

Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Römers Verfahren mit Hilfe eines astronomischen Kalenders

Udo Backhaus und Ulrich Quast

(Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 35/27, 35 (1987))

„Die Entdeckung eines endlichen Wertes für die Geschwindigkeit des Lichtes ist eine Großtat ersten Ranges gewesen. Sie ist von dem Dänen Olaf Römer vollbracht worden. ... Römer hat an astronomischen Beobachtungen angeknüpft und aus ihnen einen größenordnungsgemäßigen richtigen Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum hergeleitet.“ (Pohl 1941, S. 103f).

„Die Frage, ob Licht Zeit braucht, ist eine viel reiner entdeckende als die nächste, schon nicht mehr staunende, sondern bereits festnagelnde: wieviel Zeit es braucht. Deshalb zeigt die erste Beobachtung Olaf Römers an den Jupitermonden das Entdecken viel deutlicher, als die geniale Zahnrad-Spiegel-Kombination Fizeaus.“ (Wagenschein 1971, S. 38).

1 Einleitung

Die beiden vorausgeschickten Zitate deuten darauf hin, wie hoch die Idee Römers eingeschätzt werden muss, nach der bereits im 17. Jahrhundert ein endlicher, größenordnungsmäßig richtiger Wert für die Geschwindigkeit des Lichtes angegeben werden konnte. Sie zeigen, welcher didaktische Wert gerade diesem Verfahren zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit zukommt.

Nun wird das Verfahren Römers zwar in gängigen Schul- und Hochschulbüchern mit Hilfe von Abbildungen beschrieben, aber die Darstellungen sind so ungenau, widersprüchlich und oft sogar falsch, dass sie eher dem „Physiklernen schaden“ [8]. Der häufigste Fehler besteht darin, dass durch Text und Abbildung nahegelegt wird, man könne Jupiter mit seinen Monden auch beobachten, wenn er in Konjunktion mit der Sonne steht, Sonne und Jupiter also, von der Erde aus gesehen, in derselben Richtung stehen. In diesem Aufsatz soll gezeigt werden, wie man Römers Verfahren mit einem astronomischen Beobachtungsjahrbuch im Physikunterricht (Sekundarstufe I oder II) nachvollziehen und dabei zu einem brauchbaren Wert für die Lichtgeschwindigkeit gelangen kann. Das Jahrbuch dient dabei als Ersatz für eigene Messungen, die aus organisatorischen Gründen meist unterbleiben müssen, obwohl sie mit relativ geringem Aufwand durchgeführt werden könnten. Das Verfahren ist schwieriger, als es nach den üblichen Darstellungen den Anschein hat. So braucht man z.B. neben dem Radius der Erdbahn auch den der Jupiterbahn und die -

synodische oder siderische - Umlaufzeit Jupiters. Dafür aber lehnt es sich enger an den historischen Tatbestand an und lässt mehr von den Schwierigkeiten erkennen, die sich Römer bei der Verwirklichung seiner Idee entgegenstellten.

Bevor konkrete Vorschläge für den Unterricht gemacht werden, soll das Verfahren Römers wegen der erwähnten Unzulänglichkeiten in Lehrbüchern unter Verwendung von Originalliteratur beschrieben werden.

2 Wie Olaf Römer einen endlichen Wert für die Lichtgeschwindigkeit fand

Die Darstellungen in Schul- und Hochschulbüchern enthalten meist keine oder widersprüchliche Angaben über die von Römer verwendeten Messergebnisse. Nach [4S. 311] ist es „in der Tat erstaunlich schwierig, sichere Informationen über Römers Messungen und die von ihm verwendete Methode, daraus die Lichtgeschwindigkeit herzuleiten, zu finden“. So ist seine berühmte Abhandlung „Demonstration touchant le mouvement de la lumière“, die das „Journal des Scavan“ am 7. Dezember 1676 veröffentlichte, nur 1 1/2 Seiten lang. Wir drucken hier eine uns zugängliche Übersetzung (1978, S. 317f) als Arbeitsblatt ab, damit Schüler sich durch Studium des Originaltextes Römers Grundidee erarbeiten können, die hier klarer zutage tritt als in den meisten heutigen Darstellungen. So wird u.a. deutlich, dass die „22 Minuten für den ganzen Abstand HE“ durch Extrapolation aus Beobachtungen auf der Seite F bzw. K gewonnen wurden (Arbeitsblatt 1, S. 34).

