Encyklopaedie der Naturwissenschaften

Optik

Winkelmann, Adolph

1894

Geschwindigkeit des Lichts

urn:nbn:at:at-ubi:2-7838

Geschwindigkeit des Lichts.

---

1) Allgemeines. Ob das Licht Zeit braucht, um den Raum zu durchmessen, ist eine Frage, deren Aufwerfung ebenso nahe liegt, wie ihre Beantwortung schwierig, ja fast unmöglich erscheint. Es ist daher nicht zu verwundern, dass ihre erste Lösung bei dem Studium scheinbar ganz fernliegender Fragen erfolgte, nämlich bei Gelegenheit zweier bestimmter Arten von astronomischen Beobachtungen. Erst viel später gelang es, auch im Bereiche der Erdoberfläche, ja schliesslich sogar im Raume eines Zimmers nicht nur zu zeigen, dass, sondern auch zu messen, welche Zeit das Licht braucht, um eine bestimmte Strecke zurückzulegen. Dieser Erfolg hat übrigens, ausser der unmittelbaren, noch manche andere, nicht minder wichtige Bedeutung, insofern nämlich die Frage nach der Lichtgeschwindigkeit mit anderen hervorragenden physikalischen und astronomischen Problemen in innigem Zusammenhange steht. Das erste derselben betrifft die Entscheidung zwischen Emissionstheorie und Undulationstheorie des Lichtes; in optisch dichteren Stoffen, d. h. Stoffen von grösserem Brechungsexponenten, muss sich nämlich das Licht nach jener Theorie rascher, nach dieser hingegen langsamer fortpflanzen, als in optisch dünneren Mitteln; da sich nun die letztere Alternative als die richtige herausstellte, so war in der Mitte dieses Jahrhunderts der schon durch die Entdeckung der Interferenzerscheinungen nahezu gesicherte Sieg der Undulationstheorie endgiltig entschieden. Zweitens ist die Lichtgeschwindigkeit zusammen mit der sogen. Aberrationsconstanten und der Sonnenparallaxe (von der wiederum der mittlere Abstand der Erde von der Sonne und die mittlere Bahngeschwindigkeit der Erde abhängt) eine der drei Grössen, die sich gegenseitig bestimmen, sodass, wenn man die Lichtgeschwindigkeit auf selbständigem Wege bestimmt, man die Entfernung der Sonne berechnen kann; und es lässt sich schon jetzt die Vermuthung aussprechen, dass sich auf diesem Wege einmal ein genauerer Werth als der aus Venus- oder Marsbeobachtungen berechnete ergeben wird. Drittens endlich ist die Kenntniss der Endlichkeit und der Grösse der Lichtgeschwindigkeit eine wichtige Grundlage für allgemeine physikalische Erörterungen, wie beispielsweise für die Vergleichung akustischer, elektrischer und optischer Schwingungen, sowie für die Frage nach der Natur und dem Verhalten des Aethers in den verschiedenen Körpern.

2) Methode von RÖMER. Bei Beobachtungen über die Verfinsterungen der Jupitermonde fand OLAF RÖMER[1]) 1675, dass dieselben nicht stets nach gleichen Zeitintervallen, welche den betreffenden Umlaufszeiten der Monde um den Jupiter hätten entsprechen müssen, ihren Anfang nahmen; entfernte sich vielmehr die Erde in der Zeit zwischen zwei Verfinsterungen vom Jupiter, so trat eine Verspätung, im entgegengesetzten Falle eine Verfrühung der zweiten Verfinsterung ein. Schon RÖMER selbst erklärte dies aus der Zeit, welche das Licht brauche, um das in dem einen Falle im Vergleich zum andern stattfindende Mehr an Raum zu durchmessen, und er hat, trotz des Auftretens zahlreicher Zweifler, wie CASSINI, Recht behalten. Trete eine Verfinsterung gerade im Momente der Conjunction, eine andere genau im Momente der Opposition von Erde und Jupiter ein und wäre hierbei die Verspätung 2δ, so hätte man hierin ohne weiteres die vom Licht zur Zurücklegung des betreffenden Durchmessers der Erdbahn erforderte Zeit; da jedoch obige Annahme nicht genau erfüllt ist, und um den Werth für einen mittleren Durchmesser zu finden, hat man noch Correctionen auszuführen. Für δ, also die Fortpflanzungszeit für den mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde, fand hiernach RÖMER selbst $8^m\ 18{\cdot}2^s$, nach neuen Beobachtungen des Jupitersystems von DELAMBRE[2]) ergiebt sich $\delta = 8^m\ 13^s$, nach den neuesten Messungen von GLASENAPP[3]) $8^m\ 20{\cdot}8^s$ oder $500{\cdot}8^s$, mit einem wahrscheinlichen Fehler von 1^s, so dass die Unsicherheit dieser Zahl nur noch $\frac{2}{1000}$ beträgt. In die Formel für die Lichtgeschwindigkeit V

$$V = \frac{R}{\delta},$$

wo R der mittlere Radius der Erdbahn ist, geht nun aber dieses R als zweite Grösse ein, oder die beiden Grössen: Erdradius r und Sonnenparallaxe ε, die für R nach der Formel $r = R\,tg\,\varepsilon$ eingeführt werden können, sodass man

$$V = \frac{r}{\delta\,tg\,\varepsilon}$$

hat. Nun hat man sehr genaue Kenntniss des äquatorialen Erdradius $r = 6378\ km$, dagegen herrscht in Bezug auf die Sonnenparallaxe noch immer beträchtliche Unsicherheit. Während nämlich seit ENCKE's[4]) Berechnung der Werth $8{\cdot}57''$ für den besten galt, haben neuere Bestimmungen[5]) Werthe geliefert, welche zwischen $8{\cdot}7''$ und $9{\cdot}0''$ liegen, und deren wahrscheinliches Mittel $8{\cdot}85''$ beträgt, mit einem wahrscheinlichen Fehler von etwa $\frac{1}{200}$. Schliesslich findet man als wahrscheinlichen Werth der Lichtgeschwindigkeit

$$V = 297100\ km$$

für die Sekunde, mit einer Sicherheit von etwa $\frac{1}{2}$—1 %.

