

## 2. Lichtgeschwindigkeit

### 2.1 Historische Messungen der Lichtgeschwindigkeit $c$

In der letzten Vorlesung haben wir festgestellt, dass Schall und Licht sich beide wie Wellen verhalten, die sich im Raum ausbreiten und durch ihre Wellenlänge bzw. Frequenz charakterisiert werden können. Sowohl Schall als auch Licht sind damit Phänomene, die man zur Signalübertragung von einem Punkt zu einem anderen nutzen kann. In dieser Vorlesung soll nun betrachtet werden, mit welcher Geschwindigkeit dies möglich ist.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls kann man aus relativ einfachen Beobachtungen abschätzen: Ein Echo, das von einer einige hundert Meter entfernten Wand zurückgeworfen wird, ist um einige Sekunden gegenüber dem ursprünglichen Signal verzögert. Daraus folgt, dass die Schallgeschwindigkeit einige hundert Meter pro Sekunde betragen muss. Genaue Messungen ergeben 340 m/s bei 20 °C. Wendet man das gleiche Verfahren auf Licht an, wie Galilei es bereits versucht hat, so kann man keine Verzögerung feststellen. Daraus folgt, dass Licht sich sehr viel schneller als Schall ausbreitet. Bis gegen Ende des 17. Jahrhunderts war es eine offene Frage, ob Lichtsignale überhaupt eine endliche Geschwindigkeit besitzen oder ob sie gar unendlich schnell sind. Zur Beantwortung dieser Frage brauchte man sehr genaue Messverfahren, die insbesondere die genaue Messung von Zeiten ermöglichten.

Der erste, der zeigen konnte, dass die Lichtgeschwindigkeit einen endlichen Wert hat, war der dänische Astronom Olaf Römer. Er lebte in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts, in dessen erster Hälfte Kepler die Gesetze der Planetenbewegung aufgestellt und Galilei die vier größten Monde des Jupiter entdeckt hatte. Nach Kepler bewegen sich Planeten bzw. Monde sehr regelmäßig auf Ellipsenbahnen um ihren Zentralkörper. Schon seit alters her hat man deshalb Planeten- bzw. Mondbewegungen zur Zeitmessung benutzt. Daher überlegte sich Römer, ob man die Bewegung der

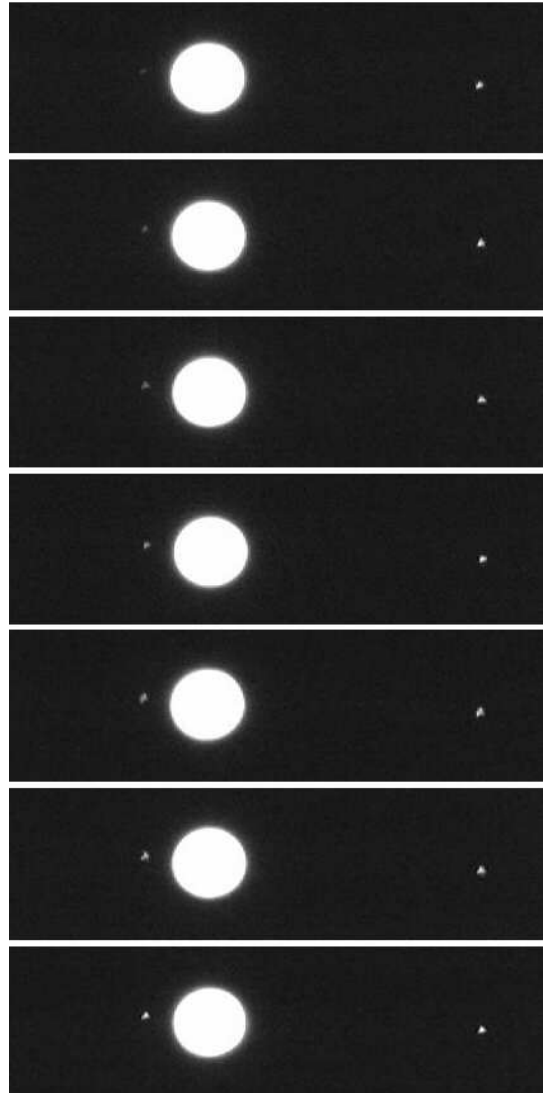


Abb. 2.1: Jupiter mit 2 Monden am 14.02.2002 von 22h 07m 00s bis 22h 09m 00s. Aufnahmen im zeitlichen Abstand von jeweils 20 Sekunden. Links taucht Io am Ende einer Verfinsternung aus dem Jupiterschatten auf. Rechts befindet sich Europa.

