

»Den Rest meines Lebens werde ich
darüber nachsinnen, was Licht ist.«
Albert Einstein, 1917

Ole Rømer & Lichtgeschwindigkeit

Über die Beitrag von **Ole Rømer** von 1676
an der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit
durch **Christiaan Huygens** 1678

Jochen Sicars • j.sicars@t-online.de • www.sicars-didactica.de

Zur Funktion dieser Präsentation

Ole Rømer und Christiaan Huygens ist es in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts erstmals gelungen, ein wenn auch sehr zeitaufwendiges, so doch vom Prinzip her relativ einfaches Verfahren zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus astronomischen Beobachtungsdaten zu entwickeln und erfolgreich anzuwenden. Erfolgreich insofern, als sie mit ihren Untersuchungen zeigen konnten, in welcher Größenordnung der Wert der Lichtgeschwindigkeit liegen könnte. Die Abweichung vom heute bekannten Wert lag bei knapp 30%, ein in der Tat nach naturwissenschaftlichen Ansprüchen kaum akzeptabler Wert. Der Fehler lag jedoch nicht in dem Verfahren begründet, sondern in der Ungenauigkeit der verwendeten astronomischen Daten. Würde man beispielweise die im Jahre 1890 bekannten Werte für den Radius der Umlaufbahn der Erde um die Sonne und die Zeitdauer zwischen zwei Austritten des Jupitermondes Io aus dessen Kernschatten zum Zeitpunkt der von Rømer angegebenen Erdumlaufbahnpositionen bei der Berechnung der Lichtgeschwindigkeit zugrundelegen, so läge die Abweichung vom heutigen Wert nur noch bei 2,35%¹ – ein auch nach heutigen Maßstäben durchaus akzeptabler Wert.

Dieser Sachverhalt verleitete offenkundig viele Autoren dazu, zur numerischen Veranschaulichung der Darstellung des Verfahrens von Rømer und Huygens aktuellere Daten zum Nachvollzug der Berechnung zu verwenden. Als Folge geistern im Zusammenhang der Darstellung des Verfahrens von Rømer eine Vielzahl von Lichtgeschwindigkeitswerten durch die Literatur, insbesondere durch Schulbuch- und Online-Publikationen. Im Folgenden wird dagegen konsequent Bezug genommen auf die von Rømer und Huygens selbst angegebenen Beobachtungsdaten. Dass man damit einen relativ hohen Fehlerquotienten in Kauf nimmt, schmälert keineswegs die historische Leistung von Rømer und Huygens, sondern dokumentiert den damals möglichen Erkenntnisstand. Auch hier zeigt sich einmal mehr, wie wichtig es ist, zunächst die Primärquellen zu Rate zu ziehen, und erst nachher abzuwägen, welche weitere Bestimmungen sinnvollerweise einbezogen werden sollten. Da diese Publikationen in deutscher Übersetzung teilweise schwer zugänglich sind, habe ich sie im Anhang dieser Präsentation als editierbare Texte beigefügt.

Aus didaktischen Erwägungen bietet das Verfahren Rømer und Huygens einen auch im Unterricht von Schülern der Mittelstufe durchaus nachvollziehbaren Einstieg in das Problemfeld der Lichtgeschwindigkeitsmessung. Angesichts der zentralen Bedeutung dieses Wertes in den Naturwissenschaften, der Astronomie und der Welt moderner Technik kann heute keine naturwissenschaftliche Bildung darauf verzichten, mindestens ein Verfahren zur Lichtgeschwindigkeitsmessung aufzuzeigen. Aus heutiger Sicht ist das Verfahren von Rømer und Huygens relativ einfach was die technischen Mittel anbelangt. Man benötigt lediglich ein halbwegs passables Fernrohr, einen Kalender und eine Uhr und, wer das Verfahren von Rømer vollständig anwenden will, viel Geduld und einen langen Atem.

¹ Vgl. dazu die Anmerkung des Herausgebers (Eugen von Lommel) aus dem Jahre 1890 zu den von Huygens verwendeten Daten in: Huyghens, Christian: Abhandlung über das Licht (Erstausgabe: 1678), Nachdruck in deutscher Übersetzung herausgegeben von E. Lommel und übersetzt von R. Mewes, Leipzig 1890, S. 113.

Historische Voraussetzungen

- **1543:** Entwurf des **Heliozentrischen Weltbildes** durch **Kopernikus**
- **1610:** Entdeckung der **Jupitermonde** durch Galilei
- **1668:** Bestimmung der **Umlaufzeiten der Jupiter-Monde** durch **Giovanni D. Cassini**:
innerer Mond **Io**: $T = 42,5 \text{ h}$
- **1673:** Bestimmung des **Erdumlaufradius** durch Kepler, Bullialdu, Cassini:
 $r_E = 140\,066\,666 \text{ km}$ (Diesen Wert verwendete Huygens 1678.)
- Annahme: **Licht hat eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit** (Galilei, Rømer, Huygens)

Lichtgeschwindigkeiten

- 1638 nach Galileo **Galilei**¹: erfolgloser Versuch
- 1678 nach **Rømer** und **Huygens**: $c = 212\,222 \text{ km/s}$
- 1851 nach **Léon Foucault**: $c = 298\,000 \text{ km/s}$
- 1983 gemäß **SI-Meter-Definition**: $c = 299\,792 \text{ km/s}$

Die Lichtgeschwindigkeit gilt heute neben der elektrischen und magnetischen Feldkonstante als eine der drei universellen Naturkonstanten. Sie sind nach Maxwell (1873) wie folgt verknüpft:

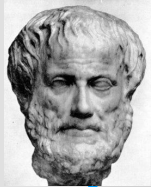
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

¹ Galilei, Galileo: Discorsi, a.a.O., S. 39 f. Hier beschreibt Galilei ein Verfahren zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, dessen Realisierung jedoch an der kurzen Entfernung des Lichtweges scheiterte.

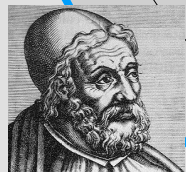
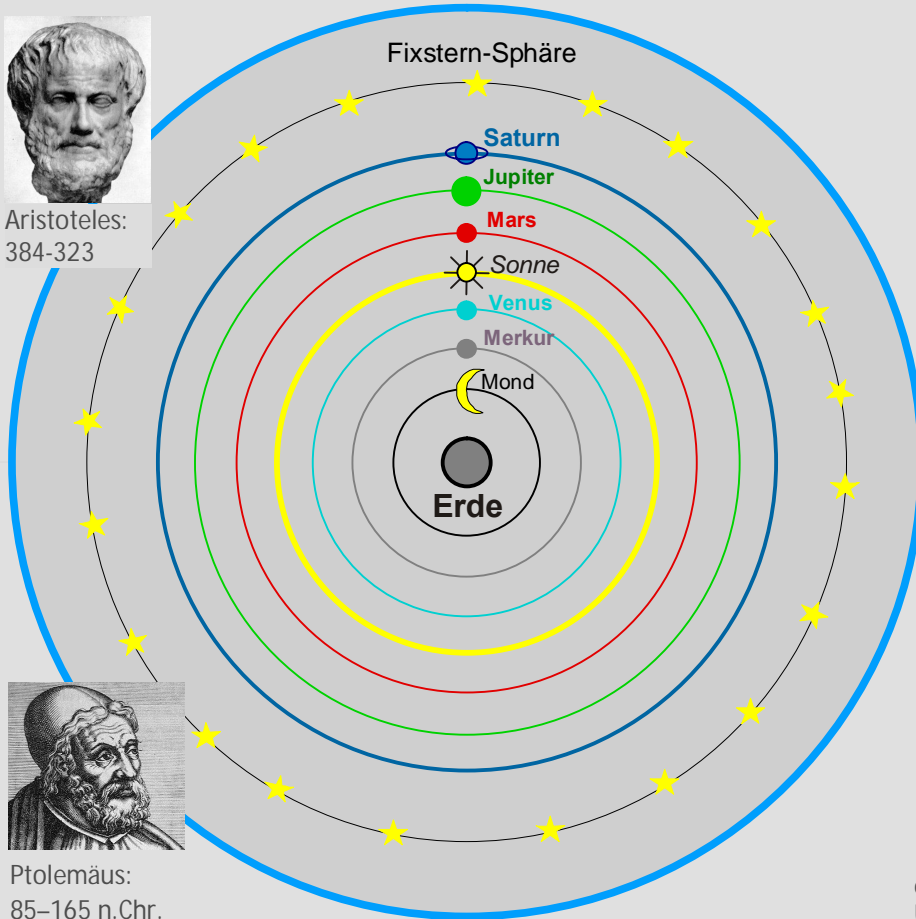