3) Methode von BRADLEY. Als BRADLEY[6]) 1727 sich bemühte, bei den Fixsternen eine Parallaxe aufzufinden, fand er allerdings eine scheinbare Aenderung ihres Ortes, aber der Verlauf derselben liess sofort erkennen, dass sie nicht

1) Acad. des Sciences, Paris 1675. Publicirt in: J. des Sav. 1676, und in: Hist. de l'Ac. 1, pag. 213. — CASSINI und MARALDI widersprachen RÖMER's Ansicht, HUYGENS und NEWTON unterstützten sie.

2) DELAMBRE, Tables ecliptiques des satellites du Jupiter. Paris 1790.

3) S. RAYLEIGH, Nature 25, Aug. 1881.

4) ENCKE, Die Entfernung der Sonne. Gotha 1824.

5) U. A. v. HANSEN, LEVERRIER, GILL.

6) BRADLEY, Phil. Trans. London 1728, No. 406.

parallaktischen Charakters war; sie erfolgte nämlich nicht in der der augenblicklichen Bewegung der Erde entgegensetzten, sondern in der gleichen Richtung; sie war ferner nicht in denjenigen Punkten der Erdbahn am grössten, in denen die Erde sich in der Richtung zu dem Stern hin oder von ihm fortbewegt, sondern in den beiden, gerade in der Mitte zwischen jenen gelegenen Punkten, wo die Bewegungsrichtung der Erde und die Richtung nach dem Stern auf einander senkrecht stehen, und sie war drittens nicht für alle Sterne verschieden, sondern gleich gross für alle diejenigen Sterne, die in der gleichen Höhe über der Ekliptik liegen, während auch für verschieden hohe Sterne die grosse Axe der, eine kleine Ellipse bildenden, scheinbaren Verschiebung stets dieselbe war. Diese Umstände liessen schon BRADLEY erkennen, dass es sich hier um eine ganz andere Erscheinung, die sogen. Aberration des Lichtes handelt. Lässt man einen Stein durch eine senkrechte Röhre fallen, während man diese gleichzeitig parallel mit sich verschiebt, so ist die Falllinie keine der Röhrenaxe parallele, sondern eine von vorn oben nach hinten unten geneigte Gerade. Da nun, wie der Stein zum Fallen, so das Licht zum Durchmessen des Raumes Zeit braucht, und da, wie dort die Röhre, so hier die Erde in Bewegung begriffen ist, so muss der Stern eine Verschiebung, also die Richtung nach ihm eine Drehung aufweisen, und dieser Winkel muss am grössten sein, wenn die Erde senkrecht zur Sehrichtung fortschreitet[1]). Für dieses Maximum, die allen Gestirnen gemeinsame Aberrationsconstante α fand BRADLEY 20·25″, STRUVE[2]) 20·445″, und nach den neuesten Berechnungen von GILL[3]) ergiebt sich als bester Mittelwerth 20·496″, mit einem wahrscheinlichen Fehler von $\frac{1}{1000}$ bis $\frac{2}{1000}$. Nennt man nun u die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn, T die Umlaufszeit, also das siderische Jahr, so hat man offenbar

$$V = \frac{u}{tang\,\alpha} = \frac{2\pi R}{T\,tang\,\alpha} = \frac{2\pi r}{T\,tang\,\alpha\,tang\,\varepsilon},$$

und dies giebt mit den obigen neuesten Werthen

$$V = 298200\ km;$$

die Genauigkeit hängt wieder von der am unsichersten bekannten Sonnenparalaxe ε ab und beträgt daher wie bei der vorigen Methode $\frac{1}{2}$ bis $1\frac{0}{0}$.

Im Mittel aus den beiden astronomischen Methoden[1]) ergiebt sich schliesslich

$$V = 297650\ km.$$

4) Methode von FIZEAU. Der Erste, welcher auf rein physikalischem Wege die Lichtgeschwindigkeit constatirte und, wenn auch zunächst (1849) nur annähernd, ermittelte, ist FIZEAU[2]). Das Princip der Methode ist folgendes. Von einer kräftigen Lichtquelle wird durch ein geeignetes Linsensystem ein Bild entworfen, die von diesem ausgehenden Strahlen werden durch eine weitere Linse parallel gemacht, sie fallen, nachdem sie eine grosse Strecke zurückgelegt haben, wiederum auf eine Linse, convergiren nach einem kleinen Hohlspiegel von derartiger Krümmung und Aufstellung, dass sie, als Strahlensystem im Ganzen betrachtet,

---

1) Ueber die Zulässigkeit des hier gemachten Vergleichs des Lichts mit einem materiellen Körper s. w. u.

2) STRUVE, Recueil und Mém. de l'Ac. de St. Pétersbourg 1844.

3) GILL, s. RAYLEIGH, a. a. O.

1) Eine dritte, auf Marsbeobachtungen beruhende Methode ergab 302000 *km*. — LIAIS, Compt. rend. 60, pag. 174. 1865. — Eine vierte, auf der Veränderlichkeit des Sterns Algol basirende, ergab 295000 *km*. — CHARLIER, Oefv. kgl. Ak. Vorh. Stockh. 46, pag. 523. 1889.

2) FIZEAU, Compt. rend. 29, pag. 90. 1849. — POGG. Ann. 79, pag. 167.