Jupitermonde eventuell als "genaue Uhr für die Seefahrer" verwenden könnte. Er beobachtete deshalb die Jupitermonde sehr genau und registrierte insbesondere die Zeitpunkte, an denen sie hinter dem Jupiter verschwanden bzw. wieder hervorkamen. In der damaligen Zeit ließen sich diese Ereignisse auf 1 Sekunde genau messen. Der Jupitermond Io braucht 42,5 Stunden = 1.77 Tage für einen Umlauf. Als Römer diese Umlaufzeit genauer untersuchte, fand er, dass ihr Wert um bis zu 15 s schwankte und zwar in Abhängigkeit von der Bewegung der Erde relativ zum Jupiter: Entfernte sich die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne von Jupiter, war die Umlaufdauer von Io länger, als wenn die Erde sich auf den Jupiter zu bewegte. Römer führte dieses Phänomen auf die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit zurück: Wenn sich die Erde von Jupiter weg bewegt, muss das Licht des Jupitermondes Io nach jedem Umlauf zusätzlich diejenige Strecke durchlaufen, die die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne in dieser Zeit zurückgelegt hat (siehe Abb. 2.2). Dieses Nachlaufen kostet Zeit, wenn das Licht sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Aus seinen Beobachtungen schloss Römer auf die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und Huygens berechnete bereits kurze Zeit später aus diesen Daten den recht guten Wert  $c \approx 220\,000\text{ km/s}$ .

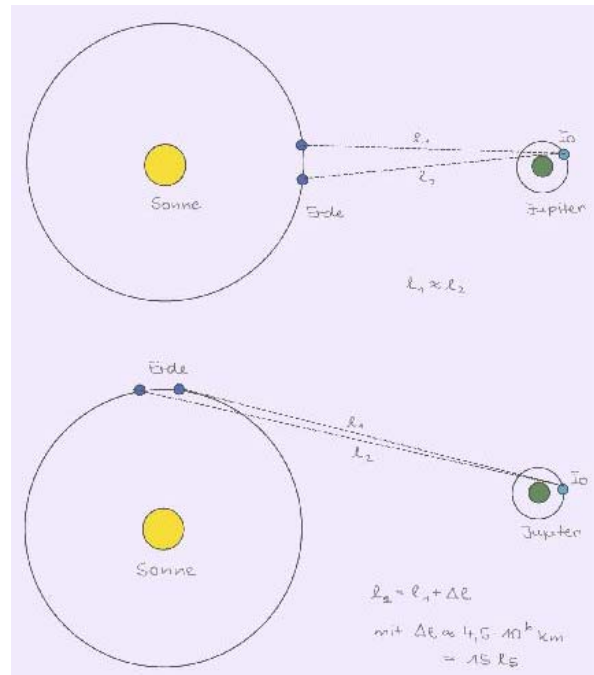


Abb. 2.2: Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Römer, Details siehe Text

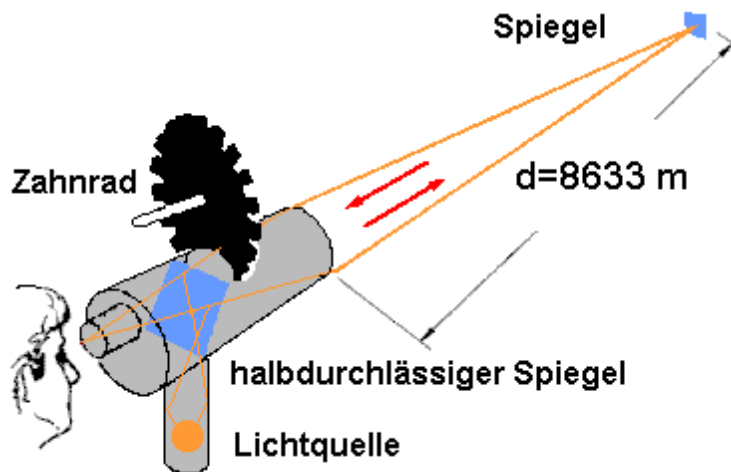


Abb.2.3: Schematischer Aufbau der Fizeauschen Apparatur zur Messung von  $c$ .