Geozentrisches Weltbild (Aristoteles + Ptolemäus)

Heliozentrisches Weltbild (Kopernikus + Galilei)



Aristoteles:
384-323

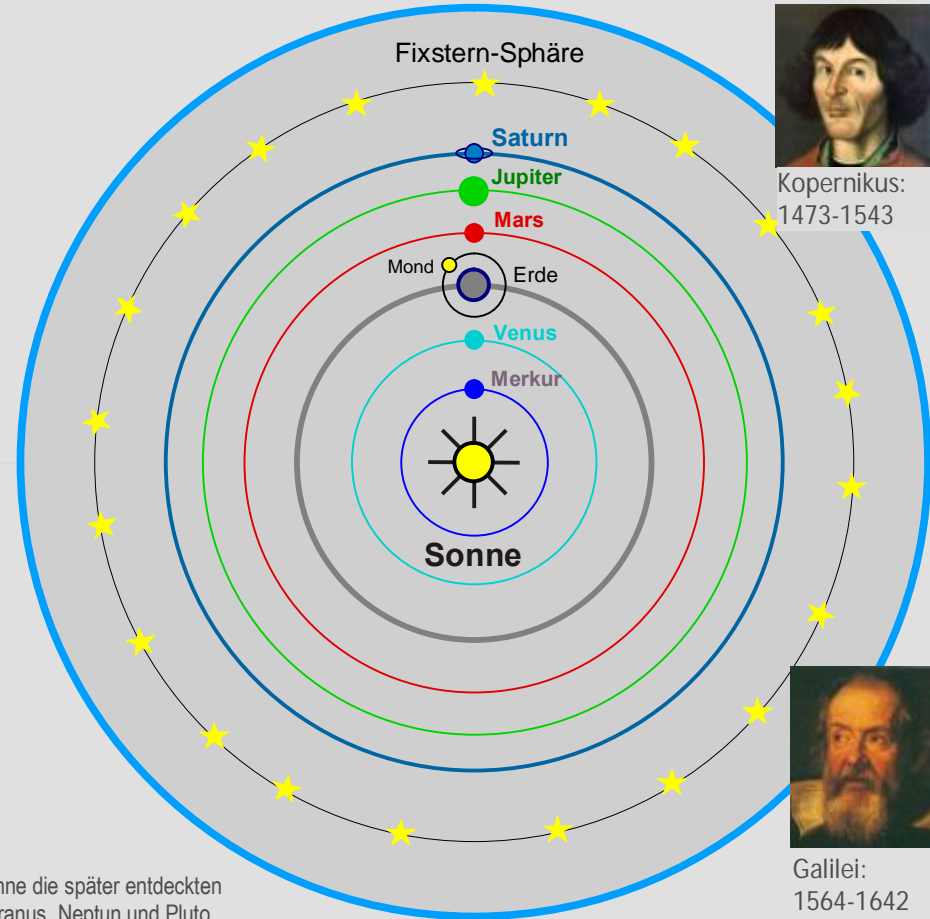


Ptolemäus:
85–165 n. Chr.

Erde als ruhender Mittelpunkt der Welt



Kopernikus:
1473-1543



ohne die später entdeckten
Uranus, Neptun und Pluto



Galilei:
1564-1642

Sonne als ruhender Mittelpunkt der Welt

Ole Rømer

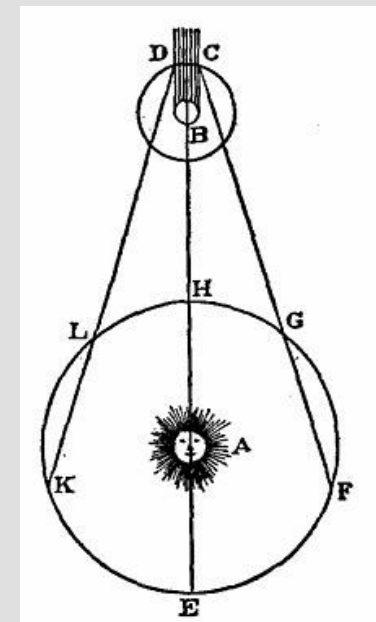
- dänischer **Astronom**
- geb. **1644** in Aarhus • gest. **1710** in Kopenhagen
- ab **1672** Mitarbeiter an der **Pariser Sternwarte** bei Giovanni Domenico Cassini



Erkenntnisinteresse

- Nachweis der **Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit**
- Diese Auffassung vertraten u.a. Galilei und später Huygens, Newton, Flamsteed
- Dagegen: Lichtgeschwindigkeit ist **unendlich**, so Aristoteles, Descartes¹, Cassini ...

¹ Vgl. zu Descartes Auffassung: Dijksterhuis, a.a.O., S. 465 f. sowie Huyghens, Christiaan: Abhandlung über das Licht (Erstausgabe: 1678), a.a.O., S. 12, S. 14 und S. 109.



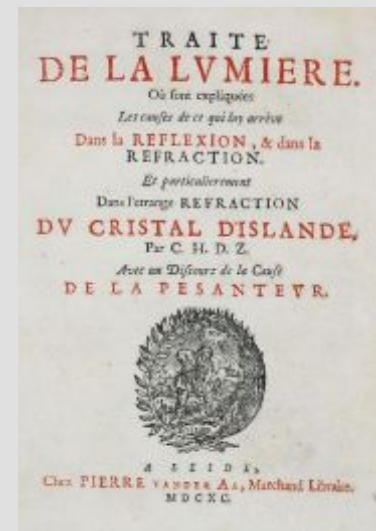
Christiaan Huygens

- niederländischer **Astronom, Physiker** und **Mathematiker**
- geb. **1629** in Den Haag • gest. **1695** in Den Haag
- ab **1665** erster Direktor der **französischen Akademie der Wissenschaften** in Paris, Mitglied der Royal Society¹

Erkenntnisinteresse

- Bestimmung der **Lichtgeschwindigkeit** (1678)
- Begründung der **Wellentheorie des Lichts** (u.a. Formulierung des Huygensschen Prinzips)
- Astronomische Entdeckungen wie den **Saturn-Mond Titan** ...
- Konstruktion sehr präziser **Pendeluhr**

