Die Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit beträgt im Vakuum $2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ m/s.

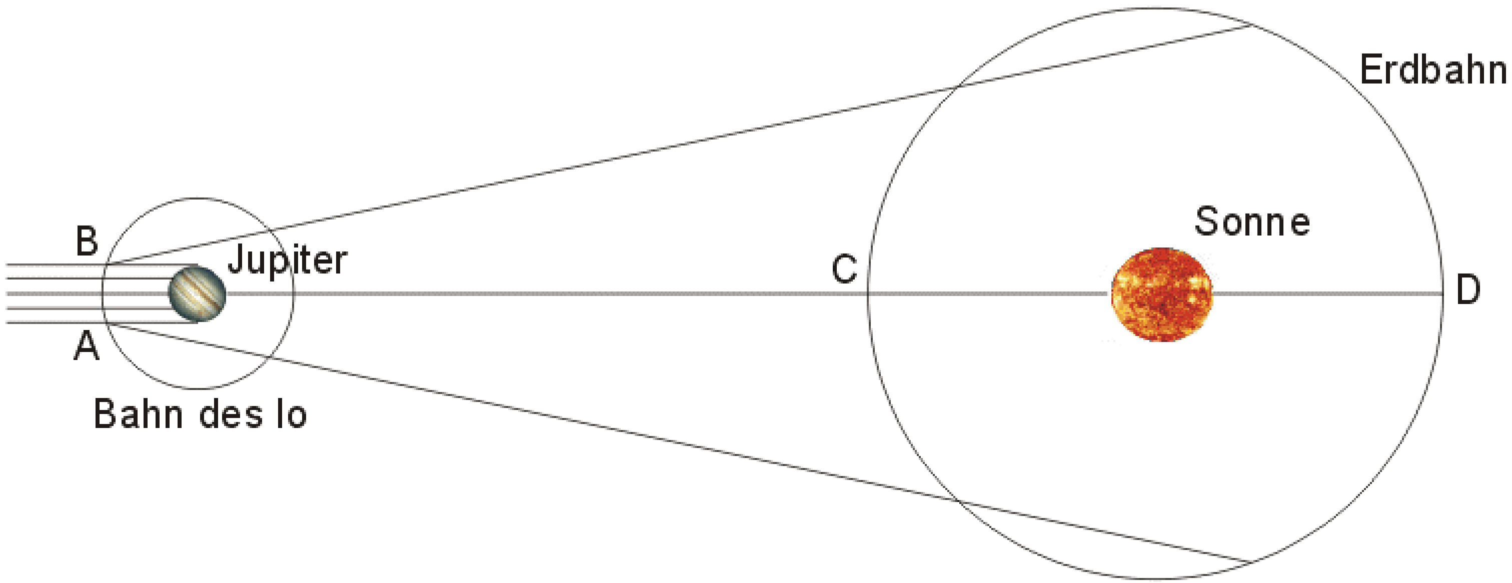
Die Messung der Lichtgeschwindigkeit hatte eine große Bedeutung bei der Frage, welche Vorstellung von der Natur des Lichts denn nun die "richtige" sei. Newton und Huygens, aber auch schon andere Physiker vor ihnen, gingen bei ihrer Herleitung des Brechungsgesetzes einmal von einer im dichteren Medium größeren, einmal im dichteren Medium kleineren Lichtgeschwindigkeit aus. Da sie gleichzeitig vehemente Verfechter der Teilchenvorstellung bzw. der Wellenvorstellung des Lichtes waren, sollte eine Messung der Lichtgeschwindigkeit den Zwist entscheiden.

Viel früher beschäftigten sich die Physiker mit der Frage, ob sich Licht mit einer endlichen Geschwindigkeit oder unendlich schnell ausbreitet.
In der Antike ging man meist von einer augenblicklichen Ausbreitung des Lichtes aus. Aber auch in der Neuzeit verfolgte man noch diesen Ansatz. Kepler meinte, dass, da die Lichtausbreitung keine materielle Bewegung darstelle, sie im Medium keinen Widerstand erfahre und sie daher momentan erfolgen müsse.
Auch Descartes nahm an, dass sich das Licht unendlich schnell ausbreite, obwohl er bei seiner Herleitung des Brechungsgesetzes von in dünnem und dichtem Medien unterschiedlicher Lichtgeschwindigkeit ausging. Er begründete seine Annahme so: Würde das Licht vom Mond zur Erde eine endliche Zeit, z.B. eine Stunde, benötigen, würde man eine Mondfinsternis nicht in dem Augenblick sehen, in dem sich Sonne, Erde und Mond auf einer geraden Linie befinden, sondern zwei Stunden später. Dann würde aber der Mond wieder unter einem gewissen Winkel zur Linie Sonne-Erde gesehen. Diesen Winkel konnte man nicht feststellen. Descartes konnte aber nicht ahnen, dass Licht dermaßen schnell ist, dass der tatsächlich vorhandene Winkel zu seiner Zeit nicht gemessen werden konnte.