Danach vergingen noch fast 175 Jahre, bis die Lichtgeschwindigkeit durch Fizeau zum ersten Mal auf der Erde experimentell bestimmt wurde. Das Prinzip seines Versuchs beruht auf dem Effekt des "Lichtechos" und ist in der Abbildung 2.3 skizziert: Ein Lichtsignal wird ausgesandt, an einem entfernten Spiegel reflektiert und die Ankunftszeit wird mit der Startzeit verglichen. Fizeaus Aufbau war noch recht primitiv, z.B. benutzte er eine Petroleumlampe als Lichtquelle und "zerhackte" das Licht in kurze Pakete, indem er es durch die Öffnungen eines sich schnell drehenden Zahnrades laufen ließ. Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Zahnrades wurde so eingestellt, dass das "Lichtecho", das von einem am anderen Ende von Paris aufgestellten Spiegel reflektiert wurde, gerade keine Öffnung im Zahnrad fand.

Fizeau selbst schrieb:

*"Das erste Fernrohr befand sich im Belvedere eines zu Suresnes gelegenen Hauses, das andere auf der Höhe des Monmartre, in einer Entfernung von beiläufig 8633 Metern. Die Scheibe mit siebenhundert Zähnen versehen, ward von einem durch Gewichte getriebenen Räderwerk, das Hr. Fromet angefertigt hat, in Bewegung gesetzt, und mittelst eines Zählers die Umdrehungsgeschwindigkeit gemessen. Das Licht war das einer Lampe von großer Helligkeit. Diese ersten Versuche lieferten für die Geschwindigkeit des Lichtes einen Werth, der wenig von dem von den Astronomen angenommenen abweicht."* (aus Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie 79 (1850) S. 167 ff.)

Aus seinen Messungen erhielt Fizeau den Wert  $c = 315000$  km/s.

## 2.2 Experiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

### Versuch: Messung von $c$

Als Lichtquelle wird eine Leuchtdiode verwendet, die mit einer Frequenz von  $f = 60$  MHz ein- und ausgeschaltet wird. Dies geschieht jedoch nicht abrupt, sondern langsam: Man



Abb. 2.4: Apparatur zur Messung der Lichtgeschwindigkeit.

moduliert die Quelle, so dass ihre Helligkeit sinusförmig mit 60 MHz schwankt. Die Dauer  $T$  zwischen zwei Zeitpunkten maximaler Helligkeit ist dann  $T = 1/f = 16.7$  ns. Glaubt man der Herstellerangabe ( $f = 60$  MHz) und stellt das Sendersignal auf dem Oszilloskop so dar, dass eine Periode dieser Schwingung auf der Horizontalachse 10 cm lang ist, dann

entspricht 1 cm gerade einer Zeit von 1.67 ns. In dieser kurzen Zeit legt das Licht die Strecke  $s = 3 \cdot 10^8 \cdot 1.67 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0.5 \text{ m}$  zurück.

Man gibt nun auf den 1. Eingang des Oszilloskops das Sendesignal, mit dem auch der Elektronenstrahl gestartet (getriggert) wird, und auf den 2. Eingang das Empfängersignal.

Für eine feste Entfernung zwischen Sender S und Empfänger E kann man die beiden Signale so einstellen, dass sie sich gerade überdecken. Schiebt man nun den Sender von E weg, so verzögert sich das Empfängersignal gegenüber dem Sendersignal.

Man verschiebt den Sender S solange, bis das Empfängersignal auf dem Schirm z.B. um 1 cm weiter nach rechts gewandert ist, und misst die zugehörige Strecke  $\Delta s$ . Die diesem einen Zentimeter zugeordnete Zeit  $\Delta t$  hat das Licht gerade für die Strecke  $\Delta s$  benötigt. Für  $\Delta s$  wurde ein Wert von 0,51 m gemessen, so dass sich für  $c = 306000 \text{ km/s}$  ergab.