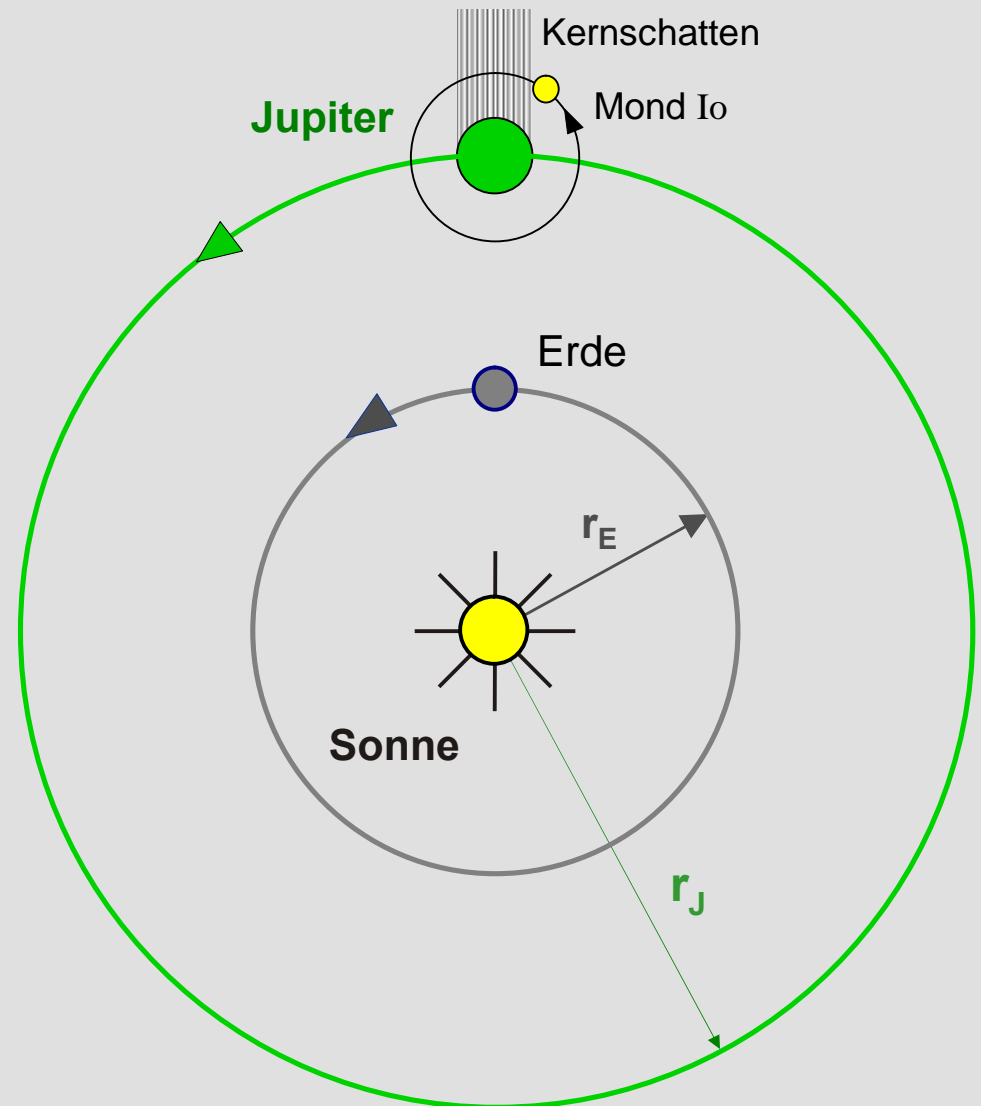
¹ Vgl. Anmerkungen des Herausgebers in Huygens, Christiaan: Abhandlung über das Licht (Erstausgabe: 1678), a.a.O., S. 108 f.



Titelblatt von Huygens Abhandlung über das Licht von 1678 (erschienen 1690)

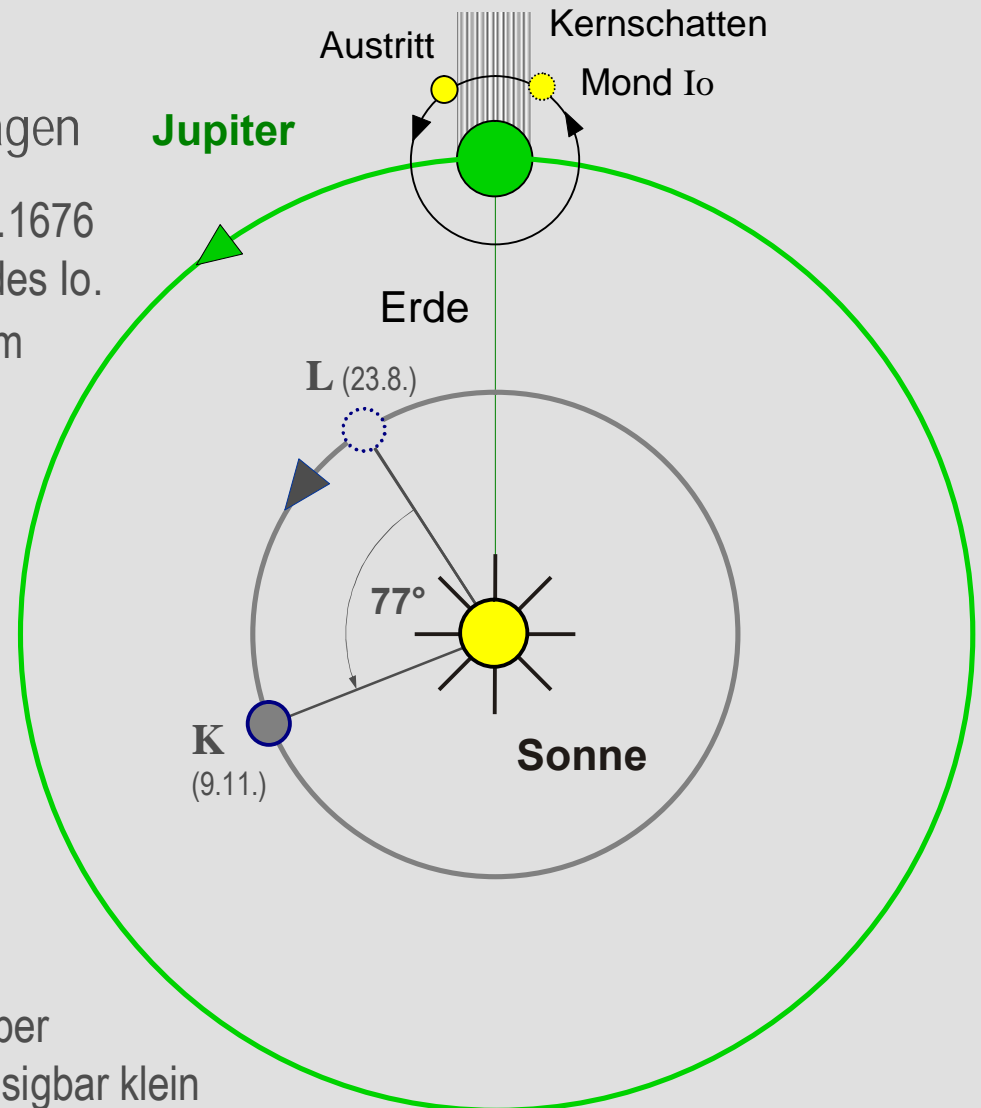
Sonne-Erde-Jupiter-Konstellation

- Umlaufzeit der Erde um die Sonne:
 $T_E = 1 \text{ a}$
- Erdbahnradius nach Huygens (1678):
 $r_E = 140,066 \cdot 10^6 \text{ km}$ (Huygens (1678), a.a.O., S. 15 f.)
- Umlaufzeit von Jupiter um die Sonne:
 $T_J = 11,862 \text{ a}$
- Jupiterbahnradius (Kepler):
 $r_J = 778,3 \cdot 10^6 \text{ km}$
- Jupiter hat 67 Monde, davon sind vier mit dem Fernglas wahrnehmbar. Der kleinste und nahestete ist Io.
- Umlaufzeit von Mond Io (nach Cassini):
 $T = 42,5 \text{ h} = 1,77 \text{ d}$ • Beobachtung: alle 42,5 h verfinstert sich Io bei Schatteneintritt.



Bewegung von Erde und Jupiter in 79 Tagen

- Rømer beobachtete vom 23.8.1676 bis 9.11.1676 für 79 Tage insgesamt 45 Umläufe des Mondes Io. In dieser Zeit drehen sich Erde und Jupiter um folgende Drehwinkel:
- Umlaufzeit der Erde um die Sonne:
 $T_E = 1 \text{ a} (= 1 \text{ Jahr})$
- Drehwinkel der Erde in 79 Tagen:
 $\varphi_E = 77^\circ$
- Umlaufzeit von Jupiter um die Sonne:
 $T_J = 11,862 \text{ a} (= 11,862 \text{ Jahre})$
- Drehwinkel des Jupiter in 79 Tagen:
Jupiter: $\varphi_J = 6,5^\circ$
- Fazit: Der Drehwinkel des Jupiter ist gegenüber dem der Erde in diesem Zeitraum vernachlässigbar klein



Die »Galileischen Monde« des Jupiter (Die vier größten Monde.)

Jupiter

- Umlaufzeit von Jupiter:
fast 12 Jahre ($T_J = 11,862 \text{ a}$)
- Drehwinkel in 79 Tagen:
Erde: $\varphi_E = 77^\circ$ • Jupiter: $\varphi_J = 6,5^\circ$
- Jupiter hat 67 Monde, davon sind die vier Galileischen Monde mit dem Fernglas wahrnehmbar. Der innerste und drittgrößte ist Io.
- Umlaufzeit von Mond Io nach Cassini (1673):
 $T = 42,5 \text{ h} = 1,77 \text{ d} = 1 \text{ d } 18 \text{ h } 27,6 \text{ min}$
mittlerer Abstand zum Jupiter: 421 600 km
- Jupiterbahnradius (Kepler): $r_J = 778,3 \cdot 10^6 \text{ km}$
Erdbahnradius nach Huygens (1678): $r_E = 140,066 \cdot 10^6 \text{ km}$



Io umkreist Jupiter in einem mittleren Abstand von 421 600 Kilometern in 42,5 Stunden.