auf gleichem Wege zurückkehren, und somit erzeugen sie ein, mit dem ursprünglichen zusammenfallendes Bild im ersten Brennpunkt. Um mittelst eines Oculars dieses reflectirte Bild für sich beobachten zu können, also durch die Lichtquelle und das direkte Bild nicht behindert zu werden, stellt man die Lichtquelle seitlich auf, bringt eine sowohl spiegelnde als durchlassende Glasplatte unter 45° in dem Punkte an, wo das von der Lichtquelle auf die Axe aller übrigen Theile des Apparates gefällte Loth diese Axe trifft und giebt dadurch den Strahlen nach der Reflexion von der Glasplatte die gewünschte Richtung; die zurückkehrenden Strahlen gehen hingegen theilweise durch die Glasplatte hindurch und das Bild gelangt im Ocular zur Beobachtung. In die Axe wird nun an der Stelle, wo das direkte und das reflectirte Bild entstehen, der Rand eines Zahnrads derart gebracht, dass, wenn sich eine Lücke in der Axe befindet, die Strahlen hindurchkönnen, dass sie dagegen aufgehalten werden, wenn ein Zahn sich in der Axe befindet. Rotirt dieses Zahnrad mit sehr geringer Geschwindigkeit, so wird man das Bild abwechselnd sehen und nicht sehen; rotirt das Rad schneller, so wird man in Folge der Dauer des Lichteindrucks das Bild ununterbrochen sehen; rotirt es noch schneller, so wird man das Bild überhaupt nicht mehr sehen, weil in der Zeit, welche das Licht zur Durcheilung des Hin- und Rückweges braucht, Zähne und Lücken ihre Stellungen mit einander vertauscht haben, weil also die Strahlen, welche hinwärts auf einen Zahn treffen, auf dem Hinwege, diejenigen aber, welche hinwärts auf eine Lücke treffen, auf dem Rückwege durch einen Zahn aufgehalten werden. Der Uebergang von der Sichtbarkeit zur Unsichtbarkeit des Bildes wird übrigens ein allmählicher sein, da anfangs nur wenige und allmählich immer mehr Strahlen aufgefangen werden. Wächst die Drehgeschwindigkeit des Rades weiter, und zwar auf das Doppelte der letztgedachten, so wird das Bild wieder erscheinen, bei der dreifachen wieder verschwinden u. s. w. Ist l die Strecke vom ersten Bild zum Reflector, also $2l$ der Weg der Lichtstrahlen, ist ferner n die Zahl der Umdrehungen des Rades in der Sekunde, bei welcher das Bild zuerst dauernd verschwindet, n_1 die, bei welcher es wieder erscheint, n_2 die, bei welcher es zum zweiten Mal verschwindet, und ist endlich z die Anzahl der Zähne (die mit den Lücken gleiche Breite haben sollen), also $1/2z$ die Breite eines Zahns oder einer Lücke in Theilen des Umfanges, so hat man für den Zeitwerth des Lichtweges einerseits $2l/V$, andererseits $1/2zn$, resp. $2/2zn_1$, resp. $3/2zn_2$ u. s. w., und folglich ist

$$V = 4lnz = 4l\frac{n_1}{2}z = 4l\frac{n_2}{3}z \text{ u. s. w.}$$

Man kann also zahlreiche Messungen combiniren, und es frägt sich nur, ob man den Grössen l, n und z ohne technische Schwierigkeiten genügend grosse Werthe geben kann. Bei FIZEAU's Versuch war $l = 8{\cdot}633$ *km* und $z = 720$, und die erste Verfinsterung trat schon bei $n = 12{\cdot}6$ ein, sodass sich $V = 313300$ *km* ergiebt; die Drehgeschwindigkeit wurde aus den Tönen ermittelt, welche die gegen den Rand eines Kartenblattes schlagenden Zähne hören liessen.

In dieser Bestimmung, sowie in der Constanterhaltung der Geschwindigkeit des Rades liegt die Schwierigkeit der Aufgabe, und in der Ueberwindung derselben beruht der Werth der neueren, nach FIZEAU's Methode von CORNU[1]) ausgeführten Messungen. CORNU lässt sich auf die Constanterhaltung, da sie doch

---

[1]) CORNU, Compt. rend. 73, pag. 857. 1871. (Methode.) — Compt. rend. 76, pag. 338. 1873. (Ergebnisse.) — J. de l'Ec. pol., Heft 44 (ausführliche Abhandlung). — Rep. d. Phys. 9, pag. 88. — Compt. rend. 79, pag. 1361. 1874. (Genaueste Bestimmung.)

nur angenähert zu verwirklichen wäre, gar nicht erst ein; er giebt vielmehr dem Rad innerhalb passender Grenzen eine nach bestimmtem Gesetz zu- oder abnehmende Geschwindigkeit und registrirt das Gesetz dieser Bewegung auf elektrischem Wege; ebenfalls elektrisch registrirt er die genauen Zeitpunkte des Erscheinens und Verschwindens des Bildes; ein Chronograph endlich registrirt gleichzeitig die Sekunden. Auf die Einzelheiten, Aufstellung der Apparate, günstigste Sichtbarmachung des Bildes u. s. w. kann hier nicht eingegangen werden. Bei den Versuchen von 1873 war $l = 10{\cdot}310\ km$, bei denen von 1874 $l = 23{\cdot}100\ km$; dort wurden 658, hier 405 Einzelbeobachtungen gemacht und zwar die meisten zur Nachtzeit mit DRUMMOND'schem Kalklicht, nur wenige mit Sonnenlicht; n konnte bis auf 1600 gesteigert werden, und es konnte demgemäss noch n_{21} verwerthet werden. Die Messungen von 1873 ergaben (reducirt auf den leeren Raum, s. u.) im Mittel

$$V = 298500 \pm 500,$$

diejenigen von 1874 liefern

$$V = 300400 \pm 300,$$

im Mittel wird also

$$V = 299950 \pm 400,$$

sodass der wahrscheinliche Fehler auf 1 bis 2 Tausendtel herabgemindert ist.

YOUNG und FORBES[1]) modificirten die FIZEAU'sche Methode in der Weise, dass sie zwei Reflektoren hintereinander statt eines einzigen aufstellten; man hat dann zwei Bilder mit verschiedenen Perioden; während das eine heller wird, wird das andere dunkler; die Drehgeschwindigkeit, bei der beide gleich hell sind, so wie diejenige, bei der das eine Bild am hellsten, das andere am dunkelsten ist, wird mit dem Chronographen bestimmt. Das Endergebniss lautet

$$V = 301300;$$

benutzt wurde dabei elektrisches Licht.

