

Wenn die Geschichte der Physik uns im Allgemeinen das Gesetz erkennen läßt, daß nicht der Zufall, sondern eine innere Nothwendigkeit über der Reihenfolge der Entdeckungen waltet, so finden wir dieses Gesetz auf das Deutlichste bestätigt, wenn wir die Geschichte eines für Astronomie und Physik gleich wichtigen Problems verfolgen: des Problems der Geschwindigkeit des Lichtes.

Schon der Entschluß, den momentan erscheinenden Strahl in die Grenzen der Zeit zu bannen, setzt eine weiter vorgeschrittene Entwicklung der physikalischen Anschauung voraus; und in der That finden wir ihn zum erstenmale ausgesprochen von einem Manne, an dessen Namen der Beginn einer neuen Epoche der Naturwissenschaft sich knüpft, und zu einer Zeit, da Erfindungen und Entdeckungen einander die Hand reichten, um der Wissenschaft einen nie gekannten Aufschwung zu bereiten. Wir meinen Baco von Verulam und das siebzehnte Jahrhundert.

Alle Nachrichten über diesen Gegenstand, die aus früherer Zeit zu uns gelangt sind, geben nur Zeugniß von Versuchen, die momentane Fortpflanzung des Lichtes indirekt zu beweisen. Aristoteles meinte, dem Lichte könne darum keine Bewegung zukommen, weil eine solche beim Fortgange desselben von Osten nach Westen sich zeigen müßte, was nicht der Fall sei. Wahrscheinlich verstand er darunter das Fortrücken des Tageslichtes längs der Oberfläche der Erde.¹ — Und Damianus, ein Sohn des Heliodorus von Larissa, sagt in seiner Optik:² „Die Fortpflanzung des Augen- und Sonnenlichtes bis zu den entferntesten

Räumen des Himmelsgewölbes geschieht augenblicklich. Denn so wie die Sonne, die von einer Wolke bedeckt war, in demselben Augenblicke uns mit ihrem Lichte erreicht, in dem die Wolke vorübergeht, so sehen auch wir sogleich den Himmel, sobald wir den Blick nach oben richten.“

Baco von Verulam erkannte die Analogie in den Erscheinungen des Lichtes und des Schalles und sprach mit Bestimmtheit den Satz aus:³ „Licht und Schall verbreiten sich ringsum durch die weitesten Räume, das Licht aber schneller als der Schall.“ — Je fester nun im Laufe der Zeit diese Analogie begründet wurde, desto mehr Wahrscheinlichkeit mußte auch die Hypothese der Lichtgeschwindigkeit gewinnen, und wir sehen, daß es nicht an Versuchen fehlte, diese Geschwindigkeit zu messen. Der Erste, welcher sich damit beschäftigte, war Galiläi. Sein Verfahren bestand darin, daß er zwei Leute in der Entfernung von einer Meile aufstellte, jeden mit einem Lichte versehen, das er bedeckt hielt. Deckte nun der Erste sein Licht auf, so mußte der Zweite in dem Augenblicke, als er dies bemerkte, dasselbe thun. War aber die zwischen dem Aufdecken des ersten und dem Wahrnehmen des zweiten Lichtes verflossene Zeit meßbar, so hatte das Licht diese Zeit gebraucht, um die Entfernung einer Meile zweimal zu durchlaufen, und die Aufgabe war gelöst. Aber, obwohl Galiläi seine Leute in dem exakten Aufdecken der Lichter sich üben ließ, eine meßbare Zeit wahrzunehmen gelang ihm nicht, und seine Absicht, den Versuch später unter Anwendung einer größeren Entfernung und mit Hülfe eines Fernrohrs zu wiederholen, scheint er nicht zur Ausführung gebracht zu haben.⁴ Gleichwohl bot dieser Versuch eine zu große Wahrscheinlichkeit des Gelingens dar, als daß sein Mißlingen unter Galiläi's Hand ihn hätte der Vergessenheit überliefern sollen. Fand man doch in der Ungenauigkeit der Beobachtungen, in der Kürze der Distanz genügende Gründe, den

ungünstigen Erfolg zu erklären. Wie sehr aber mußte die Hoffnung steigen, als es den Mitgliedern der von Großherzog Leopold von Toscana 1657 gegründeten *Academia del Cimento* gelang, auf demselben Wege die Geschwindigkeit des Schalles zu ermitteln, die sie gleich 1100 pariser Fuß in der Sekunde fanden. Nun wurden Galiläi's Versuche in größerem Maßstabe wiederholt und die Beobachter zwei Meilen auseinander gestellt,⁵ doch vergebens. — Man sah ein, daß auf diesem Wege das Ziel nicht zu erreichen sei. Die Hilfsmittel der Physik waren eben noch zu unvollkommen, und diese Wissenschaft hat noch einer zweihundertjährigen Ausbildung bedurft, bevor sie mit Glück zur Lösung des Problems schreiten konnte. Nach dem Mißlingen dieser Versuche gewann die alte Ansicht von der momentanen Fortpflanzung des Lichtes wieder die Oberhand. Vergebens sprach Huygens das folgenreiche Prinzip aus, daß das Licht durch Wellenbewegung entstehe; seine Theorie mit ihren merkwürdigen Folgerungen, daß die Lichtwellen in dichteren Mitteln langsamer gingen, daß in Krystallen das Licht nach verschiedenen Richtungen mit ungleicher Geschwindigkeit sich fortpflanze u. s. w., fand keinen Eingang. Die große Entdeckung kam für den damaligen Zustand der Wissenschaften zu früh; noch jahrzehntelang fiel sie der Vergessenheit anheim, und erst der Neuzeit war es vorbehalten, Nutzen von ihr zu ziehen und sie gegen alle Angriffe sicher zu stellen.

Unter diesen Umständen war von der Physik auf lange Zeit hinaus noch kein Mittel zu erwarten, die Geschwindigkeit des Lichtes zu bestimmen. Doch rechtzeitig fand die wichtige Aufgabe ihre Lösung. Aus den Händen der Physik, die vergebens ihre Mühe daran verschwendet, gelangte sie unerwartet in die der Astronomie, die, von jeher an Ausbildung der jüngeren Physik überlegen, fast spielend sich ihrer bemächtigte und mit bewundernswerther Einfachheit sie löste.

Schon Descartes versuchte durch eine hierher gehörige Methode die Lichtgeschwindigkeit zu ermitteln. Er meinte nämlich, der Beginn einer Mondfinsterniß müsse durch die Bewegung des Lichtes eine Verzögerung erleiden, die zwischen der berechneten und der beobachteten Zeit eine Differenz herbeiführen würde. Die schlechte Begrenzung des Erdschattens vereitelte indeß das Bemühen, auf diesem Wege etwas zu erreichen. Immerhin jedoch haben wir diesen Versuch als einen Vorläufer der von Erfolg gekrönten astronomischen Methoden zu betrachten, die im Folgenden ausführlicher erläutert werden sollen. Es sind dies

Die astronomischen Methoden von Römer und Bradley.

Von dem Versuche Descartes' lag nur ein Schritt bis zu der Idee, die Verfinsterungen der Jupiterstrabanten für denselben Zweck zu beobachten. Die Entdeckung dieser Himmelskörper (durch Simon Marius im Jahre 1610) hatte ein um so größeres Interesse erregen müssen, da sie auf diesem Gebiete die erste Frucht der Erfindung des Fernrohrs war und den einzigen bisher bekannten Satelliten, den der Erde, in eine Reihe gleichartiger Körper versetzte, deren Existenz die Analogie zwischen den einzelnen Gliedern des Planetensystems fester begründete. Gleichwohl verfloß noch geraume Zeit, bis jener Schritt gethan wurde; und als man ihn that, da geschah es, ohne daß man sich jenes Zweckes bewußt war. — Allerdings bot das neuentdeckte System mit seinen vielen Eigenthümlichkeiten reichen Stoff zu astronomischen Rechnungen; doch erst in den Jahren 1670 bis 1675 wurde es auf der Sternwarte zu Paris mit größerer Genauigkeit beobachtet. — Zum Verständniß der auf der Beobachtung des Jupitersystems beruhenden Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes wird es genügen, von den eben erwähnten Eigenschaften des Systems die folgenden hervorzuheben.