Diese Zahlenangabe führt, legt man den heutigen Wert für HE von ungefähr 300.000.000 km zugrunde, auf eine Lichtgeschwindigkeit von

$$c = \frac{300.000.000 \text{ km}}{1.320 \text{ s}} = 227.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Offensichtlich lässt Römer seine Beobachtungsdaten selbst und auch die genaue Methode der Reduktion unerwähnt. 1913 wurde jedoch in der Universitätsbibliothek Kopenhagen ein Manuskriptblatt Römers gefunden, auf dem er seine Beobachtungen des Jupitermondes Io protokolliert hat. Mit Hilfe der beobachteten Immersionen und Emersionen (Beginn bzw. Ende der Verfinsterung des Mondes durch den Kernschatten Jupiters) kann man Römers Rechengang rekonstruieren. Rohlfs (1974, S. 312) schreibt in Anlehnung an K. Meyer:

„Römer beobachtete am 18.04.1673 um $9^h 22^m 0^s$ und am 04.08.1673 um $8^h 30^m 41^s$ jeweils eine Emersion. Die Zeitangaben sind nach dem Brauch der Zeit in wahrer Sonnenzeit angegeben. Vermutlich hat Römer sie in mittlere Sonnenzeit mit Hilfe einer Tabelle der Zeitgleichung umgewandelt, die Cassini später (1693) veröffentlicht hat. Danach wären die angegebenen Zeiten in mittlerer Sonnenzeit 18.04.1673 $9^h 21^m 10^s$ und 04.08.1673 $8^h 36^m 5^s$. In dem verstrichenen Zeitintervall fanden 61 Umläufe von Io statt, für einen Umlauf benötigte Io also $1^d 18^h 28^m 46^s$.

Für die Immersionsperiode vom 28.11.1672 bis zum 24.03.1673 bekommt man entsprechend $1^d 18^h 27^m 27^s$, d.h. eine Umlaufzeit, die um $1^m 19^s$ kürzer ist. Die wahre, ungestörte Umlaufzeit für Io bekommen wir, wenn wir einen Zeitraum betrachten, der

ungefähr gleich der synodischen Umlaufszeit des Jupiters ist, da Jupiter und Erde danach wieder ähnliche relative Positionen einnehmen und alle Effekte, die durch eine endliche Lichtgeschwindigkeit verursacht sind, sich dann weitgehend aufheben. Ein synodischer Umlauf Jupiters dauert 399^d . Ein solcher Zeitraum ist ungefähr zwischen den Beobachtungen am 14.03.1672 und dem 18.04.1673 vergangen. Man erhält daraus eine Periode von $1^d 18^h 28^m 31^s$. Die 61 Umläufe des Io zwischen dem 18.04.1672 und dem 04.08.1672 hätten also $107^d 22^h 59^m 31^s$ dauern müssen; wenn die endliche Lichtgeschwindigkeit keinerlei Bedeutung hätte, tatsächlich war der Zeitraum aber $107^d 23^h 14^m 55^s$. Es wurde somit eine Verspätung von $15^m 24^s$ gemessen!