7. 1. 1610	• • ● •
8. Januar	• ● • • •
9. Januar	bewölkt
10. Januar	• • ●
11. Januar	• • ●
12. Januar	• • ● •
13. Januar	• ● • • •
14. Januar	bewölkt
15. 1. 1610	• ● • • •

Rekonstruktion von Galileis Jupiterbeobachtungen im Januar 1610²

¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Galileische_Monde

² Galilei, Galileo: Sidereus Nuncius, a.a.O., S. 111 ff.

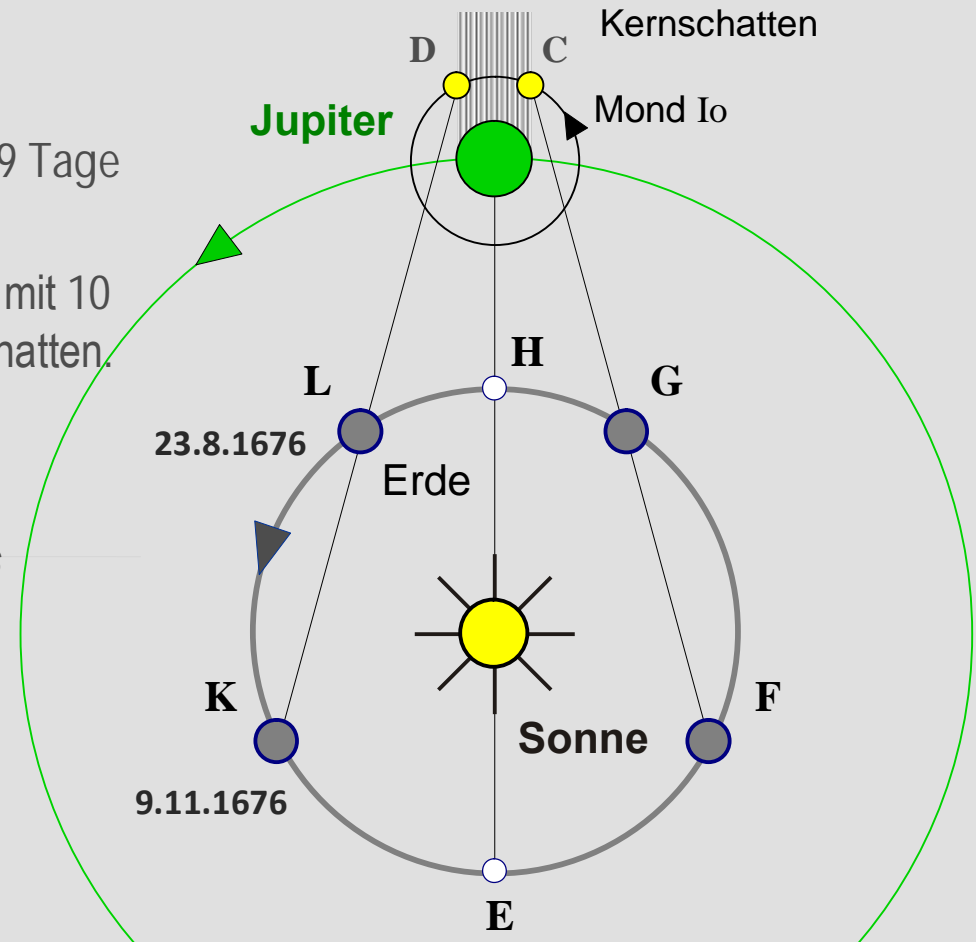
Ole Rømer 1676:

- Rømer beobachtete ab dem 23.8.1676 für 79 Tage insgesamt 45 Umläufe des Mondes Io.
- Am 9.11.1676 (5:35:45 Uhr) tritt der Mond Io mit 10 Minuten Verspätung bei D aus dem Kernschatten.
- Hochrechnung Rømers: Zwischen H und E betrüge die Verspätung 22 Minuten.
- Schlussfolgerung: **Diese Zeit benötigt das Licht um von H nach E zu gelangen.**

Christiaan Huygens 1678:

- Aus den Daten von Rømer und dem von Huygens angenommenen Erdumlaufradius von $r_E = 140\,066\,666$ km lässt sich die Lichtgeschwindigkeit c wie von Huygens angegeben berechnen¹:

¹ Römer, Olaf (1983), a.a.O., S. 11 ff. sowie Huygens, Christian (1890), a.a.O., S. 14-16 und S. 113.



$$c = \frac{2 \cdot r_E}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 140,0666 \cdot 10^6 \text{ km}}{22 \cdot 60 \text{ s}} = 212\,222 \text{ km/s}$$

Literaturverzeichnis I

- Bobis, Laurence/ Lequeux, Jame: Cassini, Rømer and the Velocity of Light, in: Journal of Astronomical History an Heritage, 11 (2) 2008, 97-105.
Onlineversion: <http://www.narit.or.th/en/files/2008JAHHvol11/2008JAHH...11...97B.pdf>
- Dijksterhuis, Eduard Jan: Die Mechanisierung des Weltbildes, Berlin Heidelberg New York 1983.
<http://books.google.de/books?id=Awag7E8Egy8C&pg=PP6&lpg=PP1&dq=Dijksterhuis&hl=de>
- Galilei, Galileo: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische. übersetzt von Emil Strauss (1891), Nachdruck hrsg. von Roman Sexl und Karl von Meyenn, Stuttgart 1982. Italienische Erstausgabe: Florenz 1632. Hier zitiert als *Dialogo*.
- Galilei, Galileo: Sidereus Nuncius, Venedig 1610, in: Galileo Galilei – Sidereus Nuncius – Nachricht von neuen Sternen, in deutscher Übersetzung herausgegeben und eingeleitet von Hans Blumenberg, Frankfurt am Main 2002, S. 76 – 131.
- Galilei, Galileo: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. In deutscher Übersetzung hrsg. von Arthur v. Oettingen, Leipzig 1890, Nachdruck: Darmstadt 1973. Italienische Erstausgabe: Leyden 1638. Hier zitiert als *Discorsi*.
- Hawkins, Stephen W.: Eine kurze Geschichte der Zeit, Die Suche nach der Urkraft des Universums, Reinbek bei Hamburg 1991. (Rømer: S. 33 f.)
- Huyghens, Christiaan: Abhandlung über das Licht (Erstausgabe: 1678), Nachdruck in deutscher Übersetzung herausgegeben von Eugen v. Lommel und übersetzt von Rudolf Mewes, Leipzig 1890.
Onlineversion: <https://archive.org/download/abhandlungberda00mewegoog/abhandlungberda00mewegoog.pdf>
- Kilian, Ulrich/Aschemeier, Rainer: Das große Buch vom Licht, Darmstadt 2012.
- Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft, Werkausgabe Band III, Frankfurt am Main 1982.
- Neumann, Hans-Ludwig: Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit durch Ole Rømer (1644-1710), in: Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 4/37.Jahrgang vom 1. Juni 1988, S. 16-18.

Literaturverzeichnis II

- Newton, Isaac: Mathematische Prinzipien der Naturlehre, Nachdruck der Erstausgabe von 1687 in deutscher Übersetzung 1872 hrsg. von J.Ph. Wolfers, Nachdruck: Darmstadt 1963.
Online-Version: http://de.wikisource.org/wiki/Mathematische_Principien_der_Naturlehre
- Perkowitz, Sidney: Eine kurze Geschichte des Lichts, München 1998.
- Rømer, Ole: Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l'Académie Royale des Sciences, Journal des Sçavans du 7 décembre 1776, 233-236.
Onlineversion: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56527v/f234.image>
- Rømer, Ole: A Demonstration Concerning the Motion of Light, Communicated from Paris, in the Journal des Scavans, and here Made English, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1677-1678 12, 893-894.
Onlineversion: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/12/133-142/893.full.pdf>
- Römer, Olaf: Die Entdeckung und die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit 1676, mit einer deutschen Übersetzung des Beitrages von Römer im Journal des Sçavans von 1676 von Renate Loosen und einem Beitrag von Wernher von Braun über die »Römersche Entdeckung der Lichtgeschwindigkeit und die Weltraumforschung« (1973), Stuttgart 1983.
- Schütz, Wilhelm: Michael Faraday, Leipzig 1982.
- Wikipedia: Ole Rømer, URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Ole_R%C3%B8mer – engl. Version: http://en.wikipedia.org/wiki/Ole_R%C3%B8mer
- Wikipedia: Rømer's determination of the speed of light, URL: http://en.wikipedia.org/wiki/R%C3%B8mer%27s_determination_of_the_speed_of_light
- Wikipedia: Lichtgeschwindigkeit, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtgeschwindigkeit>.
- Winnenburg, Wolfram: Einführung in die Astronomie, Mannheim 1991.

