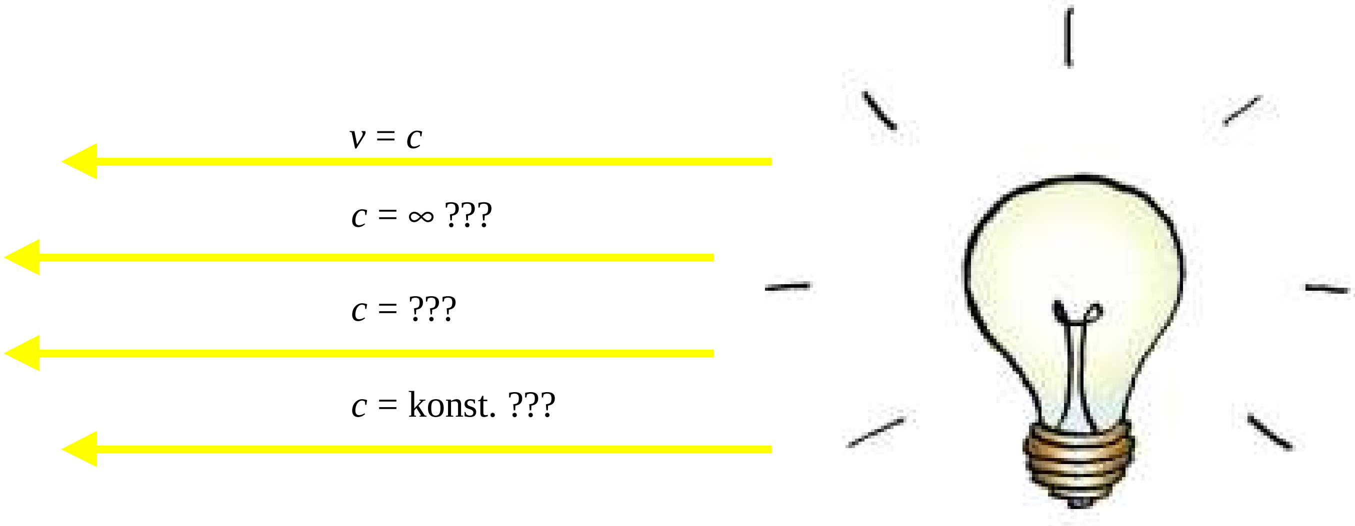


Licht – konstant schnell!?

Facharbeit von Lukas Janssen
Immanuel-Kant-Gymnasium Heiligenhaus

Jahrgangstufe 12
Schuljahr 2001/2002

INHALT

VORWORT

Nichts ist schneller als das Licht. Mit rund 300.000 Kilometern in der Sekunde ist die Lichtgeschwindigkeit das absolute Limit im Universum, sowohl für Materie wie auch für Strahlung und Information. Doch wie kam man auf diese über unser „normales“ Verständnis hinausgehende Behauptung und wie hat man sie bewiesen? Wenn ich irgendwo eine Taschenlampe einschalte, erhellt das Licht doch sofort den ganzen Raum, und nicht erst nach einer Verzögerung, oder etwa nicht!? Wie breitet sich das Licht überhaupt aus? Gibt es Lichtteilchen oder wird das Licht in einer Form von Wellen „weitergegeben“? Angenommen, das Licht hätte keine unendliche Geschwindigkeit, wie könnte man diese Geschwindigkeit dann messen?

Diese und die sich daraus ergebenen Fragen möchte ich im Folgenden versuchen zu beantworten. Dabei möchte ich vor allem auch historische Blickwinkel betrachten, von mir qualitativ und auch quantitativ durchgeführte Experimente erläutern und erklären und den Wandel der Physik in Bezug auf die Lichtgeschwindigkeit in Ansätzen darstellen.

Der Titel „Licht – konstant schnell!?“ soll sowohl den interessierten Laien als auch den schon recht informierten Fachmann ansprechen.
Für ersteren birgt der Titel eine gewisse Spannung. Vielleicht hat er schon von einer äußerst schnellen Lichtgeschwindigkeit gehört, das Wörtchen „konstant“ jedoch kann er sich nicht erklären. Er möchte wissen, was es damit auf sich hat und beginnt die Arbeit zu lesen.
Auch dem Fachmann wird dieser Titel jedoch gerecht. Er erwartet eine möglichst große Anzahl von Informationen auf kleinsten Raum durch den Titel. Dabei ist es ihm wichtig, dass er sich auf dieser Informationssuche ein möglichst genaues Bild von einem Dokument machen kann.
Dieser Leser weiß sofort, was mit einem „konstant schnellem Licht“ gemeint ist, und kann sich dadurch fundiert entscheiden, ob sich die Lektüre dieser Arbeit für ihn lohnt.