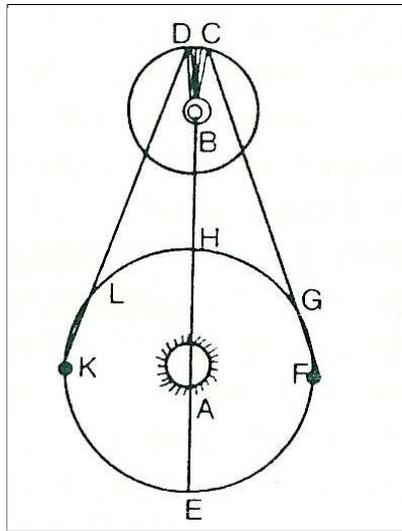
Rechnen wir nun aus, wie groß die Änderung der Entfernung Jupiter-Erde in diesem Zeitraum ist. Aus den Rudolphnischen Tafeln Keplers kann man die Positionen von Erde und Jupiter für die beiden Zeiten entnehmen. Man findet, dass sich die Entfernung in dem angegebenen Zeitintervall um 1.38 Erdbahnradien vergrößert hat. Das Licht braucht also $15^m 24^s / 1.38 = 11^m 9^s$ um die Strecke von einem Erdbahnradius zurückzulegen. „Größenordnungsmäßig stimmt dieses Ergebnis mit dem modernen Wert von $8^m 19^s$ überein. Auffällig ist dennoch die große Diskrepanz. Mehrere Fehlerquellen können dafür verantwortlich gemacht werden. So führt Rohlfs die Unregelmäßigkeit des Io-Umlaufes an, während Schlosser et al. (1982) die durch Form und Lage des Jupiterschattens verursachten Abweichungen als entscheidend darstellen. Wir halten eine weitere Fehlerquelle für naheliegend. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts, in einer Zeit also, in der Pendeluhren gerade erst entwickelt wurden, waren sekundengenaue Zeitmessungen noch sehr schwierig. Für diese Vermutung scheint uns die Aussage Römers zu sprechen, zwischen den in FG bzw. KL (vgl. Abbildung von Arbeitsblatt 1) beobachteten Umlaufzeiten bestehe keine merkbare Differenz. Der Tabelle von Arbeitsblatt 2 kann man dem gegenüber entnehmen, dass der Unterschied immerhin ungefähr 25^s beträgt.

Arbeitsblatt 1

Ole Römer

Eine Demonstration der Bewegung des Lichtes

Seit vielen Jahren bemühen sich Physiker, durch Experimente festzustellen, ob die Wirkung des Lichtes augenblicklich an ferne Punkte geleitet wird oder ob dafür Zeit nötig ist. Herr Römer von der Königlichen Akademie der Wissenschaften hat eine Methode erdacht, die auf Beobachtungen des ersten Satelliten des Jupiter beruht, um zu beweisen, dass das Licht zum Zurücklegen einer Strecke von ungefähr 3000 Meilen, was fast dem Durchmesser der Erde entspricht, nicht einmal eine Sekunde braucht.



Der Weg des Lichtes vom Jupitersatelliten zur Erde

A sei die Sonne, B Jupiter, C der erste Satellit des Jupiters, der in den Schatten Jupiters eintritt, um dann bei D aus ihm auszutreten; EFGHKL sei die Erde in verschiedenen Entfernungen von Jupiter. Nehmen wir nun an, dass die Erde, da sie sich in L bei der zweiten Quadratur des Jupiters befindet, den ersten Satelliten zum Zeitpunkt seines Wiederauftauchens aus dem Schatten bei D beobachtet hat; und dass, wenn das Licht Zeit braucht, um den Abstand LK zurückzulegen, der Satellit zu einem späteren Zeitpunkt bei D wiedergesehen werden wird, als wenn die Erde in L geblieben wäre. Beobachtet man also den Umlauf dieses Satelliten anhand seines Wiederauftauchens, so wird dieses in K später stattfinden, und zwar um die gleiche Zeitspanne, die das Licht zum Zurücklegen des Abstandes LK in Anspruch nimmt. Und umgekehrt, in der anderen Quadratur FG, wo sich die Erde gegen das Licht bewegt, werden die Umlaufzeiten zwischen jedem Eintauchen in den Schatten um eine Zeitspanne kürzer zu werden scheinen, die den längeren Zeitspannen bei jedem Wiederauftauchen entspricht.

Und weil sich in 42 1/2 Stunden, welche Periode dieser Satellit beinahe für einen Umlauf braucht, die Entfernung zwischen der Erde und Jupiter in beiden Quadraturen um mindestens 210mal den Durchmesser der Erde ändert, folgt daraus, dass, wenn für jeden Durchmesser der Erde eine Sekunde benötigt würde, das Licht für jeden der Abstände GF, KL 3 1/2 Minuten in Anspruch nehmen würde; was zwischen zwei Umläufen des ersten Satelliten, der eine in FG, der andere in KL beobachtet, eine Verzögerung von fast 7 1/2 Minuten bedeuten würde, während in Wirklichkeit keine merkbare Differenz zu beobachten ist.

