

# Messung der Lichtgeschwindigkeit

Heino Hildebrand, Lars Hoegen, Arne Winterboer

26. November 2004

## 1 Einleitung

Ziel dieses Versuches soll die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit sein. Als eine der universellen physikalischen Konstanten spielt sie bei der theoretischen Betrachtung vieler Phänomene eine tragende Rolle.

Die ersten Versuche zur Bestimmung wurden von GALLILEO GALLILEI beschrieben. Er stellte zwei Personen mit verdeckten Handlampen in einigen Kilometern Entfernung voneinander auf. Person Nummer eins enthüllt die Lampe, Person Nummer zwei sieht das Licht und enthüllt dann die zweite Lampe. Wenn Licht eine endliche Geschwindigkeit hätte, müsste diese sich aus der Zeitdifferenz zwischen Enthüllung der ersten Lampe und Eintreffen des Antwortsignals mit der bekannten Entfernung berechnen lassen. Doch selbst wenn die Reaktionszeit des zweiten Beobachters gleich Null wäre (systematische Fehlerquelle), so müsste die Entfernung zwischen den Beobachtern schon sehr groß sein, um einen Zeitunterschied mit mechanischen Uhren messen zu können, da die Lichtgeschwindigkeit – wie wir heute wissen – sehr groß ist.

OLE RØMER beobachtete 1675 mit für damalige Zeiten erstaunlicher Präzision, dass der Jupitermond Io im Verlaufe eines Erdenjahres eine Schwankung in den Zeiten aufwies, zu denen er hinter dem Jupiter hervortrat. Er deutete dies mit einer endlichen Lichtgeschwindigkeit, die infolge des sich verändernden Abstandes Erde–Jupiter im Laufe des Umlaufs der Planeten um die Sonne zu diesen Differenzen führte und berechnete mit den damaligen Bestwerten für diese Abstände einen erstaunlich guten Wert für die Lichtgeschwindigkeit von etwa  $210\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ .<sup>1</sup>

Mit Verbesserung der Methoden zur Zeitmessung wurden auch die Werte für die Lichtgeschwindigkeit immer genauer. ARMAND FIZEAU wandelte 1849 das von Gallilei beschriebene Prinzip ab und beobachtete einen Lichtstrahl, der periodisch durch die Zähne eines rotierenden Zahnrads unterbrochen und dann von einem Spiegel in bekannter Entfernung

---

<sup>1</sup>Leider wird diese Methode in vielen Schulbüchern falsch beschrieben. Man findet häufig Abbildungen, in denen die geschilderte Zeitdifferenz mit minimalen und maximalem Abstand Erde–Jupiter erklärt wird, da dann der Erdbahnradius für die Differenzbildung herangezogen werden kann. Nun steht aber bei maximalem Abstand Erde–Jupiter die Sonne immer zwischen Erde und Jupiter, so dass das Erscheinen von Io gar nicht beobachtet werden kann. Des weiteren wird, wie Wallasch in seinem Artikel [1] nachweist, häufig nicht sehr professionell mit astronomischen Begriffen umgegangen.

reflektiert wurde. Er beobachtete diesen wiederum durch das Zahnrad. Bei geeigneter Wahl der Umdrehungszahl kann es nun sein, dass sich das Zahnrad in der endlichen Zeit, die das Licht für den Hin- und Rücklauf zum bzw. vom Spiegel benötigt, gerade um einen halben (eineinhalb, zweieinhalb ...) Zahn (Zähne) weiter gedreht hat und der Lichtstrahl somit einen Zahn trifft; die beobachtete Lichtintensität wird dann minimal. Ein typischer Wert, der mit einem solchen Aufbau mit einem Zahnrad mit 720 Zähnen und einer Entfernung Zahnrad–Spiegel von 8,6 km beobachtet wird, ist ein Intensitätsminimum bei der Rotationsfrequenz von 12,6 Hz. Daraus ergibt sich eine Unterbrechungsfrequenz von 9072 Hz bzw. eine Wechselfrequenz zwischen Hell und Dunkel von 18144 Hz. Mit der gegebenen Entfernung berechnet sich die Lichtgeschwindigkeit zu  $18144 \text{ Hz} \cdot 17200 \text{ m} = 312\,076\,800 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

In Folge von Verfeinerungen der Messmethoden kann heutzutage ein recht guter Wert für die Lichtgeschwindigkeit bestimmt werden. Im Zuge der Internationalisierung der Basiseinheiten innerhalb des SI-Systems wurde die Definition der Längeneinheit Meter an die genaue Vermessung einer elektromagnetischen Welle gekoppelt, was eine *Festlegung* der(Vakuum-)Lichtgeschwindigkeit auf den heutzutage gültigen Wert  $c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  erforderte, siehe [2].