5) Methode von FOUCAULT. Schon aus Anlass der bekannten Versuche WHEATSTONE's über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität in Drähten hatte ARAGO[2]) (1838) darauf hingewiesen, dass die Methode des rotirenden Spiegels auch für die Entscheidung der betreffenden optischen Fragen Anwendung finden könne. Aber erst FOUCAULT[3]) gelang es, die Schwierigkeiten zu überwinden und (1849) die Geschwindigkeit des Lichtes zu messen. Das Bild eines durch Sonnenlicht beleuchteten Spaltes würde durch eine geeignete Linse in einer bestimmten Entfernung entworfen werden, wenn nicht die Strahlen durch einen drehbaren Spiegel schon vorher aufgefangen und, bei einer bestimmten Stellung dieses Spiegels, nach einem weit entfernten Hohlspiegel derart geworfen würden, dass, durch die Wirkung einer zwischengestellten Linse, gerade in ihm das Bild entsteht; da ferner der Hohlspiegel so steht, dass seine Axe mit der Axe des auffallenden Strahlenbündels zusammenfällt, nimmt das ganze Licht den gleichen Rückweg und es entsteht, wie bei FIZEAU, ein mit dem ursprünglichen zusammenfallendes reflectirtes Bild, so lange der drehbare Spiegel ruht; dagegen wird es, sobald der Spiegel rotirt, zwar ebenfalls, in Folge der Dauer des Lichteindrucks stetig, aber gegen das ursprüngliche Bild verschoben erscheinen, weil der Spiegel

[1]) YOUNG und FORBES, Proc. R. Soc. 32, pag. 247. 1881.

[2]) ARAGO, Compt. rend. 7, pag. 954. 1838. — POGG. Ann. 46, pag. 28. — Compt. rend. 30, pag. 489. 1850.

[3]) FOUCAULT, Compt. rend. 30, pag. 551. — POGG. Ann. 81, pag. 434. 1850. (Methode.) — Compt. rend. 55, pag. 501 u. 792. 1862. — POGG. Ann. 118, pag. 485 u. 580 (Messung).

in der Zeit zwischen den beiden Reflexionen an ihm sich um einen kleinen Winkel gedreht hat. Um diese Verschiebung zu messen, ist einmal dicht hinter dem Spalt ein feines, in Glas geritztes Gitter aufgestellt, und sodann werden die reflectirten Strahlen, ehe sie dieses Gitter erreichen, durch eine unter 45° geneigte Glasplatte nach der Seite reflectirt, erzeugen hier das Bild, und dieses resp. seine Verschiebungen werden mit Mikroskop und Glasmaassstab gemessen. Da die Entfernung des rotirenden vom Hohlspiegel gross sein muss, modificirte FOUCAULT später die Methode, um sie auch im Raum eines grösseren Zimmers ausführbar zu machen, derart, dass er den Hohlspiegel etwas schräg stellte, die in Folge dessen etwas seitlich reflectirten Strahlen in einem zweiten, passend entfernten Hohlspiegel zu einem Bilde vereinigte, und schliesslich erst von dem fünften, senkrecht aufgestellten Hohlspiegel den Rückweg antreten liess. Ist nun φ der gedachte Drehungswinkel des Spiegels, also 2φ der Winkel der zurückkehrenden mit der hingehenden Strahlenaxe, ist ferner r die Entfernung des drehbaren Spiegels vom leuchtenden Objekt, d die Verschiebung, $2l$ der Weg des Lichtes, n die Zahl der Umdrehungen des Spiegels in der Sekunde, so hat man für den Zeitwerth des Lichtweges wiederum wie bei FIZEAU zwei Ausdrücke, nämlich einerseits wieder $2l/V$, andererseits $\varphi/2\pi n$, oder da $\varphi = \frac{1}{2} arc\,tang\, d/r$, also mit genügender Genauigkeit (da φ sehr klein ist) $\varphi = d/2r$ ist, $d/4\pi n r$; die Vergleichung liefert also

$$V = \frac{8\pi n r l}{d}.$$

Als Resultat seiner Messungen giebt FOUCAULT ohne nähere Einzelheiten

$$V = 298000\ km$$

an. Im Princip ist jedenfalls diese Methode weniger günstig als die FIZEAU'sche, da sie ausser der Messung der Strecken l und r und der Tourenzahl n noch die Messung der sehr kleinen Verschiebung d erfordert. Um diese aber grösser zu gestalten, muss man die Tourenzahl erhöhen, und zwar auf einen so hohen Werth, dass die Festigkeit der Aufstellung des kleinen Spiegels und die Zuverlässigkeit des Ganges der Versuche leidet.

Erst MICHELSON[1]) in Washington gelang es, auch bei mässiger Tourenzahl eine starke Verschiebung zu erzielen, und zwar durch erhebliche Verlängerung der Strecke l. Bei FOUCAULT's Anordnung war dies nicht möglich, weil der Hohlspiegel, je weiter entfernt von dem Drehspiegel, desto grösser hätte sein müssen, um einen ausreichenden zeitlichen Complex von Lichtbündeln an die Beobachtungsstelle zurückzuwerfen, und seine Dimensionen wären bald ins praktisch Unmögliche gewachsen. MICHELSON stellt nun die zwischen Drehspiegel und festen Spiegel (für den er übrigens einen Planspiegel wählt) anzubringende Linse nicht wie FOUCAULT, nahe am Drehspiegel, sondern so auf, dass sich der Drehspiegel in ihrer sehr beträchtlichen Hauptbrennweite befindet; auf den Abstand des festen Spiegels kommt es dann gar nicht an, es genügt vielmehr, dass er mit der Linse gleiche Dimensionen habe. So konnte MICHELSON bei der ersten Versuchsreihe bis zu $l = 150\ m$, in der zweiten sogar bis zu $l = 600\ m$ gehen. Die Linse musste freilich 20 cm, der Spiegel 3 cm Durchmesser haben, die Brennweite der ersteren betrug 45 m, und der Abstand r war 9 m, dagegen war schon eine Tourenzahl von $n = 128$ resp. $n = 250$ ausreichend, und die Verschiebung ging bis zu 133 mm, sodass, da noch 0·01 mm beobachtet werden

[1]) MICHELSON, Sill. J. (3) 15, pag. 394. 1878. — Proc. Am. Soc. of Sc. 1878, pag. 71. — Sill. J. (3) 18, pag. 390. 1879. — Naut. Alm. Wash. 1880, pag. 109. — Naut. Alm. 1885, pag. 235.

konnte, die Genauigkeit über 1/10000 hinausging. Auf die Erzeugung der Rotation des Spiegels und ihre Regulirung durch einströmende Luft, auf die Messung der Tourenzahl durch optische Vergleichung mit einer elektrischen Stimmgabel, auf die mikrometrische Messung der Verschiebung, die Ermittelung der Constanten des Apparats u. s. w. wurde die grösste Sorgfalt verwandt; auch wurden alle möglichen Fehlerquellen diskutirt (Verzögerung bei der Reflexion, Deformation des Drehspiegels u. s. w.). Die aus hunderten von Einzelmessungen abgeleiteten Mittelwerthe sind, für die drei Versuchsreihen von 1878, 1880 und 1885, folgende:

1) $V = 300140 \pm 500$, 2) $V = 299940 \pm 50$, 3) $V = 299850 \pm 60$.

