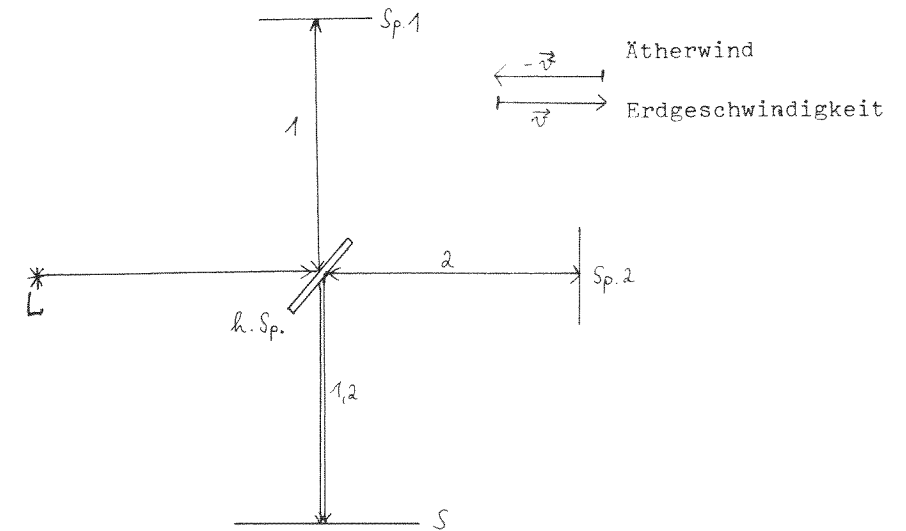
Äther durch Materie nicht mitgeführt wird, sondern ruht, und die Gestirne sich folglich ungestört durch ihn hindurch bewegen. Ein anderes Experiment zur Mitführung des Äthers war der sogenannte Fizeau-Versuch, mit dem die Lichtgeschwindigkeit in einem schnell fließenden Wasserstrahl gemessen wurde. Es ergab sich eine teilweise Mitführung, deren Größe durch den sogenannten Fresnel-Koeffizienten theoretisch angegeben wurde. Das Ergebnis des Fizeau-Versuchs ergab sich später völlig zwanglos aus der Relativitätstheorie. Stokes glaubte, daß der Äther an der Erdoberfläche wegen der Haftung an der Erde vollständig mitgeführt würde und mit wachsendem Abstand von der Erde immer weniger, um schließlich in unendlich großer Entfernung von ihr absolut zu ruhen. Stokes konnte mit seinem inkompressiblen, flüssigen Äther ebenfalls die Aberration erklären und berechnen. Wegen der Inkompressibilität müßten im Stokesschen Äther Wirbel entstehen. Planck umging später diese Schwierigkeit, dadurch daß er den Äther kompressibel „machte“ und der Gravitation unterwarf.

Trotz aller Bemühungen war die von den Versuchen immer wieder bestätigte Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Ätherdichte eine im Rahmen der Äthermodelle unerfüllbare Forderung. Am Ende des letzten Jahrhunderts wurde dazu ein entscheidendes Experiment entwickelt, vor dessen Schilderung aber noch ein anderes physikalisches Problem des 19. Jahrhunderts angesprochen werden soll: Ist der Äther ein bewegliches Medium, das als absolutes Bezugssystem dienen kann? Ist er gar endlich eine Verkörperung von Newtons absolutem Raum? Zur Entscheidung dieser Frage müßten die Lichtgeschwindigkeiten in bewegten und ruhenden Systemen gemessen werden. Der Doppler-Effekt würde zwar ein solches Experiment ermöglichen, ließe aber nur die Messung von Relativgeschwindigkeiten zu. Wie ist nun die absolute Bewegung nachweisbar? Ist sie überhaupt nachweisbar? Man hatte berechnet, daß optische Versuche höchstens Effekte von der Ordnung v^2/c^2 (mit v Körpergeschwindigkeit, c Lichtgeschwindigkeit) liefern würden. Für die Erde mit $v \approx 30 \text{ km/s}$ ergab sich $v^2/c^2 \approx 10^{-8} \ll 1$, ein sehr kleiner Wert. Im Rahmen des bereits erwähnten Stokesschen Äthermodells konnten sehr viele Erscheinungen geklärt werden. Der Ausgang aller optischen Versuche war danach unabhängig von der Existenz eines Äthers, der nach Stokes einer komplizierten nicht-Newtonschen Mechanik unterworfen werden mußte, um im unendlich fernen Raum zu ruhen.