Die vier Trabanten Jupiters bewegen sich um ihren Haupt-

planeten in Bahnen, welche gegen die Bahnebene des letzteren nur wenig geneigt sind. Eine Folge dieses Umstandes ist die, daß die Trabanten (mit Ausnahme des äußersten) bei jedem Umlauf in den Schattenkegel Jupiters treten, also eine Verfinsternung erleiden müssen. Der rasche Flug dieser Monde und die scharfe Begrenzung des Jupitersehattens machen ihre Ein- und Austritte zu momentanen Ereignissen, deren Zeit sich mit großer Genauigkeit beobachten läßt. Da ferner der Zeitunterschied zwischen zwei aufeinander folgenden Verfinsternungen desselben Mondes im wesentlichen eine unveränderliche Größe ist, so lassen sich diese Verfinsternungen leicht vorausberechnen.

Eine Reihe solcher Beobachtungen wurde denn auch in den Jahren 1670—75 auf der Sternwarte zu Paris angestellt, und die beobachteten Zeiten der Austritte aus dem Jupitersehatten wurden mit den vorausberechneten verglichen. Diese Vergleichen ergaben das Resultat, daß der Lauf der Trabanten Ungleichheiten zeigte, die man zuerst nicht wahrgenommen hatte. Denn beobachtete man zur Zeit, da die Erde sich von Jupiter entfernte, einen Austritt des Trabanten und berechnete die nächstfolgenden voraus, so traten die Verfinsternungen in Wirklichkeit regelmäßig später ein als man erwartet, und diese Verspätung nahm mit der gegenseitigen Entfernung der beiden Planeten zu. Die zunächst liegende Vermuthung, man habe es mit Beobachtungsfehlern zu thun, erwies sich als unzulänglich, da der Unterschied in diesem Falle schwerlich solche Dimensionen annehmen konnte, als es geschah. Namentlich erfolgte derjenige Austritt, der die Aufmerksamkeit der Astronomen am meisten auf sich lenkte, am 9. November 1676 um 10 Minuten später als man erwartet.⁶ Cassini und Dlaus Roemer, welche sich beide mit der Erklärung des Phänomens beschäftigten, fanden sehr bald, daß die Größe der wahrgenommenen Differenz von der gegenseitigen Entfernung Jupiters und der Erde abhing, und

gelangten übereinstimmend zu dem Schlusse, daß die Geschwindigkeit des Lichtes an dieser Verzögerung schuld sei, indem sie sich auf folgende Betrachtung stützten: Wenn das Licht einer meßbaren Zeit bedarf, um vom Jupitersystem zur Erde zu gelangen, so muß dieser Umstand Einfluß auf die Beobachtung haben; denn der Austritt eines Trabanten aus dem Jupiterschatten wird auf der Erde nicht in dem Augenblicke, wo er wirklich stattfindet, wahrgenommen werden, sondern um diejenige Zeit verspätet, deren das Licht zur Zurücklegung des Weges bis zur Erde bedarf. Bliebe die Größe dieses Weges sich jedesmal gleich, so würde auch die Verspätung jedesmal dieselbe sein und

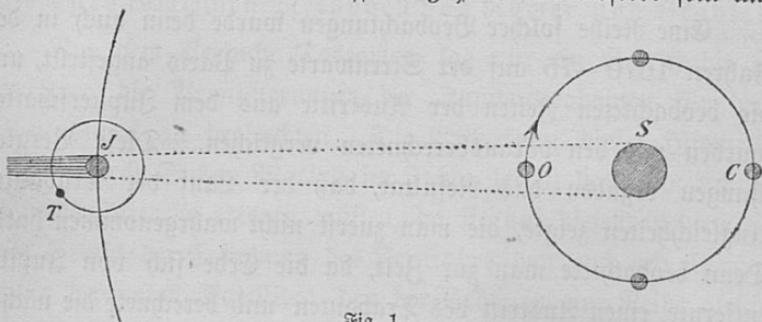


Fig. 1.

S = Sonne. J = Jupiter. T = Jupiterstrabant. O = Erde zur Zeit der Opposition.
C Erde zur Zeit der Konjunktion Jupiters.

die Beobachtung nie alteriren. Nun steht aber Jupiter zur Zeit seiner Opposition der Erde am nächsten. (S. Fig. 1.) Beobachtet man also um diese Zeit den Austritt eines Trabanten, so wird der Unterschied zwischen der wirklichen und der beobachteten Zeit dieses Ereignisses am kleinsten sein. Berechnet man weiter aus dieser Beobachtung die Zeiten der nachfolgenden Verfinsterungen, wie es in Wirklichkeit geschah, so wurde diese Rechnung immer unter der stillschweigenden Voraussetzung ausgeführt, daß das Licht bis zur Erde denselben Weg zurückzulegen habe, wie zur Zeit der Opposition. Dieser Weg wächst aber, jemehr sich die Erde von Jupiter entfernt; folglich muß

die Beobachtung jedes folgenden Austrittes verzögert werden, und diese Verzögerung muß anwachsen, bis sie zur Zeit der größten Entfernung der beiden Planeten (Konjunktion) ihren größten Werth erreicht. — Hiermit ist aber auch ein einfaches Mittel gegeben, die Geschwindigkeit des Lichtes zu bestimmen. Denn berechnet man unter den bisherigen Voraussetzungen aus den Beobachtungen zur Zeit der Opposition das Eintreffen eines Austrittes zur Zeit der Konjunktion, so wird die beobachtete Verspätung die Zeit sein, welche das Licht gebraucht, um den Weg zwischen den beiden Orten der Erde zurückzulegen, die diesen beiden Konstellationen entsprechen. Da man aber weiß, daß dieser Weg der Durchmesser der Erdbahn ist, so wird man angeben können, welche Zeit das Licht gebraucht, um diese Strecke zurückzulegen.⁷

Nun war freilich der Durchmesser der Erdbahn selbst noch so gut wie unbekannt; denn die durch frühere Methoden ermittelte Größe von zwei Millionen Meilen verlor in dem Grade an Zuverlässigkeit, als man die Unzulänglichkeit jener Methoden einsehen lernte. Doch die Bestimmung dieser Größe war nur noch eine Frage der Zeit; in der Hauptsache war das Problem gelöst, und bis in die neuere Zeit hat man sich, nachdem jene Größe ermittelt worden, der Roemer'schen Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes bedient. Man fand für den Halbmesser der Erdbahn die Zeit von 8 Minuten 15 Sekunden, und, nachdem Encke diesen Halbmesser gleich 20 666 230 geographischen Meilen gefunden, die Geschwindigkeit des Lichtes in einer Sekunde gleich ca. 41700 Meilen.

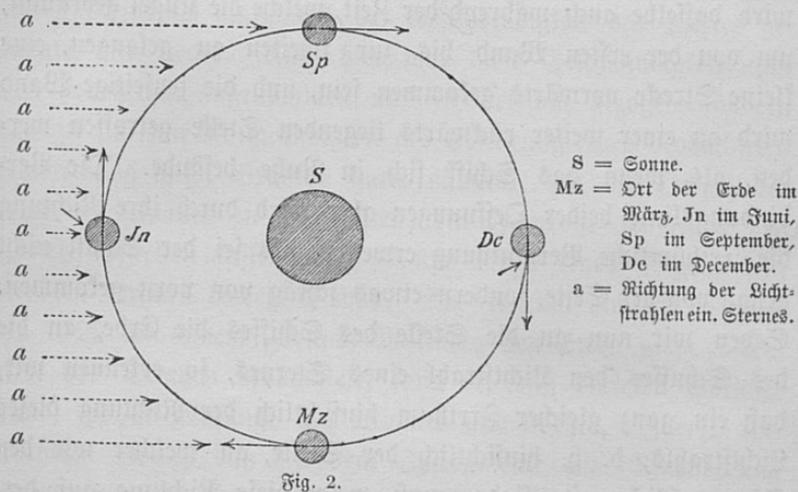
Damals freilich wurde die Richtigkeit der neuen Entdeckung noch vielfach bezweifelt; gewichtige Stimmen erhoben sich gegen dieselbe; hatte doch Cassini selbst, nachdem er kaum seine Ansichten veröffentlicht, dieselben wieder zurückgenommen und sich in der Folge stets zur Ansicht einer momentanen Fort-

pflanzung des Lichtes bekannt. Noch im Jahre 1746 sprach sich Wolff's Lehrbuch der Physik gegen Roemer's Entdeckung aus. Von Bemühungen des Letzteren, seinen Behauptungen durch Vergleichung der übrigen Jupiterstrabanten (denn nur dem ersten galten seine Untersuchungen) Nachdruck zu verschaffen, wissen wir nichts; nur, daß er im Jahre 1704 ein Werk über die Geschwindigkeit des Lichtes zu veröffentlichen gedachte.⁸