Dennoch darf man nicht darauf schließen, dass das Licht keine Zeitspanne in Anspruch nimmt. Denn Herr Römer fand, nachdem er die Sache näher untersucht hatte, dass das, was bei zwei Umläufen unmerkbar war, bei vielen zusammen sehr beträchtlich wurde; und dass, zum Beispiel, vierzig auf der Seite F beobachtete Umläufe merklich kürzer sein könnten als vierzig andere, die irgendwo im Tierkreis beobachtet wurden, wo Jupiter angetroffen werden kann; dies entspricht 22 Minuten für den ganzen Abstand HE, was doppelt so weit ist, als von hier bis zur Sonne.

Die Unwiderlegbarkeit dieser neuen Gleichung betreffend die Verzögerung des Lichtes

wird durch all die Beobachtungen nachgewiesen, die im Laufe von acht Jahren in der Königlichen Akademie und der Sternwarte gemacht worden sind. Zudem ist sie neulich durch das Wiederauftauchen des ersten Satelliten bestätigt worden, das am letzten 9. November um 5 Uhr, 35', 45" in der Nacht in Paris beobachtet wurde, 10 Minuten später, als man aufgrund des im Monat August beobachteten Wiederauftauchens erwartet hätte, als die Erde dem Jupiter viel näher war: was Herr Römer schon seit Anfang September der obigen Akademie vorausgesagt hatte.

Um aber jeden Zweifel darüber zu beseitigen, dass diese Verschiedenheit durch die Verzögerung des Lichtes verursacht wird, beweist er, dass sie weder irgendeiner Exzentrizität zugeschrieben werden kann noch einer von den anderen Ursachen, die zur Erklärung der Unregelmäßigkeiten des Mondes und der übrigen Planeten gewöhnlich angeführt werden; obgleich er sich völlig bewusst ist, dass der erste Satellit des Jupiters exzentrisch ist, dass außerdem dessen Umläufe je nachdem früher oder später stattfanden, ob sich Jupiter der Sonne näherte oder von ihr entfernte, und dass die Umläufe des primum mobile ungleich waren, erklärt er trotzdem, dass diese drei Ursachen der Ungleichheit die erste nicht daran hindern, offenbar zu sein.

3 Wie man heute Römers Verfahren nachvollziehen kann

Jupiter, seine Monde und ihre Verfinsterungen lassen sich heute mit relativ bescheidenen Mitteln beobachten. Wir benutzen dazu ein kleines Fernrohr mit 6 cm Objektivdurchmesser bzw. einen lichtstarken Feldstecher mit 15-facher Vergrößerung. Wenn auch eine Beobachtung durch Schüler über mehrere Monate hinweg in der Regel wohl nicht in Betracht gezogen werden kann, so halten wir doch das eigene Hinschauen für unabdingbar. Die Schüler sollten nicht die Lichtgeschwindigkeit aus den Verfinsterungen Ios berechnen, ohne die Jupitermonde, vielleicht sogar ohne Jupiter je gesehen zu haben! Gut wäre eine mindestens zweimalige Beobachtung, um aus den verschiedenen Stellungen der Monde auf ihre Bewegung schließen zu können. Besser wäre die zusätzliche Registrierung wenigstens eines Verfinsterungsbeginns oder -endes, um ein Gefühl für die Schwierigkeiten bekommen zu können. Die Benutzung eines Himmelsjahrbuches ersetzt dann lediglich weitere eigene Messungen, von deren Durchführbarkeit man sich überzeugt hat. In astronomischen

Jahrbüchern ist neben anderen Jupitermonderscheinungen auch der Anfang bzw. das Ende der beobachtbaren Verfinsterungen der vier großen Monde Io, Europa, Ganymed und Kallisto verzeichnet. Will man sich (anders als Schlosser et al. 1982) so eng wie möglich an Römers Vorgehen anlehnen, bietet es sich an, die entsprechenden Ereignisse für Io (in den uns vorliegenden Jahrbüchern mit I VA bzw. I VE bezeichnet) für das ganze Jahr herauszuschreiben, wie das auf Arbeitsblatt 2 für das Jahr 1985 (AHNERT 1984) geschehen ist.

Bereits ohne dass gerechnet wird, ergeben sich aus der Tabelle einige interessante Fragen:

- Warum sind für Januar und Februar keine Angaben über Verfinsterungen gemacht? Kann man Jupiter nicht das ganze Jahr lang sehen?