Schließlich kam man auf einen sehr anschaulichen Gedanken. Falls der Äther ruhte und die Erde sich durch ihn bewegte, so müßte doch ein Ätherwind, ähnlich dem Fahrtwind, den z. B. ein Radfahrer auch bei Windstille spürt, nachweisbar sein. Man bemühte sich daraufhin sehr intensiv um die Messung des Ätherwindes. Wie bereits erwähnt, zeigte die Theorie, daß die erste Ordnung v/c in optischen Versuchen nicht beitragen konnte. Die Suche nach einem geeigneten Experiment zweiter Ordnung begann und endete schließlich bei einem Aufbau, dessen Anfänge bis Maxwell zurückverfolgt werden können: Dem Michelson-Morley-Experiment.

VI. Der Michelson-Morley-Versuch, Lorentzsche Elektronentheorie

Der Versuchsaufbau ist in der folgenden Zeichnung dargestellt:



Das gebündelte, monochromatische Licht der Lichtquelle L fällt auf einen halbdurchlässigen Spiegel $h. Sp.$ und wird dort in zwei Strahlen 1 und 2 aufgeteilt, die in zueinander senkrechten Richtungen verlaufen. Der Strahl 1 wird am Spiegel $Sp. 1$ gespiegelt und läuft in sich zurück zum Spiegel $h. Sp.$ Strahl 2 geht durch den Spiegel $h. Sp.$ und wird am Spiegel $Sp. 2$ in sich zurück zum Spiegel $h. Sp.$ gespiegelt. Von dort aus laufen die Strahlen 1 und 2 den gleichen Weg zum Auffangschirm S , auf dem sie ein Interferenzbild erzeugen, dessen Gestalt von der Phaselage der Strahlen 1 und 2 zueinander abhängt. Man kann die Situation mit der zweier Schwimmer bei der Durchquerung eines Flusses mit konstanter Fließgeschwindigkeit vergleichen: Der eine Schwimmer schwimmt mit konstanter Geschwindigkeit relativ zum Wasser eine gewisse Strecke der Länge L flußabwärts und dann flußaufwärts wieder zum Ausgangsort zurück. Der zweite schwimmt mit derselben Geschwindigkeit relativ zum Wasser eine Strecke der Länge L quer zur Stromrichtung und zurück. Es läßt sich sehr einfach ausrechnen, daß der gegen bzw. mit dem Fluß schwimmende länger als der andere Schwimmer braucht. Bei Zugrundelegung eines Äthers, in dem sich die Erde bewegt, entsprechen die Strahlen 1 und 2 im Michelson-Morley-Versuch den Schwimmern. Auch hier läßt sich die Differenz der Ankunftszeiten der Lichtstrahlen auf dem Auffangschirm angeben. Dreht man die ganze Apparatur um 90° , so vertauschen sich die Rollen der beiden Strahlen. Der zunächst nicht gegen bzw. mit dem angenommenen Ätherwind laufende Strahl verläuft nun in der Richtung des Ätherwindes. Als Konsequenz daraus sollte sich das Interferenzbild in bestimmter, berechenbarer Weise ändern. Das Ergebnis des Experiments war aber negativ im Sinne der Äthertheorie. Obwohl die berechneten Effekte im Rahmen der Meßgenauigkeit des Versuchs lagen, wurde keine Änderung des Interferenzbildes festgestellt; das „Todesurteil“ für den Ätherwind.

Das berühmte Experiment wurde mehrmals wiederholt, führte aber immer wieder zum gleichen Resultat. Wenn man den Äther überhaupt noch retten wollte, schien man sich also für den Stokesschen mitgeführten Äther entscheiden zu müssen. Bei genauerer Hinsicht offenbarte sich jedoch folgendes Dilemma: Fresnels Theorie erklärte den Fizeau-Versuch, die Stokessche dagegen nicht. Fresnel scheiterte aber am Michelson-Morley-Versuch, während Stokes' Theorie mit ihm keine Probleme hatte.

Zahlreiche Versuche zur Erforschung anderer Eigenschaften des Äthers wurden im letzten Jahrhundert unternommen. Immer wieder stießen die Experimentatoren auf die im Rahmen der damals bekannten Theorien unverständliche Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Die Bestrebungen, eine Theorie zu finden, die simultan den Fizeau- und den Michelson-Morley-Versuch richtig beschreibt, gewannen immer größere Bedeutung.

