

Messung der Lichtgeschwindigkeit

Heinrich-Heine-Gymnasium

Facharbeit  
aus dem Fach  
Physik

Thema:  
Messung der Lichtgeschwindigkeit

Verfasser: Franz Skorupa

Kursleiter: Hr. Klopp

Erzielte Note: ..... in Worten: .....

Erzielte Punkte: ..... in Worten: .....

abgegeben beim Kollegstufenbetreuer: .....

.....

Unterschrift des Kursleiters

# Inhaltsangabe

1	Frühe Deutungsversuche des Lichts.....	3
2	Physikalische Aspekte zur Lichtgeschwindigkeit.....	4
	2.1 Gruppen - Phasengeschwindigkeit.....	4
	2.2 Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit.....	5
3	Frühe Versuche zur Messung der Lichtgeschwindigkeit.....	6
	3.1 Astronomische Methoden.....	6
	3.2 Mechanische Methoden.....	6
4	Moderne Methoden zur direkten Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.....	7
	4.1 Elektronisches Verfahren.....	8
	4.2 Kerr – Zelle.....	10
	4.3 Pockels – Zelle.....	11
	4.4 Hohlraumresonator.....	14
5	Indirekte Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit der Entdeckung nach Maxwell.....	15
6	Genaueste Messung der Lichtgeschwindigkeit.....	16
7	Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit als Naturkonstante.....	17
8	Ausblick: Zukünftige Messung der Lichtgeschwindigkeit.....	18
9	Literaturangaben.....	19
10	Bilderverzeichnis.....	19

## 1 Frühe Deutungsversuche des Lichts

„Was ist Licht?“ Mit dieser Frage beschäftigen sich die Menschen schon seit jeher. Nachdem verschiedenste Theorien aufgestellt wurden, kann die Physik heutzutage recht befriedigende Antworten darauf geben und das Licht physikalisch genau beschreiben.

Ausgehend von Christian Huygens (1629-1695) und durch Isaac Newton (1643-1727) bestätigt, breitet sich Licht in Form einer Welle aus. Diese Theorie wiesen die Wissenschaftler mit den Überlagerungsversuchen oder Interferenzversuchen nach.

Gegen Anfang des 20. Jahrhunderts stellte Albert Einstein (1879-1955) die Teilchentheorie des Lichts auf. Nach dessen Theorie breitet sich das Licht in Form von Lichtquanten, sogenannten Photonen, aus. Nach seiner Theorie konnten weitere Effekte des Lichts, wie der Photoeffekt, exakt beschrieben werden.

Nachdem das Licht in dieser Hinsicht gedeutet werden konnte, stellte man sich die Frage nach der Geschwindigkeit des Lichts, mit der es sich ausbreitet: „Ist das Licht unendlich schnell, oder gibt es eine begrenzte Ausbreitungsgeschwindigkeit?“

Mit der Frage nach der Lichtgeschwindigkeit beschäftigten sich von da an viele Wissenschaftler. Dadurch fiel der Bestimmung dieser Konstanten mehr Bedeutung zu, als jegliche Bestimmung einer anderen allgemeinen Konstanten. Durch die Größe der Lichtgeschwindigkeit waren die Forscher bei der Bestimmung der Konstanten schnell vor Probleme gestellt, die unlösbar schienen. Dennoch versuchten sie mit verschiedensten Versuchsanordnungen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts zu bestimmen. Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit verlor nie an Aktualität, da ihre Bedeutung in der Physik sehr groß ist.

In der folgenden Arbeit werden verschiedene Methoden zur Messung der Lichtgeschwindigkeit erläutert.

## 2 Physikalische Aspekte zur Lichtgeschwindigkeit

### 2.1 Gruppen – Phasengeschwindigkeit

Die „Lichtgeschwindigkeit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Phasenzustandes einer einzelnen Lichtwelle, [die] auch als Phasengeschwindigkeit bezeichnet [wird].“ (*Lexikon der Schulphysik, O. Höfling, S. 103*)

Jede elektromagnetische Welle schreitet, in einem dispergierendem<sup>1</sup> Medium, mit der Phasengeschwindigkeit  $v_p$  fort und wird durch die Brechzahl<sup>2</sup>  $n$ , des jeweiligen

Mediums, bestimmt:  $v_p = \frac{c}{n}$ .

Überlagern sich nun viele dieser Wellen mit unterschiedlicher Amplitude, das heißt unterschiedlichen maximalen Wert und verschiedener Wellenlänge, so entsteht eine Wellengruppe. Das Amplitudenmaximum der entstehenden Gesamtwelle bewegt sich dann mit der Gruppengeschwindigkeit  $v_G$  fort. In einem dispersionsfreien Medium, zum Beispiel im Vakuum, sind Gruppengeschwindigkeit und Phasengeschwindigkeit des Lichts identisch. Sie entsprechen der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$ .

Es gilt:  $c_G = c_p = c_0$

Allgemein ist die Gruppengeschwindigkeit  $v_G$  als Geschwindigkeit definiert, mit der sich Lichtimpulse oder Wellengruppen ausbreiten.