In anderer Weise modificirte NEWCOMB[1]) die FOUCAULT'sche Methode; auf die Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden, nur sei bemerkt, dass der Abstand zwischen den beiden, bei der Rotation des Spiegels nach den beiden entgegengesetzten Richtungen sich in entgegengesetztem Sinne verschiebenden Bildern gemessen wurde, und dass die Entfernung l bei der einen Reihe 2·55 *km* bei der anderen sogar 3·72 *km* betrug. Das Endergebniss ist

$$V = 299860 \pm 50.$$

6) Ein Rückblick auf die mitgetheilten Zahlen lässt erkennen, wie die Genauigkeit der Bestimmungen sich immer mehr steigerte, und welch bewundernswürdigen Grad von Uebereinstimmung die neuesten unter ihnen aufweisen. Insbesondere weichen die Mittelwerthe von

CORNU	MICHELSON	NEWCOMB
299950	299895	299860

nur noch um 35 bis 90 *km* von einander ab und das Hauptmittel dieser physikalischen Messungen

$$V = 299890 \pm 30,$$

st bis auf 1/10000 genau. Dagegen ist es um fast 1/100 grösser als das astronomische Mittel (pag. 5); berechnet man also aus dem physikalischen Mittel die astronomischen Constanten, so wird nach der RÖMER'schen Gleichung entweder δ oder ε kleiner als man jetzt annimmt, nach der BRADLEY'schen Gleichung entweder ε oder α kleiner; am wahrscheinlichsten ist es hiernach, dass die gegenwärtig angenommene Entfernung der Sonne von der Erde etwas zu klein ist.[2])

Schliesslich sei angeführt, dass die ermittelte Geschwindigkeit des Lichtes mit derjenigen der Fortpflanzung elektrodynamischer Wirkungen unter bestimmten Umständen wahrscheinlich identisch, dass sie dagegen fast 900000 Mal so gross wie die des Schalles in der Luft ist; ferner, dass das Mondlicht nur wenig mehr als eine Sekunde, das Sonnenlicht $8\frac{1}{4}$ Minuten, das Licht selbst der nächsten Fixsterne dagegen Jahre braucht, um zur Erde zu gelangen (das Licht des Sternes α centauri, des vermuthlich nächsten aller Fixsterne, $3\frac{3}{4}$, das des Sirius 17 Jahre u. s. w.). Grosse Entfernungen im Weltraume pflegt man hiernach auf V als Einheit zu beziehen, d. h. in Lichtjahren auszudrücken.

7) Geschwindigkeit in verschiedenen Stoffen. Die schon erwähnte von ARAGO 1838 entwickelte Idee betraf nicht sowohl Versuche zur absoluten Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft, als vielmehr Versuche zur Vergleichung der Geschwindigkeiten des Lichts in der Luft und im Wasser. Auch diese Idee wurde fast gleichzeitig von FOUCAULT[3]) und FIZEAU[4]) zur Ausführung gebracht

---

[1]) NEWCOMB, Naut. Alm. Wash. 1885, pag. 112.

[2]) Ausführliche Betrachtungen dieser Art stellt KERICUFF an, Mondes (2) 36, pag. 372. 1875.

[3]) FOUCAULT, Compt. rend. 30, pag. 551. 1850. — POGG. Ann. 81, pag. 434.

[4]) FIZEAU und BREGUET, Compt. rend. 30, pag. 562 und 771. 1850. — POGG. Ann. 81, pag. 442; 82, pag. 124.

Foucault wandte wieder den rotirenden Spiegel an, diessmal aber ausserdem zwei symmetrisch zu beiden Seiten aufgestellte feste Spiegel, deren einer durch Luft, deren anderer durch eine Röhre mit Wasser von dem Drehspiegel getrennt war. Jener war soweit verdeckt, dass er nur das mittlere Dritttheil des Bildes lieferte, während dieser das ganze Bild gab; das Ergebniss bei rotirendem Spiegel war, dass die beiden äusseren Drittel stärker verschoben erschienen, als das mittlere, oder genauer gesagt, dass der mittlere Streifen in zwei sich theilweise deckenden Bildern erschien, von denen das von der Wasserseite herrührende, durch die Uebereinstimmung seiner Lage mit der der äusseren Drittel kenntliche Bild stärker verschoben war, als das von der Luftseite herrührende Ehe das durch das Wasser geschickte Licht zurückkehrte, hatte sich also der Spiegel stärker gedreht, als bei der Rückkehr des durch die Luft gegangenen Lichts, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts im Wasser ist also kleiner als die in der Luft. Ganz ähnlich war die Methode von Fizeau und Breguet; nur machten sie die Luftstrecke und die Wasserstrecke nicht räumlich, sondern zeitlich gleich, d. h. sie gaben ihnen Längen, welche, einmal, wenn die Emissionstheorie richtig war, das andere Mal, wenn die Undulationstheorie richtig war, von dem Lichte in gleichen Zeiten zurückgelegt werden mussten, also gemäss dem Brechungsexponenten des Wassers gegen Luft (4/3), zuerst Längen, die sich wie 3:4, alsdann solche, die sich wie 4:3 verhielten; in jenem Falle erwiesen sich die Verschiebungen als ausserordentlich verschieden, in diesem waren sie genau gleich. Hiermit haben sich Fizeau und Foucault das Verdienst erworben, die Emissionstheorie endgiltig widerlegt zu haben.