Einen ersten Erfolg brachte die Elektronentheorie des Leidener Physikers Lorentz. Sie war allerdings nach Heaviside nur eine „Erklärung der Erklärung“. Lorentz' Theorie fußte auf zwei Prinzipien: 1. Der Äther ruht. 2. Alle Körper sind aus positiven und negativen Ladungen aufgebaut. Lorentz entwickelte auf der Grundlage der Maxwell-Gleichungen eine Theorie bewegter Ladungen im Äther, ohne den Äther selbst zu ergründen. Er wollte lediglich die Bewegung mit Hilfe von Gleichungen beschreiben. Der Versuch gelang. Lorentz' Elektronentheorie hat ihre Gültigkeit größtenteils bis heute behalten. Der Äther sollte sich durch die Bewegungen der Ladungen ändern und durch Rückwirkung auf die Ladungen die Gesetze dieser Bewegung bestimmen. Die vom Äther auf die bewegte Ladung ausgeübte Kraft, die Lorentzkraft, bezeichnet heute noch die Kraft eines elektromagnetischen Feldes auf eine bewegte Ladung. Lorentz konnte auch die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen, also auch des Lichts, in Dielektrika ableiten und die Fresnel-Mitführung erklären. Lorentz vereinigte somit drei große Theorien, die Maxwells, Fresnels und die von der Vorstellung partikelhafter Ladungen. Das Michelson-Dilemma blieb aber zunächst bestehen. Zusammen mit Fitzgerald leitete Lorentz aus seiner Theorie eine Schrumpfung des Feldes einer bewegten Ladung in ihrer Bewegungsrichtung ab, was einer Längsschrumpfung gegen den Ätherwind entsprach. Diese Schrumpfung lag demnach auch im wie alle Körper aus Ladungen aufgebauten Michelson-Apparat vor. Der Ätherwind beeinflusste das Experiment zwar, aber in unsichtbarer Weise. Eine Berechnung ergab, daß die Schrumpfung des in Ätherwindrichtung zeigenden Arms der Apparatur die Beobachtung des Windes unmöglich machen mußte. Es wurden sozusagen Meßobjekt und Maßstab gleichermaßen verkürzt. Der Ätherwind war eine Art „Ektoplasma“, das sich einer Beobachtung entzog. Was erzwang dann überhaupt noch seine Existenz? Zu zeigen blieb Lorentz, daß in einem bewegten Bezugssystem die physikalischen Gesetze der Form nach in erster Ordnung v/c wie im Ruhesystem lauteten. Diese Forderung führte ihn auf die sogenannte „Lorentztransformation“ der Koordinaten, die im Gegensatz zur Galilei-Transformation nicht nur die Mechanik invariant gegenüber Transformationen zwischen gegeneinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegten Bezugssystemen ließ, sondern auch die Maxwell-Gleichungen, also die Elektrodynamik. Die Beschreibung eines beschleunigten Elektrons ermunterte Lorentz außerdem zur Einführung einer Transformation der Zeit, einer sogenannten lokalen Zeit, die ihm allerdings, wie er stets betonte, als reine Hypothese

diente. Ein Ergebnis seiner Untersuchungen war, daß alle elektromagnetischen und optischen Phänomene in erster Ordnung v/c unabhängig vom Bezugssystem sein sollten. Zwei Schwierigkeiten konnte auch Lorentz nicht auflösen:

- 1) Die Erweiterung der Theorie auf Effekte höherer Ordnung in v/c . Vielleicht war dadurch eine Möglichkeit gegeben, die Einflüsse der Bewegung relativ zum Äther zu messen.
- 2) Die Unvereinbarkeit mit Newtons Mechanik. Lorentz zog sich immer auf den Standpunkt zurück, daß seine Theorie eine bloße Arbeitshypothese wäre. Jedoch mußte er folgern, daß Newtons drittes Axiom, $actio = reactio$, nicht für den Äther galt. Auf die $actio$ der Lorentzkraft, der Kraft des Äthers auf Ladungen, durfte es nämlich nach seiner Theorie keine $reactio$ der Ladung auf den Äther geben. Nach den Maxwell-Gleichungen sollte der Äther sich außerdem bewegen. Lorentz ging von einem nackten, eigenschaftslosen, nicht-Newtonscher Mechanik unterstehenden Äther aus. Lorentz war gegen einen festen oder flüssigen Äther und gegen Fernwirkungstheorien. Der Äther sollte nur in Ruhe zu sich selbst sein. Sein Verhältnis zum Äther war dem Newtons zum absoluten Raum vergleichbar und kennzeichnet die Krise in der Physik am Ende des letzten Jahrhunderts.