Die Phasengeschwindigkeit  $v_p$  hingegen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer unendlich ausgedehnten Welle. [1]

Prinzipiell kann man die Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in zwei Kategorien einteilen:

- a) die exakte Bestimmung eines Zeitintervalls, die eine elektromagnetische Welle benötigt, eine bestimmte Strecke zurückzulegen;
- b) die Messung der Wellenlänge  $\lambda$  und Berechnung der Lichtgeschwindigkeit, bei bekannter Frequenz  $f$ , über die Beziehung  $c = \lambda \cdot f$ .

Bei den Methoden von a) muss die Welle in einzelne Impulse aufgespalten werden, dessen Gruppengeschwindigkeit  $v_G$  dann gemessen wird.

Bei den Methoden von b) wird die Phasengeschwindigkeit einer kontinuierlichen Welle bestimmt.

Gruppen - und Phasengeschwindigkeit sind durch die Beziehung

$$v_G = v_P - \lambda \left( \frac{\partial v_P}{\partial \lambda} \right)$$

gegeben.

Die Phasengeschwindigkeit wiederum hängt mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts durch die Gleichung  $v_P = \frac{c}{n}$  zusammen. [2]

## 2.2 Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit

Nach der von Einstein aufgestellten Relativitätstheorie soll es keine Geschwindigkeit  $v$  geben, die größer als die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  ist.

In der Wellentheorie des Lichts bezieht sich dies jedoch auf die Gruppengeschwindigkeit des Lichts. Denn mit ganz bestimmten Wellenlängen  $\lambda$  kann eine Brechzahl kleiner eins ( $n < 1$ ) erreicht werden. Aus der Formel  $v_p = \frac{c}{n}$  würde das bedeuten, das

$v_p > c_0$ , dass die Phasengeschwindigkeit größer als die Vakuumlichtgeschwindigkeit wird.

Eine unendliche Welle, die sich mit dieser Phasengeschwindigkeit bewegt, besitzt aber kein charakteristisches Merkmal, was bedeutet, dass kein Signal übertragen werden kann. Die Signalgeschwindigkeit in Materie ist somit stets kleiner gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$ . [3]

Außerdem kann sich ein Körper mit der Ruhemasse  $m_0 > 0$ , nach der Relativitätstheorie nicht mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit wächst die Masse und die Energie des Körpers gegen unendlich. Die aufzubringende Energie, um den Körper zu beschleunigen, würde auch einen Wert gegen unendlich annehmen. Deshalb stellt die Vakuumlichtgeschwindigkeit, die obere Grenzgeschwindigkeit für Bewegungen von Körpern dar, deren Ruhemasse  $m_0$  größer Null ist.

Lichtquanten, sogenannte Photonen aus der Teilchentheorie des Lichts, besitzen keine Ruhemasse ( $m_0 = 0$ ), können sich daher mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. [4]

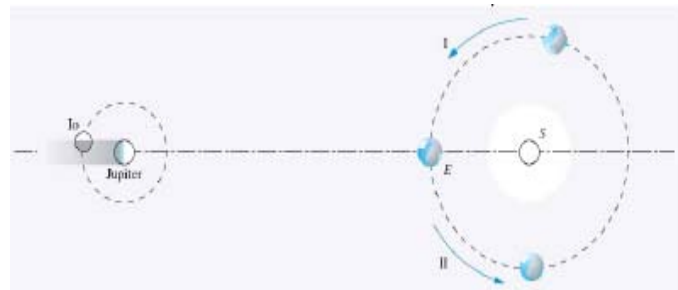
### 3 Frühe Versuche zur Messung der Lichtgeschwindigkeit

#### 3.1 Astronomische Methoden

Nachdem der Wissenschaftler Galileo Galilei (1564-1642) vergeblich Messversuche zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit durchgeführt hatte, schloss er, dass diese unendlich groß sei.

Als erstes gelang es dem dänischen Astronom Ole Rømer (1644-1710) die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts zu bestimmen.

Bei der Beobachtung der Jupitermonde stellte er fest, dass die Zeiträume zwischen den Verfinsterungen variierten. Je nachdem, ob sich die Erde gegenüber dem Jupiter wegbewegte oder näherte, nahm der Zeitraum zu beziehungsweise wieder ab.



**Abbildung 1:** Planetensystem mit Erde (E), Sonne (S), Jupiter und Jo (Mond des Jupiter)

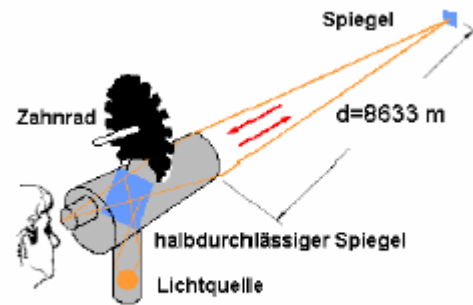
Seine Entdeckung erklärte er mit der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit und errechnete aus seinen Daten einen Wert. Rømers Entdeckung der begrenzten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts wurde aber erst 1727 akzeptiert, als James Bradley (1693-1762) durch die Aberration<sup>1</sup> des Lichts auf einen ähnlichen Wert gestoßen ist.