Quantitative Bestimmungen über die Lichtgeschwindigkeit im Wasser und im Schwefelkohlenstoff hat Michelson[1]) ausgeführt; für das Verhältniss der Geschwindigkeiten in Wasser und Luft fand sich 1·33, für Schwefelkohlenstoff und Luft bei Anwendung von weissem Licht 1·77; die erstere Zahl stimmt genau, die letztere einigermaassen mit dem beobachteten Brechungsexponenten (s. w. u.). Da übrigens bekanntlich auch die Luft das Licht bricht, und zwar gemäss dem absoluten Brechungsexponenten 1·000294, so muss man die aus irdischen Beobachtungen, also in Luft abgeleiteten Werthe von V, um sie auf den leeren Raum zu reduciren, in demselben Verhältniss, also um etwa 90 *km* vergrössern; bei den obigen Angaben [4) bis 6)] ist dies bereits geschehen.

8) Einfluss der Beschaffenheit der Lichtquelle. Man kann die Frage aufwerfen, ob die verschiedenen, unter 2) bis 5) aufgeführten Messungen überhaupt ohne weiteres mit einander vergleichbar seien, da sich doch die Bradley'sche Methode auf Fixsternlicht, die Römer'sche auf Planetenlicht, die übrigen auf Sonnenlicht, Kalklicht, elektrisches Licht u. s. w. beziehen. Zunächst könnte man fragen, ob nicht die Intensität des Lichtes von Einfluss auf seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit sei. Nach Versuchen von J. J. Müller[2]) ist diese Frage zu bejahen; derselbe fand, dass, wenn das Licht eine Abschwächung auf den dritten Theil seiner Helligkeit erfährt, die Verminderung der Geschwindigkeit 0·000016 des Werthes, oder absolut genommen, 5 *km* beträgt. Indessen sind diese Resultate durch F. Lippich[3]) und H. Ebert[4]) nicht bestätigt; nach den Beobachtungen des Letzteren beträgt die Aenderung

1) Michelson, Rep. Brit. Ass. Montreal 1884, pag. 56. — Naut. Alm. Wash. 1885, pag. 235.

2) J. J. Müller, Pogg. Ann. 145, pag. 86. 1872.

3) Lippich, Wien. Ber. 77, pag. 352. 1875.

4) Ebert, Wied. Ann. 32, pag. 337. 1887.

der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes weniger als 0·0000012 des Werthes, oder weniger als 0·4 *km*, wenn die Intensität auf den 250 fachen Betrag wächst.

Zweitens könnte die Farbe, also die Wellenlänge des Lichts seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit beeinflussen, wie dies ja für Flüssigkeiten zweifellos und auch direkt von MICHELSON nachgewiesen ist (rothes Licht im Verhältniss zu blauem im Wasser 1·4 % schneller, Licht von der Wellenlänge zwischen C und D im Schwefelkohlenstoff 2·5 % schneller als solches zwischen b und F, beides in Einklang mit den zu erwartenden Zahlen). Jedoch liegt für Luft nur eine Untersuchungsreihe von YOUNG und FORBES[1]) vor, bei denen sich im Durchschnitt das blaue Licht um 1·8 % schneller fortpflanzte als das rothe. Für die Richtigkeit dieses Resultats führen die Verfasser an: 1) dass bei ihren oben unter 4) erwähnten Versuchen das an Helligkeit zunehmende Bild röthlich, das abnehmende bläulich erschien; 2) dass einige veränderliche Sterne anfangs blau, dann gelb, endlich roth erscheinen; 3) dass bei den Versuchen von CORNU, MICHELSON und ihnen selbst V desto grösser sich ergab, je mehr brechbare Strahlen die Lichtquelle enthielt. Gegen das Resultat sprechen aber gewichtigere und nicht minder zahlreiche Gründe, die besonders von Lord RAYLEIGH[2]), MACAULAY[3]), Sir W. THOMSON[4]) und NEWCOMB[5]) hervorgehoben worden sind. Letzterer z. B. hätte, auch schon bei einem viel geringeren Einfluss der Wellenlänge, farbige Ränder an seinem Spaltbild beobachten müssen, was nicht der Fall war. Temporäre Sterne müssten zuerst blau erscheinen und dann roth, was sich an demjenigen in der Corona von 1866 nicht bestätigte. Optisch-theoretische Einwände liegen ebenfalls auf der Hand. Endlich macht Lord RAYLEIGH auf einen Punkt aufmerksam, der auch an sich von wesentlichem Interesse ist. Man hat nämlich bei jeder Wellenbewegung zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der einzelnen Welle (V) und derjenigen eines durch seine eigenthümliche Beschaffenheit charakterisirten Wellenzuges (U) zu unterscheiden, wie sich denn z. B. bei Wasserwellen schon in dem Umstande, dass vorn Wellen verschwinden, hinten solche auftauchen, augenfällig zu erkennen giebt, dass die Geschwindigkeit des Wellenzuges kleiner als die der einzelnen Wellen ist. Bedeutet k die reciproke Wellenlänge, so ist allgemein

$$U = \frac{d(kV)}{dk},$$

sodass nur, wenn V von k unabhängig ist, $U = V$ wird. RAYLEIGH zeigt nun, dass die FIZEAU'sche Methode U, die FOUCAULT'sche dagegen (ohne Rücksicht auf eine gewisse Fehlerquelle, die sich schwer in Rechnung ziehen lässt) weder V noch U, sondern die Grösse V^2/U liefert, sodass man event. durch Combination beider Methoden U und V selbst finden könnte. Nach SCHUSTER[6]) geben die FOUCAULT'schen Versuche einen noch anderen Werth, nämlich $V^2/(2V - U)$, und man müsste, um V/U zu bestimmen, statt des festen Spiegels einen beweglichen anwenden, der mit der doppelten Geschwindigkeit des ersten rotirte. GIBBS[7]) endlich meint — und SCHUSTER giebt ihm nachträglich Recht — dass das

---

[1]) YOUNG und FORBES, Proc R. Soc. 32, pag. 247. 1881. — Trans. R. Soc. 1882 (1), pag. 231.

[2]) Lord RAYLEIGH, Nature 24, pag. 382; 25, pag. 52. 1881.

[3]) MACAULAY, Nature 24, pag. 556. 1881.

[4]) Sir W. THOMSON, s. FORBES, Nature 26, pag. 465. 1882.

[5]) NEWCOMB, a. a. O.

[6]) SCHUSTER, Nature 33, pag. 439. 1886.

[7]) GIBBS, Nature 33, pag. 582. 1886.