Daraus ergibt sich, dass Licht in einer Sekunde im Vakuum die Strecke von einem Meter in etwa  $3.3356 \cdot 10^{-9}$  Sekunden zurücklegt. Würde man dies mit einem Oszilloskop messen wollen, z.B. durch die Darstellung von einem Start- und einem Messimpuls, so müsste dieses in der Lage sein, eine Frequenz von etwa 3 MHz zu messen.

## 2 Theorie

Wir möchten in diesem Versuch die Drehspiegelmethode nach JEAN BERNARD FOUCAULT anwenden, um die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen. Diese Methode wurde ebenfalls im Jahr 1849 zuerst angewendet.

### 2.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Aus einem von einem Laser erzeugten kohärenten, d.h. monochromatischen und phasenbeziehungsfesten Lichtbündel wird mit einem Spalt ein kleiner Teil ausgeblendet; die dabei entstehenden Beugungsmuster nimmt man in Kauf. Das restliche Lichtbündel durchläuft einen Strahlteilerwürfel und trifft dann einen mit bekannter Drehzahl rotierenden Drehspiegel in seiner Drehachse. In einer bestimmten Spiegelposition wird das Lichtbündel gerade durch die optische Achse einer Linse mit einer Brennweite  $f = 2000 \text{ mm}$  reflektiert. Der Abstand Spalt–Drehspiegel und Drehspiegel–Linse beträgt in Summe gerade die doppelte Brennweite der Linse (zur Begründung siehe unten). Hinter der Linse ist wiederum im Abstand der doppelten Brennweite ein planer Oberflächenspiegel angebracht, der das Lichtbündel ohne störende Reflexionen an Glasschichten genau durch die optische Achse der Linse zurück reflektiert.

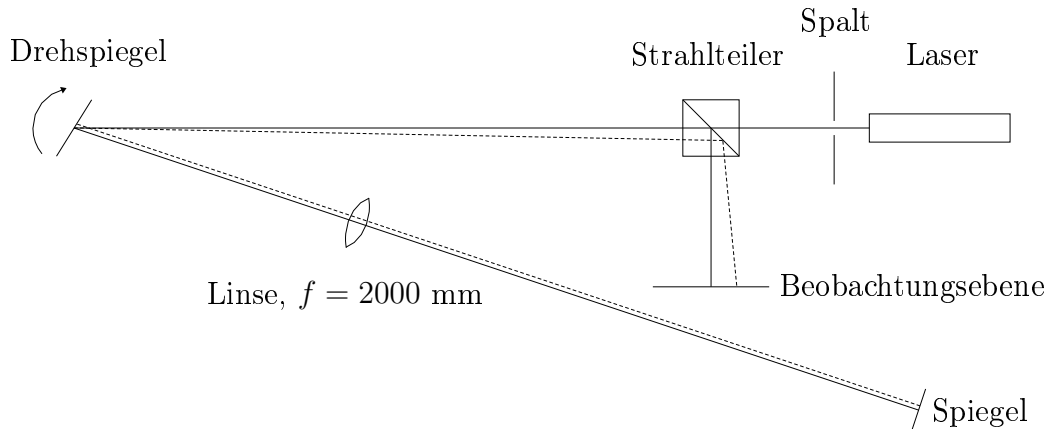


Abbildung 1: Aufbau zur Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Drehspiegelmethode

Da der Laser keine unendlich dünnen und auch keine parallelen Lichtstrahlen aussendet, muss man die Bilder des Spalts scharf abbilden. Man wählt die Abstände Spalt–Linse und Linse–Spiegel gerade daher als zweifache Brennweite, weil dann nach dem Abbildungsgesetz für Linsen

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\text{Bildweite}} + \frac{1}{\text{Gegenstandsweite}} = \frac{1}{2f} + \frac{1}{2f}$$

ist. Nach der Linsengleichung

$$\frac{\text{Bildweite}}{\text{Gegenstandsweite}} = \frac{\text{Bildhöhe}}{\text{Gegenstandshöhe}}$$

folgt, dass Bildhöhe = Gegenstandshöhe, damit wird das Bild des Spalts durch die Linse scharf und in Originalgröße auf den Oberflächenspiegel abgebildet und das reflektierte Bild des Spalts wird wiederum scharf in der Spaltebene abgebildet.