Nach diesen beiden Entdeckungen vergingen mehr als 100 Jahre, bis Wissenschaftler wieder versucht haben die Lichtgeschwindigkeit exakt zu ermitteln. [5]

#### 3.2 Mechanische Methoden

1849 gelang es dem französischen Physiker Hippolyte Fizeau (1819-1896) mit der sogenannten *Zahnrad - Methode* die Lichtgeschwindigkeit direkt zu messen. Bei dieser terrestrischen<sup>2</sup> Methode modulierte der Wissenschaftler Fizeau mit Hilfe eines rotierenden Zahnrades einen Lichtstrahl. Die Lichtimpulse, die durch die Lücken

zwischen den Zähnen des Rades gelangten, wurden an einem Spiegel in weiter Entfernung reflektiert. Das Rad drehte sich während der Zeit weiter, in der das Licht die Strecke bis zum Spiegel und retour, zurücklegte. Je nach Stellung des Rades trafen die reflektierten Impulse auf eine Lücke oder auf einen Zahn. Durch entsprechende Konfiguration der Versuchsapparatur gelang es Fizeau den Wert der Lichtgeschwindigkeit auf 315300 km/s zu bestimmen. (siehe Abbildung 2)



**Abbildung 2:** schematische Darstellung der Zahnrad-Methode

Auch Leon Foucault (1819-1868) verwendete einige Jahre später eine terrestrische Methode um die Lichtgeschwindigkeit zu ermitteln. Nach einem bereits theoretisch erdachten Plan, bestimmte er 1854 die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts mit der *Drehspiegel - Methode*. Dabei wurde ein Lichtbündel durch einen Drehspiegel auf eine Ebene projiziert. Diese Ebene reflektiert das Licht auf den Drehspiegel und von dort auf den Spalt zurück. Rotiert der Drehspiegel nun, so trifft das reflektierte Lichtbündel versetzt auf. Aus der Versetzung des Spaltbildes und der Strecke (Spiegel-Ebene) konnte Foucault die Lichtgeschwindigkeit auf 300 900 km/s bestimmen.

Der Amerikaner Albert Michelson (1852-1931) verbesserte die Drehspiegelmethode und führte zwischen 1878 und 1927 genaue Messungen durch. Er erhielt ein Ergebnis von 299774 km/s, bei einer mittleren Abweichung von 11 km/s. [6]

#### 4 Moderne Methoden zur direkten Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts ist es notwendig ein Lichtsignal zu modulieren. Prinzipiell gibt es zwei verschiedenen Verfahren zur Modulation eines Lichtsignals:

**a)** Modulation der Lichtquelle

**b)** nachträgliche Modulation einer Strahlung, die von einer kontinuierlichen Lichtquelle ausgeht.



Zu Methode a) eignet sich ein Versuchsaufbau unter Verwendung einer Leuchtdiode, der im Abschnitt Elektronisches Verfahren genauer erläutert wird.

Bei Methode b) verwendet man gewöhnlich eine Kerr- oder Pockelszelle um ein Lichtsignal zu modulieren.

Beide Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

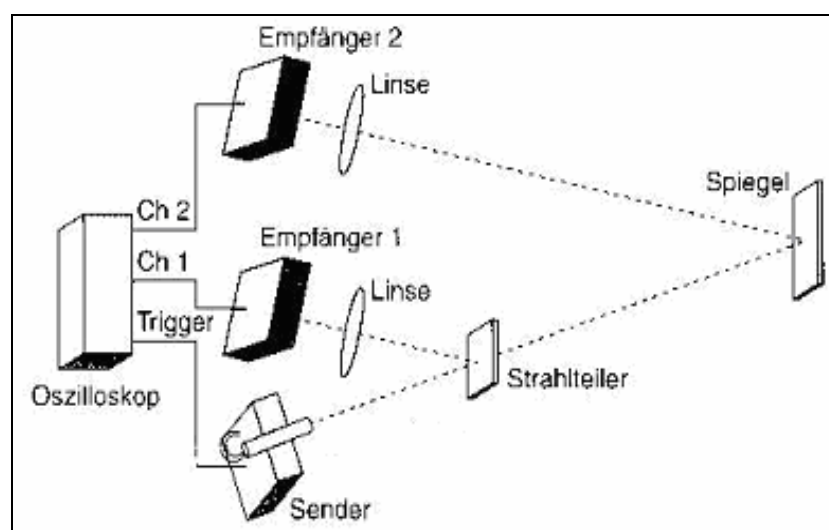
#### 4.1 Elektronisches Verfahren

Eine einfachere elektronische Methode zur Messung der Lichtgeschwindigkeit, die auch in der Schule oder Universität durchgeführt werden kann, ist die sogenannte Triggermethode. Bei diesem Verfahren kann durch Einsatz von Elektronik die Lichtgeschwindigkeit leicht bestimmt werden.

Als Lichtquelle wird bei diesem Versuch eine Leuchtdiode (LED) verwendet. Zur Erzeugung von kurzen Lichtimpulsen mit hoher Frequenz, wird die LED an eine Wechselspannung angeschlossen. Durch eine anliegende sinusförmige Wechselspannung entsteht auch eine sinusförmig schwankende Helligkeit an der Leuchtdiode. Die Helligkeitsschwankungen sind wiederum von der Wiederholfrequenz der Spannung abhängig. Das vom Sender, der LED, ausgesandte Licht wird durch einen Strahlteiler geteilt.