Ergebniss U selbst sei. Alle diese Betrachtungen entbehren nun aber vorläufig der Unterlage, da die nach der FIZEAU'schen und die nach der FOUCAULT'schen Methode gefundenen Zahlenwerthe bis auf den wahrscheinlichen Fehler mit einander stimmen; und diese Thatsache wiederum spricht auf Grund der RAYLEIGH'schen Betrachtungen gegen das Resultat von YOUNG und FORBES. Ferner macht Lord RAYLAIGH darauf aufmerksam, dass, wenn YOUNG und FORBES Recht hätten, sich keine harmonischen Beziehungen zwischen den Spektrallinien eines leuchtenden Gases ergeben könnten, was doch der Fall zu sein scheint. Da schliesslich YOUNG und FORBES selbst zugeben, dass das genannte Resultat nicht bei allen Versuchen eintrat, dass vielmehr bei einigen beide Lichtsorten die gleiche und bei einem Versuche sogar die rothe die grössere Geschwindigkeit zu haben schien, muss ihr Ergebniss vorläufig noch bezweifelt werden.

9) Einfluss der Bewegung des Mediums auf die Lichtbewegung. Nach Analogie des Schalles, welcher bekanntlich mit dem Winde schneller als gegen denselben sich fortpflanzt, kann man die Frage aufwerfen, ob der Träger der Lichtbewegung in bewegten Mitteln ruhe oder an der Bewegung theilnehme, und wenn letzteres, ob diese Theilnahme eine vollständige oder eine nur partielle sei; die eminente Wichtigkeit dieser Frage für die Theorie des Lichts sowie ihr Zusammenhang mit anderen Fragen liegen auf der Hand. FRESNEL stellte die Hypothese auf, dass der Aether theilweise an der Geschwindigkeit des Mediums theilnehme, nämlich mit dem Bruchtheil $(n^2 - 1)/n^2$, wo n der Brechungsexponent ist, und dieser Werth ist später von BEER[1]), welcher ihn den Correptionscoëfficienten der betreffenden Substanz nannte, von KETTELER[2]) und Anderen theoretisch näher begründet worden; er ist beispielsweise für Wasser gleich 0·438, für Luft aber nur gleich 0·00059. Experimentell wurde die Frage zuerst von FIZEAU[3]) bearbeitet und zwar mittelst einer Interferenzmethode, die dann später noch vielfache Anwendung und Abänderung erfahren hat. Hinter dem Objekt sind nämlich diesmal zwei Spalte neben einander aufgestellt, von diesen gehen die Strahlen durch zwei parallel neben einander gestellte Röhren, werden durch eine Linse vereinigt und im Vereinigungspunkte von einem symmetrisch gegen sie aufgestellten Spiegel derart reflektirt, dass sie ihre Wege mit einander vertauschen; die beiden Spaltbilder gelangen auf diese Weise zum Ausgangspunkt zurück und bilden hier Interferenzstreifen. Wird nun durch die Röhren Wasser in entgegengesetztem Sinne getrieben, so geht das eine Strahlenbündel hin- und herwärts mit dem strömenden Wasser, das andere beide Mal gegen dasselbe. Eine etwaige Fortführung des Lichts mit dem Wasser müsste sich also in einer Verschiebung der Interferenzstreifen zeigen. Dies war in der That und zwar schon bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m der Fall; bei einer solchen von 4 bis 7 m war sie sogar näherungsweise messbar und bestätigte die Hypothese der partiellen Correption des Aethers. Vervollkommnet wurde die Methode durch MICHELSON und MORLEY[4]) und zwar derart, dass exakt dafür gesorgt wurde, dass die beiden Lichtwege räumlich genau identisch waren, eine grössere Lichtfülle gewonnen, die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers einige Minuten lang constant erhalten und ihr axialer Werth, auf den es hier ankommt, genau gemessen wurde. Ist l die Röhrenlänge, u die Strömungsgeschwindigkeit,

---

1) BEER, POGG. Ann. 93, pag. 213. 1854.

2) KETTELER, POGG. Ann. 144, pag. 109, 287, 363, 550. 1871.

3) FIZEAU, Compt. rend. 33, pag. 349. 1851. — POGG. Ann. Erg. Bd. 3, pag. 457. — Ann. Chim. Phys. (3) 57, pag. 385. 1859. — Vergl. auch ARAGO, Compt. rend. 88, pag. 538. 1853.

4) MICHELSON u. MORLEY, Sill. J. (3) 31, pag. 377. 1886.

λ die Wellenlänge, n der Brechungsexponent des Wassers, δ die Verschiebung des centralen Streifens der Interferenzerscheinung in Bruchtheilen seiner ganzen Breite, so hat man für die Beschleunigung des Lichts die Formel

$$x = \frac{\lambda\delta}{4ln^2u} V.$$

Aus zahlreichen Versuchen, bei denen u zwischen 5·7 und 8·7 variirte, ergab sich der Mittelwerth 0·434 ± 0·02, nahezu identisch mit dem FRESNEL'schen Werthe 0·438. Auch mit Luft haben sowohl FIZEAU als auch MICHELSON und MORLEY Versuche angestellt, aber ohne Erfolg, und Letztere zeigen, dass dieser auch nicht erwartet werden durfte, da sich hier nach der Theorie nur eine Verschiebung um 0·0036 Streifenbreiten ergiebt.