Nun benötigt das Licht aber wegen seiner endlichen Geschwindigkeit für das Durchlaufen des unteren Lichtwegs eine gewisse Zeit, in der sich der Drehspiegel um einen gewissen Betrag weiter dreht. Das vom Drehspiegel reflektierte Bild des Spalts wird demnach gegenüber dem Ursprungsbild seitlich verschoben. Zur Messung der Lichtgeschwindigkeit macht man sich die Vermessung diese Verschiebung in Abhängigkeit von der Spiegeldrehzahl zu Nutze.

Da diese Verschiebung in der Spaltebene nur schwierig zu vermessen ist, wird der rücklaufende Strahl vom Strahlteilerwürfel zur Hälfte um  $90^\circ$  abgelenkt. Die Beobachtungsebene wird so gewählt, dass der Abstand Beobachtungsebene–Strahlteilerwürfel gleich dem Abstand Spalt–Strahlteilerwürfel entspricht, da so wiederum für das reflektierte Licht ein Weg von der zweifachen Länge der Linsenbrennweite gewährleistet ist.

## 2.2 Geometrische Betrachtungen

Zur Herleitung der Formel zur Berechnung der Lichtgeschwindigkeit betrachten wir nur den oberen Lichtweg. Den Strahlteilerwürfel können wir bei unseren Überlegungen vernachlässigen, denn bei der gewählten Geometrie lenkt er die Strahlen nur um  $90^\circ$  um, ohne an der durch die Rotation verursachten seitlichen Verschiebung betragsmäßig etwas zu verändern; die von ihm verursachte Umkehr der Orientierung können wir ebenfalls vernachlässigen, da uns nur der Betrag der Verschiebung interessiert. Der so vereinfachte Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

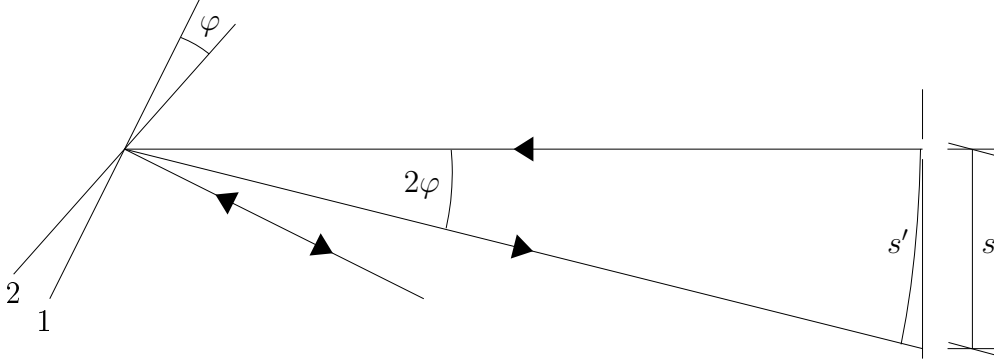


Abbildung 2: Zur Geometrie des Messprinzips

Nehmen wir an, der Drehspeigel befände sich zum Zeitpunkt des Auftreffens des hinlaufenden Strahls in Position 1. In dem Zeitraum, in dem der vom Drehspeigel reflektierte Strahl den unteren Weg (vgl. Abbildung 1) durchläuft, dreht der Spiegel sich um den Winkel  $\varphi$  in Position 2. Der auf den Spalt zurück reflektierte Strahl weist also gegenüber dem Ursprungsstrahl eine Winkeldifferenz  $2\varphi$  auf. Das reflektierte Spaltbild verschiebt sich im Bogenmaß um den Betrag  $s' = 2\varphi \cdot f \approx s$ , da die Ablenkwinkel sehr klein sind. Es gilt im Bogenmaß:

$$\varphi = \frac{s}{2f} \quad (1)$$

Der Drehspeigel braucht für eine Umdrehung um den Winkel  $2\pi$  die Zeit  $T = 1/n$  ( $n$  ist die Umdrehungszahl pro Zeiteinheit). Er hat demnach die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n \quad (2)$$