VII. Einsteins Relativitätstheorie und das „Ende“ des Äthers

Die Krise wurde durch Einsteins Relativitätstheorie beendet. Einstein löste alle mit dem Äther zusammenhängenden Probleme vollständig auf. Vor der Darstellung von Einsteins Ideen soll noch einmal kurz an die Situation erinnert werden, in der sich die Physik vor Einstein befand.

Der Äther war mechanisch nicht erklärbar, als absolutes Bezugssystem unbrauchbar. Alle Versuche, den Ätherwind nachzuweisen, mißlangen. Als Erklärung wurde die Behauptung herangezogen, daß die Abweichungen zu klein wären, wenn sie überhaupt beobachtbar waren. Der Äther widersetzte sich einer Deutung im Rahmen der klassischen Mechanik, nach der er einer Beschleunigung unterliegen müßte. Die Theorie des Äthers sagte verschiedene Lichtgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Systemen voraus; alle Experimente ergaben die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bezugssystem. Die Gesetze der Newtonschen Mechanik sind invariant gegenüber Galilei-Transformationen. Daraus ergibt sich der bereits erwähnte Konflikt zwischen Mechanik und Elektrodynamik, denn letztere besitzt diese Invarianz nicht. Maxwell hatte Optik und Elektrodynamik vereinheitlicht zu einer geschlossenen Theorie, die experimentell ausgezeichnet bestätigt worden ist und vom Prinzip der Nahwirkung ausging. Lorentz' Elektronentheorie war nicht in der Lage, die klassische Mechanik und die Elektrodynamik zu einer Theorie zusammenzubringen.

Wie sieht Einsteins Lösung dieses Problems aus? Er hinterfragte die bis zum Ende des 19. Jahrhunderts geltende Unumstößlichkeit der Prinzipien des absoluten Raums und der absoluten Zeit. Einstein glaubte, daß nur ein neues universelles Prinzip – ähnlich etwa dem des „perpetuum mobile“ in der Thermodynamik –, das nicht auf ausschließlich empirischen Fakten beruhte, weiterhelfen könnte. Sein „revolutionärer“ Ansatz postulierte die Gültigkeit zweier Prinzipien:

1) Relativitätsprinzip: Es existiert kein privilegiertes Bezugssystem. Die Naturgesetze sind der Form nach invariant.

Dieses Prinzip entspricht dem menschlichen Streben nach einem möglichst harmonischen Weltbild.

2) Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, gemessen zum Emissionsträger. Einstein „forderte“ die Konstanz wegen der darauf hinweisenden Experimente. Die Lichtwellen sollten sich wie von einem fahrenden Boot aus erregte Wasserwellen mit einer von der Bootsgeschwindigkeit unabhängigen Geschwindigkeit ausbreiten.

Einstein suchte dann die diesen beiden Prinzipien entsprechende Transformation der Raum-Zeit-Koordinaten zweier sich gegeneinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegender Bezugssysteme und stieß natürlich auf die Lorentztransformation. Er erhielt sie aber von einem ganz anderen, allgemeineren Ausgangspunkt her als Lorentz. Lorentz kam zu der Transformation, indem er die Effekte des von ihm postulierten Äthers auf Körper betrachtete. Einstein fand sie demgegenüber dadurch, daß er gerade diese Effekte vermied und ausschließlich von seinen beiden Prinzipien ausging. In Einsteins Theorie ist die Zeit (und auch der Raum) nicht mehr absolut. Die „neue“ Zeit ist aber keine „lokale“ oder „hypothetische“ Zeit wie bei Lorentz, der selbst sagte, die lokale Zeit wäre nicht „wahr“. Daher ist die Relativitätstheorie eine grundlegend neue physikalische Weltanschauung. Zu einem Ereignis existieren unendlich viele Zeiten, jede ihrem Bezugssystem zugeordnet. Alle diese Zeiten sind gleichermaßen „wahr“, und jede von ihnen ist meßbar in ihrem System. Die lokale, hypothetische Zeit ist ein unsinniges Konstrukt. In Einsteins Theorie ist kein Platz für ein substantielles Feld oder Materie als physikalische Größe. Kein System ist ausgezeichnet, jedes gleich real. Das ausgezeichnete System des Äthers existiert nicht. Bewegung relativ zum Äther hat nach dem Relativitätsprinzip keinen Einfluß auf die physikalischen Gesetze. Daraus folgt, daß Äther und absoluter Raum unnötige, nicht sinnvolle, d. h. zur Naturbeschreibung ungeeignete Begriffe sind.