Ein Teil des Lichts wird dabei auf eine Linse reflektiert, die das ankommende Licht bündelt und auf einen Empfänger fokussiert.

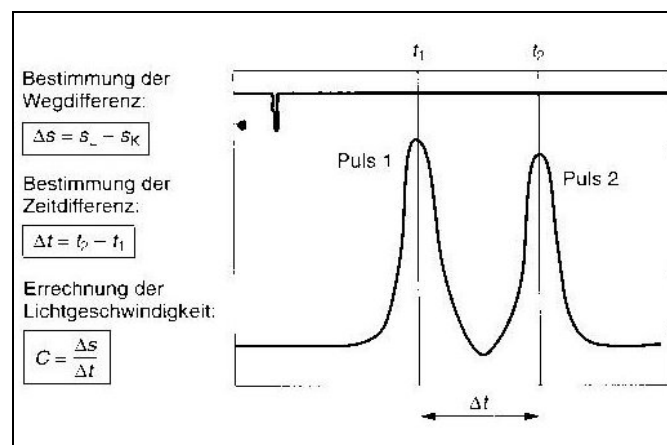
**Abbildung 3:**  
Prinzipskizze des  
Versuchsaufbaus



Als Empfänger dient eine schnelle Fotodiode, die die eintreffenden kurzen Lichtimpulse in eine sinusförmige Spannungsschwankung umsetzt. Diese Spannungsschwankung an der Fotodiode ist proportional zur Beleuchtungsspannung. Die Diode wird mit einem Oszilloskop verbunden, auf dem die Schwankungen dargestellt werden.

Der andere Teil des Lichts, der den Strahlteiler passiert, wird an einem entfernten Spiegel auf einen weitem Empfänger reflektiert. Dieser wird auch mit dem Oszilloskop verbunden. (siehe Abbildung 3)

Der für die Berechnung relevante Wert der Weglänge  $\Delta s$  kann gemessen werden. Zum passieren der beiden Weglängen benötigt das Licht unterschiedlich lange. Diese Zeitdifferenz  $\Delta t$ , kann über das Oszilloskop bestimmt werden. Denn die Kurve des ersten Empfängers ist gegenüber der Kurve des zweiten Empfängers auf dem Oszilloskop verschoben. Aus der Verschiebung kann man mit der Beziehung  $\Delta t = t_2 - t_1$  die Zeitdifferenz bestimmen.



**Abbildung 4:** Bild am Oszilloskop, das zur Versuchsauswertung dient

Aus der bestimmten Zeitdifferenz  $\Delta t$  und der gemessenen Wegdifferenz  $\Delta s$  kann mit

der Formel  $v = c = \frac{\Delta s}{\Delta t}$  ein Wert für die Lichtgeschwindigkeit

errechnet werden.

Führt man mit dieser Versuchsanordnung Messungen durch, so erhält man ungefähr einen Wert  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  für die Lichtgeschwindigkeit.

Die wohl größten Fehlerquellen bei dieser Anordnung sind zum einen die Ablesungenauigkeit am Oszilloskop und zum anderen die ungenaue Längenmessung, aus dessen Daten die Lichtgeschwindigkeit berechnet wird. [7]

## 4.2 Kerr – Zelle

Bei modernen elektronischen Verfahren zur direkten Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, kann man in der Regel verschiedene Methoden zur Modulation des Lichtes verwenden. Eine oft gewählte Möglichkeit ist die Verwendung einer Kerr - Zelle.

Der schottische Physiker John Kerr (1824-1907), entdeckte 1875 den ersten elektrooptischen Effekt, den Kerr-Effekt. Dieser bezeichnet die Tatsache, dass einige Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Nitrobenzol doppelbrechend wirken, wenn sie sich in einem starken elektrischen Feld befinden. Gelangt linear polarisiertes Licht senkrecht durch ein solches Feld, so wird es im allgemeinen elliptisch polarisiert.

Einen entsprechenden Versuchsaufbau, bei dem ein Kondensator in einer Flüssigkeit ein elektrisches Feld erzeugt nennt man Kerr-Zelle.

Setzt man vor eine solche Vorrichtung eine Polarisationsfolie und danach eine, deren Durchlassebene um  $90^\circ$  verschoben ist, kann nur elliptisch polarisiertes Licht durch den zweiten Polarisator gelangen.

Legt man an die Kondensatorplatten eine Gleichspannung an, so wird das Licht beim durchlaufen der Zelle elliptisch polarisiert. Das heißt, es kann durch den zweiten Polarisator dringen. Wird aber eine Wechselspannung an die Platten angelegt, so kann damit der Lichtstrahl zerkleinert werden.