### 2.3 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts fragte man sich, wie sich das Licht fortpflanzt. Der Schall bewegt sich in Luft bzw. in einem anderen materiellen Medium, ohne ein solches Medium kann er sich nicht fortpflanzen. Das Licht braucht keine Luft, denn Licht pflanzt sich auch im Vakuum fort. Da man sich aber eine Fortpflanzung nicht ohne einen Träger vorstellen konnte, auch wenn man ihn noch nicht beobachtet hatte, **postulierte** man eine Trägersubstanz, den Äther, der den ganzen Raum gleichmäßig erfüllen sollte. Wenn nun, so schloss man aus Analogie zum Schall, Licht von einer Quelle ausgesandt wird, die sich relativ zum Äther mit einer Geschwindigkeit  $v$  bewegt, dann sollte die gemessene Geschwindigkeit des Lichtes von der Geschwindigkeit der Quelle abhängen. Diese Abhängigkeit könnte man benutzen, um die Existenz des Äthers nachweisen.

Das Prinzip kann man vielleicht in der folgenden Analogie mit dem Schall verstehen. In einem fahrenden Triebwagen stehe hinten der Schaffner, der dem Fahrer an der Zugspitze ein Signal geben will. Er kann im Zug rufen, so dass sich der Schall im Zuginnern fortpflanzt, oder er kann sich aus dem Fenster lehnen, so dass der Schall sich in der den Zug umgebenden Luft fortpflanzt. Welches Signal kommt schneller bei dem Fahrer an? Die Antwort ist klar: Da sich der Schall in der Luft (ob im Zug oder außerhalb des Zuges) mit der gleichen Schallgeschwindigkeit fortpflanzt, hört der Fahrer durch die Luft im Zug das Signal schneller als über die Außenluft, da der Zug dem Signal außerhalb sozusagen davonfährt. Wenn der Triebwagen mit Überschallgeschwindigkeit fahren könnte, würde der Fahrer nie das hören, was der Schaffner hinten aus dem Fenster schreit.

Wenn sich die Ausbreitung des Lichts analog zu der des Schalls verhält, so sollte die Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle oder des Empfängers abhängen. Eine solche Abhängigkeit müsste man experimentell nachweisen können.

Michelson und Morley machten am Ende des 19. Jahrhunderts einen Versuch, der im Prinzip dem Gedankenexperiment mit dem Triebwagen ähnelt. Als Triebwagen benutzten sie die Erde, die mit 30 km/s um die Sonne saust. Sie fanden: ob das Lichtsignal "innerhalb des Triebwagens" oder "außerhalb des Triebwagens" vom Schaffner zum Fahrer gesandt wurde, machte keinen Unterschied. Der Triebwagen konnte dem Lichtsignal nicht davonfahren. Auf weitere Details wollen wir hier nicht eingehen.

**Die Lichtgeschwindigkeit war in allen Systemen gleich.**

Damit musste die Ätherhypothese fallengelassen werden. Gleichzeitig wurde die Lichtgeschwindigkeit zu einer universellen Konstanten, die eine besondere Wichtigkeit durch Einsteins Spezielle Relativitätstheorie erfuhr. Sie ist eine der am genauesten bekannten Naturkonstanten mit dem Wert

$$c = 299\,792,458 \text{ km/s}$$

## 2.4 Synchronisieren von Uhren, Definition der Gleichzeitigkeit

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden die Städte Europas durch die Eisenbahnen verbunden. Das führte u.a. zu einem ganz neuen Problem, nämlich dem der Synchronisation von Uhren an verschiedenen Orten. Bis dahin hatte nämlich jede Stadt ihre eigene Zeit. In jeder Stadt war 12 Uhr Mittag, wenn die Sonne im Kulminationspunkt am höchsten am Himmel stand. Für Orte mit verschiedenen