Abbreviaturen

Formelzeichen	Einheit	Erklärung
c, c_0	$m \cdot s^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit, Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
f	m	Brennweite
f	Hz	Frequenz
l	m	Länge (*hier:* Entfernung Drehspiegel – Endspiegel)
λ	m	Wellenlänge
m		*hier:* Anzahl der Interferenzmaxima
n		Brechungsindex
ν	Hz	Frequenz
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit (*hier:* des Drehspiegels)
r	m	Radius (*hier:* Entfernung Drehspiegel – Strahlteiler)
s	m	Strecke
t	s	Zeit
v	$m \cdot s^{-1}$	Geschwindigkeit

Erläuterung zum Literaturverzeichnis

Die in Klammern an die Absätze angefügten Zahlen beziehen sich auf die im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen. (s.a. Erklärung über die selbständige Anfertigung der Arbeit, Seite 19)

DIE ENDLICHKEIT DER LICHTGESCHWINDIGKEIT

Hypothesen zur Lichtgeschwindigkeit und erste Versuche zur Messung

Während in der Antike von den Philosophen und Wissenschaftlern, ausgelöst von Aristoteles einstimmig angenommen wurde, dass das Licht sich mit einer unendlichen Geschwindigkeit ausbreite, also ohne Verzögerung an jedem Ziel unabhängig der Entfernung ankommen würde, wurde schon zu Beginn des 17. Jahrhunderts von Galileo Galilei vermutet, dass sich das Licht mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreitet.

Bild 4.1: Versuch zur Messung von c

Um seine Hypothese experimentell zu bestätigen, stellte er zwei Personen auf voneinander entfernte Bodenerhebungen auf. Beide trugen Lampen mit sich, die vorerst mit der Hand verdeckt wurden. Zunächst sollte einer der beiden die Hand von der Lampe nehmen. Sobald der andere auf dem anderen Hügel das Licht gesehen hat, sollte er die Hand von seiner Lampe nehmen. Um grobe Fehler durch die Reaktionszeit der Personen zu umgehen, veränderte Galilei den Abstand bis hin zu für ihn recht großen Abständen. Wenn die Zeit, bis die Person, die als erstes die Hand von ihrer Lampe genommen hat, das Licht der anderen Person sieht, sich bei größerer Entfernung deutlich vergrößert hätte, könnte Galilei hieraus auf eine Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit schließen. Wegen der, wie wir heute wissen, zu großen Lichtgeschwindigkeit, mißlang dieses Experiment aber. (3) (14)

Messung der Lichtgeschwindigkeit durch astronomische Beobachtungen

Ole Römer war 1675 der erste, der experimentell die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit feststellte und sie wenig später auch berechnete. Der dänische Astronom beobachtete mit Hilfe eines astronomischen Fernrohres die Bewegung der vier bis dahin bekannten Jupitermonde, speziell den Jupitermond Io. Er stellte dabei die Zeit fest, die Io benötigte, um sich einmal um den Jupiter zu drehen. Zu beobachten war, wann er in den Schatten des Jupiter eintrat bzw. auch wieder hinaustrat. Es war also möglich die Dauer einer Periode z.B. durch Messen der Zeit zwischen dem ersten Eintritt Ios und der Wiederholung dieses Vorgangs, festzustellen.
Römer maß eine Periodendauer des Io von 42½ Stunden, das heißt dass dieser Jupitermond genau 42½ Stunden braucht um den Jupiter einmal zu umkreisen. Da er davon ausging dass sich Io annähernd mit einer gleichförmigen Bewegung bewegt, konnte er aus der Periodendauer einen „Fahrplan"erstellen, um stets den genauen Stand von Io berechnen zu können.
Als er nach einiger Zeit wieder durch sein Fernrohr sah, beobachtete er, dass Io nicht mehr zu der berechneten Zeit hinter Jupiter verschwand, sondern ein wenig später. Er benötigte zwar immer noch jeweils genau 42½ Stunden für eine Umdrehung, aber die berechneten Zeiten für den Eintritt stimmten einfach nicht mehr.

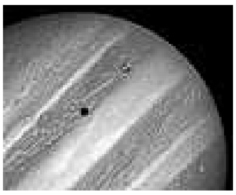
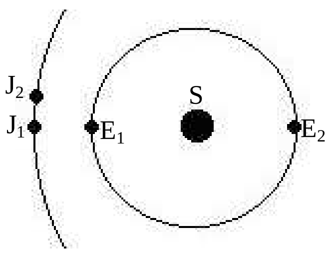


Bild 4.2: Jupiter und Io (Satellitenphoto)

