

Die speculativen Grundlagen der optischen Wellentheorie.

Von P. A. Linsmeier S. J. in Mariaschein (Böhmen.)

Die Undulationshypothese des Lichtes will Rechenschaft geben über die Lichtfortpflanzung und die hiebei unter verschiedenen Umständen eintretenden weiteren Erscheinungen, so besonders die Reflexion, Brechung, Farbenzerstreuung, Interferenz, Beugung, Polarisation und Doppelbrechung aus ihren physikalischen Ursachen erklären. Es genügt hier, die hauptsächlichsten und zugleich bekannteren Erscheinungsgruppen zu berücksichtigen.

1. Der Grundgedanke dieser Hypothese wurde zuerst von Huygens in seiner „Abhandlung über das Licht“ (1678) eingehend auseinander gesetzt; vorübergehend und nur so im allgemeinen war der Gedanke auch schon früher und von Anderen ausgesprochen worden. Diese erste Bearbeitung der Undulationshypothese liess aber noch grosse Lücken und bedenkliche Schwierigkeiten zurück, deshalb wurde sie auch durch die Emissionshypothese, der sich Newton zuneigte, für lange Zeit auf die Seite gedrängt. Erst mit Beginn unseres Jahrhunderts wurde die Aufmerksamkeit der Physiker wieder und zwar nachhaltig der Undulationshypothese zugewendet, zuerst durch Young, insbesondere durch dessen Abhandlung „Theorie des Lichtes und der Farben“ (1802). Noch wichtiger und geradezu entscheidend waren die Arbeiten Fresnels, welcher in der verhältnissmässig kurzen Zeit von 1815 bis 1827 diese Hypothese so glücklich weiter entwickelte und zu einer so hohen Stufe von Wahrscheinlichkeit emporhob, dass die meisten Physiker die Emissionshypothese, welche bis dahin die herrschende war, verliessen und die Undulationshypothese annahmen.

Fresnel hat den Sieg der letzteren zwar entschieden, sie war aber demungeachtet noch immer nicht allseitig vollendet, sie war

nur wesentlich wahrscheinlicher geworden als die entgegenstehende Ansicht. Cauchy, Foucault, Boussinesq, Sellmeyer, Helmholtz und Ketteler haben sich um die Vollendung und innere Befestigung dieser Hypothese noch ansehnliche Verdienste erworben.

2. Diese Forscher erweiterten die Huyghens'sche Stammhypothese durch ungezwungene Angliederung neuer Hilfsannahmen und machten sie hiedurch erklärungs-fähiger; indem aber die Zahl und Güte der Erklärungen zunahm, wuchs naturnothwendig auch die Wahrscheinlichkeit der Gesamthypothese.

Aber, so wird man etwa einwenden, haben sich denn diese Forscher nicht dadurch in einen ‚circulus vitiosus‘ verirrt, dass sie jeweilig erst in die Hypothese hineintrugen, was sie zur Erklärung einer Erscheinungsgruppe daraus entnehmen wollten?

Dieser Einwurf hat für den ersten Anblick etwas Bestechendes, bei näherem Zusehen schwindet jedoch leicht alles Bedenken. Zunächst eine geschichtliche Erinnerung. Kepler machte auch die damals höchst befremdliche Annahme, dass die Planeten in Ellipsen um die Sonne herumgehen, zunächst nur deswegen, weil er unter dieser Voraussetzung die scheinbaren Planetenbewegungen einfacher und befriedigender zu erklären vermochte, als es in der ursprünglichen Hypothese des Copernicus der Fall war. Er hat hiemit auch erst in die Hypothese hineingelegt¹⁾, was er zu den Erklärungen brauchte. Wird man ihm deswegen vorwerfen wollen, dass er sich in einem verwerflichen ‚circulus vitiosus‘ bewegt habe? Gewiss nicht. (Die beigefügte Anmerkung gibt über den Vorgang nähere Aufklärung.) Wenn Kepler auf diesem Wege eine wichtige