Andererseits ergibt sich seine Winkelgeschwindigkeit aber auch aus der Zeit  $t$ , die der Spiegel benötigt, um sich um den Winkel  $\varphi$  zu drehen:  $\omega = \frac{\varphi}{t}$ . Es folgt, dass der Winkel  $\varphi$  in der Zeit  $t = \frac{\varphi}{2\pi n}$  überstrichen wird. Mit Hilfe der Gleichung (1) ergibt sich

$$t = \frac{s}{4\pi f n} \quad (3)$$

Dies ist wiederum genau die Zeit, die das Licht für den Durchlauf durch den unteren Lichtweg benötigt. Näherungsweise ist dies in unserem Fall  $l \approx 6f$ . Damit lässt sich die Lichtgeschwindigkeit direkt bestimmen nach:

$$c = \frac{l}{t} = \frac{24\pi \cdot f^2 \cdot n}{s} \quad (4)$$

## 3 Versuchsdurchführung

### 3.1 Vorbereitende Tätigkeiten

Der Versuchsaufbau ist in der Realität etwas schwieriger, als in der Theorie beschrieben, da die Messmethode sehr genau sein muss. Der Laser wurde in unserem Aufbau auf einer optischen Bank montiert und zunächst ohne Spalt so justiert, dass die Drehachse des Drehspiegels getroffen wurde. Der Drehspiegel konnte mit Hilfe eines Motors und eines vorgeschalteten Stelltrafos in seiner Drehzahl stufenlos variiert werden. Darüber hinaus gab es die Möglichkeit, den Spiegel mittels eines Stellschlüssels in eine bestimmte Position zu drehen, um die Strahlengänge einrichten zu können.

Nachdem der Laser also mittig auf die Drehspiegelachse gerichtet war, wurde dieser in eine Position gebracht, in der er den Strahl direkt in Laserrichtung zurück warf, um den Drehspiegel in der Höhe zu nivellieren. Somit wurde sichergestellt, dass der rücklaufende Strahl in der gleichen Ebene lag wie der hinlaufende.

Im dritten Justageschritt wurde dann der untere Lichtweg hergestellt. Die Linse und der Oberflächenspiegel wurden so positioniert, dass hin- und rücklaufender Strahl genau durch die Linsenmitte verliefen, um Abbildungsfehler zu minimieren. Ebenso wurde der rücklaufende Strahl in Deckung mit dem hinlaufenden gebracht, um den Drehspiegel wieder an der gleichen Stelle zu treffen.

Abschließend wurden dann noch ein in der Breite verstellbarer Spalt vor den Laser gestellt und der Strahlteilerwürfel eingebracht und im  $45^\circ$ -Winkel ausgerichtet. Für die spätere Messung mit der Fotodiode war darüber hinaus noch eine Abschwächung der Laserintensität von Nöten, die wir mittels eines Graufilterrades zwischen Laser und Spalt realisierten; hier wurde die Filterintensität gewählt, bei der die Fotodiode gerade eben nicht übersteuerte.

Das uns zur Verfügung stehende Experimentiermaterial ließ es nicht zu, den Abstand Spalt–Drehspiegel gleich der Brennweite der Linse zu wählen, da wir räumlichen Beschränkungen für die Dimensionierung der Strahlengänge unterlagen. Daher ergaben sich folgende Abmessungen:

- Abstand Spalt–Drehspiegel:  $151 \pm 2$  cm
- Abstand Drehspiegel–Oberflächenspiegel:  $649 \pm 2$  cm
- Abstand Oberflächenspiegel–Linse:  $400 \pm 2$  cm

Dies muss insbesondere bei der Auswertung nach Gleichung (4) beachtet werden, da  $l$  in unserem Fall etwas länger ist als oben angegeben.

## 3.2 Versuchsdurchführung

Die eigentliche Versuchsdurchführung bestand zum einen in der möglichst genauen Bestimmung der Drehspiegelrotationsfrequenz und in der Vermessung der Verschiebung in der Beobachtungsebene.