Eine unerwartete und glänzende Bestätigung aber erhielt die Theorie Roemer's im Jahre 1725 dadurch, daß der englische Astronom Bradley auf einem durchaus neuen Wege zu demselben Resultate hinsichtlich der Geschwindigkeit des Lichtes gelangte, wie Fener. Auch hier war diese Geschwindigkeit nicht von vornherein angenommen und in Betracht gezogen, sondern drängte sich mit Nothwendigkeit als Erklärung einer beobachteten Abweichung auf. Bradley hatte nämlich, um die Verter der Fixsterne genauer zu beobachten, ein Fernrohr so gegen den Zenith aufstellen lassen, daß es nur längs eines Bogens von wenigen Graden beweglich war. Als er nun am 20. Dezember 1725 mit seinem Freunde Molineux den Stern γ im Sternbilde des Drachen beobachtete, fand er, daß derselbe südlicher stand, als im Anfange des Monats und vorher. Zuerst vermutheten Beide, daß mit dem Instrumente eine Veränderung vorgegangen sei, und, nachdem diese Annahme sich als unrichtig erwiesen, daß die Erdoberfläche wankte.⁹ In Folge dessen beobachtete Bradley ein Jahr lang verschiedene Sterne und gelangte zu dem Resultate, daß ihre Verter in der That veränderlich waren, und zwar in einer Periode, welche dem Erdjahre entsprach. In dieser Zeit nämlich beschrieben die Sterne, welche im Pol der Ekliptik stehen, einen kleinen Kreis, die in der Ekliptik selbst stehenden eine gerade Linie, alle übrigen dagegen, je nach ihrer geringeren oder größeren Entfernung von der Ekliptik, mehr oder minder flache Ellipsen. — Als Ursache dieser Erscheinung

erkaunte Bradley¹⁰ das Zusammenwirken der Geschwindigkeiten des Lichtes und der Erde. Das Resultat eines solchen Zusammenwirkens zweier Geschwindigkeiten kann nicht besser veranschaulicht werden als durch folgendes in den Lehrbüchern der Physik längst heimisch gewordenes Beispiel. Ein in senkrechter Richtung zur Längswand eines ruhenden Schiffes abgefeuerter Kanonenschuß wird beide Längswände an genau gegenüberliegenden Stellen durchbohren, und die Verbindungslinie der beiden Oeffnungen wird genau die Richtung angeben, aus welcher der Schuß kam. Befindet sich aber das Schiff in rascher Fahrt, so wird dasselbe auch während der Zeit, welche die Kugel gebraucht, um von der ersten Wand bis zur zweiten zu gelangen, eine kleine Strecke vorwärts gekommen sein, und die jenseitige Wand wird an einer weiter rückwärts liegenden Stelle getroffen werden, als wenn das Schiff sich in Ruhe befände. Die Verbindungslinie beider Oeffnungen aber wird durch ihre Richtung die irrthümliche Vermuthung erwecken, als sei der Schuß nicht genau von der Seite, sondern etwas schräg von vorn gekommen. Sehen wir nun an die Stelle des Schiffes die Erde, an die des Schusses den Lichtstrahl eines Sternes, so erkennen wir, daß ein ganz gleicher Irrthum hinsichtlich der Richtung dieses Lichtstrahls, d. h. hinsichtlich der Stelle, an welcher wir den Stern erblicken, stattfinden muß, wenn diese Richtung auf derjenigen senkrecht steht, welche die Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne verfolgt. Nehmen wir im einfachsten Falle einen in der Bahnebene der Erde selbst (also in der Ekliptik) befindlichen Stern an, dessen Strahlen im Juni die Richtung der Erdbewegung senkrecht treffen (s. Fig. 2), so wird der Stern an einem (in der Zeichnung weiter oben liegenden) im Sinne der Erdbewegung vorgerückten Orte erscheinen; im Dezember dagegen, wo die Erde sich in einer zur vorigen entgegengesetzten Richtung bewegt, wird auch der Ort des Sternes nach der ent-

gegengesetzten Richtung (in der Zeichnung nach unten) abgelenkt erscheinen. Andererseits wird der Stern im März und September an seinem wahren Orte gesehen werden, weil zu diesen Zeiten die Richtungen der Erdbewegung mit den Strahlen des Sternes zusammenfallen. Der Stern wird also im Laufe eines Jahres auf einer geraden Strecke hin und her zu rücken scheinen, deren Mitte sein wahrer Ort am Himmel ist. Andererseits wird ein Stern, der senkrecht über dem Mittelpunkte der Erdbahn (also im Pol der Ekliptik) steht, jederzeit um den gleichen Betrag von seiner wahren Stellung abgelenkt erscheinen, also selbst



im Laufe eines Jahres einen kleinen Kreis um dieselbe zu beschreiben scheinen, gerade so, wie für unser Auge die Spitze eines Thurmes am Himmel einen Kreis um den Zenithpunkt des Thurmes beschreibt, wenn wir selbst im Kreise um den Thurm herumgehen. — Kehren wir nun zu dem obigen Beispiel des Schiffes zurück, so ist leicht zu erkennen, daß man aus den bekannten Daten der Geschwindigkeit und Breite des Schiffes und aus der Strecke, um welche die jenseitige Schußöffnung hinter der diesseitigen zurückliegt, auch die Geschwindig-

keit der Kugel berechnen kann. Denn aus der letzteren Strecke und der Geschwindigkeit des Schiffes kann man die Zeit berechnen, welche das Schiff zur Zurücklegung dieser Strecke und die Kugel zum Fluge durch die Breite des Schiffes gebrauchte; aus dieser Zeit aber und der Breite des Schiffes folgt die Geschwindigkeit der Kugel. In der nämlichen einfachen Weise läßt sich nun auch die Geschwindigkeit des Lichtes finden, wenn man den Winkel (Aberrationswinkel) kennt, um welchen die Richtung der von dem Sterne kommenden Lichtstrahlen abgelenkt wird, und die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn.

In der That stimmten alle die vorstehend aus der Theorie der Lichtgeschwindigkeit gezogenen Folgerungen mit den Beobachtungen überein, und es fragte sich nur noch, ob auch die nach der Bradley'schen Methode ausgeführte Berechnung der Geschwindigkeit des Lichtes das nach der Roemer'schen gefundene Resultat bestätigen oder wohl gar durch Ermittlung einer bestimmten Meilenzahl für die Sekunde überflügeln würde. Letzteres konnte nun offenbar nicht der Fall sein. Denn wenn auch der Aberrationswinkel des Lichtstrahls sich durch Beobachtung ermitteln ließ, so führte der Versuch, die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn um die Sonne zu bestimmen, doch nur wieder auf die Entfernung der Erde von der Sonne, d. h. auf dieselbe unbekannte Größe, die sich auch einer endgültigen Beantwortung der Frage, wie viele Meilen das Licht in einer Sekunde zurücklege, hindernd in den Weg stellte. Gleichwohl gelang es, die beiden Resultate mit einander zu vergleichen; denn sowohl Bradley's wie Roemer's Methode gestattete ja anzugeben, welche Zeit das Licht gebrauche, um den Weg von der Sonne bis zur Erde zurückzulegen, und die Uebereinstimmung dieser Resultate (8' 15" nach Roemer's, 8' 18,2" nach Bradley's Methode) war mit Rücksicht auf die verhältnißmäßig noch unvollkommenen Hülfsmittel der Beobachtung eine

wahrhaft glänzende. Der geringfügige Unterschied der Resultate aber erklärte sich vollauf aus der Möglichkeit, den Aberrationswinkel mit noch größerer Schärfe zu bestimmen, als die Verspätungen in den Verfinsterungen der Jupiterstrabanten. — Jedenfalls aber war die Harmonie der aus zwei so verschiedenartigen Beobachtungen gezogenen Resultate eine überaus wichtige Thatsache und wohl geeignet, jeden Zweifel an der Richtigkeit der einen oder anderen Methode zu unterdrücken. Man begnügte sich denn auch mit diesen Resultaten, und da weder das Bedürfnis vorlag, noch auch die Möglichkeit abzusehen war, dieselben durch physikalische Methoden, ähnlich den früher versuchten, zu erzielen, so konnte eine geraume Zeit vergehen, bevor die inzwischen vorgeschrittene Physik daran dachte, nun ihrerseits das Problem der Lichtgeschwindigkeit wieder aufzunehmen. In der That müssen wir einen Zeitraum von mehr als hundert Jahren überspringen um