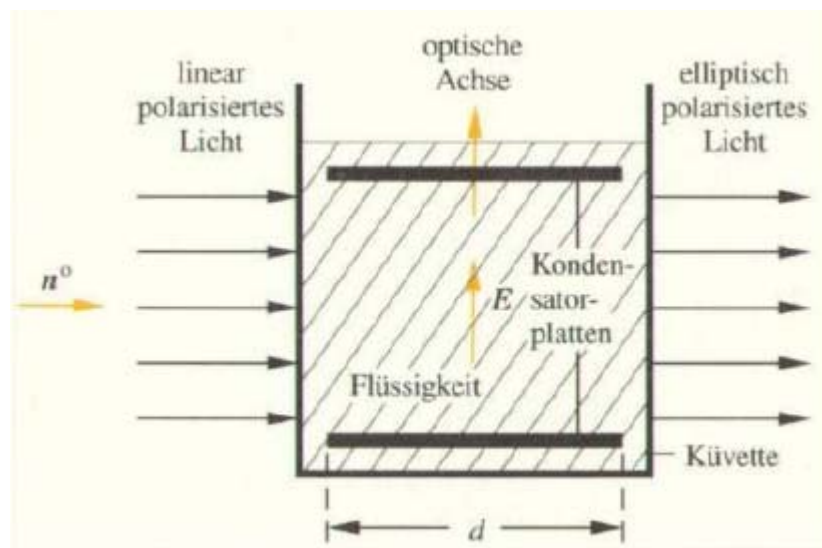


Abbildung 5: Schema einer Kerr-Zelle

Mit dieser Eigenschaft ersetzte die Kerr-Zelle unter anderem das Zahnrad bei Fizeaus Messungen der Lichtgeschwindigkeit. Ein großer Vorteil dieses elektrooptischen Schalters ist, dass sich damit viel kürzere Lichtimpulse erzeugen lassen.

Das Prinzip zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit bleibt erhalten, nur dass zur Modulation des Lichtes eine Kerr-Zelle verwendet wird, bevor das Licht einen bestimmten Weg zu einem Detektor zurücklegt. Die Modulationsphase des ankommenden Lichts wird mit der Modulationsphase des ursprünglichen Lichts verglichen. Aus der Zeitdifferenz  $\Delta t$  und der bekannten Strecke  $\Delta s$  kann die Lichtgeschwindigkeit  $c$  berechnet werden. (vgl. Prinzip des Elektronischen Verfahrens, S. 8)

Doch bei dieser einfacheren Messung ergeben sich zwei größere Fehlerquellen. Zum einen die ungenaue Bestimmung des Lichtweges und zum anderen, dass die Phase der sinusförmigen Kurve nicht exakt bestimmt werden kann.

Diese beiden Fehlerquellen können reduziert werden, indem man einerseits einen kurzen und einen langen Lichtweg benutzt und daraus die Differenz exakt bestimmt. Die zweite Fehlerquelle wird verringert, indem man einen empfindlichen Phasendetektor (oder Nulldetektor) zur Messung verwendet. Somit wird die relative Messung der Phase umgangen. Mit diesem zusätzlichen, technischen Bauteil ist es möglich die Zeitdifferenz genauer zu bestimmen.

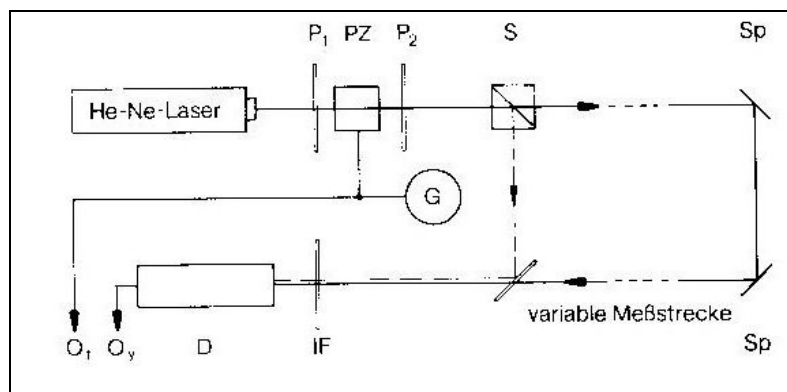
Bei genauen Messungen mit solch einer Versuchsanordnung erhielt der Wissenschaftler V. Bergstrand einen Wert von 299 792,1 km/s für die Lichtgeschwindigkeit.[8]

### **4.3 Pockels – Zelle**

Nach der Entdeckung des Kerr-Effekts, mit dem kurze Lichtimpulse erzeugt werden können, fand der deutsche Physiker F. Pockels (1865-1913) 1893 einen weiteren elektrooptischen Effekt. Der nach dem Wissenschaftler benannte Pockels – Effekt kann auch sehr kurze Lichtimpulse erzeugen und eignet sich deshalb ebenfalls zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.

Als Lichtquelle ist es von Vorteil bei diesem Experiment einen He-Ne-Laser zu benutzen. Durch dessen gute Qualität können unter anderem größere Wegstrecken verwendet werden. Zur Modulation dieses Lichtstrahles wird eine Pockels - Zelle ( $PZ$ ) eingesetzt mit der sehr kurze Lichtimpulse erzeugt werden können.

Dieser elektrooptischer Schalter kann Lichtimpulse der Dauer von 1,5 Nanosekunden erzeugen. Dabei wird in der Zelle die Polarisationssebene durch ein anliegendes elektromagnetisches Feld kurzzeitig gedreht, wodurch die Zelle für den Laser durchlässig wird. Das Lichtbündel wird teilweise an einem halbdurchlässigen Spiegel ( $S$ ) auf einen Empfänger ( $D$ ), einen Photomultiplier<sup>1</sup>, reflektiert.