### 3.2.1 Bestimmung der Rotationsfrequenz

Der von uns verwendete Drehspiegel war beidseitig mit einer Silberschicht versehen. Bei hohen Rotationsfrequenzen erzeugte dieser eine Art Spur, da das Auge nicht mehr vermochte, dem durch die Reflexion erzeugten Punkt zu folgen. In dieser Spur platzierten wir außerhalb des Strahlengangs des eigentlichen Versuchs eine Fotodiode, deren Ausgangssignal auf einem Oszilloskop dargestellt wurde. Aus dem zeitlichen Abstand der von der Diode erzeugten Messpeaks ließ sich direkt auf die Rotationsfrequenz des Drehspiegels schließen.

Für die Berechnung der Rotationsfrequenz aus der gemessenen Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen zwei Peaks der Fotodiode gilt

$$f = \frac{1}{2\Delta t} \quad (5)$$

### 3.2.2 Beobachtung der Verschiebung auf Millimeterpapier

In einem ersten Durchgang versuchten wir, die Verschiebung mittels eines in der Beobachtungsebene platzierten Millimeterpapiers zu bestimmen. Es stellte sich allerdings heraus, dass die Verschiebung bei der höchst möglichen Rotationsfrequenz unterhalb der Messgenauigkeit lag. Mit dem Drehspiegel war eine maximale Rotationsfrequenz von etwa 300 Umdrehungen pro Sekunde möglich, was nach Gleichung (4) zu einer Verschiebung von

$$s = \frac{24\pi \cdot f^2 \cdot n}{c} = \frac{24\pi \cdot [2000 \text{ mm}]^2 \cdot 300/\text{s}}{3 \cdot 10^{11} \text{ mm/s}} \approx 0,3 \text{ mm}$$

führen muss. Die Auflösungsgenauigkeit von Millimeterpapier beträgt aber mindestens 0,5 mm.

### 3.2.3 Beobachtung der Verschiebung mit einer CCD-Kamera

In der Beobachtungsebene platzierten wir eine CCD-Kamera ohne Linse, deren Bild auf einem Fernseh Bildschirm dargestellt wurde. Wie in [3] dargestellt, lässt sich zwischen der auf dem Bildschirm gemessenen Verschiebung und der tatsächlich auf dem Target der CCD-Kamera abgebildeten Verschiebung ein Abbildungsmaßstab angeben: Die Breite des Bildschirms von  $29 \pm 0,5 \text{ cm}$  entspricht einer Länge von  $4,76 \pm 0,02 \text{ mm}$  auf dem Target.

Die Vermessung der Abstände zwischen den Intensitätsmaxima von hin- und rücklaufendem Strahl erfolgte mittels einem Lineal. Es ergaben sich die in Tabelle 1 verzeichneten Messwerte.

Zeitdifferenz $\Delta t$ zwischen zwei Messpeaks	Abstand hin- und rücklaufender Strahl auf dem Bildschirm
$0,04 \pm 0,001$ s	0 mm
$0,002 \pm 0,0001$ s	$28 \pm 2$ mm
$0,0017 \pm 0,0001$ s	$36 \pm 2$ mm

Tabelle 1: Auf dem Bildschirm vermessene Abstände zwischen hin- und rücklaufenden Lichtstrahl in Abhängigkeit von der Drehspiegelfrequenz

### 3.2.4 Vermessung der Verschiebung mit der Fotodiode

Als dritte Messmethode kam die Fotodiode zum Einsatz, die in der Beobachtungsebene auf einem seitlich mit einer Mikrometerschraube positionierbaren Reiter montiert wurde. Wir ermittelten die Position der Fotodiode auf der auf dem Reiter angebrachten Skala als den Ort der Maximums der von der Diode erzeugten Messpeaks. Da wir zeitlichen Beschränkungen unterlagen – die Dauer des Praktikums war auf vier Stunden beschränkt – haben wir hier nur eine verlässliche Messung durchführen können, deren Ergebnisse in Tabelle 2 verzeichnet sind.