Vielen Dank
für Ihr Interesse.

Falls Sie noch Fragen haben:

j.sicars@t-online.de

Unterrichtsmaterialien (demnächst): www.sicars-didactica.de

Anhang 1

Erkenntnistheoretische Aspekte

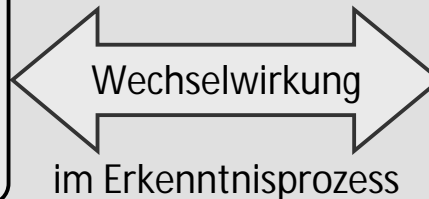
Über die Dialektik von Wahrnehmung und Denken in der wissenschaftlichen Arbeit

Ähnlich wie auch sein späterer Verehrer Faraday verstand auch Huygens »die Kunst, sich des Konkreten zu bedienen, um das Abstrakte zu erreichen, und das Abstrakte der Kontrolle des Konkreten zu unterwerfen.«¹

Grundquellen der Erkenntnis

Wahrnehmung

der Sinne zur Gewinnung von
Gegenstand und **Erfahrung**



Denken

zur theoretischen Reflexion des Gegen-
standes mit Verstand und Vernunft

- Nach KANT gehören „zur Erkenntnis zwei Stücke: erstlich der **Begriff**, dadurch überhaupt ein Gegenstand gedacht wird, und zweitens die **Anschauung**, dadurch er gegeben wird.“²
- Weiter heißt es bei KANT: „Alle unsere Erkenntnis hebt von den **Sinnen** an, geht von da zum **Verstande** und endigt bei der **Vernunft**.“³
- Und: „**Vernunft** ist das Vermögen, von dem Allgemeinen das Besondere abzuleiten und dieses letztere also nach Prinzipien und als notwendig vorzustellen.“⁴

¹ Dumas, Jean-Baptiste zit. nach Schütz (1982), a.a.O., S. 68. ² Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft, Werkausgabe Bd. III, Frankfurt am Main 1982 (Suhrkamp), S. 145. Vgl. auch ebenda, S. 97 f. und S. 131 f. ³ ebenda, S. 311. ⁴ Kant, Immanuel: Anthropologie in pragmatischer Absicht, 1. Buch, § 43 (VII200).

Anhang 2

Galileo Galilei:

Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. In deutscher Übersetzung hrsg. von Arthur v. Oettingen, Leipzig 1890, Nachdruck: Darmstadt 1973. Italienische Erstausgabe: Leyden 1638, S. 39 - 40.

Galileo Galilei: Experiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 1638

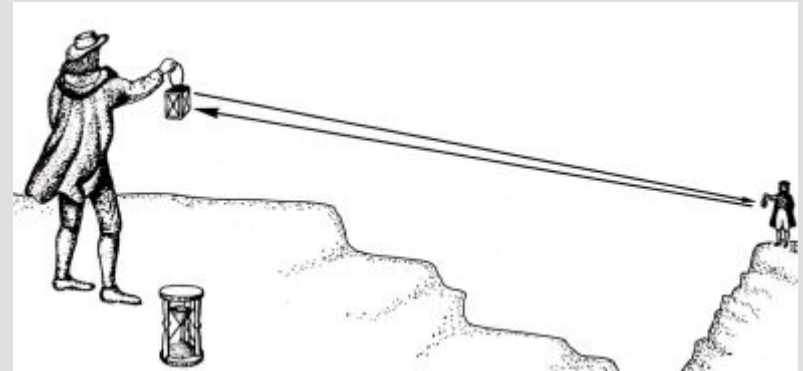
Salviati Andere Verbrennungen und Auflösungen sehen wir mit Bewegung, und zwar mit sehr geschwinder, geschehen. Hierher gehören die Erscheinungen des Blitzes, des Pulvers in den Minen und Petarden, überhaupt Alles, was im Kohlenfeuer mit dem Blasebälge angefacht, mit dichten unreinen Gasen gemischt die Metalle flüssig werden lässt: daher ich nicht annehmen mag, dass die Wirkung des Lichtes, auch des allerreinsten, ohne Bewegung geschehe, wenn auch mit sehr grosser Geschwindigkeit.

Sagredo Aber welcher Art und wie gross dürfen wir die Lichtgeschwindigkeit schätzen? Ist die Erscheinung instantan, momentan, oder wie andere Bewegungen zeitlich? Liesse sich das experimentell entscheiden?

Simplicio Die alltägliche Erfahrung lehrt, dass die Ausbreitung des Lichtes instantan sei; wenn in weiter Entfernung die Artillerie Schiessübungen anstellt, so sehen wir den Glanz der Flamme ohne Zeitverlust, während das Ohr den Schall erst nach merklicher Zeit vernimmt.

Sagredo Ei, Herr Simplicio, aus diesem wohlbekannten Versuche lässt sich nichts anderes schliessen, als dass der Schall mehr Zeit gebraucht, als das Licht; aber keineswegs, dass das Licht momentan und nicht zeitlich, wenn auch sehr schnell sei. Auch eine andere ähnliche Beobachtung lehrt nicht mehr: sofort wenn die Sonne am Horizonte erscheint, erblicken wir ihre Strahlen; aber wer sagt mir, dass die Strahlen nicht früher am Horizont, als in meinen Augen ankommen?

Salviati Die geringe Entscheidungskraft dieser und anderer ähnlicher Vorgänge brachte mich auf den Gedanken, ob man nicht auf irgend eine Weise sicher entscheiden könne, ob die Illumination, d. h. die Ausbreitung des Lichtes wirklich instantan sei: denn schon die ziemlich rasche Fortpflanzung des Schalles lässt voraussetzen, dass die des Lichtes nur sehr schnell sein könne. Und der Versuch, den ich ersann, war folgender: Von zwei Personen hält eine jede ein Licht in einer Laterne oder etwas dem ähnlichen, so zwar, dass ein jeder mit der Hand das Licht zu- und aufdecken könne; dann stellen sie sich einander gegenüber auf in einer kurzen Entfernung und Üben sich, ein jeder dem anderen sein Licht zu verdecken und aufzudecken: so zwar, dass, wenn der Eine das andere Licht erblickt, er sofort das seine



Galileis Idee zur Messung der Lichtgeschwindigkeit – aus:
Winnenburg, a.a.O., S. 352.

Galileo Galilei: Experiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 1638

aufdeckt; solche Correspondenz wird wechselseitig mehrmals wiederholt, so dass bald ohne Fehler beim Aufdecken des Einen sofort das Aufdecken des Andern erfolgt und, wenn der eine sein Licht aufdeckt, er auch alsobald das des anderen erblicken wird. Eingübt in kleiner Distanz, entfernen sich die beiden Personen mit ihren Laternen bis auf 2 oder 3 Meilen; und indem sie Nachts ihre Versuche anstellen, beachten sie aufmerksam, ob die Beantwortung ihrer Zeichen, in demselben Tempo wie zuvor, erfolge, woraus man wird erschliessen können, ob das Licht sich instantan fortpflanzt; denn wenn das nicht der Fall wäre, so müsste in 3 Meilen Entfernung, also auf 6 Meilen Weg hin und her, die Verzögerung ziemlich gut bemerkbar sein. Und wollte man den Versuch in noch grösserer Entfernung anstellen, in 8 oder 10 Meilen, so könnte man Teleskope benutzen, indem man die Experimentatoren da aufstellt, wo man Nachts Lichter anzuwenden pflegt, die zwar in so grosser Entfernung dem blossen Auge nicht mehr sichtbar erscheinen, aber mit Hülfe fest aufgestellter Teleskope bequem zu- und aufgedeckt werden können.

Sagredo Ein schöner sinnreicher Versuch, aber, sagt uns, was hat sich bei der Ausführung desselben ergeben?