**Abbildung 6:** Versuchsapparatur unter Verwendung der Pockels-Zelle  
 $P_1, P_2$  = Polarisatoren;  $PZ$  = Pockels-Zelle;  
 $S, Sp$  = Spiegel;  $G$  = Impulsgenerator (nicht relevant);  
 $O_1, O_2$  = Eingänge des Oszilloskops

Das auftreffende Licht erzeugt ein Signal, das auf einem Oszilloskop dargestellt wird. Teile des Lichts lässt der halbdurchlässige Spiegel ( $S$ ) durch, welches in einiger Entfernung an einem weiteren Spiegel ( $Sp$ ) auf den Empfänger reflektiert wird. Dabei wird im Multiplier ( $D$ ) wiederum ein Signal erzeugt, das auch auf dem Leuchtschirm dargestellt wird.

Die Bestimmung des Weges  $\Delta s$  scheint keine größeren Probleme zu machen.

Die notwendige Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  kann man über das Oszilloskop ermitteln. Dazu wird die Phasendifferenz  $\Delta v$  des in die Messstrecke eintretenden Signals mit dem des austretenden, verglichen:

$$x(t) = x_0 \cdot \cos \omega t$$

$$y(t) = y_0 \cdot \cos (\omega t - \Delta v)$$

$x$  = Signalausschlag bei Eintritt in die Messstrecke

$y$  = Signalausschlag bei Austritt aus der Messstrecke

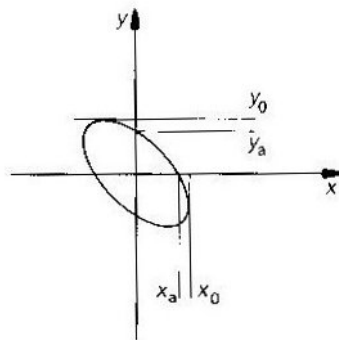
$\omega$  = Modulationskreisfrequenz

Die Phasendifferenz  $\Delta v$  kann durch simultane Darstellung des Empfängersignals auf dem Oszilloskop recht genau bestimmt werden. Je nach Phasendifferenz erhält man unterschiedliche Ellipsen, ganz selten Kreise oder Geraden.

Aus den Achsenabschnitten kann man die Phasendifferenz im Winkelmaß bestimmen:

$$\Delta v = \arcsin\left(\frac{x_a}{x_0}\right) = \arcsin\left(\frac{y_a}{y_0}\right)$$

$x_a$ ;  $y_a$  sind Achsenschnittpunkte der Ellipse  
 $x_0$ ;  $y_0$  sind die maximale Auslenkung



**Abbildung 7:** Bild am Oszilloskop;  
 $x_a$ ;  $y_a$  sind Achsenschnittpunkte  
 $x_0$ ;  $y_0$  sind die maximale Auslenkung

Die Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  kann aus der oben bestimmten Phasendifferenz  $\Delta v$  und der Kreismodulationsfrequenz  $\omega$  (welche bekannt sein muss), über die Beziehung:

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{\omega}$$

ermittelt werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts  $c$  kann als Quotient aus Weglänge  $\Delta s$  und der dafür benötigten Zeit  $\Delta t$  berechnet werden.

Das beschriebene Verfahren eignet sich gut für kürzere Messstrecken. Das heißt es kann die Lichtgeschwindigkeit nicht nur in Luft, sondern auch in anderen Medien bestimmt werden.

Man kann daraus auch das Brechzahlverhältnis  $n_2/n_1$  als Quotient zweier Geschwindigkeiten  $c_2/c_1$  ermitteln, mit der sich elektromagnetische Wellen in zwei verschiedenen Medien fortbewegen. [9]

#### 4.4 Hohlraumresonator

Eine weitere Möglichkeit die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen, ist die Methode mit Hilfe des Hohlraumresonators. Das Prinzip dieser Methode basiert auf der Messung der Wellenlänge  $\lambda$  und der Bestimmung der Frequenz  $f$  von Mikrowellenstrahlung. Aus diesen beiden Werten kann die Lichtgeschwindigkeit  $c$  aus der Beziehung  $c = \lambda \cdot f$  berechnet werden.

Eine direkte Bestimmung der Wellenlänge im ‚freien Raum‘ ist jedoch schwierig, da die Wellenlänge zum einen durch den Brechungsindex  $n$  verändert wird und zum anderen viele kleinere Faktoren eine beträchtliche Abweichung hervorrufen würden. Um dies zu umgehen, kann man die Wellenlänge mit Hilfe eines *evakuierten* Hohlraumresonators bestimmen.