Zeitdifferenz $\Delta t$ zwischen zwei Messpeaks	Position der Fotodiode auf dem Mikrometerschrauben-Reiter
$0,011 \pm 0,001$ s	$1,796 \pm 0,002$ cm
$0,0016 \pm 0,0001$ s	$1,720 \pm 0,002$ cm

Tabelle 2: Mit dem Mikrometerschrauben-Reiter der Fotodiode vermessene seitliche Verschiebung des Abstandes zwischen hin- und und rücklaufendem Lichtstrahl in Abhängigkeit von der Rotationsfrequenz

## 4 Auswertung

Bei der Auswertung gemäß Gleichung (4) müssen wir berücksichtigen, dass der unterer Lichtweg die Länge  $l = 6,5f$  hat. Daher ergibt sich zur Berechnung der Lichtgeschwindigkeit folgende Formel:

$$\begin{aligned}
 c = \frac{l}{t} &= \frac{26\pi \cdot f^2 \cdot n}{s} \\
 &= \frac{26\pi \cdot [2 \text{ m}]^2 \cdot n}{s}
 \end{aligned} \tag{6}$$

### 4.1 Messung mit der CCD-Kamera

Für die Umrechnung der auf dem Bildschirm gemessenen Werte in die Abstände auf dem Target der CCD-Kamera ergibt sich der Wert  $s_{\text{CCD}} = s_{\text{TV}} \cdot 1,628 \cdot 10^{-2}$ . Gemäß Formel (6) berechnet sich damit die Lichtgeschwindigkeit zu

$n$ Umdrehungen pro Sekunde	Abstand hin- und rücklaufender Strahl auf dem Target der CCD-Kamera	berechnete Lichtgeschwindigkeit $c$
250	$0,455 \pm 0,002$ mm	$179\,234\,326 \pm 500\,389 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
300	$0,586 \pm 0,001$ mm	$167\,285\,371 \pm 304\,637 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tabelle 3: Aus der Messung mit der CCD-Kamera ermittelte Werte für die Lichtgeschwindigkeit

## 4.2 Messung mit der Fotodiode

Ausgehend von der Annahme, dass der für die niedrige Drehfrequenz ermittelte Wert die unverschobene Position markiert, ergibt sich eine Verschiebung von  $s = 0,76 \pm 0,02$  mm für eine Drehfrequenz von  $n = 295$ , was zu einer Lichtgeschwindigkeit von  $c = 126\,821\,135 \pm 3\,251\,823 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ergibt.

## 4.3 Diskussion der Ergebnisse

Vergleicht man die Ergebnisse mit den Literaturwerten, stellt man fest, dass die von uns gemessenen Lichtgeschwindigkeiten alle um etwa den Faktor 2 zu klein sind. Dies deutet auf einen systematischen Fehler hin, den wir zurückblickend allerdings nicht nachvollziehen können. Das einzig erklärbare Auftreten dieses Faktors ist der Unterschied der für einen einseitig beschichteten Spiegel hergeleiteten Theorie und den mit einem doppelseitig beschichteten Spiegel gemessenen Werten. Diesen Unterschied haben wir in Gleichung (5) berücksichtigt.

Nach der zum Drehspiegel gehörenden Gerätekarte der Firma LEYBOLD, Versuch Nummer 47640, heißt es, dass der Drehspiegel bei angelegten 220 V Spannung eine Umdrehungszahl von 27000 pro Minute bzw. 450 pro Sekunde erreicht. Angenommen, wir hätten nur einen einseitig beschichteten Spiegel, würde die von uns ermittelte Drehzahl von 600 pro Sekunde (vgl. Tabelle 3) wesentlich über diesem Wert liegen.

# 5 Didaktische Überlegungen

Die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist, kommt im curricularen Verlauf der Oberstufe häufig vor. Sie ist elementar für das Verständnis der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie. Auch bei zeitlichen Messungen mit Hilfe von Lichtsignalen muss sie berücksichtigt werden. Ein dritter Bereich ist die Erklärung von Beugung und Brechung durch die Betrachtung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien. Es ist daher sinnvoll, eine Unterrichtseinheit zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit vor den Einstieg in diese Thematiken zu setzen.

Als Zugang zu der Untersuchung der Lichtgeschwindigkeit könnte man die SchülerInnen befragen, ob sie den Begriff ‚Lichtjahr‘ kennen. Vermutlich werden einige diesen aus



Science-Fiction-Literatur oder -Filmen und -Serien kennen. Dieser Begriff ist vom semantischen Gehalt zunächst irreführend, denn eine Längeneinheit wird durch eine Zeiteinheit beschrieben. Befragt man die SchülerInnen nach ihrer Vorstellung eines Lichtjahrs, so wird es sicherlich sehr verschiedenen Deutungen geben, die man in Hypothesen überführen kann. Mit einigem Geschick lässt sich die Prüfung der Hypothesen in Richtung der Lichtgeschwindigkeitsbestimmung leiten. Somit wäre eine motivationale Basis geschaffen (fragend entwickelnder Unterricht).