Salviati Ich habe den Versuch nur in geringer Entfernung angestellt, in weniger als einer Meile, woraus noch kein Schluss über die Instantaneität des Lichtes zu ziehen war; aber wenn es nicht momentan ist, so ist es doch sehr schnell, ja fast momentan, und ich würde es vergleichen mit dem Blitze, den wir 8 bis 10 Meilen weit zwischen den Wolken sehen; hier können wir den Anfang unterscheiden, ja geradezu die Quelle, an einem bestimmten Orte zwischen den Wolken; und wenn auch unmittelbar darauf die rascheste Ausbreitung statthat in den umgebenden Wolken, so erkennt man doch einen zeitlichen Vorgang; denn wenn die Erleuchtung überall zugleich und nicht folweise stattfände, so könnten wir schwerlich den Ursprung unterscheiden, das Centrum seiner Bahnen und der Ausläufer. Aber in welchem Meer sind wir aus Unachtsamkeit gerathen? Zwischen Vacuum, Unendlichem, Untheilbarem, Momentanbewegungen, um nach 1000 Dingen nie am Ufer zu landen?

Sagredo Freilich entspricht das nicht unserer Absicht. Beim Suchen der Unendlichkeit unter den Zahlen schien dieselbe in den Begriff der Einheit aufzugehen: das Untheilbare erzeugt das stets Theilbare: das Vacuum schien untrennbar in das Erfüllte eingebettet zu sein: überhaupt wandeln sich unsere ursprünglichen Anschauungen der Art, dass sogar der Kreis zu einer unendlich langen Geraden ward, was, wenn ich mich recht erinnere, jener Satz war, den Ihr, Herr Salviati, uns geometrisch erklären solltet. Wenn's Euch recht ist, lasst uns ohne Abschweifung den Beweis hören. ...

Anhang 3

Ole Rømer:

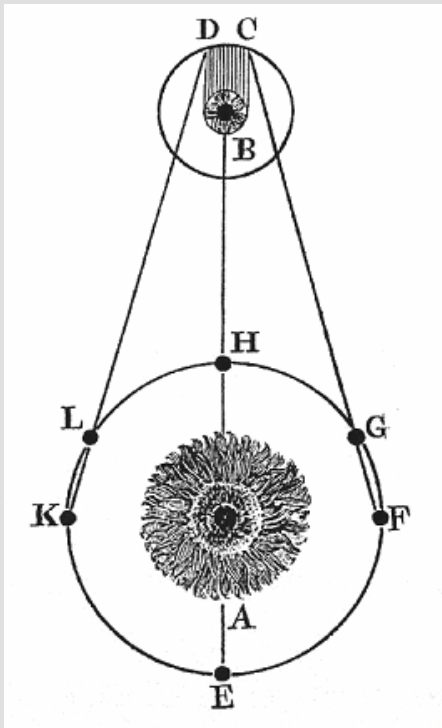
Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Rømer de l'Académie Royale des Sciences, Journal des Sçavans du 7 décembre 1676

in deutscher Übersetzung von Renate Loosen

Olaf Römer: Die Entdeckung und die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit 1676

Seit langem bemühen sich die Gelehrten, experimentell zu bestimmen, ob sich das Licht ohne Verzögerung über jede beliebige Entfernung hinweg ausbreitet oder ob es dazu Zeit benötigt. Olaf Römer, Mitglied der Königlichen Akademie der Wissenschaften, entdeckte, gestützt auf Beobachtungen des innersten Jupitermondes, eine Methode, zu beweisen, daß das Licht für eine Entfernung von rund 3000 Meilen, was etwa dem Erddurchmesser entspricht, weniger als eine Sekunde braucht.

Gesetzt, A sei die Sonne, B der Jupiter, C der innerste Jupitermond, der in den Jupiterschatten eintritt, um in D wieder aufzutauchen; und E F G H K L sei die Erde, in verschiedenen Positionen und Entfernungen zum Jupiter.



Angenommen nun, die Erde habe, als sie sich in Stellung L in der zweiten Quadratur des Jupiter befindet, den innersten Mond genau im Augenblick seiner Emersion (der Austritt) aus dem Schatten in D gesehen und sähe ihn dann in K, rund $42\frac{1}{2}$ Stunden später – nämlich nach einer Umlaufzeit des innersten Mondes – wieder in D, dann ist klar, daß, wenn das Licht für die Strecke LK Zeit benötigt, der innerste Mond später in D erscheint, als wenn die Erde in der Stellung L geblieben wäre. Das heißt, daß die Umlaufzeit des innersten Mondes, die durch die jeweilige Beobachtung der Emersionen gemessen wird, um genau die Zeit verzögert wird, die das Licht gebraucht hat, um die Strecke LK zurückzulegen. Umgekehrt gilt für die gegenüberliegende Quadratur F G, wenn sich die Erde auf den Planeten zubewegt, dem Licht also entgegenkommt, daß die am Eintauchen in den Schatten (Immersion) gemessenen Umlaufzeiten um die gleiche Zeitspanne verkürzt sind, wie die am Hervortreten gemessene Zeit verlängert erschien. Da nun in den etwa $42\frac{1}{2}$ Stunden, die der Jupitermond für jeden Umlauf braucht, die Entfernung zwischen Erde und Jupiter in den beiden Quadraturen um wenigstens 210 Erddurchmesser variiert, folgt daraus, daß, wenn das Licht für die Entfernung des Erddurchmessers eine Sekunde benötigte, es für jede der Strecken G F und K L $3\frac{1}{2}$ Minuten brauchte. Das wäre fast eine halbe Viertelstunde Unterschied zwischen den Meßwerten der Umlaufzeiten des Jupitermondes, das eine Mal von F G, das andere Mal von K L aus beobachtet. Tatsächlich war aber kein Unterschied auszumachen.

Olaf Römer: Die Entdeckung und die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit 1676

Daraus folgt nun aber nicht, daß das Licht keine Zeit braucht: denn als Römer seine Beobachtungen nochmals durchprüfte, stellte sich heraus, daß das, was bei zwei beobachteten Umläufen nicht in Erscheinung trat, bei mehreren Umläufen zusammengenommen beachtlich ins Gewicht fiel. Zum Beispiel waren 40 von der Seite F aus beobachtete Umläufe deutlich kürzer als 40 weitere Umläufe, die von der anderen Seite aus beobachtet wurden, unabhängig davon, wo der Jupiter in der Ekliptik gesehen wurde. Die Ergebnisse differierten um 22 Minuten für die Gesamtstrecke H E, die gleich der doppelten Entfernung von der Erde zur Sonne ist.

Diese neue Gleichung für die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich zwingend aus allen an der Königlichen Akademie der Wissenschaften und am Observatorium seit 8 Jahren gemachten Beobachtungen, und neuerdings ist sie wiederum bestätigt worden als die Emersion des innersten Jupitermondes in Paris am 9.

November um 5 Uhr 35' 45" nachmittags gesehen wurde, 10 Minuten später, als man ihn infolge der im August beobachteten Emersionen hätte erwarten müssen. Das hatte Römer der Akademie schon Anfang September vorausgesagt.

Um aber auch jeden Zweifel auszuräumen, diese Verschiebung sei etwa nicht darauf zurück-zuführen, daß das Licht Zeit braucht, weist Römer nach, daß keine Exzentrizität oder andere Ursache, mit denen man gewöhnlich die Unregelmäßigkeiten des Mondes und der Planeten erklärt, hier Grund für die Zeitdifferenz sein kann. Sehr wohl hat Römer beobachtet, daß die Bahn des innersten Jupitermondes exzentrisch ist und daß seine Umläufe in dem Maße, in dem sich der Jupiter der Sonne nähert oder sich von ihr entfernt, kürzer oder länger werden und daß selbst die Umläufe des Jupiter ungleich sind. Die drei letztgenannten Ursachen für Unregelmäßigkeiten können jedoch Römers Beweisführung nicht entkräften.

Quelle:

Römer, Olaf: Die Entdeckung und die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit 1676, mit einer deutschen Übersetzung des Beitrages von Römer im Journal des Sçavans von 1676 von Renate Loosen und einem Beitrag von Wernher von Braun über die »Römersche Entdeckung der Lichtgeschwindigkeit und die Weltraumforschung« (1973), Stuttgart 1983 (Belser Verlag).