Galilei versuchte die Frage experimentell zu klären. Zwei Personen, jeder mit einer Lampe, stellten sich gegenüber. Zunächst deckten beide die Lampe mit einer Hand ab. Dann öffnete einer die Abdeckung. Sobald der zweite das Licht sah, öffnete auch er die Abdeckung. Erst wurde das Wechselspiel in geringer Entfernung geübt. Dann vergrößerten die Personen ihren Abstand. Breitet sich das Licht mit endlicher Geschwindigkeit aus, müsste der Abstand zwischen Aufdecken der ersten Lampe und Wahrnehmen der Aufdeckung der zweiten Lampe größer werden. Galilei konnte in seinem Experiment mit einer Entfernung von einer knappen Meile aber keinen Unterschied feststellen. Er folgerte richtig, dass die Lichtgeschwindigkeit, wenn sie nicht unendlich groß sei, doch sehr groß sein müsse.

1676 gelang Ole Christensen Römer der erste Beweis der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit. Er war seit 1672 Mitarbeiter des Astronomen Giovanni Domenico Cassini. Dieser entdeckte 1675 eine gewisse Unregelmäßigkeit in der Bewegung des innersten Jupitermondes (Io), Die Umlaufzeit war davon abhängig, ob sich die Erde vom Jupiter entfernte oder näherte.

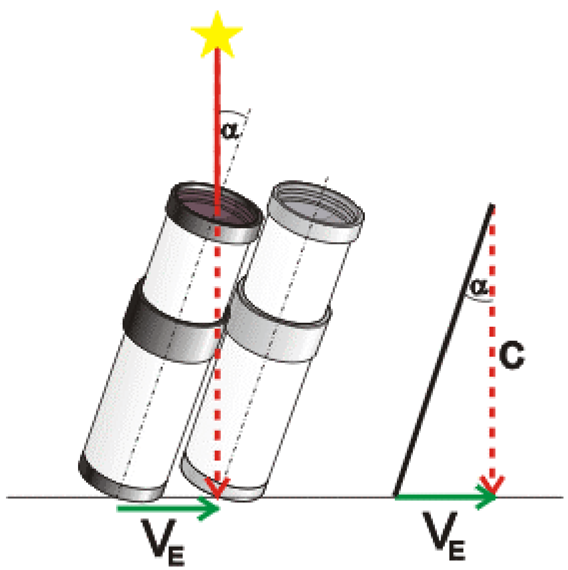
Wenn die Erde sich dem Jupiter nähert, lassen sich die Eintauchungen (A) der Monde in den Schatten beobachten, wenn sie sich entfernt, die Auftauchungen (B).



Römer sah, dass sich die Erscheinung bei der Annäherung der Erde beschleunigte und bei ihrer Entfernung verzögerte. Wenn er ferner aus der Umlaufzeit des innersten Mondes, wie sie bei der geringsten Entfernung der Erde vom Jupiter beobachtet wurde (C), die künftigen Verfinsterungen vorausberechnete, so ergab die Wirklichkeit Verspätungen, je weiter sich die Erde vom Jupiter entfernte. Die größte Verspätung maß Römer bei der größten Entfernung der Erde vom Jupiter (D) mit ca. 22 Minuten.
Römer folgerte daraus, dass das Licht ungefähr 22 Minuten brauchte, um den Erdbahndurchmesser zu durchlaufen und damit also die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit.

Entgegen einiger Veröffentlichungen konnte Römer noch nicht den Wert der Lichtgeschwindigkeit berechnen, da damals der Erdbahndurchmesser noch nicht bekannt war. Mit dem heute bekannten Erdbahndurchmesser von $2{,}992 \cdot 10^{11}$m ergibt sich aus Römers Beobachtungen eine Lichtgeschwindigkeit von $2{,}267 \cdot 10^{8}$m/s.