¹⁾ Wenn man liest, Kepler habe aus Tycho's Marsbeobachtungen die Ellipsenbahn (rechnerisch) abgeleitet, so könnte das leicht dahin verstanden werden, dass die Ellipsenbahn ‚a priori‘ gefunden wurde, also nicht mehr Hypothese gewesen sei. Das wäre irrig, diese aprioristische Ableitung hat erst viel später Newton gegeben. Kepler ging so vor: er berechnete, wo der Planet zur Zeit dieser und jener Tycho'schen Beobachtung hätte stehen müssen, wenn er sich in elliptischer Bahn bewegte; er fand nun, dass die so berechneten Stellungen viel besser mit den wirklich beobachteten übereinstimmten, als es der Fall war, wenn man als Bahn einen Kreis oder eine Ovallinie oder eine ‚linea buccosa‘ (Wangenlinie) — mit letzteren zwei Curven machte Kepler zuerst den Versuch — annahm. Kepler's Rechnungen bewiesen demnach nicht die Ellipsenbahn, sondern machten sie nur wahrscheinlicher, indem sie zeigten, dass diese Annahme bessere Erklärungen bietet als andere, die noch gemacht wurden.

astronomische Wahrheit gefunden hat, warum sollte nicht auch in der vorliegenden optischen Frage die Wahrheit in ähnlicher Weise gefunden werden können?

Uebrigens zeigt der Sachverhalt selbst auch, dass sich gegen diesen Vorgang principiell nichts einwenden lässt. Damit eine Naturerscheinung eintreten könne, müssen zuerst deren Ursachen gesetzt werden; verschiedene Erscheinungsgruppen haben natürlich auch verschiedene Ursachen. Eine oder auch einige Ursachen können bei den verschiedenen Erscheinungen immerhin gleich sein, andere aber müssen von einander abweichen, sonst wäre ja ein Unterschied der Wirkungen nicht möglich. Da man nun den wirklichen Ursachen nachspürend Annahmen (Hypothesen) macht, so ist es gar nicht anders zu erwarten, als dass für verschiedene Erscheinungsgruppen auch verschiedene Hilfhypothesen aufgestellt werden. Wollte aber jemand überhaupt diese Forschungsmethode, nach der man auf dem Wege der Annahmen und Hypothesen die Wahrheit sucht, beanstanden, so kann ein solcher auf die Thatsache verwiesen werden, dass auf diesem Wege schon zahllose Male, z. B. bei Entzifferung von Geheimschriften, dann auch bezüglich des Weltsystems, die Wahrheit und Gewissheit gewonnen wurde.

Es verdient noch besonders hervorgehoben zu werden, dass die Zusätze, welche die früher genannten Forscher an Huyghens' Hypothese anbrachten, durchaus nicht das Merkmal der Willkürlichkeit oder Gezwungenheit an sich tragen, sie erweisen sich vielmehr als ganz ungezwungene und naturgemässe, zum Theil sogar naturnothwendige Weiterentwicklung der Grundannahme. Die folgende Auseinandersetzung der Grundlagen, auf denen die einzelnen Theile der Gesamthypothese beruhen, wird dieses zeigen.

3. Die Lichtfortpflanzung ist eine Thatsache, die wir täglich unzählige Male erfahren, deren nähere Einzelheiten aber unserer unmittelbaren Sinneswahrnehmung entrückt sind. Will man über diese letzteren irgendwelchen Aufschluss gewinnen, so steht einzig der Umweg durch Hypothesen zugebote.

Man hat sich zunächst gefragt: Wie pflanzt sich das Licht fort? Die Physiker fanden und erörterten bis heute nur zwei Möglichkeiten: entweder fliegt ein Stoff vom leuchtenden Körper fort und zum wahrnehmenden Auge hin (Emissionshypothese) oder die Fortpflanzung geschieht nach Art des Schalles d. h. durch wellenartige Bewegungen eines Mittels und ohne Fortführung irgend eines

Stoffes vom leuchtenden Körper zum Auge (Undulationshypothese). Eine weitere Möglichkeit wurde, wie schon gesagt, bisher von den Physikern nicht ersonnen, und es scheint eine solche auch gar nicht denkbar zu sein. Denn „der vermittelnde Stoff wird fortgeführt“ (Emission) und „... wird nicht fortgeführt“ schliessen zunächst ein Drittes aus; was den zweiten Punkt angeht, so vermögen wir uns nach unserem gegenwärtigen Kenntnisskreise nur jene periodische Bewegung des vermittelnden Stoffes zu denken, die wir Wellenbewegung (Undulation) nennen.