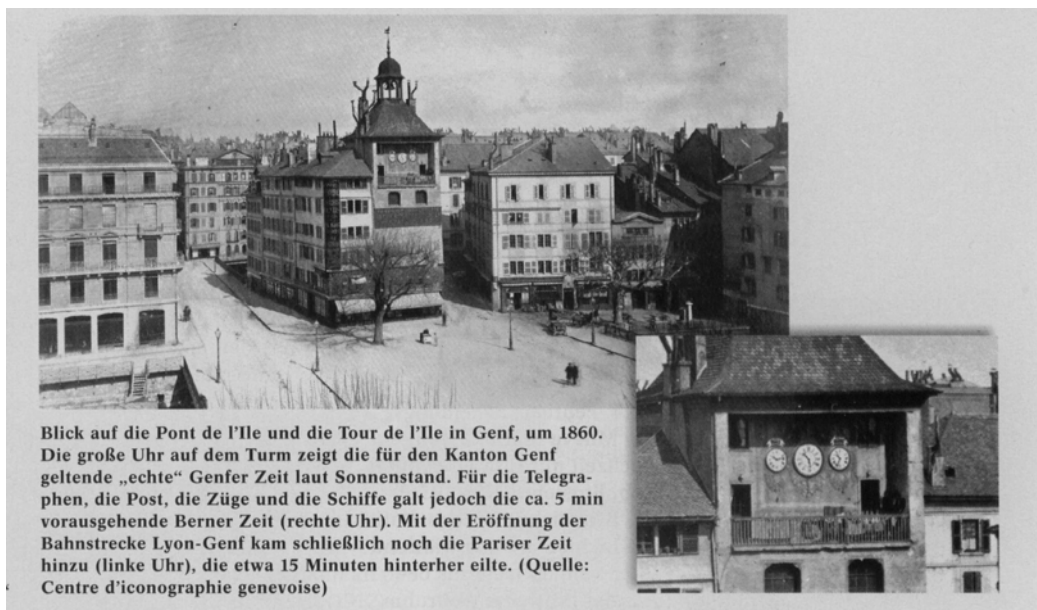


Abb. 2.5: Anzeige der Berner, Genfer und Pariser Uhrzeit um 1860 in Genf.

Längengraden geschah das aber zu verschiedenen Zeiten. Man kann sich vorstellen, welche Probleme das bereitete. Am Bahnhof in Genf gab es zum Beispiel drei Uhren, die die lokalen Zeiten von Genf, Bern und Paris anzeigten (siehe Abb. 2.5).

Ganz besonders schwierig muss das für den Zugführer gewesen sein, der ja nun gar nicht wusste, welche Zeit herrschte, wenn er zwischen zwei Städten fuhr. Deshalb gab es um die Jahrhundertwende eine Reihe von Patenten, die u.a. im Patentamt Bern, wo Einstein arbeitete, eingereicht wurden und vorschlugen, wie man die Uhren an verschiedenen Orten synchronisieren könnte.

Ob Einstein durch die Patentanträge zum Synchronisieren von Uhren zu seiner Speziellen Relativitätstheorie angeregt wurde, wissen wir nicht, aber aus dem Anfang seiner Publikation zu dieser Theorie hören wir, was die Leute damals bewegte. Wir möchten einige Zeilen aus dieser Arbeit zitieren, um Ihnen zu zeigen, dass Einstein sehr wohl klar und verständlich reden konnte und die Mathematik, die der Laie immer so fürchtet, bei ihm anfangs gar nicht die entscheidende Rolle spielte. Es ging ihm zunächst darum, ein Problem gedanklich zu durchdringen.

*"Wollen wir die Bewegung eines materiellen Punktes beschreiben, so geben wir die Werte seiner Koordinaten in Funktion der Zeit. Es ist nun wohl im Auge zu behalten, dass eine derartige mathematische Beschreibung erst dann einen physikalischen Sinn hat, wenn man sich vorher darüber klar geworden ist, was hier unter 'Zeit' verstanden wird. Wir haben zu berücksichtigen, dass alle unsere Urteile, in denen Zeit eine Rolle spielt, immer Urteile über **gleichzeitige Ereignisse** sind. Wenn ich z.B. sage: 'Jener Zug kommt hier um 7 Uhr an', so heißt dies etwa: 'Das Zeigen des kleinen Zeigers meiner Uhr auf 7 und das Ankommen des Zuges sind gleichzeitige Ereignisse.'*