ZUKAV vergleicht diese Situation in seinem Buch „Die tanzenden Wu Li Meister“ mit einer kleinen Geschichte. Wenn der Kaiser nackt durch die Straßen lief, hielten sich treue Monarchisten die Augen zu und bewunderten des Kaisers schöne Kleider. Einstein sei nun der erste, der verkündet, der Kaiser sei nackt, der Äther sei überflüssig. Es gibt keine absolute Geschwindigkeit, die jedem Raumpunkt zugeordnet werden kann. Natürlich kann solch ein Vergleich dem von Einstein begründeten Umdenken in der Physik in keiner Weise gerecht werden. Einstein führte eine neue den praktischen Bedürfnissen angepaßte Art der Gleichzeitigkeit ein, die auf einer genau vorgeschriebenen Uhrensynchronisation beruht. Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse verliert damit ihren absoluten Charakter und wird als vom Beobachter abhängig erkannt.

Seit Einstein sind die physikalischen Größen in keiner Substanz mehr verankert, wie sie es nach Newton 300 Jahre lang gewesen waren. Laut Einstein beraubte Lorentz den Äther aller seiner Eigenschaften, die Immobilität ausgenommen. Einstein erkennt zwar eine Art abstrakten Äther an, als den er den mit physikalischer Realität ausgestatteten Raum ansieht. Das ist aber eine von den konventionellen Äthervorstellungen weit entfernte Auffassung, die von immaterieller Natur ist und

eher dem schon angesprochenen menschlichen Drang nach einem harmonischen Weltbild entspricht, als daß sie konkrete physikalische Hintergründe hat. Einsteins physikalisches Weltbild steht im wesentlichen auf zwei Grundpfeilern:

1) Die Physik ist eine einheitliche Feldtheorie.

2) Die Naturgesetze sind invariant gegenüber Lorentztransformationen.

Insofern markiert die Relativitätstheorie das Ende des Übergangs von einer Substanz- zu einer Invarianztheorie in der Physik.

Die Relativitätstheorie kann als eine geometrische Theorie aufgefaßt werden, weil in ihr jede Materiekonfiguration im Raum in eine Geometrie – bestimmt durch ihren metrischen Tensor – übersetzt wird. Deshalb enthält die Theorie keinen Kraftbegriff und keine Materievorstellung. In der von ihr beschriebenen Welt gibt es keine Kräfte, sondern nur Raum-Zeit, d. h. eine vierdimensionale Geometrie. Um zu erläutern, was das heißt, sei ein anschauliches Beispiel angeführt, das vom britischen Philosophen und Mathematiker Russell stammt:

Man stelle sich einen Berg in stockfinsterner Nacht vor. Auf dem Gipfel des Bergs brenne ein Licht, das ein Hubschrauberpilot aus der Luft beobachtet. Eine Gruppe von Wanderern besteige den Berg. Jeder von ihnen trage eine Fackel. Aus der Sicht des Piloten gehen die Bergsteiger „merkwürdigerweise“ nicht geradeaus auf das Licht auf dem Berg zu, sondern nähern sich ihm auf serpentinenartigen Wegen. Ohne Kenntnis der Landschaft wird der Pilot im Rahmen der vorrelativistischen Physik sagen, daß eine Kraft existiere, vielleicht eine Art von Zentrifugalkraft, die die Wanderer daran hindert, den scheinbar direktesten Weg zum Licht zu wählen. Die Relativitätstheorie deutet den Sachverhalt aus der Sicht des Beobachters bei Tage. Die Geometrie lasse nur den eingeschlagenen Weg als kürzeste Verbindung in dieser Geometrie zu. Das „Raum-Zeit-Gebirge“ ist so beschaffen, daß nur dieser Weg möglich ist, so wie eine Kugel in einer Rinne nur eine ganz bestimmte Bahn nehmen möge hier genügen. In einem Boot auf einem klaren und flachen Gewässer sitzend, kann man die im Wasser umherschwimmenden Fische beobachten. Häufig passiert es, daß ein knapp über dem Grund schwimmender Fisch ruckartig zur Seite ausweicht. Die Physik vor Einstein ging davon aus, daß an dieser Stelle auf dem Grund eine Kraft herrsche, die den Fisch zu diesem Verhalten zwingt. Nach Einstein müßte man dagegen sagen, daß der Grund des Gewässers, die Geometrie, den Fisch auf diesen Weg bringe, etwa weil an dem Ort eine Erhebung sei. Von einer Entscheidung des freien Willens der Individuen sei in den beiden Beispielen einmal abgesehen.