Die physikalischen Methoden der Neuzeit

zum Gegenstande unserer Betrachtung zu machen. — Es war im Jahre 1838, als Arago den Vorschlag zu Versuchen machte, welche endgültig feststellen sollten, ob das Licht mit größerer Geschwindigkeit in der Luft oder im Wasser sich fortpflanze. Hierdurch sollte die Frage, ob das Licht durch schwingende (Undulationstheorie) oder durch fortschreitende Bewegung (Emissionstheorie) der kleinsten Theilchen eines äußerst dünnen, im Uebrigen unbekanntes Stoffes entstehe und sich verbreite, zur Entscheidung gebracht werden, indem das erste Resultat für die Richtigkeit der ersten, das letztere für die der zweiten Theorie den Ausschlag geben mußte. — Diese Versuche beruhen auf folgender Betrachtung:

Wenn zwei wagerechte gleichgerichtete Lichtstrahlen in einen dunklen Raum auf einen Spiegel fallen, der sie senkrecht auf

einen zweiten Spiegel wirft, so kehren sie auf demselben Wege zum ersten Spiegel zurück und werden darin vom Auge des Beobachters als zwei in wagerechter Linie befindliche Lichtpunkte wahrgenommen. Jede noch so geringe Drehung dieses ersten Spiegels um eine wagerechte Axe bewirkt, daß die Strahlen den zweiten Spiegel nicht mehr senkrecht treffen, also auch auf den ersten bei der Rückkehr an einem andern Ort anlangen, als der war, von dem sie ausgingen. Dreht sich nun der erste Spiegel mit großer Geschwindigkeit (z. B. 1000 mal in der Sekunde) um seine Axe, so nimmt er bei jeder Umdrehung einmal die ursprüngliche Stellung ein, in der sich die beiden Bilder jedes Lichtstrahls decken, und die schnelle Aufeinanderfolge dieser Lichtblitze bewirkt im Auge den Eindruck eines zusammenhängenden beständigen Lichtes, demjenigen gleich, den der ruhende Spiegel verursachte. Bringt man aber zwischen den beiden Spiegeln eine mit Wasser gefüllte, oben und unten durch Glasplatten geschlossene Röhre so an, daß einer der beiden Lichtstrahlen sie ihrer Länge nach durchlaufen muß, so wird derselbe vermöge seines zweimaligen Durchgangs durch das Wasser eine Verzögerung (nach der Undulationstheorie) oder eine Beschleunigung (nach der Emissionstheorie) erfahren und nicht mehr gleichzeitig mit dem anderen den ersten Spiegel wieder erreichen.

— Zwischen dem Eintreffen der beiden Strahlen wird sich aber die Stellung des Spiegels geändert haben; die beiden Lichtpunkte werden also nicht mehr in wagerechter Linie erscheinen, und es wird aus der Verschiebung ihrer Bilder und der bekannten Umdrehungsgeschwindigkeiten des Spiegels das Verhältniß der Geschwindigkeit in Luft und Wasser sich ermitteln lassen; namentlich aber wird sich sofort zeigen, welche Geschwindigkeit die größere ist. Denn dreht sich der Spiegel so, daß sein oberer Theil sich vom Beobachter entfernt, und treffen die beiden Strahlen ihn oberhalb seiner Drehungsaxe, so wird das Bild

des später eintreffenden Strahls an einer tieferen Stelle erscheinen, als das des andern. Es wird sich also bestimmt zeigen, welche der beiden Theorien mit dieser Erscheinung in Einklang zu bringen ist.

Obwohl nach dieser Methode, welche, beiläufig bemerkt, die Frage im Sinne der Undulationstheorie entschieden hat, vorläufig nur die Ermittlung des Verhältnisses der Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser in Aussicht genommen war, so erwies sich doch die Idee des rotirenden Spiegels in der Folge als eine so fruchtbringende, daß sie in der That zu einer direkten Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes geführt hat. Um jedoch in der Zeitfolge nicht vorzugreifen, müssen wir zuerst einer anderen Methode gedenken, die, ebenso originell als sinnreich, im Jahre 1850 von H. Fizeau veröffentlicht wurde.¹¹

Wenn eine kreisförmige Scheibe mit großer Geschwindigkeit sich um ihren Mittelpunkt dreht, so durchläuft ein Punkt ihres Umfangs einen sehr kleinen Bogen in einer so kurzen Zeit, daß das Licht trotz seiner großen Geschwindigkeit in derselben Zeit nur einen mäßigen Weg zurücklegen kann. Diese Zeit beträgt z. B. für 100 Umdrehungen in der Sekunde und einen Bogen von 0,001 des Umfangs nur 0,00001 einer Sekunde, während welcher Zeit das Licht 3 Kilometer durchläuft. Besteht nun der Rand der Scheibe, nach Art der gezahnten Räder, aus vollen und ausgeschnittenen Theilen, deren Summe 1000 betragen möge, so geht, unter den obigen Voraussetzungen, jeder dieser Theile an einem bestimmten Punkte des Raumes in derselben Zeit von 0,00001 Sekunde vorüber. Denken wir uns jetzt einen Lichtstrahl, der durch eine der Oeffnungen am Rande der rotirenden Scheibe geht und jenseits von einem Spiegel senkrecht zurückgeworfen wird, so daß er auf demselben Wege wieder zurückkehrt. Ist die Entfernung des Spiegels und die Schnelligkeit der Drehung hinreichend groß, so wird, während das Licht jene Entfernung zweimal durchlief, die Scheibe ihre

Stellung so geändert haben, daß der zurückkehrende Strahl jetzt an derselben Stelle einen Zahn trifft, wo er vorher durch eine Lücke ging. Er wird folglich dem hinter der Scheibe befindlichen Auge unsichtbar bleiben. Bei der doppelten Drehungsgeschwindigkeit wird er wieder eine Lücke antreffen und durchgelassen werden, bei dreifacher wird er wieder verschwinden u. s. w. Nehmen wir nun statt des einfachen Strahls eine beständige Lichtquelle an, so wird dieselbe durch jede Lücke, die an demselben Punkte vorübergeht, einen Strahl senden, und die schnelle Aufeinanderfolge dieser Strahlen wird im Auge den nämlichen Eindruck hervorrufen, wie der einfache Strahl. Aus der Entfernung des Spiegels von der Scheibe, m , der Anzahl ihrer Umdrehungen in einer Sekunde, n (nothwendig und hinreichend, um das zurückkehrende Licht durch einen Zahn aufzufangen), und der Anzahl ihrer Zähne, p , findet man die Geschwindigkeit des Lichtes einfach als vierfaches Produkt dieser drei Zahlen, also gleich $4 m n p$. — Eine vermehrte Rotationsgeschwindigkeit wird dazu dienen, die Schärfe der ersten Beobachtung zu vergrößern, ein Umstand, welcher den Werth dieser Methode noch besonders erhöht.