- Warum sind die Angaben eines Ereignisses (z.B. I VA) so unregelmäßig verteilt? Ist Ios Umlauf so ungleichförmig, oder treten sie manchmal am Tage ein, so dass man sie nicht sehen kann?
- Obwohl Schattenein- und -austritte im Wechsel stattfinden müssen, sind bis Anfang August nur Ereignisse I VA verzeichnet, ab dann nur I VE. Warum kann man jeweils nur den Anfang oder das Ende einer Verfinsterung beobachten?

Bevor Römers Verfahren weiter nachvollzogen wird, sollten diese und ähnliche Fragen beantwortet werden. Die Antworten auf die erste und die letzte Frage können aus der Zeichnung in Römers Arbeit (Arbeitsblatt 1) gewonnen werden. Die zweite Frage lässt sich endgültig erst beantworten, nachdem die ungefähre Umlaufzeit von Io bestimmt worden ist. Sicher muss hier der Lehrer mit Informationen über Planetensystem, Konstellationen, Größenordnungen von Planeten und Entfernungen helfen. Bei dieser Gelegenheit können auch Begriffe wie Konjunktion, Opposition, synodische und siderische Umlaufzeit u.a. eingeführt werden. Dabei eröffnet sich natürlich ein weites Feld für weitere Fragen, z.B.

- Woher weiß man den Abstand Sonne-Erde?
- Wie misst man den Radius der Jupiterbahn?
- Wie kann man aus der synodischen Umlaufzeit die siderische berechnen?

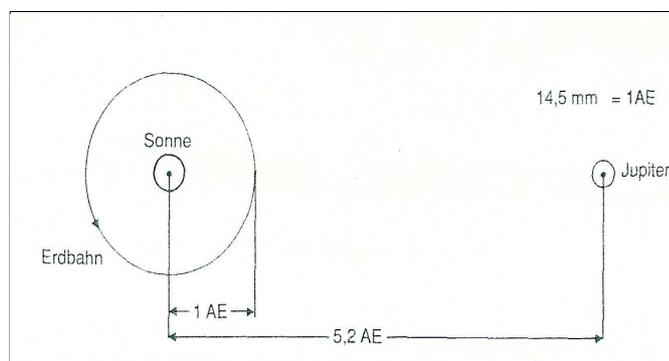
Aus Zeitgründen wird man sicher nicht alle diese Fragen mit gleicher Gründlichkeit behandeln können.

Auswertung der Tabelle

1. Bestimmung der Umlaufzeit T des Mondes Io

Zur Veranschaulichung der Grundideen haben wir in Arbeitsblatt 2 die vollständig ausgefüllte Tabelle abgedruckt. Wir empfehlen aber, den Schülern bei genügend Zeit nur die ersten drei Spalten zur Verfügung zu stellen (die anderen Zahlenwerte können beim Kopieren abgedeckt werden).

Den in der dritten Spalte berechneten Zeitabständen ist die Umlaufzeit nicht ohne weiteres zu entnehmen. Jedoch fallen drei kleinste, ungefähr gleiche Werte auf. Es liegt nahe, dass diese die ungefähre Umlaufzeit Ios ($152910^s = 1^d 18^h 28,5^m$) angeben. Nimmt man an, dass sich dieser Wert nicht wesentlich ändert, dann kann man für jeden Zeitraum die Anzahl der Umläufe und die zugehörige mittlere Umlaufzeit berechnen (Spalte 4 und 5).



1. Zeichne die Erde für den Zeitpunkt ein, zu dem Jupiter in Opposition zur Sonne steht (04.08.).
2. In dem Koordinatensystem, in dem Sonne und Jupiter ruhen, umkreist die Erde die Sonne in 399 Tagen. Zeichne für dieses Koordinatensystem die Stellung der Erde am 01.05., 01.11. und 23.12.!
3. Wie groß ist an diesen Tagen der Abstand zwischen Erde und Jupiter?
4. An welchen Stellen der Erdbahn ändert sich dieser Abstand durch die Bewegung der Erde am schnellsten, wo am wenigsten?