(Es gilt  $v_p = v_G$ , da der Hohlraum evakuiert ist)

Ausgehend von der folgenden Beziehung kann die Wellenlänge im freien Raum ermittelt werden:

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda_G^2} + \frac{1}{\lambda_p^2} \quad (1)$$

( $\lambda$  für den freien Raum;  $\lambda_G$  für den Hohlleiter;  $\lambda_p$  als kritische Wellenlänge des Hohlleiters)

Für den Hohlleiter wiederum gilt die Beziehung:

$$L = \frac{n \cdot \lambda_G}{2} \quad (2)$$

( $L$  ist die Länge des Hohlleiters, die exakt ermittelt werden kann und  $n$  ist eine ganze Zahl)

Mit der Gleichung (2) kann  $\lambda_G$  ermittelt werden und setzt man diesen Wert in Gleichung (1) ein, so kann auch die Wellenlänge  $\lambda$  berechnet werden.

Bestimmt man nun noch die Frequenz  $f$ , so kann über die Gleichung  $c = \lambda \cdot f$ , die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts berechnet werden.

Zur Bestimmung von  $f$  wird die Frequenz am Hohlraumresonator solange variiert, bis sie der Resonanzfrequenz des Hohlleiters entspricht. Bei diesem Wert zeigt das angeschlossene Messinstrument im Empfänger ein starkes Anwachsen der Amplitude des Signals an. Diese Frequenz wird dann mit einem sogenannten Überlagerungs-Wellenmesser gemessen.

Vor der Versuchsdurchführung kann frei gewählt werden, ob man einen festen Hohlraumresonator verwendet und die Frequenz bis zum Resonanzfall variiert, oder eine feste Frequenz wählt und die Größe des Hohlraumes verändert. Bei der Durchführung des Experiments wird meist erstere Methode benutzt.

Die beiden Wissenschaftler, L. Essen und A. C. Gordon-Smith, die diesen Versuch durchführten, erhielten nach unzähligen Versuchen mit solch einer Apparatur einen relativen Wert von  $c = (299\,792 \pm 9) \text{ km/s}$ . [10]

## **5 Indirekte Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit der Entdeckung nach Maxwell**

Eine indirekte Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit fand der Physiker James Clark Maxwell (1831-1879), als er das empirische Wissen auf dem Gebiet der Elektrizität und des Magnetismus zusammenfasste. Resultat war ein einziger Satz mathematischer Gleichungen.

Maxwell erkannte bereits dass sich jede elektromagnetische Welle mit einer bestimmten Geschwindigkeit ausbreitet. Außerdem erkannte er, das Licht und elektromagnetische Wellen von gleicher Natur sind. Auf diese Erkenntnis hin, leitete er einen Ausdruck für die Lichtgeschwindigkeit aus seinen Gleichungen her.

In diesen Term: 
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

gehen die bereits bekannten elektrischen und magnetischen Eigenschaften eines Mediums ein. Aus dem festgelegten Wert  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ , der Permeabilität und der Dielektizität  $\epsilon_0$ , die gemessen werden muss, kann die Lichtgeschwindigkeit berechnet werden. [11]



## 6 Genaueste Messung der Lichtgeschwindigkeit

Mit den bisher beschriebenen Methoden kann die Lichtgeschwindigkeit zwar bestimmt werden, doch sind die erhaltenen Werte nicht sehr exakt.

Die weitaus genaueste Messung der Lichtgeschwindigkeit erfolgte 1972 in den USA. Dabei erhielten zwei unabhängige Forscherteams auf verschiedenen Wegen gleiche Werte, die innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmten.

Bei beiden Versuchen zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit wurde jeweils das Produkt von Wellenlänge  $\lambda$  und der Frequenz  $f$  berechnet.

Der Versuch der Forschergruppe (um Barger und Hall) bestand aus der Bestimmung der Wellenlänge  $\lambda$  und der Frequenz  $f$  der Lichtquelle, eines He-Ne-Lasers. Bei dieser Versuchsanordnung wird der Laser an eine Absorptionszelle<sup>1</sup> gekoppelt, die Methan enthält. Dabei wird die Eigenschaft ausgenutzt, dass Methan bei  $3,39 \mu\text{m}$  ( $88 \text{ THz}$ ) eine Absorptionslinie besitzt.

Die Wellenlänge  $\lambda$ , und somit auch die Frequenz  $f$  des Lasers stellt man sehr genau auf die Methanlinie bei  $3,39 \mu\text{m}$  ein.

Für die Frequenz ergibt sich dort eine geringe sogenannte Frequenzbreite, wodurch die Wellenlänge sehr genau auf die Methanlinie abgestimmt werden kann.

Die Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers wird mit Hilfe eines Fabry-Perot-Interferometers<sup>2</sup> auf kompliziertem Wege gemessen.

Die Frequenz  $f$ , des auf die Methanlinie geregelten Lasers, konnte durch abgleichen mit der Standardfrequenz, also mit der international festgelegten Einheit Sekunde, ermittelt werden.

*„Das Produkt der Wellenlänge und der Frequenz [dieser Messung] hat im Jahre 1972 den bis jetzt genauesten Wert der Lichtgeschwindigkeit ergeben:“*

$$c = (299\,792,458 \pm 1,2) \text{ km/s}$$

*(Optik, Bergmann/Schaefer, S. 196)*

Diese äußerst moderne Art der Präzisionsmessung stellt höchste Anforderungen an die Experimentiertechnik dar.