Die Verspätung des Io nahm immer mehr zu, bis sie nach einem halben Jahr etwa 1000 Sekunden betrug. Nach dem halben Jahr nahm die Verspätung wieder ab, und als Römer nach einem weiteren halben Jahr durch sein Fernrohr schaute, stimmte sein „Fahrplan"mit den Beobachtungen wieder überein.
Der Grund für diese Verspätung, so fand Römer heraus, konnte nur sein, dass das Licht für die sich ändernden Entfernung zwischen dem Beobachter auf der Erde und dem Jupiter (bzw. Jupitermonden) verschiedene Laufzeiten hätte, das Licht also eine endliche Geschwindigkeit hätte. Das Licht benötigt also mehr Zeit von Io zur Erde, wenn jener weiter entfernt zur Erde steht. Deswegen scheint für den Beobachter auf der Erde Io später in den Jupiterschatten einzutreten.
Die Veränderung der Entfernung zwischen Jupiter und Erde lässt sich annähernd durch

$\Delta s = 2\, s_{Sonne\text{-}Erde}$

bestimmen, da die Periodendauer des Jupiters ($T_{Jupiter}$ = 4329d) gegenüber der Periodendauer der Erde (T_{Erde} = 365d) verhältnismäßig groß ist, und damit annähernd von einem ruhendem Jupiter ausgegangen werden kann.



$$\begin{aligned}\Delta s &= s_{E2\text{-}J2} - s_{E1\text{-}J1}\\ &\approx s_{E2\text{-}J1} - s_{E1\text{-}J1} \qquad \Rightarrow \text{ da sich in } T_{Erde} \text{ der Jupiter kaum bewegt}\\ &= s_{E2\text{-}E1} + s_{E1\text{-}J1} - s_{E1\text{-}J1}\\ &= s_{E2\text{-}E1}\\ &= 2\, s_{Sonne\text{-}Erde}\end{aligned}$$

$$v_{Licht} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \approx \frac{2\, s_{Sonne\text{-}Erde}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 149{,}6 \cdot 10^9 \text{ m}}{1000 \text{ s}} = 2{,}992 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der heute ermittelte Wert liegt bei $2{,}99792485 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Mit Römers Methode könnte man also die Lichtgeschwindigkeit bis auf eine erstaunliche Genauigkeit von lediglich 0,2% Fehler berechnen (trotz Vernachlässigung der Bewegung des Jupiters!). Da Ole Römer jedoch keine genauen Werte der Entfernung zwischen Erde und Sonne besaß und für ihn die Verspätung des Io nicht leicht zu messen war, errechnete er die Lichtgeschwindigkeit mit einem Fehler von etwa 25%, er erhielt nämlich für das Licht eine Geschwindigkeit von $2{,}25 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Aber hiermit war erstmals in der

Geschichte der Physik die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit mit Hilfe einer Beobachtung nachgewiesen worden, und sogar quantitativ, wenn auch mit sehr geringer Genauigkeit, festgestellt worden. (14)

James Bradley entdeckte 1728 die Aberration des Lichtes und konnte die Lichtgeschwindigkeit mit einem erstaunlich geringen Fehler von weniger als 1% ermitteln.
Bei einer Beobachtung eines Stern stellte Bradley nämlich eine Verschiebung des Sternenbildes fest. Er erklärte diesen Sachverhalt damit, dass sich das Fernrohr im System des Sterns mit der Geschwindigkeit der Erde bewegt, und dann das einfallende Licht im Fernrohr abgelenkt wird. Wenig später mass Bradley auch den Winkel um den das Bild verschoben war (in Bild 2.2 ∢B‘OB) bei einer Geschwindigkeit des Fernrohrs von $v_{Fernrohr} = 29{,}77 \cdot 10^3\ \frac{m}{s}$ (Geschwindigkeit der Erde) und bestimmte damit die Lichtgeschwindigkeit zu $c = 2{,}98 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Dieser Winkel war nämlich genau der Winkel, um den man das Fernrohr neigen musste, damit der Punkt B‘ wieder auf B lag. Nach der Veröffentlichung von Bradleys Arbeiten stand die Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit für die Astronomie fest und Römers Theorie wurde schließlich allgemein akzeptiert. Es dauerte aber noch über 100 Jahre, bis man feststellte, dass Licht nichts anderes als eine Form von elektromagnetischen Wellen ist und es damit gelang, zwei große Teilgebiete der Physik, nämlich das der Optik und das der E-Lehre zu vereinen. Die deutschen Physiker Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch und Wilhelm Eduard Weber bestimmten 1856 mit Hilfe der berühmten Maxwellschen Gleichungen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen und stellten eine Übereinstimmung mit der Lichtgeschwindigkeit fest. Der Begründer jener Gleichungen, der britische Physiker James Clerke Maxwell leitete zusätzlich, ausgehend seiner Gleichungen, die bedeutsame Beziehung zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der magnetischen und elektrischen Feldkonstante her, welche demnach auch für alle elektromagnetischen Wellen gilt.