Eigene Bewegung bleibt nach dem Relativitätsprinzip unsichtbar, die Kontraktion in Bewegungsrichtung ist nach Lorentz' Theorie ein physikalischer Vorgang in dem zu messenden Objekt und erfordert die Einführung der abstrakten lokalen Zeit. Nach Einstein ist die Lorentzkontraktion eine Folge der verschiedenen Bezugssysteme, von denen aus ein Körper beobachtet wird. Zwei gegeneinander bewegte Beobachter sehen sich gegenseitig verkürzt. In der Relativitätstheorie geht die Lorentzkraft in ganz natürlicher Weise aus den Transformationseigenschaften hervor. Elektrische und magnetische Felder hängen vom Bezugssystem des Betrachters ab. Hier geraten somit zwei Weltanschauungen aneinander. Es handelt sich nicht um technische Unterschiede, sondern um metaphysische.

Die spezielle Relativitätstheorie ist empirisch umfassend bestätigt worden. Die Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie wurden bei der Drehung der Merkurbahn und der Beobachtung gekrümmter, von einem hinter der Sonne befindlichen Stern ausgehender Lichtstrahlen bestätigt. Das letzte Phänomen wurde 1919 von Livingston während einer Sonnenfinsternis untersucht.

VIII. Sichtweise der gegenwärtigen Physik

Diesem Abschnitt liegt zur Hauptsache das Buch „Relativität, Gruppen, Teilchen“ von SEXL und URBANTKE zugrunde.

Die Maxwell-Gleichungen sind vollkommen unabhängig von der Existenz eines Äthers. Lorentz' Vorstellungen von der Kontraktion bewegter Körper erscheint uns heute als viel zu umständlich. Man kann auf mathematischem Wege zeigen, daß Einsteins erstes Prinzip, das Relativitätsprinzip, ausreichend ist. Aus ihm folgt automatisch die Existenz einer invarianten Geschwindigkeit. Aus den Experimenten erkennt man dann die Lichtgeschwindigkeit als diese invariante Geschwindigkeit. Die Spezielle Relativitätstheorie ist, wie bereits erwähnt, in allen Experimenten sehr gut bestätigt worden und konnte auch mit der Quantentheorie zu einer relativistischen Quantentheorie vereinigt werden. Es ist bisher aber noch nicht gelungen, die Allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantentheorie zu einer Theorie zu vereinheitlichen.

Im Gegensatz zu Lorentz entwarf Einstein eine klare, empirisch nachvollziehbare Zuordnung der Zeiten t und t' in zwei Bezugssystemen, die sich gegeneinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Er fand die Lorentztransformation ganz allgemein ohne Elektronentheorie. Wohl auch deshalb blieb Lorentz der Meinung, daß seine Theorie anschaulicher als Einsteins wäre. Heute neigt man zur entgegengesetzten Auffassung. Nach Lorentz mußte die Lorentzkontraktion mit im Äther ruhenden Maßstäben gemessen werden.

Seit Einstein sind die Physiker der Überzeugung, daß der Michelson-Morley-Versuch nicht als Voraussetzung für die Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie angesehen werden kann. Aus ihm allein ist eine Deduktion der Relativitätstheorie nicht möglich. Einstein wußte zunächst von dem Versuch nichts, war aber, wie er selbst erklärte, von seinem „negativen“ Ausgang überzeugt. Nach Einsteins berühmter Arbeit ist der Michelson-Morley-Versuch deswegen im Grunde nur noch technisch interessant. Es fehlen ihm neben der Längenkontraktion zwei wichtige relativistische Effekte:

- 1) die Invarianz der Geschehnisse senkrecht zur Bewegungsrichtung und
- 2) die Zeitdilatation. Der Michelson-Morley-Versuch rief auch keinen Wandel im physikalischen Gedankengebäude hervor, weil er vollständig mit der Lorentz'schen Äthertheorie erklärt werden konnte, wenn man ihre Postulate anerkannte.