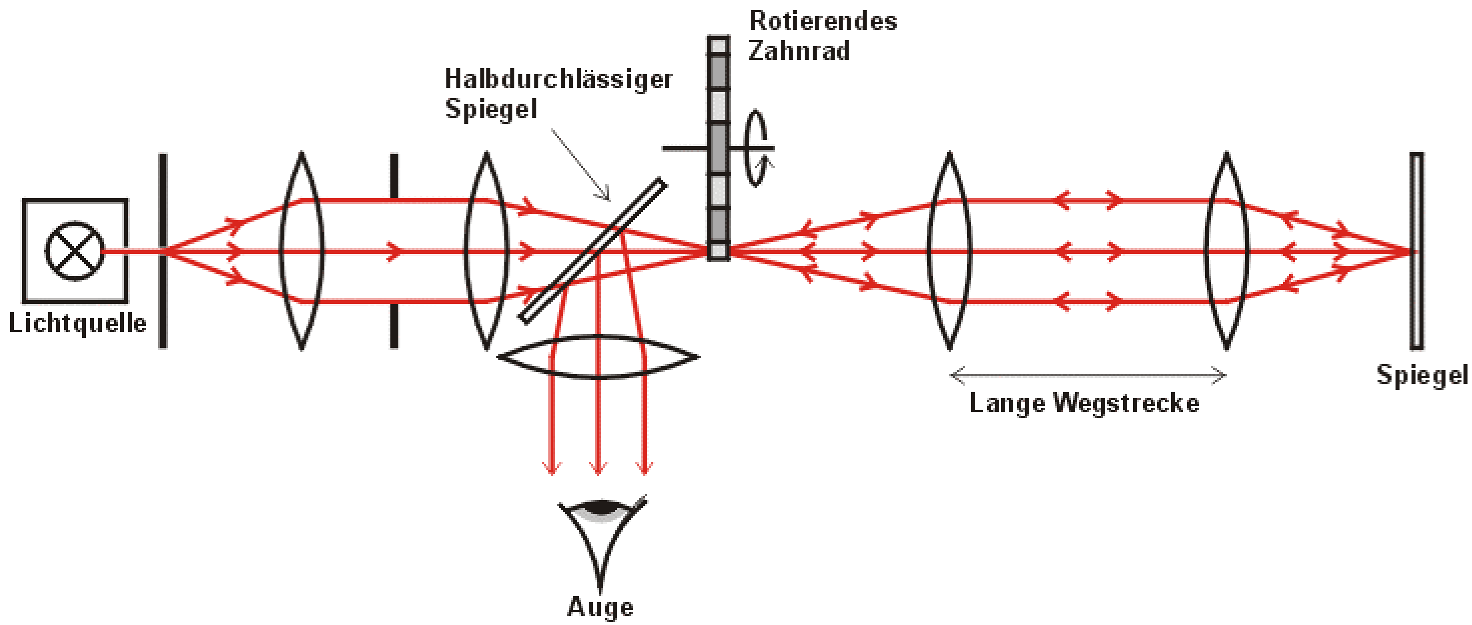
Dem Beweis der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit stimmten zunächst nur wenige Wissenschaftler zu. Erst als auch der englische Astronom James Bradley 1727 aus der Aberration des Lichts auf eine endliche Lichtgeschwindigkeit schloss, erkannte man die Tatsache an.
Das Phänomen der Aberration lässt sich am besten mit einem Fußgänger im Regen vergleichen. Nimmt man an, dass die Regentropfen senkrecht nach unten fallen, so muss man den Regenschirm umso schräger nach vorn halten, je schneller man geht, um nicht vom Regen gertoffen zu werden. Der Regen sei nun das vertikal von einem Fixstern einfallende Licht, der Schirm das Fernrohr, mit dem der Stern beobachtet wird. Da sich die Erde bewegt (sowohl um die Sonne, als auch um sich selbst), muss das Fernrohr schräg gehalten werden.



Es ergibt sich $\frac{v_E}{c} = \tan\alpha$, und damit $c = \frac{v_E}{\tan\alpha}$.
Für einen Beobachter auf der Erde beschreibt der Fixstern eine Ellipse. Genaue Messungen haben für den Umlauf der Erde um die Sonne $\alpha = 20{,}48^{0}$ ergeben, für die Drehung der Erde um sich selbst $\alpha = 0{,}32^{//}$. Letzteres kann man vernachlässigen.
Bei einer Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne von $v_E=2{,}977*10^4$m/s bekommt man für die Lichtgeschwindigkeit $c = 2{,}998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

Die bisher dargestellten Methoden benutzten die Weite des Weltraums zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Nun bemühte man sich die Lichtgeschwindigkeit auch auf der Erde zu messen, um dann auch Messungen in verschiedenen Medien zu ermöglichen. Das Problem war, wegen der geringen Distanzen äußerst kurze Zeiten zu messen, denn die enorme Größe der Lichtgeschwindigkeit war ja nun bekannt.