Um die eben besprochenen Erscheinungen hervorzurufen, werden (s. Fig. 3) zwei Fernröhre einander gegenüber so aufmöge der Aufstellung der beiden Fernröhre in den des zweiten, Q , gestellt, daß man das Fadentkrenz des einen im Brennpunkte des andern sieht. In der Seitenwand des ersten Fernrohrs ist eine Linse, $A B$, angebracht, da das Licht einer seitwärts stehenden Lampe, C , von großer Helligkeit auf eine im Innern des Fernrohrs befindliche, um 45° gegen die Aze desselben geneigte Glasplatte, $D E$, wirft. Diese wirft die Lichtstrahlen so zurück, daß sie im Brennpunkte, P , des Fernrohrs vereinigt werden. Durch diesen Brennpunkt geht aber auch der Rand einer senkrecht zur Aze aufgestellten gezähnten Scheibe, $F G$. Aus dem Brennpunkte des ersten Fernrohrs gelangen die Strahlen ver-

wo sie von einem senkrecht zur Aze aufgestellten Spiegel, H J, nach dem Brennpunkte des ersten Fernrohrs zurückgeworfen werden. Hier treffen sie, je nach der Drehungsgeschwindigkeit der Scheibe, entweder einen Zahn an und bleiben dem Auge Desjenigen, der durch das Fernrohr beobachtet, unsichtbar, oder sie gelangen durch eine Lücke, durchdringen das durchsichtige Glas und werden so vom Beobachter wahrgenommen. — Vermöge dieser Anordnung kann kein Lichtstrahl eher das Auge des Beobachters erreichen, bevor er den Zwischenraum, der die Brennpunkte der beiden Fernröhre trennt, zweimal durchlaufen

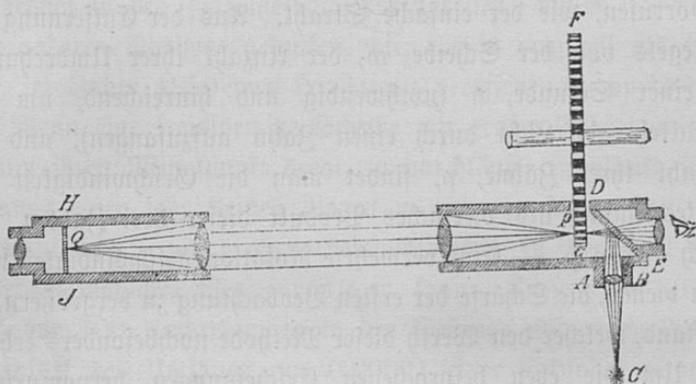


Fig. 3.

hat. Die Umdrehung der Scheibe wird durch ein von Gewichten getriebenes Uhrwerk besorgt und ihre Geschwindigkeit mittelst eines Zählwerkes gemessen.

Fizeau wandte Fernröhre von 6 Centimeter Deffnung an, die er in einer Entfernung von etwa 8600 Meter aufstellte. Die Scheibe war mit 700 Zähnen versehen. Unter diesen Umständen erfolgte die erste Verfinsternung bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe von 12,6 in der Sekunde. Alle Voraussetzungen trafen ein; denn bei einer doppelten Geschwindigkeit ward es wieder hell, bei einer dreifachen wieder dunkel. Das Mittel aus den ersten 28 Beobachtungen ergab eine Geschwindigkeit

(750)

des Lichtes von 70986 Liewes (25 auf einen Grad des Aequators) in einer Sekunde. Es zeigte sich somit im allgemeinen eine vortreffliche Uebereinstimmung mit den durch die Astronomie gefundenen Resultaten, und zum Erstenmale war die Messung der Geschwindigkeit irdischen Lichtes, und zwar unter Benutzung einer sehr mäßigen Entfernung, eine Thatsache geworden.

Inzwischen war jedoch auch die Idee Arago's wieder aufgenommen worden, und zwar durch L. Foucault, dem es gelang, eine Methode zu finden, um die Geschwindigkeit des Lichtes, nicht nur in der Luft, sondern auch in anderen durchsichtigen Mitteln zu bestimmen. Noch in demselben Jahre, in welchem die Wissenschaft durch Fizeau's Methode bereichert wurde, trat auch Foucault mit der seinigen hervor.¹²

Dieselbe gründet sich nach Arago's Anregung auf Drehung eines Spiegels, bedient sich aber zur Zurückwerfung des Lichtes nicht eines ebenen, sondern eines Hohlspiegels. Der Gang des Lichtes in dem Foucault'schen Apparat ist nämlich folgender (S. Fig. 4): Ein Bündel direkter Lichtstrahlen A (elektrisches oder Sonnenlicht) geht durch eine quadratische Oeffnung und unmittelbar hinter derselben durch ein Gitter BC von senkrechten Platinadrähten (elf auf den Millimeter). Eine Linse DE von großer Brennweite (2 Meter) ist in einer Entfernung von weniger als 4 Meter vom Gitter aufgestellt und nimmt das Bild des Gitters auf, um es im jenseitigen Brennpunkte zur Erscheinung zu bringen. Allein bevor es dahin gelangt, fällt es auf einen drehbaren Spiegel FG, dessen Axe den Drähten des Gitters gleichgerichtet ist und durch den Mittelpunkt M des quadratischen Bildes geht. Dieser Mittelpunkt ist aber gleichzeitig der Kugelmittelpunkt eines Hohlspiegels HI, auf dessen Oberfläche das Bild durch Zurückwerfung vom drehbaren Spiegel gelangt. Befindet sich letzterer in Ruhe, so geht das Bild nach senkrechter Zurückwerfung vom Hohlspiegel auf dem-

selben Wege zurück, auf dem es gekommen, und fällt in gleicher Größe und gleicher Stellung wieder auf das Gitter. — Um nun das Gitter und sein Bild beobachten zu können, ohne die Lichtquelle zu verdecken, bringt man zwischen dem Gitter und der Linse ein schräges ebenes Glas NO an, welches vermöge der auf seinen beiden Seiten stattfindenden Reflexion sowohl das ursprüngliche als das zurückgeworfene Bild des Gitters auf eine seitlich angebrachte Linse PQ wirkt, durch welche beide Bilder dem Auge des Beobachters sichtbar werden. — Wird der Spiegel zuerst langsam und gleichförmig um seine Aye gedreht, so streicht bei jeder Umdrehung das Bild des Lichtbündels

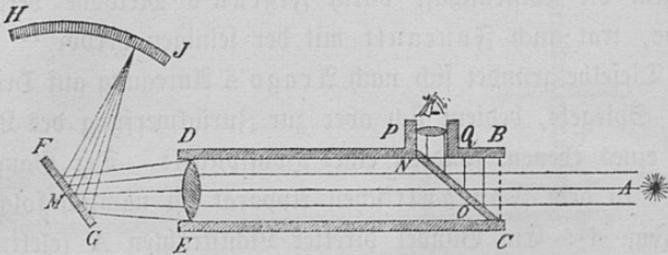


Fig. 4.

über die Oberfläche des Hohlspiegels, wird in jedem Augenblicke von demselben senkrecht zurückgeworfen, kehrt auf demselben Wege, auf dem es gekommen, zum Gitter zurück und erscheint dem Beobachter ruhend, verschwindet jedoch jedesmal so lange, als kein Licht auf den Hohlspiegel gelangt. Das Gitter wird dabei nur einfach gesehen, da sein vom Hohlspiegel zurückkehrendes Bild sich mit dem direkt von der Glasplatte ins Auge gelangenden Bilde deckt. Macht der Spiegel mehr als 30 Umdrehungen in der Sekunde, so ist das Auge zwar nicht mehr imstande, das Erscheinen und Verschwinden des Bildes zu unterscheiden, der Eindruck desselben ist vielmehr ein bleibender und vollkommen ruhiger; aber auch jetzt noch erscheint das Gitter einfach. Erst wenn die Geschwindigkeit des Spiegels

eine sehr bedeutende ist, kommt die Zeit in Betracht, die das Licht gebraucht, um den kurzen Weg zwischen dem ebenen und dem Hohlspiegel zweimal zurückzulegen. Denn, wie gering auch diese Zeit sein mag, so wird sie doch hinreichen, um die Stellung des sich drehenden Spiegels zu verändern; dasselbe Lichtbündel also, welches vom letzteren auf den Hohlspiegel gelangte, wird bei seiner Rückkehr den ebenen Spiegel in einer anderen Stellung vorfinden, anders von ihm zurückgeworfen werden und auf anderem Wege durch die Linse nach dem Gitter zurückkehren. Dort angelangt, wird das mit dem Lichtbündel zurückkehrende Bild des Gitters dieses letztere nicht mehr decken; folglich werden auch die beiden durch die ebene Glasplatte zurückgeworfenen Bilder nicht mehr zusammenfallen. Und da ihre gegenseitige Verschiebung mit der Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels zunehmen muß, so kann dieselbe dazu dienen, die Geschwindigkeit zu ermitteln, mit welcher das Licht den doppelten Weg zwischen dem ebenen und dem Hohlspiegel zurückgelegt hat. Auch hier läßt sich, wie bei dem Fizeau'schen Apparate, die Schärfe der Beobachtung durch zunehmende Drehungsgeschwindigkeit erhöhen.