Poincaré, ein Mathematiker der damaligen Zeit, sah in der Theorie Einsteins sogar eine Bedrohung der „Klassik“, hoffte aber, daß letzten Ende doch die „solide“ Newtonsche Mechanik „siegen“ würde. Die Spezielle Relativitätstheorie war zwar eine Revolution im Denken der Physik, erklärte aber zunächst nicht mehr als die Äthertheorien, wie viele meinten. Darum wurden die Äthervorstellungen von einigen Forschern hartnäckig weiterverfolgt. Schließlich wurde die große Bedeutung der Relativitätstheorie offenkundig. Sie wird heute nicht mehr bestritten. Wer sich

einmal mit ihr beschäftigt hat, wird nicht nur ihren physikalischen Nutzen erkennen, sondern ihr auch einen gewissen ästhetischen Reiz abgewinnen. Sie ist von schlichter und direkter „formaler Schönheit“. Diese Eigenschaft entspricht einem Archetypus oder Urbild im Menschen, dem schon mehrfach angesprochenen Streben nach Harmonie und Abgeschlossenheit der physikalischen Welt, das sich bis zu den Philosophen der Antike zurückverfolgen läßt. Wie Mittelstaedt erläutert; spiegelt sich dieses Bestreben stets in den Naturgesetzen wider, eingepreßt weniger von der Natur als vom sie betrachtenden Menschen.

Die klassische Äthertheorie ist in der gegenwärtigen Physik „tot“. Sie war, wie ZUKAV sagt, der letzte Versuch, das Universum zu erklären, indem man irgendetwas erklärte.

Um zu zeigen, wie sich die im Ruf, sehr abstrakt zu sein, stehende Relativitätstheorie praktisch auswirken kann, soll ein Beispiel aus der Schifffahrt erwähnt werden. Es gibt ein Navigationsnetz, LORAN (= **Long Range Aid to Navigation**), das aus auf der ganzen Welt verteilten, nach Einsteins Theorie synchronisierten Uhren besteht. Aus den Laufzeitdifferenzen der Signale von den einzelnen Uhren ermitteln die Schiffe ihre Positionen. Durch den Einsatz von Satelliten sind Positionsangaben mit einer Genauigkeit von 5 m möglich geworden. Die Äthertheorien ergäben Mißweisungen von bis zu 2 Kilometern. Der relativistische Effekt ist also sehr deutlich. Die Äthervorstellung wirkte sich verhängnisvoll aus.

Dieser Abschnitt soll mit einem Zitat SOMMERFELDS zur Stellung des Äthers in der Physik abgeschlossen werden. Es ist dem Band über Elektrodynamik seiner Vorlesungen über Theoretische Physik entnommen (1948):

„Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist das einzige noch heute berechnete Residuum der Äthervorstellung. Wollten wir heutzutage vom Äther sprechen, so müßten wir jedem Bezugssystem seinen besonderen Äther zubilligen, also z. B. von einem gestrichenen und ungestrichenen Äther sprechen. Den Lenardschen „Uräther“ sehen wir nur noch als Kuriosum und die aristotelisch-scholastische „Quintessenz“ (das fünfte Element neben Feuer, Wasser, Luft und Erde) als historische Merkwürdigkeit an.“

Im heute auf der ganzen Welt anerkannten Lehrbuch der Theoretischen Physik von LANDAU und LIFSCHITZ findet sich das Stichwort „Äther“ im Band für Klassische Feldtheorie nicht einmal im Register.

IX. Schlußbetrachtungen

Am Ende dieser Ausführungen soll herausgestellt werden, was man aus heutiger Sicht aus der Entwicklung der Äthervorstellungen lernen kann. Zum Teil lehnt sich die hier gegebene Darstellung an das Schlußkapitel des Buches „Fields of Force“ von BERKSON an.