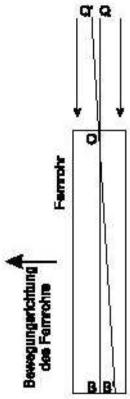


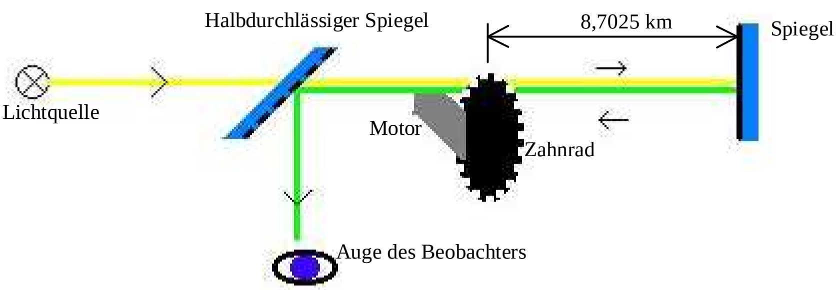
Bild 2.2: Aberration des Lichtes

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}}$$

Die Besonderheit dieser Konstanten und deren Bedeutung wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch genauer behandelt. (11) (24)

Erste terrestrische Messung der Lichtgeschwindigkeit mit der Zahnradmethode

174 Jahre später im Jahre 1849 wurde von dem französischem Physiker Armand Hippolyte Louis Fizeau eine neue Möglichkeit zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit entwickelt. Es war das erste Mal, dass die Lichtgeschwindigkeit terrestrisch, also auf der Erde gemessen wurde. Dazu errichtete Fizeau auf einem Hügel eine Lichtquelle, deren Licht von einem auf einem etwa 8,7 km entfernten Hügel befindlichen Spiegel reflektiert wurde. Vor die Lichtquelle wurde eine Glasscheibe als „halbdurchlässiger“Spiegel im 45°-Winkel zu den Lichtstrahlen angebracht, so dass man das Licht, das vom Spiegel zurückkam beobachten konnte.
Hinter dem Spiegel baute Fizeau ein Zahnrad auf, welches man mit einer Dampfmaschine in Drehung versetzen konnte.



Dreht sich das Zahnrad nicht oder langsam, passiert das auf den Spiegel einfallende und das von ihm reflektierte Licht die gleiche Zahnlücke. Dreht sich das Zahnrad relativ schnell trifft das reflektierte Licht auf den auf die Lücke, die es auf dem Hinweg passiert hat, folgenden Zahn. In das Auge des Beobachters trifft kein Licht. Erhöht man nun erneut, genauer verdoppelt man die Drehgeschwindigkeit, dann passiert das Licht die auf die Lücke, die es auf dem Hinweg passiert hat, folgende Lücke.
Dies soll hier aber nicht geschehen: In der Zeit, in der das Licht die Strecke von Zahnrad zum Spiegel und wieder zurück hinter sich legt, soll sich das Zahnrad von der einen Lücke zum nächsten Zahn bewegen. Das Licht trifft also auf dem Rückweg auf einen Zahn.
Das bedeute für Fizaeu, dass er die Winkelgeschwindigkeit ω des Zahnrades genauso einstellen musste, dass der Beobachter am halbdurchlässigen Spiegel kein Licht sieht. Hierbei war eine Frequenz des Zahnrades von $f = 12{,}5 \frac{1}{s}$ von

Nöten. Da das Zahnrad, das Fizeau benutzte aus jeweils 720 Lücken und Zähnen bestand, war die Zeit, in der sich das Rad um einen Zahn oder eine Lücke weiterdreht:

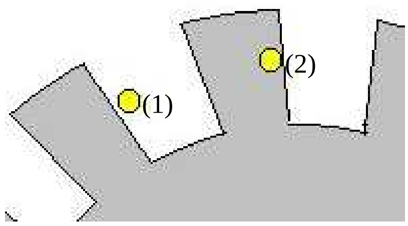
$$t = \frac{T}{2 \cdot 720} = \frac{1}{f \cdot 2 \cdot 720} = \frac{1}{12{,}5\,\mathrm{Hz} \cdot 1440} = 5{,}\overline{5} \cdot 10^{-5}\,\mathrm{s}$$

Und damit die Lichtgeschwindigkeit:

$$v_{Licht} = \frac{s}{t} = s \cdot f \cdot 2 \cdot 720 = 2 \cdot 8702{,}5\,\mathrm{m} \cdot 12{,}5\,\mathrm{Hz} \cdot 2 \cdot 720 = 3{,}13290 \cdot 10^{8}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Fizeau konnte damit also die Lichtgeschwindigkeit mit einem Fehler von weniger als 5% berechnen. Eine Fehlerquelle (wenn auch vielleicht geringfügige) beinhaltet wohl die Messung der Frequenz, weil sich das Zahnrad mit 12,5Hz ja recht schnell bewegt hat.