Anhang 4

Christiaan Huygens:

Abhandlung über das Licht (Erstausgabe: 1678),
Nachdruck in deutscher Übersetzung herausgegeben
von E. Lommel und übersetzt von Rudolf Mewes,
Leipzig 1890, S. 12 – 16.

Christiaan Huygens: Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 1678

Um nun zu erkennen, ob die Fortpflanzung des Lichtes mit der Zeit erfolgt, untersuchen wir zuerst, ob es Versuche giebt, welche uns von dem Gegentheile überzeugen könnten. Betreffs derjenigen, welche man hier auf der Erde mit in grossen Entfernungen aufgestellten Flammen ausführen kann, lässt sich, obwohl sie beweisen, dass das Licht keine merkliche Zeit zum Durchlaufen dieser Entfernungen gebraucht, mit Recht behaupten, dass diese Entfernungen zu klein sind und dass man daraus nur schliessen kann, die Fortpflanzung des Lichtes sei eine ausserordentlich schnelle. *Descartes*, welcher der Ansicht war, dass sie momentan erfolgt, stützte sich, nicht ohne Grund, auf eine weit bessere, den Mondfinsternissen entnommene Beobachtung, welche jedoch, wie ich zeigen werde, nicht beweisend ist. Ich werde sie ein wenig anders als er darstellen, damit man ihre Tragweite besser ermessen kann.

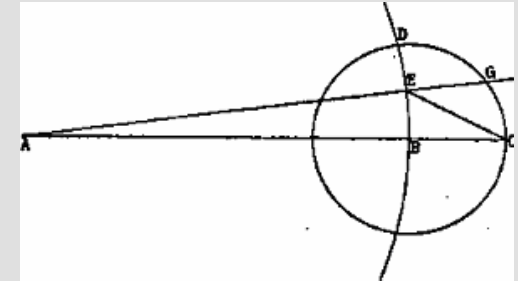


Bild 1: Sonne, Mond- und Erdbahn.

Es sei *A* der Ort der Sonne, *BD* ein Theil der Erdbahn oder des jährlichen Weges der Erde. *ABC* ist eine gerade Linie, welche, wie ich voraussetze, die durch den Kreis *CD* dargestellte Mondbahn in *C* trifft (siehe Bild 1).

Wenn nun das Licht Zeit gebraucht, beispielsweise eine Stunde, um den Raum, welcher sich zwischen der Erde und dem Monde befindet, zu durchlaufen, so folgt daraus, dass, wenn die Erde nach *B* gelangt ist, der Schatten, den sie verursacht, oder die Absperrung des Lichtes noch nicht zum Punkte *C* gelangt sein, sondern dort erst eine Stunde später ankommen wird. Eine Stunde später also, von dem Augenblicke an gerechnet, seitdem die Erde in *B* war, wird der in *C* ankommende Mond daselbst verdunkelt werden; aber diese Verdunkelung oder Lichtabspernung wird erst in einer weiteren Stunde zur Erde gelangen. Nehmen wir an, dass dieselbe in den zwei Stunden nach *E* gelangt ist. Wenn nun die Erde sich in *E* befindet, so wird man den verfinsterten Mond im Punkte *C* erblicken, von dem er eine Stunde vorher ausgegangen ist, und zur selbigen Zeit wird man die Sonne in *A* sehen. Denn da sie unbeweglich ist, wie ich es mit Copernicus voraussetze, und das Licht sich in geraden Linien fortpflanzt, so muss sie immer dort erscheinen, wo sie ist. Aber man hat immer beobachtet, sagt man, dass der verfinsterte Mond an der der Sonne gegenüberliegenden Stelle der Ekliptik erscheint; hier würde er jedoch hinter dieser Stelle erscheinen, um den Winkel *GEC*, welcher den Winkel *AEC* zu zwei Rechten ergänzt. Dies widerspricht also der Erfahrung, da der Winkel *GEC* sehr merklich wäre und ungefähr 33 Grad betragen würde. Denn gemäss unserer Berechnung, welche in der Abhandlung über die Ursache der Erscheinungen beim Saturn steht, beträgt die Entfernung *BA* zwischen der Erde und der Sonne beiläufig 12 Tausend Erddurchmesser und ist folglich 400mal grösser als die Entfernung des Mondes *BC*, welche 30 Durchmesser

Christiaan Huygens: Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 1678

beträgt. Der Winkel ECB wird daher ungefähr 400mal grösser sein als BAE , der gleich fünf Minuten ist, d. h. als der Weg, welchen die Erde innerhalb zweier Stunden auf ihrer Bahn zurücklegt; und deshalb ist der Winkel BCE nahezu 33 Grad, und ebenso der Winkel CEG , der ihn um fünf Minuten übertrifft.

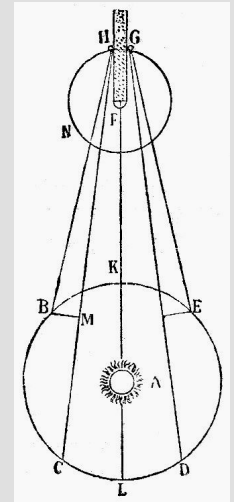
Man muss aber bedenken, dass die Geschwindigkeit des Lichtes in dieser Betrachtung so angenommen ist, dass es eine Stunde für den Weg von hier bis zum Monde gebraucht. Sobald man voraussetzt, dass es hierzu nur eine Minute Zeit nöthig hat, so wird offenbar der Winkel CEG nur 33 Minuten, und bei der Annahme von 10 Secunden noch nicht 6 Minuten betragen. Dann ist es aber nicht leicht, ihn in den Beobachtungen der Mondfinsterniss wahrzunehmen, und es ist darum nicht erlaubt, hieraus auf die augenblickliche Fortpflanzung des Lichtes zu schliessen.

Es könnte allerdings befremden, eine Geschwindigkeit anzunehmen, welche hunderttausendmal grösser als diejenige des Schalles sein würde. Der Schall legt nämlich nach meinen Beobachtungen ungefähr 180 Toisen in der Zeit einer Secunde oder eines Pulsschlages zurück.¹⁾ Jene Annahme dürfte aber nach meiner Ansicht nichts Unmögliches an sich haben; denn es handelt sich nicht um die Fortführung eines Körpers mit einer so grossen Geschwindigkeit, sondern um eine folgeweise, von den einen zu den anderen Körpern übergehende Bewegung.

Daher habe ich bei dem Nachdenken über diese Frage kein Bedenken getragen anzunehmen, dass die Fortpflanzung des Lichtes Zeit erfordert, weil sich auf diese Weise, wie ich erkannte, alle seine Erscheinungen erklären lassen, während nach der entgegengesetzten Ansicht alles unverständlich wäre. Ich habe nämlich stets, und viele Andere mit mir, gemeint, dass selbst *Descartes*, welcher doch bestrebt war, alle Gegenstände der Physik in verständlicher Weise zu behandeln, und welchem dies gewiss auch viel besser gelungen ist als irgend einem seiner Vorgänger, betreffe des Lichtes und seiner Eigenschaften nichts gesagt hat, was nicht voller Schwierigkeiten oder sogar unbegreiflich wäre.

Uebrigens hat, was ich als blosser Hypothese einführte, seit Kurzem den hohen Rang einer feststehenden Wahrheit erhalten durch *Rømer's* sinnreiche Beweisführung, welche ich hier mittheilen will, in der Erwartung, dass er selbst alles geben werde, was zu ihrer Begründung dienen soll. Sie stützt sich ebenso wie die vorhergehende Betrachtung auf Himmelsbeobachtungen, und beweist nicht nur, dass das Licht auf seinem Wege Zeit braucht, sondern lässt auch erkennen, wieviel Zeit es braucht, und dass seine Geschwindigkeit sogar sechsmal grösser ist als diejenige, welche ich vorhin annahm.

¹⁾ Anmerkung des Herausgebers: Da 1 Toise = 1,948 m ist, so wäre nach Huygens die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles 350 m je Sekunde.



Christiaan Huygens: Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 1678

Rømer benutzt die Verfinsterungen der kleinen Planeten, die sich um den Jupiter bewegen und öfter in seinen Schatten eintreten. Seine Ueberlegung ist folgende. Es sei A die Sonne, B CDE die jährliche Bahn der Erde, F der Jupiter, G N die Bahn des nächsten seiner Trabanten; denn dieser ist wegen der Geschwindigkeit seines Umlaufes für die vorliegende Untersuchung geeigneter als jeder der drei anderen. Bei G möge dieser Satellit in den Schatten des Jupiter ein- und in H aus dem Schatten austreten.