*Es könnte scheinen, dass alle Definitionen der 'Zeit' betreffenden Schwierigkeiten dadurch überwunden werden könnten, dass ich anstelle der 'Zeit' die 'Stellung des kleinen Zeigers meiner Uhr' setze. Eine solche Definition genügt in der Tat, wenn es sich darum handelt, eine Zeit zu definieren ausschließlich für den Ort, an welchem sich die Uhr eben befindet; die Definition genügt aber nicht mehr, sobald es sich darum handelt, an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisreihen miteinander zeitlich zu verknüpfen, oder – was auf dasselbe hinausläuft – Ereignisse zeitlich zu werten, welche in von der Uhr entfernten Orten stattfinden."*

Soweit Einsteins Text. Wenn man Uhren an verschiedenen Orten vergleichen will, muss man ein Signal von einer Uhr zur anderen schicken. Dazu bietet sich das Licht an. Wenn die Uhr am Ort A die Zeit 7 Uhr anzeigt, werde ein Lichtsignal zum Ort B geschickt. Das Signal kommt dort um die Zeitdifferenz, die das Licht für das Durchlaufen der Strecke von A nach B braucht, verspätet an. Da man die Lichtgeschwindigkeit kennt, kann man diese Zeitdifferenz berechnen, und die Uhr in B so stellen, dass sie synchron mit der in A läuft. Schwieriger ist es, wenn ein Schaffner in einem fahrenden Zug seine Uhr mit der Bahnhofsuhr synchronisieren will. Denn er wird mit dem Problem konfrontiert, welches für ihn die Geschwindigkeit des von der ruhenden Bahnhofsuhr ausgesandten Lichtes ist. Das Experiment von Michelson und Morley, hatte gezeigt: Sie ist auch  $c$ . Damit kann auch der Schaffner im fahrenden Zug die Laufzeit des Lichtes berechnen und seine Uhr mit der Bahnhofsuhr synchronisieren. Das Verfahren könnte z.B. folgendermaßen aussehen: Um 11 Uhr 59 (Schaffneruhr) sendet der sich im fahrenden Zug befindliche Schaffner einen Lichtblitz aus, der an der Bahnhofsuhr reflektiert und um 12 Uhr 01 wieder beim Schaffner ankommt. Als der Lichtblitz die Bahnhofsuhr traf, zeigte diese 11 Uhr 55 an. Damit weiß der Schaffner, dass seine Uhr 5 Minuten vorgeht.

Die überraschenden Phänomene, die sich aus diesem naheliegenden und offensichtlich recht harmlosen Verfahren ergeben, werden in der nächsten Vorlesung behandelt.

## 2.5 Biographie: Ole Römer (1644 – 1710)

Ole Römer wurde in Aarhus in Dänemark geboren. Sein Vater war ein kleiner Kaufmann, der bei seinem Tode – um 1663 - seinem Sohn viele Navigationsinstrumente und Bücher hinterließ. Hieraus lässt sich schließen, dass es dem Vater finanziell gut gegangen sein muss und dass Ole schon in jungen Jahren mit astronomischen und mathematischen Problemen Bekanntschaft machte.

Mit 18 Jahren schickte ihn sein Vater zur Universität nach Kopenhagen, wo er Astronomie und Optik und im Nebenfach Physik studierte und eine ausgesprochen gute Ausbildung erhielt. Hier lernte er Erasmus Bartholin (1625 – 1698) kennen, der später sein Schwiegervater wurde. Bartholin war Professor für Geometrie und Medizin und bereitete die Publikation der Beobachtungen von Tycho Brahe vor. Da Bartholin von Römers Arbeit sehr angetan war, übertrug er ihm die Veröffentlichung dieser Manuskripte. Im Jahre 1671 fuhr Römer mit Bartholin und dem französischen Astronomen Jean Picard (1620 – 1682) auf die Insel Hven, um die Position von Tychos Sternwarte Uranienborg genau zu bestimmen. Damit wurde es möglich, Tycho Brahes Beobachtungen mit denen anderer Astronomen zu vergleichen.



Ein Jahr später ging Römer mit Picard nach Paris, wo er im königlichen Observatorium, das der Pariser Akademie unterstand, untergebracht wurde. Er arbeitete dort unter der Schirmherrschaft der Akademie und man nimmt an, dass er auch Mitglied der Akademie wurde.