2. Qualitative Auswertung

Vor der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit sollte Spalte 5 qualitativ diskutiert werden:

- (a) Die Umlaufzeit T ist tatsächlich ungefähr konstant. Die Unterschiede betragen maximal lediglich 27 Sekunden
- (b) und das sind bezogen auf eine Gesamtzeit von ungefähr 153000s weniger als 0,2 Promille! Die Schüler können hier ein Gefühl für die Schwierigkeit bekommen, diese Abweichungen überhaupt zu bemerken und sie dann nicht als Messfehler abzutun, sondern nach einem zugrundeliegenden physikalischen Effekt zu suchen. Hat man die Abweichungen erst einmal als systematisch erkannt, fallen folgende Regelmäßigkeiten auf:
- (c) Zwischen Mai und November wächst T kontinuierlich um insgesamt etwa 25s.
- (d) Bis Mai nimmt T ab. Ob T auch nach November/Dezember wieder abnimmt, ist ohne das folgende Jahrbuch nicht eindeutig zu entscheiden. Es ist aber anzunehmen, da im April ein synodischer Umlauf beendet sein und der Vorgang sich dann wiederholen wird.
- (e) Gegenüber den zurzeit der Opposition (04.08.) gemessenen Werten erscheint die Umlaufzeit vorher verkürzt, nachher verlängert.

Zunächst liegt wohl die Vermutung nahe, diese Abweichungen lägen an Unregelmäßigkeiten des Mondumlaufes selbst. Dagegen spricht jedoch die Erfahrung, dass sie sich während jeder synodischen Jupiterperiode in gleicher Weise wiederholen (auf oben erwähntem Manuskriptblatt Römers befinden sich Aufzeichnungen aus den Jahren 1668-1678). Sie hängen also offensichtlich ab von der Stellung der Erde relativ zu Jupiter und zur Sonne, die man sich anhand einer maßstabsgetreuen Zeichnung klarmachen kann. Am leichtesten zu verstehen ist die Bewegung der beiden Planeten vielleicht in einem Inertialsystem. Der besseren Übersichtlichkeit wegen haben wir uns für die Zeichnung auf Arbeitsblatt 3 trotzdem für das Koordinatensystem entschieden, in dem Sonne und Jupiter ruhen und die Erde entsprechend Jupiters synodischer Umlaufzeit in 399 Tagen um die Sonne läuft. Trägt man in diese Zeichnung die Stellung der Erde für verschiedene Daten ein, dann fällt folgendes auf:

- (f) Zurzeit der Opposition ist der Abstand d zwischen Jupiter und Erde am geringsten; in der Zeit vorher verringert er sich, danach wird er größer.
- (g) In der Zeit um den 01.05. (bzw. 01.11) bewegt sich die Erde genau auf Jupiter zu (bzw. von ihm weg). Zu diesen Zeitpunkten (1. und 2. Quadratur) ändert sich der Abstand also am schnellsten, zur Zeit der Opposition (und der Konjunktion) am langsamsten. Nach diesen Feststellungen ist es nicht mehr sehr schwierig, Römers bahnbrechende Idee nachzuvollziehen:

Ios Umlaufzeit ist konstant. Die beobachteten Abweichungen zeigen einen einfachen Zusammenhang mit der Relativbewegung von Erde und Jupiter. Sie können auf eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes zurückgeführt werden, das uns die Nachrichten von den Mondumläufen übermittelt.

3. Quantitative Auswertung

- (a) Den durch die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes am wenigsten verfälschten Wert von T erhält man offensichtlich zurzeit der Opposition. Bekannt ist T für je 4 Umläufe vor und nach diesem Zeitpunkt.

T_{Opp} berechnet man sinnvollerweise durch Mittelwertbildung:

$$T = T_{Opp} = 152915s = 1^d 18^h 28^m 35^s$$

- (b) Berechnet man mit diesem Wert die zu erwartenden kommenden Verfinsterungen, erscheinen die tatsächlich „beobachteten“ verspätet. Die Verspätungen berechnet man am besten für jedes beobachtbare Ereignis einzeln (Spalte 6, Arbeitsblatt 2) und summiert dann. Für den 23.12. ergibt sich so eine Verspätung von

$$\Delta t = 904s$$

- (c) Am 23.12. sind seit der Opposition 141 Tage vergangen. Der Winkel Erde-Sonne-Jupiter beträgt demnach an diesem Tag

$$o = \frac{141}{399} * 360 = 127^\circ$$

- (d) Auf Arbeitsblatt 3 ergibt sich für diesen Winkel ein Abstand Erde-Jupiter von $d=5,9$ AE, gegenüber dem 04.08. also eine Abstandsvergrößerung um