Nun wird vielleicht jemand auf die Idee kommen, dass sich ein größerer Fehler dadurch ergeben könnte, dass wie in nebenstehendem Bild gezeigt der Lichtstrahl auf dem Hinweg genau den linken Rand eines Loches passiert (1), und auf dem Rückweg zwar auf einen Zahn trifft, aber vielleicht auf der rechten Seite (2). Da der Abstand zwischen (1) und (2) dann (im ungünstigsten Fall) doppelt so groß wie von Fizeau angenommen, müsste man eine Toleranzgrenze des ermittelten Wertes von ±50% angeben.



Das würde für Fizeau bedeuteten, dass er möglichst genau den Abstand des Durchgangspunktes (am Zahnrad) eines „Lichtteilchens“ auf dem Hinweg zu dem Auftreffpunkt dieses „Lichtteilchens“ am nebenliegenden Zahn, berechnen müsste.
Dieser ist aber genau die Größe einer Lücke, wenn das komplette Licht einer Lichtstrecke, die ein Loch passiert hat, komplett auf einen Zahn trifft. Angenommen, Loch und Zahn sind gleich groß, bedeutet das, dass es nur genau eine Geschwindigkeit des Zahnrades gibt, bei dem überhaupt kein Licht in das Auge des Beobachters trifft, selbst wenn Zahn und Loch eine gewisse Breite haben. Der Fehler würde sich dann bei dieser recht schwierig auszulotenden Anordnung, auf Gleichheit der Größe der Zähne und Lücken beschränken.

Fehlerquelle	Fehler (Toleranzangabe)
Messung der Frequenz	± 2%
Gleichheit von Zahn und Lücke	± 5%
Toleranz des Ergebnisses	**±7,1%**

Das bedeutet für Fizaeu:

$$92{,}9\% \cdot c_{ermittelt} \leq c \leq 107{,}1\% \cdot c_{ermittelt}$$
$$2{,}91 \cdot 10^{8}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \leq c \leq 3{,}36 \cdot 10^{8}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Dabei bedeutet c die Lichtgeschwindigkeit (c ist die Abkürzung für constant *engl.* = konstant). Der Grund für die Wahl dieses Buchstabens wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch deutlich.

Diese doch auch schon für damalige Zeit recht dürftige Genauigkeit (im Verhältnis zu dem immensen Aufwand der betrieben wurde) zeigt, dass es Fizeau nicht darum ging eine quantitative Analyse durchzuführen, sondern zu beweisen, dass nicht nur in der Astronomie sondern auch auf der Erde eine Messung der Lichtgeschwindigkeit möglich ist. (1) (3) (11) (14) (20) (24)

Messung der Lichtgeschwindigkeit mit Hilfe der Drehspiegelmethode

Kurz nachdem Fizeau seine Messungen veröffentlichte entwickelte der französische Physiker Léon Foucault an der Pariser Akademie nach einem Vorschlag von Arago aus dem Jahr 1838 eine neue Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, die später von Albert Michelson noch verbessert wurde und mit der später mit einem Fehler von weniger als 1% gearbeitet werden konnte (mit Hilfe der Verbesserung der Methode durch Michelson). Vorteile dieser Methode war die große Genauigkeit des Ergebnisses und der im Gegensatz zu den vorhergegangenen terrestrischen Methoden geringere Arbeitsaufwand, da ein Lichtweg von gerade einmal 30m gebraucht wurde. Da das Licht einmal hin und mit einem Spiegel wieder zurückgeworfen wurde, war die ganze Apparatur also gerade einmal 15m lang. Eine Vereinfachung, bei der das Licht einmal umgelenkt wurde, verkürzte die Apparatur auf 7,5m. Das ist der Grund, weshalb die Drehspiegelmethode in der Didaktik heute noch häufig zur Demonstration verwendet wird und ich diesen Versuch auch in unserer Physiksammlung durchführen konnte. Deshalb werde ich hier meine eigenen Messergebnisse angeben und eine ausführliche Fehlerberechnung durchführen.
Grundidee Foucaults war es, einen gebündelten Lichtstrahl auf einen Drehspiegel zu schicken, dieser Lichtstrahl soll dann einen Weg von mehreren Metern durchlaufen und mit Hilfe eines Parabolspiegels soll er darauf den selben Weg in entgegengesetzter Richtung zurücklaufen. Kommt er wieder beim Drehspiegel an, hat sich dieser um den Winkel φ weitergedreht. Der Lichtstrahl ist dann an einer Stelle von dem hinlaufendem Strahl um den Abstand d entfernt:

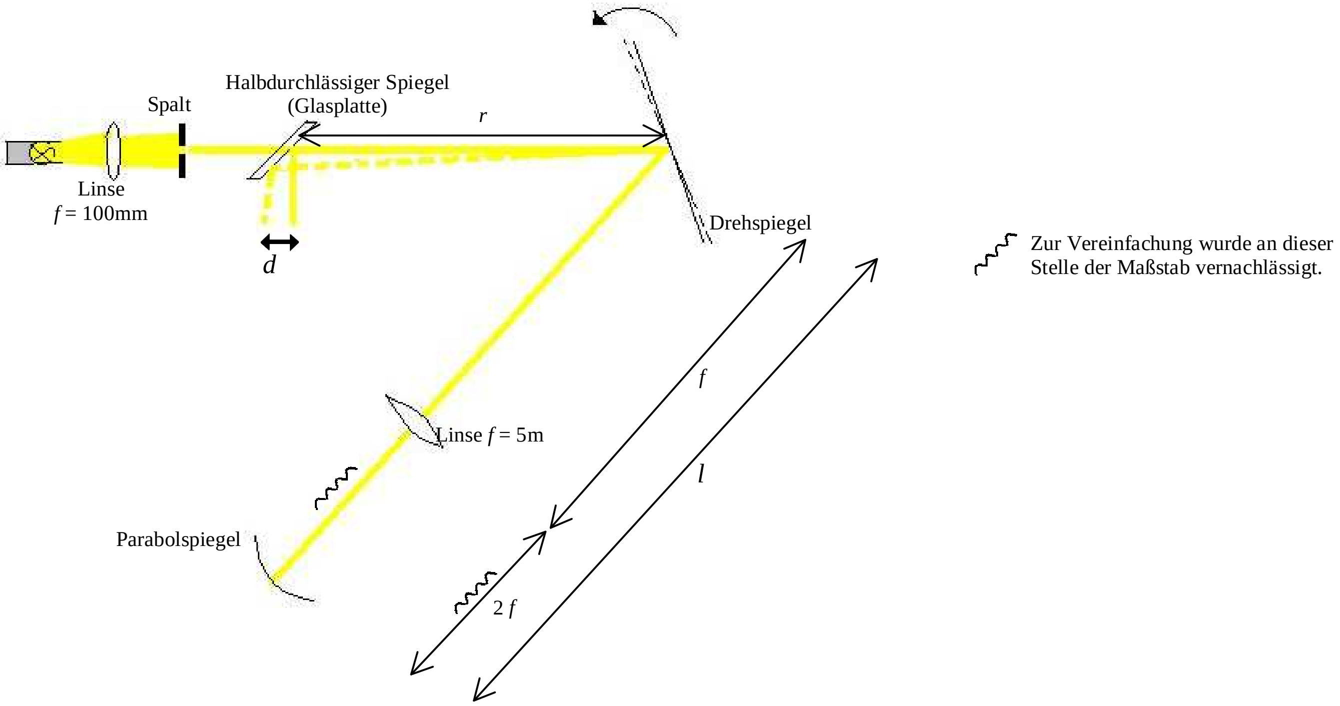


Bild 7.1: Schematische Darstellung der Drehspiegelmethode

Wenn sich die Drehspiegelachse um den Winkel φ dreht, dann schliessen der rückgeführte Lichtstrahl, in der Zeichnung in gestricheltem Gelb dargestellt, und der hingeführte Strahl einen Winkel von 2φ ein, da für den Spiegel gilt: Einfallswinkel = Reflexionswinkel. Wenn man beide Lichtstrahlen (den auf dem Hinweg und jenen auf dem Rückweg) an der Glasplatte mit einiger Näherung als parallel ansieht (2φ ist sehr klein!), ist die Strecke AB gleich der zu messenden Strecke d. (siehe Bild 7.2)

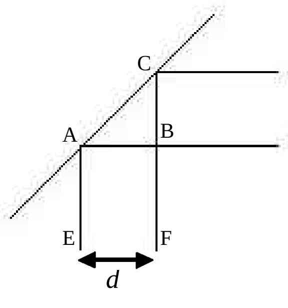


Bild 7.2: $d \approx s_{BC}$

$\sphericalangle$CAB = $\sphericalangle$BCA = 45°

Also ist ΔABC gleichseitig:
AB = BC (1)

Da AE || BF und AB || EF:
AB = EF = d (2)

(1) und (2) zusammen:
BC = d

Nach Bild 8.1 gilt:

$$\sin(2\varphi) = \frac{BC}{BD}$$

$$\sin(2\varphi) \approx \frac{BC}{CD} = \frac{d}{r}$$

$$2\varphi \approx \frac{d}{r}$$ da für kleine φ gilt: $\sin\varphi \approx \varphi$.
Dies wird anhand folgender Tabelle deutlich gemacht:

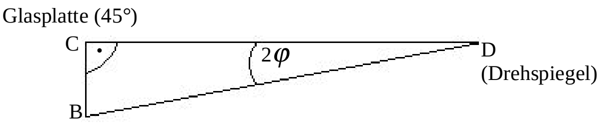


Bild 8.1: $2\varphi = \frac{d}{r}$

sin φ	φ
0,1	0,09983341665
0,01	0,00999998333
0,001	0,00099999983
0,0001	0,00009999999

Also gilt:

$$\varphi = \frac{d}{2r}$$

da $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

$$2\pi\nu = \frac{d}{2r\Delta t}$$

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{4\pi r\nu}{d}$$

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta s \cdot 4\pi r\, n}{d} = \frac{2\cdot l\cdot 4\pi r\,\nu}{d} = \frac{8\cdot\pi\cdot l\cdot r\cdot\nu}{d}$$

der griechische Buchstabe ν wurde als Formelzeichen für die Frequenz verwendet, um eine Verwechslung mit der Brennweite f auszuschließen

l: Abstand Drehspiegel – Endspiegel
r: Abstand Glasplatte – Drehspiegel
ν: Frequenz des Drehspiegels
d: Abstand der Lichtpunkte
siehe auch Bild 7.1

l, r und d sind als Längeneinheiten relativ einfach zu messen. Die Frequenz könnte man mit Hilfe der Schwebungsmethode auf 440Hz einstellen. Dazu schlägt man eine Stimmgabel mit dem Ton a` = 440Hz an, und „vergleicht“den Ton mit dem Motorgeräusch. Wenn die Schwebungsfrequenz null ist, also kein Anschwillen oder Abnehmen der Lautstärke vorliegt, ist die Frequenz des Drehspiegels 440Hz.
Foucault ermittelte dabei die Lichtgeschwindigkeit nach sorgfältiger Versuchsdurchführung auf $2{,}98\cdot10^{8}\,\frac{m}{s} \pm 0{,}1\%$. Der Erfolg dieses Experimentes ist dieser erstaunlichen Genauigkeit zuzuschreiben, wobei man bedenken muss, dass selbst 0,1% der schließlich recht hohen Lichtgeschwindigkeit bereits $298000\frac{m}{s}$ sind.
Später benutzte Foucault einen von Wheatstone entworfenen, mit Luftgebläse angetriebenen Drehspiegel, der eine Frequenz von bis zu 800Hz hatte, so dass ein noch geringerer Lichtweg ausreichte. Deshalb war es Foucault möglich, durchsichtige Stoffe in den Lichtweg einzuführen, er konnte also nicht nur die Lichtgeschwindigkeit in Luft, sondern auch jene in verschiedener Materie messen, welches für die Verifizierung der Wellentheorie (wird im folgenden noch genauer behandelt) bedeutend war.
Heute wird der Versuch mit zwei verschiedenen Lichtquellen durchgeführt, da uns heutzutage ein Laser zu Verfügung steht, der den ganzen Ablauf, vor allem die Justierung ungemein erleichtert. Ich habe in unseren Physikräumen beide Versuche durchgeführt und bin zu dem Ergebnis gekommen, dass der Laser auch die Genauigkeit des Ergebnisses deutlich steigert. Eine große Schwierigkeit des Experimentes ist es, mit dem schwachen Licht auszukommen. Der Laser liefert durch seine Bündelung dadurch eine erhebliche Erleichterung. Im folgenden möchte ich deshalb die Versuchsergebnisse mit Hilfe das Lasers angeben.
Zur Bestimmung der Frequenz wählte ich ein Stroboskop und veränderte dessen Frequenz so, dass sie mit der Frequenz des Drehspiegels übereinstimmte. Das war dann der Fall, wenn jeweils der Lichtblitz des Stroboskopes aufblitzte, der Drehspiegel sich immer an der gleichen Stelle befand.
Ich wählte

l = 15 m
r = 5 m
ν = 490 Hz

und maß einen Abstand der beiden Lichtpunkte von

d = 2,5 mm

Damit war

$$c = \frac{8\cdot\pi\cdot l\cdot r\cdot\nu}{d} = \frac{8\cdot\pi\cdot 15m\cdot 5m\cdot 490Hz}{2{,}5\cdot10^{-3}m} = 3{,}69\cdot10^{8}\,\frac{m}{s}$$

Später habe die Messung bei noch vier weiteren verschiedenen Frequenzen durchgeführt (r und l bleiben konstant):

	ν [Hz]	d [mm]	c [ms^{-1}]
1. Messung	490	2,5	$3{,}69\cdot10^8$
2. Messung	422	2,5	$3{,}18\cdot10^8$
3. Messung	386	2,0	$3{,}63\cdot10^8$
4. Messung	310	2,0	$2{,}92\cdot10^8$
5. Messung	254	1,0	$4{,}79\cdot10^8$
		$\bar{c}$ =	$3{,}36\cdot10^8$

Bei der Berechnung des arithmetischen Mittels wird dieser Wert herausgenommen, da er zu sehr von den anderen abweicht (vermutlich Messfehler!)