4. Beide Möglichkeiten wurden eingehend untersucht; allmählich stellte sich die völlige Unhaltbarkeit der Emissionshypothese klar heraus, darüber besteht jetzt, und schon seit einigen Jahrzehnten kein Zweifel mehr. Es genügt, eine einzige Thatsache anzuführen. Die Emissionshypothese führte, von der Brechungserscheinung ausgehend, mit unausweichlicher Nothwendigkeit zu dem Schluss, dass sich das Licht in Wasser schneller fortpflanze als in Luft; die Undulationshypothese dagegen gelangte mit der gleichen Nothwendigkeit zu dem gerade entgegengesetzten Schluss. Der Versuch müsste nun entscheiden, welche von den beiden Folgerungen die richtige ist. Es brauchte einen grossen Aufwand von Scharfsinn und Vorversuchen, ehe der endgiltige Versuch gelang; Foucault kündigte dessen Ausführung 1840 zuerst an und veröffentlichte ihn 1854 ausführlich.¹⁾ Dieser Versuch nun entschied in ganz unanfechtbarer Weise gegen die aus der Emissionshypothese gezogene Folgerung und somit gegen die Prämisse dieses Schlusses oder gegen die Zulässigkeit der Emissionshypothese selbst. Damit war der Sieg der Undulationshypothese besiegelt, entschieden war er schon durch die Arbeiten Fresnel's und, wenn man will, Cauchy's.

5. Die Welle verlangt nun aber nothwendig einen Wellenträger d. h. ein Mittel, in dem sie sich bilden und fortpflanzen kann. Im absolut leeren Raume ist eine Welle undenkbar. Die Schallwelle pflanzt sich sowohl in luftförmigen als auch in festen und flüssigen Körpern fort; das häufigste und wichtigste Schallmittel ist die Luft. Man hat Gründe dafürzuhalten, dass Luft sowie feste und flüssige Körper nicht Träger der Lichtwellen sind. Wenn man z. B. aus einem Recipienten, worin sich ein Läutewerk befindet, die Luft auspumpt, so wird der Schall des Glöckchens um

¹⁾ F. Rosenberger, Geschichte der Physik (Braunschweig, Vieweg 1882—90) III. 470.

so schwächer gehört, je weiter die Luftverdünnung voranschreitet. Daraus schliesst man mit Recht, dass die Luft ein Leiter des Schalles ist. Lässt man hingegen Licht durch einen Recipienten hindurchgehen, so bemerkt man, während die Luft daraus entfernt wird, nicht die geringste Schwächung an dem durchgegangenen Lichte. Hieraus schliesst man nun in ähnlicher Weise, dass die Luft nicht Fortpflanzungsmittel der Lichtwelle ist. Zur gleichen Folgerung drängt die Thatsache, dass das Sonnen- und Sternenlicht die weiten Himmelsräume, die ja nach allgemeiner Ueberzeugung luftleer sind, durch-eilt. Auch an das elektrische Glühlicht, das sich in einer luftleer gemachten Glaskugel befindet, kann hier noch erinnert werden.

Der soeben angeführte Grund, dass sich das Licht auch durch luftlere Räume, und zwar ohne irgendwelche merkliche Schwächung fortpflanzt, hat allgemeine Geltung, mag man elastische oder elektromagnetische Kräfte als die nächste Ursache der Wellen und ihrer Fortpflanzung ansehen. Hängt die Lichtwelle von der Elasticität des Fortpflanzungsmittels ab, dann sind auch folgende zwei Gründe von Gewicht. Die Gasmolekeln befinden sich in relativ grossen Abständen von einander und, wie die neuere Gastheorie behauptet, ausserhalb ihrer gegenseitigen Wirkungssphäre. Wie wäre es unter diesen Umständen denkbar, dass eine Molekel durch die Nachbarmolekeln in eine bestimmte Mittellage zurückgezogen würde? Ohne eine solche zurückziehende Kraft ist aber speciell die transversale Schwingungsbewegung nicht denkbar.¹⁾