Setzt man nun voraus, dass man den Trabanten, während die Erde sich einige Zeit vor der letzten Quadratur im Punkte B befindet, aus dem Schatten austreten sah, so müsste man, wenn die Erde an derselben Stelle bliebe, nach $42\frac{1}{2}$ Stunden einen ebensolchen Austritt beobachten; denn in dieser Zeit vollendet er den Umlauf seiner Bahn und kommt wieder in die Opposition zur Sonne zurück. Wenn nun die Erde beispielsweise während 30 Umläufe dieses Mondes immer in B bliebe, so würde man ihn gerade nach 30 mal $42\frac{1}{2}$ Stunden wieder aus dem Schatten heraustreten sehen. Da aber die Erde während dieser Zeit bis nach C sich fortbewegt hat, indem sie sich mehr und mehr von dem Jupiter entfernt, so folgt daraus, dass, wenn das Licht für seine Fortpflanzung Zeit braucht, die Beleuchtung des kleinen Mondes in C später bemerkt werden wird, als dies in B geschehen wäre, und dass man zu der Zeit von 30 mal $42\frac{1}{2}$ Stunden noch diejenige hinzufügen muss, welche das Licht gebraucht, um den Weg MC, nämlich die Differenz der Strecken CH und BH, zu durchheilen. Ebenso wird man in der anderen Quadratur, wenn die Erde von D bis nach E gelangt ist, indem sie sich dem Jupiter nähert, das Eintreten des Mondes G in den Schatten in E früher beobachten müssen, als dies geschehen sein würde, wenn die Erde in D geblieben wäre.

Aus zahlreichen Beobachtungen dieser Verfinsterungen während zehn aufeinander folgender Jahre haben sich nun diese Unterschiede als sehr beträchtlich herausgestellt, nämlich zu etwa 10 Minuten und darüber, und man hat daraus geschlossen, dass das Licht ungefähr 22 Minuten Zeit gebraucht, um den ganzen Durchmesser KL der Erdbahn zu durchlaufen, welcher doppelt so gross ist als die Entfernung von hier bis zur Sonne.

Die Bewegung des Jupiter in seiner Bahn, während die Erde von B bis nach C oder von D bis nach E gelangt, ist bei dieser Rechnung berücksichtigt; ferner wird bewiesen, dass man weder die Verzögerung der Beleuchtungen noch das verfrühte Eintreten der Verfinsterungen weder der Unregelmässigkeit in der Bewegung jenes kleinen Planeten, noch auch seiner Excentricität zuschreiben kann.

Wenn man die bedeutende Ausdehnung des Durchmessers KL erwägt, welcher nach meinen Untersuchungen etwa 24 000 Erddurchmesser beträgt, wird man einen Begriff von der ausserordentlichen Geschwindigkeit des Lichtes erhalten. Denn nimmt man an, dass KL nur 22 000 Erddurchmesser betrage, so leuchtet ein, dass das Licht, indem es dieselben in 22 Minuten durchläuft, in einer Minute 1000 Durchmesser zurücklegt, in einer Secunde oder einem Pulsschlage demnach $16\frac{2}{3}$ Durchmesser, welche mehr als 110 Millionen

Christiaan Huygens: Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 1678

Toisen ausmachen²⁾; denn nach der genauen Messung, welche Picard auf den Befehl des Königs im Jahre 1669 angestellt hat, beträgt der Durchmesser der Erde 2865 Lieues, deren 25 auf einen Grad gehen, und jede Lieue 2282 Toisen. Der Schall legt dagegen, wie ich oben angeführt habe, nur 180 Toisen in derselben Zeit einer Secunde zurück; die Lichtgeschwindigkeit ist also mehr als 600 000mal so gross, als die Schallgeschwindigkeit. Eine solche Fortpflanzung ist gleichwohl etwas ganz anderes, als eine augenblickliche; denn zwischen jener und dieser besteht derselbe Unterschied wie zwischen dem Endlichen und dem Unendlichen. Da nun die allmähliche Fortpflanzung des Lichtes hiermit festgestellt ist, so folgt, wie ich schon gesagt habe, dass es sich ebenso wie der Schall in kugelförmigen Wellen ausbreitet. Wenn sich auch beide hierin gleichen, so unterscheiden sie sich doch in mehreren anderen Beziehungen, nämlich durch die ursprüngliche Erzeugung der sie verursachenden Bewegung, durch das Mittel, in welchem diese Bewegung sich fortpflanzt, und durch die Art ihrer Mittheilung. Denn der Schall wird bekanntlich durch die plötzliche Erschütterung eines ganzen Körpers oder eines beträchtlichen Theiles hervorgebracht, welche die ganze umgebende Luft in Bewegung setzt. Die Lichtbewegung hingegen muss von jedem Punkte des leuchtenden Gegenstandes ausgehen, damit man alle verschiedenen Theile dieses Gegenstandes wahrnehmen könne, wie in der Folge deutlicher gezeigt werden soll. Nach meiner Meinung lässt sich diese Bewegung durch nichts besser als dadurch erklären, dass man annimmt, die leuchtenden Körper, welche, wie die Flamme und offenbar auch die Sonne und die Fixsterne, flüssig sind, seien aus Theilchen zusammengesetzt, welche in einer viel feineren Materie schwimmen, von welcher sie mit einer grossen Geschwindigkeit bewegt und gegen die umgebenden, viel kleineren Aethertheilchen gestossen werden; dass dagegen in den leuchtenden festen Körpern, wie Kohle oder glühendes Metall, dieselbe Bewegung durch die heftige Erschütterung der Holz oder Metalltheilchen verursacht werde, von denen die an der Oberfläche befindlichen ebenfalls gegen jene Aethermaterie prallen. Die Bewegung der Theilchen, welche das Licht erzeugen, muss übrigens viel schneller und heftiger sein, als diejenige der Körper, welche den Schall verursachen, denn wir sehen, dass die zitternde Bewegung eines tönenden Körpers ebensowenig im Stande ist, Licht zu erzeugen, wie die Bewegung der Hand in der Luft Schall hervorzubringen vermag.

Nachberechnung der Lichtgeschwindigkeit mit den von Huygens 1678 angegebenen Werten: siehe nächste Seite!

² Anmerkung des Herausgebers: Unter der Annahme, dass der Durchmesser der Erdbahn nur 22 000 Erddurchmesser betrage, und von dem Licht in 22' durchlaufen werde, würde sich nach den obigen Zahlenangaben (1 Lieue = $4 \frac{4}{9}$ km) die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts zu 212 222 km ergeben, und wenn man für den Durchmesser der Erdbahn den richtigen Werth von 2 4000 Erddurchmessern nimmt, 231 513 km. Die Gesamtverspätung der Verfinsternung des Jupitermondes beträgt aber nicht 22', sondern nur 16' 36"; hiermit ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit 306 827 km.

Nachberechnung der Lichtgeschwindigkeit mit den von
Christiaan Huygens 1678 angegebenen Werten:

$$1 \text{ Lieue}^3 = 4 \frac{4}{9} \text{ km} = 4,444 \text{ km}$$

Erde

Durchmesser:⁴ $D_E = 2\,865 \cdot 4 \frac{4}{9} \text{ km} = 12\,733,333 \text{ km}$

Radius: $R_E = (2\,865 \cdot 4 \frac{4}{9} \text{ km}) : 2 = 6\,366,666 \text{ km}$

Erdumlaufbahn

Durchmesser:⁵ $d_E = 22\,000 \cdot R_E = 22\,000 \cdot 12\,733,333 \text{ km} = 280\,133\,333,3 \text{ km}$

Radius: $r_E = 22\,000 \cdot R_E = (22\,000 \cdot 12\,733,333 \text{ km}) : 2 = 140\,066\,666,7 \text{ km}$

Lichtgeschwindigkeit:

$$c = \frac{2 \cdot r_E}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 140\,066\,666,7 \text{ km}}{22 \cdot 60 \text{ s}} \Rightarrow \underline{\underline{c = 212\,222 \text{ km/s}}}$$

³ Huygens (1678), a.a.O., S. 113. ⁴ ebenda, S. 16. ⁵ ebenda, S. 15.