Ein anderer denkbarer Einstieg wäre die Herangehensweise über die historische Entwicklung, wie sie in vielen Schulbüchern dargestellt ist. Da hier aber nur sehr bedingt ein Bezug zum Alltag der SchülerInnen herzustellen ist, wird es schwierig sein, eine geeignete Motivation zu erzeugen. Man kann den Ausflug in die Geschichte aber auch kurz an das Ende der Unterrichtseinheit stellen, um aufzuzeigen, dass die (geschichtliche) Entwicklung in der Physik sich am kritischen Hinterfragen der eigenen Beobachtungen festmacht.

Für die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in der Schule bieten sich moderne Varianten des Fizeau'schen Zahnradversuchs und des Foucault'schen Drehspiegelversuchs an. Beide haben gewisse Vor- wie auch Nachteile.

Ersterer zeichnet sich durch einen weniger komplexen Aufbau aus, der zudem einen relativ einfachen theoretischen Hintergrund hat. Nachteilig ist allerdings die sehr präzise Durchführung des Versuches, da das Zahnrad mit präzise konstanter Drehzahl laufen muss. Zudem sind die in schulischen Zusammenhängen realisierbaren Abstände zwischen Zahnrad und Spiegel derart kurz, dass das Zahnrad eine hohe Drehfrequenz haben muss, bei der kleine Veränderungen nur schwierig einzustellen sind. Ein anderer Weg wäre eine große Zähnezahl, was allerdings ein großes Zahnrad bedingen würde; die bewegte Masse wäre daher sehr groß und es würden sich infolge dessen andere Schwierigkeiten ergeben. Die genaue Ermittlung eines Intensitätsmaximums dürfte sich daher schwierig gestalten, was zu einer nur relativ ungenauen Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit führt. Dieser Versuch bietet sich wegen seiner wenigen Komponenten sehr gut als Schülerversuch an, wenn genügend Zeit zur Verfügung steht, denn allein die Durchführung wird sicherlich eine Doppelstunde beanspruchen.

Der Foucault'schen Drehspiegelversuch liefert sicherlich genauere Daten, da die Drehfrequenz des Spiegels nur bestimmt werden muss, statt sie gezielt zu variieren. Der Justageaufwand ist bei diesem Versuch ungleich höher, zudem ist der Aufbau etwas störanfälliger. Er bietet sich daher vorrangig als Demonstrationsversuch an, den man, nachdem er in der Unterrichtsvorbereitung justiert wurde, durchaus innerhalb einer Doppelstunde vorführen und auswerten kann. Dazu ist es allerdings wichtig, dass die SchülerInnen das Messprinzip verstanden und die Theorie durchdrungen haben, was einen intensiveren Vorlauf erfordert.

Alternativ zu diesen beiden Versuchen erlauben elektronische Messverfahren die direkte Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Bei sehr knapp bemessener Unterrichtseinheit kann auf solche Aufbauten zurückgegriffen werden. Diese haben häufig auch noch den Vorteil, dass die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien bestimmt werden kann. Ein einmal theoretisch eingeführter Versuch kann daher mehrfach im Verlauf der Unterrichtseinheiten eingesetzt werden.

# Literatur

- [1] Wallasch, Joachim. *Olaf Römer und die Lichtgeschwindigkeit oder Wie Schulbücher dem Physiklernen schaden*. In: physica didactica 9 (1982), 10 (1983). Franzbecker. Hildesheim.
- [2] Bayer-Hemls, Friedrich; Helmcke, Jürgen. *Länge Die SI-Basiseinheit „Meter“*. In: Die SI-Basiseinheiten: Definition, Entwicklung, Realisierung. Physikalisch Technische Bundesanstalt 1997 (Nachdruck 2001). Braunschweig.
- [3] Helmers, Heinz et al. *Grundkurs I Physik Anfängerpraktikum Physik I*. Fakultät V, Institut für Physik an der Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg (Eigenverlag). 2004. Seite 161 f.