Als erster löste Hippolyte Fizeau 1849 das Problem der Kurzzeitmessung. Er ließ das Licht durch ein rotierendes Zahnrad laufen, nach einer großen Wegstrecke (8,633 km) reflektieren und noch einmal durch das Zahnrad laufen (Lichtquelle und Zahnrad plazierte er übrigens auf einen Hügel vor seinem Haus in Paris und den Spiegel auf den Montmatre).



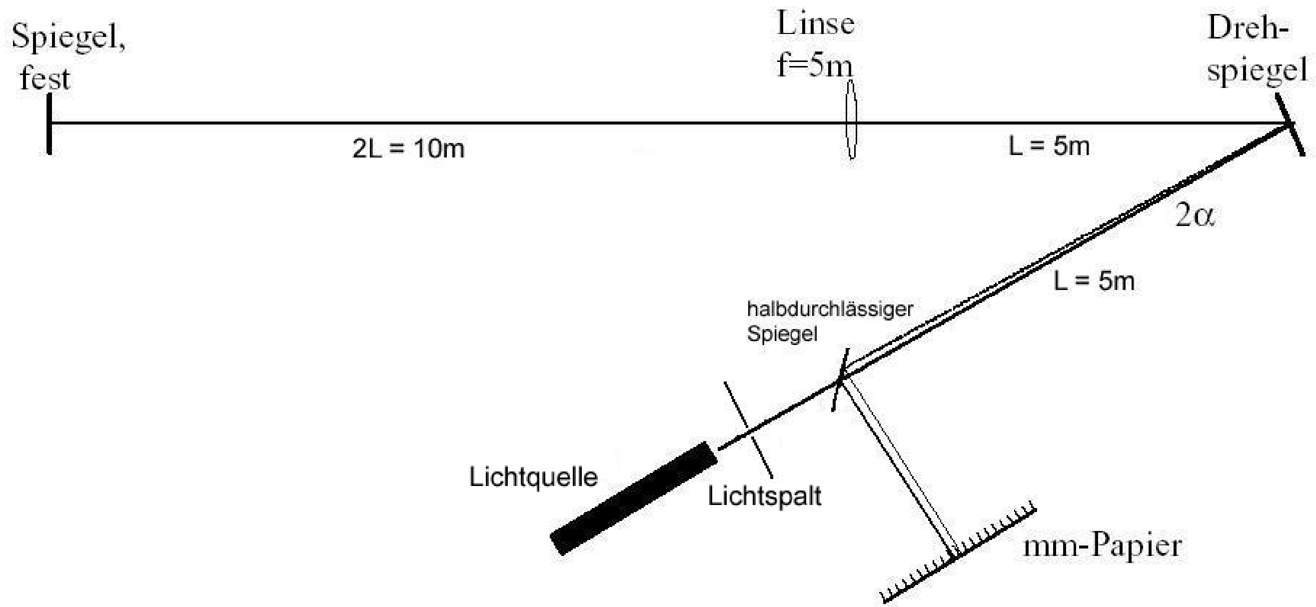
Bei stillstehendem Zahnrad traf das reflektierte Licht wieder dieselbe Zahnlücke. Beschleunigte man die Drehung des Zahnrades, wurde immer mehr Licht vom nachfolgenden Zahn abgedeckt, bis bei einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit kein Licht mehr im Auge ankam.
Bei stärkster Abdunklung für den Beobachter war das Rad etwa von Zahnlückenmitte zur nächstfolgenden Zahnmitte vorgerückt. Bei insgesamt 720 Zähnen hatte sich das Rad dann um den 1440sten Teil einer vollen Drehung weiterbewegt. Bei einer Drehfrequenz f_Z = 12,6 Hz entsprach das der Zeit t = $1/(f_Z*1440) = 5{,}5*10^{-5}$s und für einen Weg von s = 2*8,633 km ergab das c = s/t = $3{,}13*10^{8}$m/s.
Die Genauigkeit der Messung wurde noch von der Breite der Zähne und der Fähigkeit des Beobachters, die maximale Dunkelheit wahrzunehmen, begrenzt.

1850 verbesserte Foucault den Versuchsaufbau, indem er anstelle des Zahnrades einen Drehspiegel verwendete.