Ein zweiter Grund bezieht sich auf alle Aggregatzustände und hat Geltung, gleichviel ob man sich die Körper stetig oder atomistisch denkt. Man kann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Schwingungsimpulses ‚a priori‘ berechnen; der mathematische Ausdruck hiefür zeigt, dass sie abhängig ist von der Elasticität und Dichte des Mittels. Diese Grössen sind z. B. für Luft, Glas, Wasser

¹⁾ Man kann dieser Schwierigkeit nicht etwa dadurch entgehen, dass man das Gas als etwas Stetiges betrachtet. Denn beim Verdünnen wird die Masse um ein Massentheilchen herum immer mehr vermindert; jene ist es aber, wodurch dieses in eine bestimmte Mittellage zurückgezogen wird. Bei Verminderung der anziehenden Massen wird daher auch die zurückziehende Kraft geringer. Das Licht lässt aber keinerlei Schwächung erkennen, im Gegentheil wird die Lichtabsorption mit steigender Verdünnung geringer. Diese Thatsache ist nur verständlich, wenn die Gasmasse die Rolle eines Hindernisses für die Lichtfortpflanzung hat, nicht aber, wenn sie selbst Mittel der Lichtfortpflanzung wäre.

bekannt; führt man sie in die allgemeine Formel ein, so erhält man Werthe, welche mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in jenen Körpern recht befriedigend übereinstimmen, die aber hunderttausend- bis millionenmal kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit in denselben.

Diese Erwägungen gestatten nicht, die Luft (oder andere bekannte Körper) als Träger der Lichtwellen anzusehen. Da aber die Fortleitung einer Wellenbewegung ohne Mittel nicht denkbar ist, so hat man als nothwendige und unausweichliche Hilfshypothese den Lichtäther angenommen.

6. Ueber die Eigenschaften des Aethers lässt sich wenig Zuverlässiges sagen. Er muss überall verbreitet sein, wohin immer das Licht zu dringen vermag. Die Eigenschaft der Unabsperrbarkeit fügt dem nichts Neues hinzu, sondern hebt nur einen besonderen Umstand ausdrücklich hervor. Der Aether muss ferner eine äusserst geringe Dichtigkeit haben, so dass er selbst den schnellen Bewegungen der Kometen, die doch bei einem sehr grossen Volumen nur eine geringe Masse besitzen, keinen astronomisch merkbaren Widerstand entgegensetzt.¹⁾ Mit der äusserst geringen Dichte hängt es zusammen, dass er auch unwägbar ist. Es wäre zu viel behauptet, wenn man ihm eine absolute Unwägbarkeit (Gewichtslosigkeit im strengen Sinn) zuschreiben wollte; gewiss ist nur und daher nothwendig in die Hypothese aufzunehmen, dass er selbst für unsere feinsten Wagen unerreichbar ist.²⁾ Aehnlich ist es zu verstehen, wenn man den Aether incompressibel nennt: man denkt sich ihn nicht absolut unzusammendrückbar, sondern nur viel leichter (transversal) verschiebbar als (longitudinal) zusammendrückbar.

Bezüglich des bisher Gesagten wird eine nennenswerthe Meinungsverschiedenheit kaum bestehen. So im allgemeinen kann auch mit Gewissheit noch gesagt werden, dass der Aether alle jene Eigen-

¹⁾ Eine Zeit lang glaubten einige Astronomen, gewisse Unregelmässigkeiten in der Bewegung des einen oder anderen Kometen auf den Widerstand des Aethers (oder eines anderen Mittels) zurückführen zu müssen; andere Astronomen waren aber gleich anfangs gegen diese Meinung, und jetzt ist sie allgemein wieder aufgegeben, da jene Unregelmässigkeiten, die ohnehin nicht bei allen Kometen wahrgenommen wurden, eine befriedigende Erklärung ohne irgendwelche neue Annahme gefunden haben.