Um nun aber die gerade für die Lichtbewegung in der Atmosphäre der durch den Weltraum sich fortbewegenden Erde wichtige Entscheidung zu ermöglichen, hat MICHELSON[1]) einen anderen Weg eingeschlagen, und diesen dann einige Jahre später derartig abgeändert[2]), dass die gegen die ursprüngliche Untersuchung von LORENTZ[3]) erhobenen Einwände Berücksichtigung finden. Die Idee MICHELSON's ist folgende. Am nächsten läge es, Strahlen zu vergleichen, welche in entgegengesetzten Richtungen, also der eine mit, der andere entgegen der Erdbewegung verlaufen; dies scheitert aber daran, dass man die Strahlen zum Zwecke der Beobachtung wieder auf demselben Wege zurückführen muss, wodurch die zu untersuchenden Differenzen sich gerade ausgleichen. Wohl aber kann man zwei Strahlen zur Interferenz bringen, die senkrecht gegen einander verlaufen, nämlich der eine mit der Erdbewegung, der andere senkrecht zu ihr. Nun falle ein Strahl in der Richtung der Erdbewegung auf eine unter 45° geneigte Glasplatte, die beiden hier durch Reflexion und Durchgang entstandenen Componenten werden nach gleicher Wegstrecke D von den zwei Spiegeln in sich zurückgeworfen; es kommt dann die auf dem Rückwege durchgegangene Componente des auf dem Hinwege reflectirten Strahles mit der auf dem Rückwege reflectirten Componente des hinwärts durchgegangenen Strahles in gleicher Richtung zusammen, und diese Strahlen müssten, wenn u die Erdgeschwindigkeit ist, einen Wegunterschied von Du^2/V^2 besitzen, falls der Aether an der Erdbewegung nicht theilnähme; wird jetzt die Anordnung um 90° gedreht, so wird der Wegunterschied der entgegengesetzte, also die Differenz zwischen beiden Fällen $2Du^2/V^2$. Die Drehung der fest montirten Apparate geschah in der vorsichtigsten Weise, und die zu beobachtende Verschiebung wurde durch Anwendung mehrerer Spiegel statt je eines auf 0·4 Streifenbreiten gebracht. Die wirklich beobachtete war aber um so viel kleiner, dass der Correptionscoëfficient des Aethers in der Atmosphäre mindestens $\frac{3}{4}$, wahrscheinlich aber sogar mehr als $\frac{5}{6}$ beträgt. Nach einigen Monaten ergaben Controlbeobachtungen das gleiche Resultat, woraus hervorgeht, dass bei der ersten Reihe nicht etwa zufällig die Erdbewegung und die Bewegung des Sonnensystems sich gerade aufhob.

Andererseits hat FIZEAU[4]) seine früheren Versuche später auf andere Weise wieder aufgenommen, indem er die Drehung der Polarisationsebene polarisirten

---

[1]) MICHELSON, Sill. J. (3) 21, pag. 120. 1881.

[2]) MICHELSON und MORLEY, Sill. J. (3) 34, pag. 333. 1887.

[3]) LORENTZ, Arch. Néerl. 21, pag. 103. 1886.

[4]) FIZEAU, Compt. rend. 49, pag. 717. 1859. — POGG. Ann. 109, pag. 160. Vergl. hierzu auch BABINET, Compt. rend. 55, pag. 561. 1862.

Lichtes beim schiefen Durchgang durch eine planparallele Platte untersuchte. Da diese Drehung vom Brechungsexponenten abhängt, also von der Lichtgeschwindigkeit, muss sie verschieden ausfallen, je nachdem das durchfallende Licht mit der Erde oder gegen diese sich bewegt. Die Beobachtungen ergaben in der That die Drehung stets grösser, wenn um die Mittagszeit der Apparat gegen Westen als wenn er gegen Osten gerichtet war, und die Zahlen stimmten mit dem nach der FRESNEL'schen Annahme zu erwartenden nahezu überein.

Hiernach besteht ein Widerspruch zwischen FIZEAU's und MICHELSON's Resultaten, insofern nach jenen der Aether fast gar nicht, nach diesen fast vollständig mit der Erde fortschreitet, und es muss diese Frage daher noch für offen gelten.

Schliesslich sei auf die zahlreichen theoretischen Diskussionen hingewiesen, welche diese Frage theils an sich, theils hinsichtlich ihrer Folgen für die Theorie der Aberration des Lichtes, der Bewegung des Sonnensystems durch den Weltraum u. s. w. hervorgerufen hat[1]). F. AUERBACH.

Geometrische Optik.

Einleitung.

Die Gesammtheit der uns bekannten Erscheinungen des Lichts hat zu der Annahme geführt, dass das Licht in transversalen Schwingungen eines sehr feinen, sehr elastischen und überall verbreiteten Mediums, des sogen. Lichtäthers bestehe. Auf Grund dieser Vorstellung gelingt es, von den meisten Erscheinungen des Lichts ziemlich vollständig Rechenschaft zu geben.

Es giebt aber ein grosses Gebiet von Lichterscheinungen — und darunter befinden sich gerade solche in grosser Zahl, welche sich im gewöhnlichen Leben am häufigsten darbieten, und eine weitgende praktische Anwendung gefunden haben — die in ihrem wesentlichen Theile nicht von der genannten näheren Natur des Lichts abhängen, sondern die auf gewissen allgemeineren Eigenschaften der Lichtbewegung beruhen, — Eigenschaften, die an sich sehr einfach sind und die auch für sich, ohne Berücksichtigung, ja selbst ohne Kenntniss der

---

[1]) STOKES, Phil. Mag. (3) 27, pag. 9. 1846 u. s. w. (Nachweis, dass die Fortpflanzung des aus dem Weltraume kommenden Lichts in der Atmosphäre krummlinig werden muss, und somit die gewöhnliche Erklärung der Aberration nicht mehr gilt.) — CHALLIS, ebenda, pag. 321. (Einwände dagegen, die STOKES widerlegt.)

FAYE, Compt. rend. 49, pag. 870. (Einwände gegen FIZEAU.) — TESSAN, ebenda, pag. 980. (Widerlegung derselben). —

S. TOLVER PRESTON, Nat. 19, pag. 178. 1879. (Ohne Kenntniss der Thatsachen und der Literatur geschrieben.)

KLINKERFUES, Versuche üb. d. Bew. d. Erde u. d. Sonne im Aether, Gött. Nachr. 1870, pag. 226. (Von KETTELER in der oben citirten Abh. z. Thl. widerlegt.)

VELTMANN, POGG. Ann. 150, pag. 497. 1870. (Ueber die FRESNEL'sche Hypothese.)

PUSCHL, Wien. Ber. (2) 68, pag. 446. 1874. — Rep. d. Phys. 10, pag. 171. 1874. (Ersatz der Mitbewegung des Aethers durch die Bewegung der Körpermolekeln, wobei nahezu ebenfalls die FRESNEL'sche Beziehung herauskommt).

GOUY, Ann. Chim. Phys. (6) 16, pag. 262. 1889. (Allgem. Ableitung der Gleichung für Lichtstrahlen u. s. w.)