Die ersten Versuche Foucault's brachten schon bei 30 Umdrehungen des Spiegels in einer Sekunde eine Verschiebung des zurückkehrenden Bildes um 0,01 Millimeter hervor, wobei der Weg des Lichtes vom ebenen bis zum Hohlspiegel 2 Meter betrug. Mit Benutzung dieser Werthe ergab die Rechnung eine Geschwindigkeit des Lichtes von 40640 geogr. Meilen in der Sekunde.

Um die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser oder einem anderen durchsichtigen Stoffe zu messen, brauchte man nur zwischen den beiden Spiegeln eine Säule von diesem Stoff einzuschalten, die in einer an beiden Enden durch Glasplatten geschlossenen Röhre enthalten war. Foucault fand vermittelst dieser Einrichtung, daß die Ablenkung des durch Wasser ge-

führten Lichtbündels bedeutender war als beim Wege durch die Luft. Demnach mußte das Licht einer längeren Zeit bedurft haben, um die Wasser säule zu durchdringen, weil die stärkere Ablenkung eine größere Drehung des Spiegels anzeigte. Wurde der Versuch in der Weise an gestellt, daß die obere Hälfte des Lichtbündels durch Luft, die untere durch Wasser ging, so erschienen die Streifen des Bildes in der Mitte gebrochen, und zwar lagen die Streifen der Wasserhälfte im Sinne der allgemeinen Ablenkung voraus, wie es zu erwarten war.

Wenn wir nun in dieser Methode einen Fortschritt gegen das Verfahren Fizeau's erkennen, so gründet sich diese Bemerkung darauf, daß einerseits der Weg, den das Licht innerhalb des Apparates zurückzulegen hat, bei Foucault bedeutend abgekürzt, mithin die Bequemlichkeit der Beobachtung in demselben Maße erhöht ist, während andererseits durch Foucault's Apparat eine Verallgemeinerung der Untersuchungen angebahnt wurde, vermöge deren der Forscher sich nicht mehr mit der einfachen Frage nach der Geschwindigkeit des Lichtes begnügte, sondern sich nunmehr die Aufgabe stellte, zu bestimmen, wie sich diese Geschwindigkeit in verschiedenen Stoffen und unter sonstiger Veränderung der Umstände gestalten möchte. Diese Richtung haben denn auch seitdem alle Bestrebungen auf diesem Gebiete festgehalten.

Zunächst bemächtigte sich Fizeau der oben erwähnten Idee Arago's in dem Sinne, daß er eine dem Foucault'schen Apparat im Prinzip gleiche, in der Ausführung theilweise verschiedene Vorrichtung herstellte, um das Verhältniß der Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser auch zahlenmäßig zu ermitteln, nachdem bisher nur im allgemeinen die Verminderung dieser Geschwindigkeit im Wasser festgestellt war. — Fizeau's Verfahren¹³ gründet sich auf folgende einfache Erwägung. Sind die Wege zweier Lichtbündel durch Luft und Wasser (im Foucault'schen

Apparat) einander gleich, so muß, wie wir bereits gesehen haben, bei einer großen Drehungsgeschwindigkeit das eine Bündel den Doppelweg zwischen den beiden Spiegeln schneller zurücklegen als das andere; mithin werden auch ihre Bilder in ungleichem Grade abgelenkt erscheinen. Nun wird es aber möglich sein, den Weg durch die Luft mittelst angemessener Verschiebung eines Spiegels derartig zu verlängern, daß bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit auch die Ablenkungen der beiden Lichtbündel einander wieder gleich werden, und noch mehr, daß sie gleich bleiben, wie man auch diese Geschwindigkeit vergrößern möge. — Durch Versuche ist nun gefunden worden, daß die Wege durch die Luft und durch das Wasser im Verhältniß von 4:3 stehen müssen, wenn die Ablenkungen der beiden Lichtbündel einander gleich sein sollen. Unter diesen Umständen bleiben sie es auch bei jeder Rotationsgeschwindigkeit. Kehrt man dagegen das Verhältniß der beiden Wege um, so zeigt sich der Unterschied der Ablenkungen bei 400—500 Umdrehungen des Spiegels in einer Sekunde.

Wir haben bereits gesehen, daß die Resultate, welche hinsichtlich der Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser gefunden wurden, die Voraussetzungen der Undulationstheorie bestätigten. Diese letztere lieferte aber auch sogleich ein Mittel, die Lichtgeschwindigkeit in jedem anderen Stoffe durch einfache Winkelmessungen zu bestimmen. Unter der Voraussetzung nämlich, daß die Fortpflanzung der Lichtwellen im Wasser langsamer stattfinde als in der Luft, folgt zunächst für diese Stoffe, daß eine Welle, die aus Luft in Wasser (oder umgekehrt) übergeht, eine Veränderung ihrer Richtung erleiden muß, wenn sie die trennende Oberfläche in schiefer Richtung trifft. Diese unter dem Namen „Lichtbrechung“ bekannte Erscheinung kann, wie die mathematische Physik zeigt, in der That dazu dienen, das Verhältniß der Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser aus den Winkeln zu berechnen, welche der „einfallende“ und der „gebrochene“ Licht-

strahl mit einer auf der Oberfläche des Wassers senkrecht gedachten Linie bilden. Praktisch gestaltet sich diese Methode noch bei weitem bequemer, wenn man den Lichtstrahl nicht einen einfachen Uebergang aus einem Stoffe in den andern machen läßt, sondern ihn durch ein hohles mit Wasser oder einem anderen Stoffe, in welchem die Lichtgeschwindigkeit untersucht werden soll, gefülltes Glasprisma hindurchleitet. Diese letzteren Methoden, welche somit die Anwendung der komplizirten vorher beschriebenen Apparate ganz überflüssig machen, geben den Untersuchungen über die Geschwindigkeit des Lichtes in verschiedenen Stoffen einen vollkommenen Abschluß.

Wir haben gesehen, in wie engem Zusammenhange diese Untersuchungen mit den Grundlagen der ganzen Lehre vom Licht stehen, ja, wie diese Grundlagen sogar unwiderlegliche Beweise durch die Resultate jener Untersuchungen gefunden haben. Hiermit ist jedoch die weiterreichende Bedeutung der Untersuchungen, welche durch die vorher beschriebenen Apparate ermöglicht wurden, noch nicht erschöpft. So war es z. B. für den Physiker wichtig festzustellen, ob und in welchem Grade der den ganzen Weltraum wie die Zwischenräume zwischen den kleinsten Theilen eines Körpers ausfüllende Aetherstoff, der Träger der Lichtschwingungen, an den Bewegungen des Körpers theilnehme. Durch Versuche über die Lichtgeschwindigkeit in bewegtem Wasser und bewegter Luft gelang es Fizeau¹⁴ darzuthun, daß die Ansicht Fresnels, nur ein Theil des in einem Körper befindlichen Aethers nehme an der Bewegung des Körpers theil, durch die Erfahrung bestätigt werde. Uebrigens zeigte sich auch, daß die Geschwindigkeit des Lichtes in einem bewegten Körper eine Veränderung im Sinne dieser Bewegung erleide. Andere hierher gehörige Untersuchungen von speziellerem Interesse sind diejenigen, welche Famin über Lichtgeschwindigkeit im Wasser bei verschiedenen Temperaturen¹⁵ mit Hülfe des

fogen. Interferenzial-Refraktor^s ¹⁶ anstellte, ferner Fizeau über den Einfluß der Bewegung der Erde auf die Geschwindigkeit der sie treffenden Lichtstrahlen,¹⁷ u. s. w. — Im allgemeinen legen die Fortschritte, welche diese Untersuchungen in der Neuzeit gemacht haben, Zeugniß dafür ab, daß es der Wissenschaft verstattet war, vom allgemeinen ausgehend, ihre Fragen immer detaillirter zu stellen, und daß sie einen in gleichem Maße zunehmenden Reichthum an Mitteln entfaltete, um die delikatesten Untersuchungen mit Schärfe und Sicherheit durchzuführen.