²⁾ Der Engländer Wood hat, die kinetische Gastheorie auf den Aether anwendend, das Resultat gefunden, „dass ein Volum desselben, das etwa dem zwanzigfachen Volum der Erde gleich ist, ein Pfund (englisch) wiegt.“ (Naturwissenschaftl. Rundschau. Jahrg. 1886, S. 3).

schaften haben müsse, die erforderlich sind, Licht (und strahlende Wärme) mit der ganz ausserordentlichen Geschwindigkeit von 40 000 Meilen¹⁾ fortzupflanzen; im besondern gehen aber diesbezüglich die Meinungen schon auseinander. Bisher glaubte man nämlich, als hiezu nothwendige Eigenschaft die Elasticität und zwar eine sehr grosse annehmen zu müssen, seitdem aber die Maxwell'sche Lichttheorie, welche die Lichtfortpflanzung auf elektrische und magnetische Kräfte zurückführt, mehr und mehr Anhänger findet, verliert sich im selben Grade die bisherige Uebereinstimmung hinsichtlich dieser Eigenschaft des Aethers.

Die Physiker denken sich fast durchwegs den Aether atomistisch; unter den Philosophen finden sich aber viele, welche für die Stetigkeit des Aethers eintreten. Manche halten dafür, dass der Aether seinem innersten Wesen nach in einem gewissen Gegensatz stehe zur gröbereren Körperwelt, und dass ihm Abstossungskräfte zugeschrieben werden müssen, während bei der hinfälligen Materie Anziehungskräfte walten. Andere wieder lassen es dahingestellt, ob die Aethertheilchen sich gegenseitig anziehen oder abstossen. Wieder andere meinen, dass der Aether die Urmaterie sei, aus welcher die chemischen Atome sich gebildet hätten; diejenigen, welche dieser Ansicht beipflichten, können ihm wohl inwohnende Abstossungskräfte füglich nicht mehr zuschreiben.

Eine weitere Umschau über die vielen Meinungsverschiedenheiten hinsichtlich des Lichtäthers vermöchte doch nichts Nennenswerthes mehr zur Klarstellung der Grundlagen der Undulationshypothese beizutragen. Zum Abschluss mag noch die Thatsache hervorgehoben werden, dass trotz der vielen Meinungsverschiedenheiten in den Einzelheiten der Aetherhypothese doch in der Annahme des Lichtäthers selbst eine seltene Uebereinstimmung herrscht; auch die Philosophen nehmen lieber den Aether als eine unvermittelte Lichtfortpflanzung an.

7. Das sogenannte Huyghens'sche Princip, welches in der optischen Wellentheorie vielfache Verwendung findet, ist nicht eine Hilfshypothese, sondern vielmehr ein physikalisch-geometrischer Behelf, der die mathematische Behandlung mancher Probleme wesentlich erleichtert. Es ist ungefähr dasselbe, wie wenn man in der Geometrie, um den Flächeninhalt der Ellipse zu berechnen, diese in unendlich viele parallele Streifen zerlegt denkt.

¹⁾ D. i. 300 000 000 Meter; die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt 331 bis 333 Meter.

Mit Hilfe dieses Principes kann man aus der Grundvorstellung, dass die Lichtfortpflanzung wellenartig geschehe, eine Reihe von Erscheinungen in völlig befriedigender Weise und mit mathematischer Folgerichtigkeit erklären: die geradlinige Fortpflanzung des Lichtes, die Reflexion, dann ganz besonders die so höchst auffälligen Erscheinungen, bei denen Licht zu Licht addirt bald Licht bald Dunkelheit gibt, die mannigfaltigen Interferenz- und Beugungserscheinungen nämlich. Das hiezu nothwendige Interferenzprincip ist nicht etwa eine Hilfshypothese, sondern nur eine Ueбетragung der sichergestellten mechanischen Lehre über die Zusammensetzung von Bewegungen auf das Gebiet der akustischen und optischen Wellenbewegung.

Ein Eingehen in die Erklärungen selbst ist nicht beabsichtigt, übrigens auch nicht nothwendig, da sie der hiefür interessirte Leser entweder schon kennt oder doch in leicht zugänglichen Lehrbüchern finden kann. Dieselbe Bemerkung gilt auch für die weiterhin noch zur Sprache kommenden Erscheinungen.

8. Zur Erklärung der Brechung musste die neue Hilfshypothese gemacht werden, dass das Licht beim Uebergang aus einem Medium in ein anderes eine Aenderung in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit erleide, dass es sich, um die häufigsten Fälle speciell zu erwähnen, in der Luft schneller fortpflanze als in Glas oder Wasser, und im luftleeren Raum wieder schneller als in der Luft.¹⁾ Die Erklärung selbst, bei der das Huyghens'sche Princip auch in Verwendung kommt, ist eine mathematisch strenge.