$$\Delta d = 1,7AE$$

- (e) Die Verspätung ist auf die Zeit zurückzuführen, die das Licht zum Durchlaufen dieser zusätzlichen Entfernung benötigt. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt also

$$c = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{1,7AE}{904s}$$

Rechnet man mit dem modernen Wert für die astronomische Einheit, ergibt sich daraus

$$c = \frac{1,7 * 149500000}{904s} \approx 281000 \frac{km}{s}$$

4 Diskussion

Dem Verfahren liegen neben der grundlegenden Annahme einer konstanten Umlaufzeit Ios folgende vereinfachende Annahmen zu Grunde:

- Erde und Jupiter vollziehen gleichförmige Kreisbewegungen.
- Erd- und Jupiterbahn liegen in einer Ebene.¹

(Anders als bei dem von Schlosser et al. (1982) beschriebenen Verfahren dürfte hier der Fehler durch verschiedenes Eintauchen Ios in den Jupiterschatten gering sein, da sich die Lage des Schattens in dem betrachteten Zeitraum nur wenig ändert.) Angesichts dieser Vereinfachungen ist das Ergebnis überraschend gut.

Mit den in einem anderen weit verbreiteten astronomischen Kalender [2] angegebenen auf volle Minuten gerundeten Verfinsterungszeiten ergeben sich wesentlich schlechtere Ergebnisse: Die Regelmäßigkeiten in Spalte 5 werden von den Rundungsfehlern fast überdeckt. Auch der Wert für c ist ungenauer, weil jede Sekunde Unterschied in T_{Opp} die Verspätung um 79s verändert und damit starken Einfluss auf das Ergebnis hat.

Da heute die Lichtgeschwindigkeit auch mit schulischen Mitteln relativ einfach im Labor zu messen ist, ist Römers Verfahren weniger wegen des Ergebnisses, als vielmehr wegen seiner Methode interessant. Bei geänderter Fragestellung führt es jedoch zu einem Ergebnis, das man anders mit einfachen Mitteln nicht erzielen kann: Setzt man den im Labor gemessenen Wert für die Lichtgeschwindigkeit als bekannt voraus, ergibt sich umgekehrt ein recht guter Wert für die astronomische Einheit [9]. Mit obigen Werten ergibt sich z.B. mit

$$c = 300000km/s.$$

¹Einer Anregung W. Schlossers folgend haben wir die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit für das Jahr 1982 wiederholt, in welchem Jupiter den maximalen Abstand zur Ebene der Erdbahn hatte: Das Ergebnis war von vergleichbarer Genauigkeit.

$$1AE \approx 160000000km.$$

Literatur

- [1] Ahnert, P.: *Kalender für Sternfreunde 1985*, Barth: Leipzig 1984
- [2] Keller, H.-U.: *Das Himmelsjahr 1985*, Franckh'sche Verlagsbuchhandlung: Stuttgart 1984
- [3] Römer, O.: *Eine Demonstration der Bewegung des Lichtes*, Übersetzung der Originalarbeit von 1676, in: Sambursky, S. (Hrsg.) *Der Weg der Physik*, dtv 6093: München 1978
- [4] Rohlfs, K.: *Olaf Römer und die Lichtgeschwindigkeit*, *Sterne und Weltraum* 10/1974, 311-314
- [5] Pohl, R.W.: *Optik*, Berlin²³1941
- [6] Schlosser, W.; Schmidt-Kaler, T.: *Astronomische Musterversuche für die Sekundarstufe II*, Hirschgraben: Frankfurt a.M. 1982
- [7] Wagenschein, M.: *Die pädagogische Dimension der Physik*, Braunschweig³ 1971
- [8] Wallasch, J.: *Olaf Römer und die Lichtgeschwindigkeit oder Wie Schulbücher dem Physiklernen schaden*, *physica didact.* 9/2, 81-102 (1982)(Die Teile II und III dieser Arbeit sind in derselben Zeitschrift erschienen: 10/3,4, 207-230 (1983) und 10/2, 63-83 (1983).)
- [9] Zimmermann, I.: *Astronomisches Praktikum II*, Verlag Sterne und Weltraum: München 1983, S. 39f