Werfen wir nunmehr einen vergleichenden Rückblick auf die Resultate und auf die Eigenthümlichkeiten der vorher beschriebenen Methoden. Zunächst auf die Resultate. Dieselben sind zweierlei Art, insofern sie zum Theil die absolute Lichtgeschwindigkeit (im Weltraum und unserer Atmosphäre), zum Theil die relative (in verschiedenen Stoffen, unter verschiedenen Umständen) betreffen. An der Feststellung der ersteren haben Astronomie und Physik gleichen Antheil, und es haben die beiderseitigen Methoden in ihren Resultaten eine ziemlich genaue Uebereinstimmung gezeigt. Vollkommen jedoch konnte diese Uebereinstimmung nicht genannt werden, denn die physikalischen Methoden gaben übereinstimmend die Geschwindigkeit des Lichtes um den dreißigsten Theil geringer, als die astronomischen. Vergleicht man diese Differenz mit der durch allmähliche Vervollkommnung der Instrumente erzielten erstaunlichen Schärfe der beiderseitigen Beobachtungen, so erscheint sie trotz der Schwierigkeit der Untersuchung zu groß, wenn man gleich nicht weiß, auf welcher Seite man einen Beobachtungsfehler suchen soll. — Neuere Untersuchungen haben jedoch auch diesen räthselhaften Umstand in einer für die Zuverlässigkeit der neueren Beobachtungen, sowohl auf astronomischen wie auf physikalischem Gebiete gleich befriedigenden Weise erklärt, wenn auch die Angabe, welche aus den physikalischen Methoden hervorging, allein das Feld behauptet

hat. — Erinnern wir uns, daß unter den Daten der astronomischen Rechnung das eine, nämlich die Entfernung der Sonne von der Erde, eine verhältnißmäßig späte Berechnung erfahren hat. E. Halley hatte im Jahre 1714 den Vorschlag gemacht, die Vorübergänge des Planeten Venus vor der Sonnenscheibe zu diesem Zwecke zu benutzen, und die beiden, am 6. Juni 1761 und am 4. Juni 1769 stattfindenden Ereignisse dieser Art lieferten dem Astronomen Encke das Material zu seinen mit äußerster Genauigkeit ausgeführten Rechnungen, welche für die Entfernung der Erde von der Sonne 20 666 230 geographische Meilen ergaben. Diese Entfernung lieferte, verbunden mit der Zeit von 8' 18,2', die das Licht braucht, um sie zu durchlaufen, jenen Werth von 41 500 Meilen, der bis auf die neue Epoche der physikalischen Berechnungen als der richtige galt. — Inzwischen trafen jedoch mehrere astronomische Beobachtungen zusammen, die geeignet waren, einen Zweifel an der Genauigkeit jener Encke'schen Zahlen zu begründen. Namentlich ließen sich die Theorie des Mondlaufes und die gegenseitigen Wirkungen der Erde und Venus nur dann mit den Beobachtungen vereinigen, wenn man den Maßstab aller Entfernungen im Sonnensystem, nämlich die Entfernung der Erde von der Sonne, geringer annahm als es bisher geschehen. Man konnte den Grund dieser Erscheinung in der vielleicht noch nicht hinreichenden Genauigkeit der Beobachtungen von 1761 und 1769 finden, und eine Gelegenheit, die Berechtigung dieses Bedenkens zu prüfen, trat im Jahre 1862 ein, als der Planet Mars bei seiner Opposition am 6. Oktober der Erde bis auf $\frac{2}{5}$ der Sonnen-Entfernung nahe kam. Auf Anregung Winnecke's in Pulkowa wurde dieser Vorgang an verschiedenen Orten der Erde mit möglichster Genauigkeit beobachtet, um durch eine neue Rechnung die Entfernung der Erde von der Sonne zu ermitteln. Die in der Folge angestellten Berechnungen haben nun das

Resultat ergeben, daß diese Entfernung vorher um wenigstens 800 000 Meilen zu groß angenommen war. Demgemäß corrigiren sich auch die astronomischen Angaben über die Geschwindigkeit des Lichtes und zeigen nunmehr eine befriedigende Uebereinstimmung mit den durch die physikalischen Methodenerlangten Resultaten.

Die Ergebnisse jener Versuche, welche zur Ermittlung der relativen Lichtgeschwindigkeit angestellt worden sind, haben übereinstimmend die Aussprüche der Undulationstheorie bestätigt. Sie beanspruchen in Folge dessen einen um so höheren Werth, weil durch sie der lange geführte Streit zweier fundamentaler Theorien eines wichtigen Zweiges der Physik endgültig entschieden wurde. Nicht zu übersehen ist, daß diese Versuche auch sonst über die Natur des Lichtes und seines Trägers, des Weltäthers, mannigfache wichtige Aufschlüsse gegeben haben.

Gönnen wir nun auch den Eigenthümlichkeiten der angewandten Methoden eine nähere Betrachtung. Denn zeigt sich uns in den Resultaten die Erhabenheit der Schöpfung, so bewundern wir in den Mitteln die Größe des menschlichen Geistes. Und ausgerüstet mit den Ergebnissen jener Forschungen, sind wir in den Stand gesetzt, die Mittel derselben unbefangener zu würdigen.

Um eine Geschwindigkeit zu messen, mußte man mit Raum und Zeit operiren; denn aus diesen Begriffen setzt sich derjenige der Geschwindigkeit zusammen. Eine so große Geschwindigkeit aber, wie die des Lichtes, läßt sich nur dann beobachten, wenn man von ihren beiden Bestandtheilen, Raum und Zeit, entweder den ersten sehr groß oder den zweiten sehr klein annimmt. Denn nur unter diesen beiden Voraussetzungen kann der Bruch: Geschwindigkeit, dessen Zähler der Raum, dessen Nenner die Zeit ist, einen Werth von genügender Größe erhalten. Wir sehen, wie aus dem Begriffe der Geschwindigkeit für unsere Aufgabe zwei Systeme von Lösungen sich konstruiren lassen, die einzigen, welche es überhaupt geben kann. Denn entweder gehen

sie aus der Operation mit einem großen Raum und einer mäßigen Zeit hervor, oder aus einer solchen mit mäßigem Raum und kleiner Zeit. Ueber so große Räume aber, wie sie zur ersten Untersuchung erfordert werden, gebietet nur die Astronomie; so kleine Zeiten zu messen, wie die zweite verlangt, gelingt nur der Physik; darum gehört das eine System von Lösungen der ersteren, das andere der letzteren Wissenschaft an.

Alle Methoden stimmen darin überein, daß von den beiden Größen, Raum und Zeit, die eine innerhalb gewisser Grenzen willkürlich angenommen, die andere beobachtet wird. Und es ist in den eigenthümlichen Beziehungen des menschlichen Geistes zu diesen beiden Größen begründet, daß stets der Raum das willkürlich angenommene, die Zeit das beobachtete Element der Untersuchung ist. Hieraus erklärt es sich, daß das letztere, die Zeit, den Fortschritten der Aufgabe bei weitem die größten Schwierigkeiten bereitet hat, und daß die Wissenschaft viel früher durch astronomische Methoden zum Ziel kommen mußte, bei denen es nur auf die Beobachtung einer mäßigen Zeit ankam, als durch physikalische, welche von einer überaus kurzen Zeit abhingen.

Als man zuerst versuchte, die absolute Geschwindigkeit des Lichtes zu messen, hatte man sich schon eine ungefähre Idee von ihrer muthmaßlichen Größe gebildet,¹⁸ welche letztere freilich weit hinter der Wirklichkeit zurückblieb. Diese vorgefaßte Meinung führte den erfinderischen Geist auf Mittel, deren Unzulänglichkeit das Vorurtheil allmählich zerstören mußte. Man glaubte nämlich anfangs mit einem großen Raume zu operiren und machte sich auf die Beobachtung einer mäßigen Zeit gefaßt. In Wirklichkeit aber erhielt man für den kleinen Raum eine Zeit, deren Kürze bei den damaligen Mitteln der Physik jeder Bestimmung spottete. Nach dem Fehlschlagen dieser Versuche begann man zu ahnen, daß der Weg des Lichtstrahls in weitere Räume verfolgt werden müsse, und hiermit wurde der zweite

der oben bezeichneten Wege eingeschlagen, der einzige, der für jene Zeit die Möglichkeit in sich trug, bis zum Ziele verfolgt zu werden. Wir begegnen auf diesem Wege drei Männern, Descartes, Roemer und Bradley, und es ist merkwürdig genug, die Fortschritte zu beobachten, die sich in der Arbeit des Späteren gegen die des Früheren zeigen. — Noch weiß Niemand, wie weit das Ziel entfernt ist; denn der ungünstige Erfolg der bisherigen Versuche gestattet keinen Rückschluß, welchen Antheil jede einzelne seiner beiden muthmaßlichen Ursachen, Unsicherheit der Beobachtungen und allzugroße Geschwindigkeit des Lichtes, an ihm habe. — Descartes, der Erste, welcher den Himmel für seinen Zweck durchmustert, verfolgt den Weg des Lichtes bis zum Monde; aber das Objekt seiner Beobachtung, der Erdschatten, ist zu unsicher, und der Weg bei dieser Unsicherheit zu kurz. — Roemer findet fast zufällig im Jupiter-Systeme, was sein Vorgänger im Gebiete der Erde vergebens gesucht, und dieser Fortschritt im Weltraum ist begleitet von einer größeren Schärfe der Beobachtung, die der Schatten Jupiters vor dem der Erde gewährt. — Bradley endlich vervollkommnet das von Roemer erhaltene Resultat, indem er bis in die Welt der Fixsterne vordringt und gleichzeitig Objekte einführt, deren Beobachtung einer noch höheren Genauigkeit fähig ist.*