Diese Annahme ist nun an und für sich schon viel wahrscheinlicher als ihr Gegentheil; denn im luftleeren Raume findet die Aetherbewegung keinerlei Hinderniss vor, wohl aber dort, wo eine gröbere Materie den Weg mannigfach verlegt und die Beweglichkeit der Aethertheilchen beeinträchtigt. In der Luft wird sich dieses Hinderniss nicht so stark bemerkbar machen als in festen oder flüssigen Körpern, weil hier der Raum viel mehr mit grober Materie erfüllt ist als in der Luft.

Mann kann zu Gunsten dieser Annahme auch auf analoge

¹⁾ Wenn das, was hier Hypothese genannt wird, in N. 4 ein nothwendiger Schluss genannt wurde, so liegt hierin kein Widerspruch; denn auch die nothwendige Folgerung aus einer Hypothese ist doch selbst immer wieder nur Hypothese und keine Gewissheit. In der Sprache der Logik wird man vielleicht lieber sagen: Die Conclusion steht im Werthe nicht höher als die (geringere) Prämisse.

Thatsachen hinweisen. Es ist nämlich bekannt, dass sich der Schall in Röhren langsamer fortpflanzt als in freier Luft, und zwar um so langsamer, je enger die Röhren sind. Das ist schon länger bekannt, jüngst hat N. Hesehus durch Versuche gezeigt, dass sich der Schall in Daunen, Ebonitspänen und anderen porösen Körpern langsamer fortpflanzt als in freier Luft, und dass die Verlangsamung bedeutender wird, wenn die porenartigen Zwischenräume durch Zusammendrängen der Stoffmasse geringer werden.¹⁾

Die festen und, wie die Gasabsorption zeigt, auch die flüssigen Körper enthalten nun zahlreiche Zwischenräume, welche nicht mit Körpermasse erfüllt sind, und welche sich wie feine vielverzweigte Canäle verhalten. Da drängt sich doch die Annahme als die weit- aus wahrscheinlichere von selbst auf, dass, wie in den Röhren und groben Poren die Schallwelle, so auch in diesen Canälen die Lichtwelle verlangsamt werde. Die unmittelbare Ursache dessen kann in der Reibung liegen, die der feinere Aether bei seiner Bewegung an der gröberen Materie erfährt; oder darin, dass die Theilchen der groben (und deshalb schwerer beweglichen) Materie selbst in die Wellenbewegung mit hineingerissen werden; oder endlich, wenn die Körperatome durch die Lichtwelle nicht in Bewegung versetzt werden, schon darin allein, dass der Weg durch die vielverschlungenen Canälchen an sich bereits ein Umweg ist, der deshalb auch mehr Zeit beansprucht als der vollkommen gerade.

Diese nach dem Bisherigen schon höchst wahrscheinliche Annahme ist aber für einen einzelnen Fall zur Gewissheit erhoben worden, indem Foucault durch einen unanfechtbaren Versuch nachgewiesen hat, dass sich das Licht in Wasser langsamer fortpflanzt als in Luft.²⁾ Es kann demnach nicht in Abrede gestellt werden, dass die zur Erklärung der Lichtbrechung erforderliche Hypothese eine ganz naturgemässe Weiterentwicklung der Stammhypothese ist. Die Wahrscheinlichkeit dieser neuen Annahme wächst dann auch noch durch die befriedigenden Erklärungen, welche sie bietet. Endlich ist auch der Umstand günstig für sie, dass man eine zweite auf anderer Basis beruhende Erklärungsweise der Brechung gegenwärtig gar nicht kennt. (Schluss folgt.)

¹⁾ Naturwiss. Rundschau VI. 618.

²⁾ Dieser Versuch wird in etwas grösseren physikalischen Werken, z. B. in dem von Pouillet-Müller (Auf. 7. Bd. I. S. 754) ausführlich beschrieben; es ist derselbe, der auch die Unhaltbarkeit der Emissionshypothese erwies.