Jean Bernard Léon Foucault
Der Drehspiegelversuch

- entwickelt 1850
- Foucault verbesserte den Zahnradversuch von Fizeau
- er nutzte anstatt des Zahnrads einen Drehspiegel

Aufbau:



Teil 1:

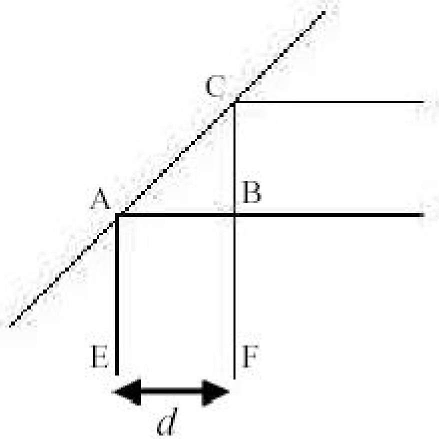
- ein gebündelte r Lichtstrahl trifft auf den ruhenden Drehspiege l
- durch die Reflexion geht der Lichtstrahl durch eine

Sammellinse und trifft den festen Spiegel im doppelten Brennpunkt (der punkt des scharfen Bildes)
- am festen Spiegel wird der Lichtstrahl wieder reflektiert und er bildet sich auf dem Millimeterpapier durch Spiegelung am Drehspiegel und am halbdurchlässigen Spiegel ab
- diesen Punkt auf dem Papier markiert man sich

<u>Teil 2:</u>

- das selbe wie in Teil 1, nur das diesmal sich der Drehspiegel dreht
- dadurch wird der Lichtstrahl auf dem Rückweg, da der Drehspiegel ja seine Spiegelachse verändert hat, anders auf den halbdurchlässigen Spiegel reflektiert
- der Lichtstrahl trifft auf dem Millimeterpapier in einem anderen Punkt auf

- wenn sich der Drehspiegel um den Winkel α dreht, dann schließen der hingeführte Lichtstrahl und der rückgeführte Lichtstrahl einen Winkel von 2α ein
- das Dreieck ABC ist gleichseitig da die Winkel CAB und ACB 45° groß sind
- geht man davon aus das die beiden Lichtstrahlen parallel sind, so ergibt sich der Abstand der beiden Punkte auf dem Millimeterpapier aus dem Abstand der Punkte A und B



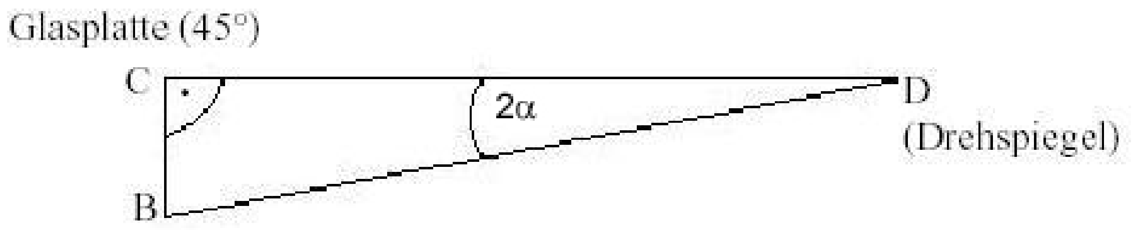
➔ AB = BC (1)

da AE || BF und AB || EF:

➔ AB = EF = d (2)

aus (1) und (2) folgt:

➔ BC = d



$$\sin(2\alpha) = \frac{\mathrm{BC}}{\mathrm{BD}} = \frac{BC}{CD} = \frac{d}{r}$$

➔ für kleine α gilt sin α = α

$$\alpha = \frac{d}{2r} \qquad (1)$$

des Weiteren gilt:

$$\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \qquad (2)$$

f – Frequenz des Drehspiegels = 440 Hz
d – Abstand der Lichtpunkte = 0,3 cm
l – Abstand Drehspiegel - fester Spiegel = 15m
r – Abstand Drehspiegel – Spiegel = 5m

➔ $$2 \cdot \pi \cdot f = \frac{d}{2 \cdot r \cdot \Delta t}$$

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot f}{d}$$

➔ $$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2 \cdot l \cdot 4 \cdot \pi \cdot r \cdot f}{d} = \frac{8 \cdot \pi \cdot l \cdot r \cdot f}{d} = \frac{8 \cdot \pi \cdot 15m \cdot 5m \cdot 440Hz}{0{,}003m} = 276460153{,}5\frac{m}{s}$$

- Foucault bestimmte die Lichtgeschwindigkeit auf 0,1% genau, für die damalige Zeit ein Meilenstein