Es ist hier der Ort, noch einen besonders bemerkenswerthen Unterschied zwischen den älteren und den neueren Methoden hervorzuheben, der sich auf die Art ihrer Entstehung bezieht und bereits mehrfach angedeutet wurde. Während bei den zwei astronomischen Methoden die Beobachtung in der Weise voranging, daß die Lichtgeschwindigkeit erst als Erklärung unerwarteter

* Anhangsweise sei hier noch eine Arbeit Arago's erwähnt, welche darlegt, wie durch genaue Beobachtung des Lichtwechsels des veränderlichen Sternes Algol die Geschwindigkeit des Lichtes dieses Sternes gefunden werden könne.¹⁰

Phänomene diente, also gewissermaßen a priori gefunden wurde, hat man bei den neueren physikalischen Methoden vorher die Umstände überlegt, unter denen eine Beobachtung der Lichtgeschwindigkeit möglich wurde, und nachher hat man sich durch die Beobachtung von der Richtigkeit der Voraussetzungen überzeugt. Wenn es hiernach scheinen könnte, als gebühre der neueren Naturforschung in der Behandlung unseres Problems mehr Anerkennung als der älteren, weil jene dabei planmäßig zu Werke gegangen sei, während diese die Aufgabe nur durch ein glückliches Apercü gelöst, so ist andererseits nicht zu übersehen, daß die neueren Forscher jenes durch das Verdienst der älteren ermittelte Resultat in ihren Vorberechnungen schon mit anbringen und bei der Konstruktion ihrer Apparate berücksichtigen konnten, während den älteren jede Ahnung von diesem Resultate gefehlt hatte. Ja, es verdient ihr Unternehmen, der unbekanntem Ursache jener astronomischen Abweichungen die Lichtgeschwindigkeit zu substituiren, eine um so größere Bewunderung, da auf ein solches Resultat, wie sie es der Welt mittheilten, niemand gefaßt war, und sie einer nicht zu verachtenden Opposition muthig die Stirn boten.

Die physikalischen Methoden der Neuzeit, auf die wir nunmehr übergehen, charakterisiren sich, wie schon bemerkt, durch die Beobachtung einer Zeit, welche klein genug ist, um den Lichtstrahl nur mäßige Strecken durchlaufen zu lassen. Da jedoch die direkte Beobachtung einer solchen Zeit schlechterdings unmöglich ist, so suchen die Erfinder dieser Methoden ihren Zweck dadurch zu erreichen, daß sie eine große Anzahl gleicher Experimente, deren jedes einer äußerst kurzen Zeit bedarf, in schnellster Aufeinanderfolge anstellen und beobachten, wie groß die Anzahl derselben innerhalb einer gewissen Zeit sein muß, damit die Summe ihrer Erfolge eine beobachtbare Größe werde. Das in dieser Weise wiederholte Experiment besteht darin, daß man

einen Lichtstrahl durch eine gewisse Strecke sendet und ihn nöthigt, auf demselben Wege zu seinem Ausgangspunkte zurückzukehren, den er alsdann in veränderten Umständen vorfindet. Letztere Veränderung muß ebenfalls sehr rasch von statten gehen. Da sie aber nur einen (materiellen) Punkt betrifft, der gegen die Strecke, die das Licht in derselben Zeit zurücklegen muß, sehr klein ist, so erhellt, daß durch die künstlich erzeugte Bewegung, welche die Umstände jenes Punktes verändert, gleichsam ein Mittelglied zwischen dem Zustande der Ruhe des Beobachters und der Bewegung des Lichtes gewonnen wird. Der Apparat ermöglicht es nämlich, die Geschwindigkeit des Lichtes mit derjenigen der erzeugten Bewegung zu vergleichen, welche letztere selbst eine meßbare Größe ist.

Unstreitig gebührt Arago das Verdienst, durch die Idee des rotirenden Spiegels als Apparat zur Erzeugung einer Mittelbewegung diesen Untersuchungen Bahn gebrochen zu haben. Wir erkennen auch, daß dieser rotirende Spiegel und Fizeau's gezahntes Rad nur Mittel zu demselben Zwecke sind, welcher darin besteht, eine beständige Lichtquelle in gesonderte Strahlen zu zerlegen und den Ausgangspunkt dieser Strahlen in jedem Augenblicke in andere Verhältnisse zu bringen, die in einer regelmäßigen periodischen Wiederkehr begriffen sind. Für den Zweck der Bestimmung der absoluten Lichtgeschwindigkeit erscheinen denn auch beide Methoden, die von Fizeau sowohl als die von Foucault, der den Gedanken Arago's zur Ausführung brachte, gleich brauchbar, wie verschieden sie auch im Einzelnen sind.

Was endlich die Methoden zur Bestimmung der relativen Geschwindigkeit des Lichtes betrifft, so stimmen dieselben zuerst im wesentlichen mit den zuletzt genannten überein. Sie erfahren aber einen wesentlichen Fortschritt durch die Erkenntniß des Zusammenhanges der Lichtbrechung mit der Lichtgeschwindigkeit und ersetzen insofern dessen den komplizirten Bewegungsapparat durch einfache Winkelmessungen.

Es dürfte durch die vorangehenden Betrachtungen der innere Zusammenhang der vorher erörterten Methoden und die stete naturgemäße Entwicklung der Theorie von der Geschwindigkeit des Lichtes zur Genüge dargelegt sein. Und es wird die leitende Absicht dieser Betrachtungen erreicht sein, wenn es gelang zu zeigen, wie lehrreich es ist, zwei Wissenschaften mit verschiedenen Mitteln an der Lösung desselben Problems arbeiten zu sehen und schließlich wahrzunehmen, wie es beiden, der einen auf dem Wege des unendlich großen Raumes, der anderen auf dem der verschwindend kleinen Zeit, gelang, dasselbe Ziel in schöner Uebereinstimmung zu erreichen.

Literatur.

1. Bradley, Geschichte der Optik S. 113. Leipzig 1776.
2. Ausgabe von Erasmus Bartholinus. Paris 1657.
3. *Zu Novum organum.*
4. Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich in Galiläi's Mechanik, S. 39.
5. Muschenbroeck, *Tentamina experimentorum in Academia del Cimento t. II p. 183.* Leiden 1731.
6. Bradley a. a. D. S. 113.
7. *Mémoires de l'Académie de Paris t. VI u. X.*
8. Delambre, *Histoire de l'astronomie moderne t. II p. 653.* — Bailly, *Histoire de l'astronomie t. II p. 419.*
9. Bradley a. a. D. S. 287.
10. *Transact. of the Royal Society of arts and sciences.* 1729.
11. *Comptes rendus t. XXIX p. 90.*
12. *Comptes rendus t. XXX p. 551.* — *Annales de chimie et physique Sér. 3 t. XLI p. 129.*
13. *Comptes rendus t. XXX p. 771.*
14. *Comptes rendus t. XXXIII p. 349.*
15. *Comptes rendus t. XLIII p. 1191.*
16. *Cosmos, Nr. 10 S. 277.* 1856.
17. *Comptes rendus t. XLIX p. 717.*
18. Bradley a. a. D. S. 71.
19. *Annuaire du Bureau des Longitudes pour l'an 1842. p. 312--353.*