Die wohl größte Fehlerquelle dieses Versuchs ist die Genauigkeit, beziehungsweise Ungenauigkeit mit der das Längennormals definiert ist. [12]

## 7 Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit als Naturkonstante

Bei den Messungen der Lichtgeschwindigkeit strebte man in den letzten Jahrzehnten immer genauere Werte an. Jedoch führte jede Veränderung im Messergebnis zu einer Änderung der Längeneinheit. „Denn ‚1 Meter‘ und ‚1 Sekunde‘ sind über die Lichtgeschwindigkeit miteinander verknüpft.“ (*Impulse Physik*, S. 203)

Im Jahre 1983 wurde eine neue Definition des Längennormals beschlossen und hierfür ein exakter Wert der Lichtgeschwindigkeit festgelegt:  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ . Aus der Lichtgeschwindigkeit und der Zeiteinheit Sekunde leitet sich die Basiseinheit Meter ab. Ein Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Zeit  $(1/299792458)\text{s}$  durchläuft.

Außerdem spielt der Wert der Lichtgeschwindigkeit in Einsteins berühmter Formel  $E = m \cdot c^2$ , bei der Bestimmung von Energien, eine wichtige Rolle.

Anstelle von Messungen der Lichtgeschwindigkeit misst man heutzutage Strecken mit der Lichtgeschwindigkeit. Dabei wird die Zeit gemessen, die der Lichtimpuls von seiner Aussendung bis zu seiner Rückkehr nach Reflexion an einem Spiegel, benötigt. Aus der festgelegten Geschwindigkeit des Lichts  $c$  und dem Zeitintervall  $\Delta t$ , das der Lichtstrahl benötigt den Weg zurückzulegen, kann man die Weglänge  $\Delta s$  berechnen. [13]

## **8 Ausblick: Zukünftige Messung der Lichtgeschwindigkeit**

Aus den verschiedenen Versuchen zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit erkennt man, dass sich die Methoden mit der Zeit grundlegend verändert haben.

Von der einstigen Zeit-Weg-Bestimmung eines Lichtstrahles bewegte man sich weg und wendete sich der Frequenz und Wellenlängenbestimmung zu. Diese Entwicklung wird sich auch zukünftig fortsetzen. Durch den Fortschritt in der Technik können Wellenlängen immer genauer bestimmen werden. Das wiederum hat zur Folge, dass der Wert der Lichtgeschwindigkeit immer exakter bestimmt werden kann.

Ist die Geschwindigkeit des Lichts genauer bekannt, werden auch Längen und Abstandsmessungen, die mit Hilfe eines Lichtstrahls bestimmt werden, immer genauer.

Dies ist ein weiterer grundlegender Aspekt, der zur Annahme führt, dass der Wert der Lichtgeschwindigkeit keine abgeschlossene Sache ist.

## 9 Literaturangaben

### Fachbücher:

- 1) O. Höfling, Lexikon der Schulphysik – Optik und Relativitätstheorie, Aulis Verlag Deubner & CO KG
- 2) F. Pedrotti, Optik für Ingenieure, Springer Verlag, 2. Auflage
- 3) E. Hecht, Optik, Oldenbourg Verlag, 3. Auflage
- 4) J. H. Sanders, Die Lichtgeschwindigkeit - Einführung und Originaltexte, Akademie-Verlag Berlin
- 5) Bergmann/Schaeffer, Optik - Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3, Walter de Gruyter Verlag, 9. Auflage
- 6) Müller/Leitner/Dilg/Mraz, Physik Leistungskurs 2. Semester, Ehrenwirth Verlag, 8. Auflage
- 7) W. Kuhn, Handbuch der experimentellen Physik Band 4/1, Aulis Verlag Deubner & CO KG
- 8) W. Bredthauer, Impulse Physik-Oberstufe, Klett Verlag, 1. Auflage

### Zeitschriften:

- 1) D. Klein, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Aulis Verlag Deubner, Heft 8/52 1. Dez. 2003 52. Jahrgang

## 10 Bilderverzeichnis

- Abb. 1: Oliver Benson, Experimentalphysik 3,  
in <http://www.physik.hu-berlin.de/nano1>, aufgerufen am 10.1.2008
- Abb. 2: [http://www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web\\_ph09/versuche/09lichtgeschwindigkeit/fizeau/fizeau1.htm](http://www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph09/versuche/09lichtgeschwindigkeit/fizeau/fizeau1.htm), aufgerufen am 17.10.2007
- Abb. 3: D. Klein, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Aulis Verlag Deubner, Heft 8/52 1. Dez. 2003 52. Jahrgang, S. 22

Abb. 4: D. Klein, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Aulis Verlag Deubner, Heft 8/52 1. Dez. 2003 52. Jahrgang, S. 26

Abb. 5: Messung der Lichtgeschwindigkeit in  
<http://www.hausarbeiten.de/faecher/hausarbeit/phy/15070.html>,  
aufgerufen am 17.1.2008

Abb. 6: W. Kuhn, Handbuch der experimentellen Physik – Optik – Band 4/1  
Aulis Verlag Deubner & CO KG, S. 79

Abb. 7: W. Kuhn, Handbuch der experimentellen Physik – Optik – Band 4/1  
Aulis Verlag Deubner & CO KG, S. 80

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt habe und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den .....

.....

Unterschrift des Schülers