Einstein sah vor allem in der Kritik eine Eigenart der Wissenschaft, die eng mit ihrem Fortschritt verbunden wäre. BERKSON regt an, auch Einsteins Theorie kritisch zu betrachten. Eine Verneinung der Existenz von Äther und absolutem Raum führt nicht zwangsläufig zur Entwicklung der Relativitätstheorie, aber BERKSON gesteht gleichzeitig, daß er keine konstruktive Alternative zu Einsteins Physik sieht, die in so hervorragendem Einklang mit den empirischen Fakten steht. Allerdings ist z. B. Stokes' Theorie bis heute nicht durch das Experiment widerlegt worden, die Lorentzkontraktion erhielt wegen ihrer „Einfachheit“ den Vorzug. Vielleicht könnte man einen widerspruchsfreien Äther konstruieren oder/und

Faradays Kraftfeld mit Einsteins Feldtheorie vereinigen in einem hochkomplizierten nichtflüssigen, nicht-Newtonschen Gesetzen unterworfenen Äther. Dies sind jedoch nur Wunschträume, die mit realer Physik nichts gemein haben, was auch BERKSON erkennt. Er möchte aber warnen: Das Einzige, was eine Wissenschaft als a priori gegeben akzeptieren dürfe, sei die Pflicht zur Suche nach Alternativen, sonst solle sie sich davor hüten, a priori Grundsätze aufzustellen. Bis heute ist es aber nicht gelungen, Alternativen zur Relativitätstheorie zu finden, sie bleibt also die „richtige“ Theorie. Das Beispiel des Äthers und der Relativitätstheorie zeige, wie groß der Einfluß von Weltanschauungen auf die Naturwissenschaften seien. Die Wissenschaft muß sich streng verbieten, eine Theorie aus metaphysischen Gründen zu verwerfen. Dazu sei noch einmal ZUKAV zitiert, der sinngemäß sagt:

Die Charakterisierung einer Sache als Unsinn hängt auch in den Naturwissenschaften vom aktuellen Standpunkt ab. Eine neue Theorie löst alte Probleme. Nachdem die Naturwissenschaft, die Physik, jahrhundertlang eine scheinbare Objektivität außerhalb von uns selbst suchte, hat sie heute zum einzigen Weg zurückgefunden, den wir gehen können, den Weg zu uns selbst.“

An dieser Stelle könnte man Verbindungen zu Hegels Definition der Objektivität aufzeigen und erläutern, was hier aber nicht weiter ausgeführt werden soll.

Ein Ausspruch des französischen Mathematikers und Philosophen d'Alembert erscheint geeignet, die Bedeutung der jeweils aktuellen naturwissenschaftlichen Theorien und abschließend auch dieser Ausführungen zu relativieren. Nach KUZNECOV sagte d'Alembert über Descartes' Wirbeltheorie der Gravitation:

„Wenn man jene heute fast lächerlich gewordenen Wirbel (tourbillons) unvoreingenommen beurteilt, wird man zugeben – ich wage es zu sagen –, daß man sich damals nichts Besseres ausdenken konnte.“

X Literaturverzeichnis

- a) Historisches Wörterbuch der Philosophie (1971): Stichwort „Äther, Quintessenz“. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, Band 1, Spalte 599–601
- b) MORE, L. T. (1962): Isaac Newton. A Biography. Dover Publ., New York, chapter VII, S. 199–252, insbesondere S. 211 ff.
- c) BERKSON, W. (1974): Fields of Force. Routledge and Kegan Paul, London, S. 261–268, S. 317–330 sowie die unter dem Stichwort "ether" im subject index angegebenen Orte
- d) KUZNECOV, B. G. (1970): Von Galilei bis Einstein. Vieweg, Braunschweig, insbesondere S. 99–107, S. 120–128 und S. 229–236
- e) SEXL, R. und H. URBANTKE (1976): Relativität, Gruppen, Teilchen. Springer-Verlag, Wien und New York, S. 1–14 und S. 35–39
- f) SOMMERFELD, A. (1977): Vorlesungen über Theoretische Physik, Band III Elektrodynamik. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, S. 219–220
- g) LANDAU, L. und E. LIFSCHITZ (1981): Lehrbuch der Theoretischen Physik, Band II Klassische Feldtheorie. Akademie-Verlag, Berlin, 481 S.
- h) ZUKAV, G. (1981): Die tanzenden Wu Li Meister. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, insbesondere S. 138–218

Anschrift des Verfassers Christian Mohrdieck
 Institut für Theoretische Physik
 und Sternwarte der Universität Kiel
 Olsenhäuserstraße 40–60
 D-2300 Kiel 1