Ludwig XIV. bestellte ihn zum Lehrer für seinen Sohn im Fach Astronomie. Damit erhielt er auch das Privileg, durch ganz Frankreich reisen zu dürfen und an den berühmtesten Sternwarten Beobachtungen durchzuführen. Er war jedoch nicht nur Lehrer des Dauphins, sondern hatte auch die Aufgabe, Instrumente zu bauen, und war ferner an der Konstruktion der herrlichen Brunnen in Versailles beteiligt.

In den Jahren 1675/76 machte er dann die Beobachtungen, aus denen er schloss, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich sein müsse. Er selbst gab jedoch nie einen Wert für die Lichtgeschwindigkeit an, vielleicht weil meinte, dass die Entfernung zwischen Erde und Sonne nicht genau genug bekannt wäre. So findet man in seinem Notizbuch nur folgende Notiz zur Geschwindigkeit des Lichts: 1091 Erddurchmesser pro Minute. Nimmt man den heutigen Wert für den Durchmesser der Erde  $d_E = 12740 \text{ km}$ , so erhält man aus Römers Angabe als Wert für die Lichtgeschwindigkeit  $c \approx 230000 \text{ km/s}$ , der nur um etwa 30 % kleiner als der heutige ist (300000 km/s).

Die Veröffentlichung seiner Ergebnisse wurde von seinen Kollegen teils missbilligend aufgenommen; selbst so berühmte Zeitgenossen wie Isaac Newton und Edmund Halley sollen Römers Entdeckung erst nach einiger Zeit anerkannt haben. Huygens war eine Ausnahme. Als er im Jahre 1677 über Römers Arbeit las, bat er ihn um mehr Information und berechnete in seinem Buch "Traité de la lumière", das er 1678 der Academie des Sciences vorstellte, aus dem Erdbahndurchmesser und den Römerschen Ergebnissen auch die Lichtgeschwindigkeit in heute üblichen Einheiten.

Als Römer 1677 nach Kopenhagen zurückkehrte, wurde er an der dortigen Universität Professor für Astronomie, 4 Jahre später erhielt er zusätzlich einen Lehrstuhl für Mathematik und wurde außerdem zum königlichen Astronomen und Direktor des Observatoriums ernannt. In dieser Position erneuerte er konsequent die Instrumentierung, wobei ihm seine Erfahrungen als Instrumentenbauer astronomischer Geräte und als sehr sorgfältiger Beobachter zugute kamen. Er entwickelte Geräte zur genauen Bestimmung von Sternörterten und war wohl der erste, der einen Meridiandurchgang mit einem Teleskop beobachtete. Er erfand außerdem ein neues Thermometer und arbeitete

auf dem Gebiet der Thermometrie. Einige seiner Ideen gingen auf Fahrenheit über, den er im Jahre 1708 traf.

Darüber hinaus war Römer in einer Reihe von Beraterfunktionen für den König tätig: Als Chef der Münze, als Hafensachverständiger, Inspektor für Schiffsarchitektur, Ballistikexperte und Vorsitzender der Fernstraßen-Kommission. Er wurde 1705 Bürgermeister von Kopenhagen und führte in Dänemark ein neues allgemeingültiges System von Maßen und Gewichten und ein. Diese Reform war besonders wichtig, da die vorher existierende Verwirrung den Handel behinderte.

Speziell in Kopenhagen lieferte Römer eine Anzahl weiterer praktischer Beiträge zur Verbesserung des Lebens in Dänemark. Als Kopenhagen schnell wuchs, gehörte es zu seinen Aufgaben, die Anlage von Straßen, Beleuchtung, Wasser- und Abwasser-versorgung und einiges mehr zu organisieren. Außerdem war er ab 1705 als Kopenhagener Polizeichef tätig. In dieser Funktion bekämpfte er zunächst die schlechte Moral der Truppe, indem er sie entließ und durch eine neue ersetzte. Danach ging er gegen jegliche Art der Kriminalität vor, indem er u.a. soziale Reformen einleitete.

Bereits im Jahre 1699 hatte er den Kalender überarbeitet und dabei den Termin des Osterfestes vom Mond abhängig gemacht.

Ole Römer, der 1687 nach England, Holland und Frankreich gereist war, um dort andere Forscher zu treffen und von ihnen zu lernen, war zeitlebens mit vielen Wissenschaftlern befreundet und wurde Mitglied verschiedener Akademien, u.a. auch Ehrenmitglied der Berliner Universität.