Dabei waren l und r leicht per Zollstock zu messen. Mit Hilfe des Stroboskopes ist die Frequenz ν auch recht genau zu bestimmen. Der größte Fehler rührt wohl von der Messung des Abstandes der beiden Lichtpunkte her. Dieser war nicht nur recht gering und deshalb fehlerträchtig ($d \approx 2{,}5$ mm) sondern die beiden Lichtpunkte waren zudem noch sehr schwach, und auch eher „Flecke“ als Punkte.
Deshalb die Fehlerberechnung:

Fehlerquelle	Fehler (Toleranzangabe)
Messung von l	± 1%
Messung von r	± 1%
Messung von ν	± 2%
Messung von d	± 20%

Damit ergibt sich für die Summe der Fehler:

$$\frac{8\cdot\pi\cdot0{,}99l\cdot0{,}99r\cdot0{,}98\nu}{1{,}2d} < c_{Genau} < \frac{8\cdot\pi\cdot1{,}01l\cdot1{,}01r\cdot1{,}02\nu}{0{,}8d}$$

$$0{,}8\cdot c_{ermittelt} < c_{Genau} < 1{,}3\cdot c_{ermittelt}$$

$$2{,}69\cdot10^8\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} < c_{Genau} < 4{,}37\cdot10^8\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Auf dieses Intervall kann ich also meine Messung beschränken. Auf den ersten Blick eine ungenaue Messung, wenn man aber bedenkt, dass ausschließlich mit Schulmitteln, die ja eigentlich primär zur Veranschaulichung gedacht sind, gearbeitet wurde, und ein Lichtweg von schlichten 30m zur Verfügung stand, kann sich dieses Ergebnis doch schon sehen lassen. Immerhin weicht mein Wert vom heute ermittelten Wert nur um ca. 12% ab. (1) (6) (9) (11) (12) (17) (24)

Moderne Möglichkeiten zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Eine heute auch in Schulen und Universität häufig durchgeführte Methode zur Bestimmung von c ist die sogenannte Messung mit einem elektrisch moduliertem Signal. Dabei werden Lichtstöße von einer Leuchtdiode, die mit 60MHz pulsiert, ausgesendet. Gleichzeitig wird ein zum Sendesignal synchrones Referenzsignal an den Empfänger geschickt. Der Lichtstoß wird von einer Photodiode nach einer Strecke aufgenommen und in eine 60MHz Wechselspannung umgewandelt. Der Oszillator schreibt nun den zweiten Spannungsstoß auf den Bildschirm, wobei diese zweite Kurve im Verhältnis zur ersten lediglich phasenverschoben ist. Zu Beginn einer Messung werden dann die beiden Kurven zur Deckung gebracht, und dann die Messstrecke Δs vergrößert. Aus der dann sich ergebenen nochmaligen Phasenverschiebung φ und der Veränderung der zurückgelegten Wegstrecke Δs kann man die Lichtgeschwindigkeit in Luft, aber leicht auch in verschiedenen anderen Stoffen, messen.
Da die Phasenverschiebung der beiden Kurven sehr gering ist, wendet man zur scheinbaren Vergrößerung der Laufzeit einen elektronischen Trick an. Dabei werden jeweils Referenzsignal und Empfängersignal (Photodiodensignal) mit einem 59,9MHz-Signal gemischt, also mutipliziert. Sie durchlaufen daraufhin einen Frequenzfilter, der die niederfrequenten Anteile mit der Differenzfrequenz $f_1 - f_2 = 0{,}1$MHz herausfiltert. Dabei bleibt die Phasenverschiebung φ der beiden Wellen konstant. Nur die Laufzeit wird um den Faktor

$$\frac{f_1}{f_1 - f_2} = \frac{60\mathrm{MHz}}{0{,}1\mathrm{MHz}} = 600$$

gestreckt. Damit ist die Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t}\cdot\frac{f_1}{f_1 - f_2} \qquad (9)\ (12)$$

An der Universität Stuttgart wird zur Zeit an der Möglichkeit, die Lichtgeschwindigkeit anhand von Positronenvernichtungsstrahlung mit sehr geringer Wegstrecke zu messen, geforscht. Dabei sollen modernste BaF_2 – Szintillationsdetektoren benutzt werden, die Zeitauflösungen von weit unter einer halben Nanosekunde bieten. Dadurch ist es möglich, schon über Strecken von zwei Metern exakte Laufzeitmessungen von Strahlung durchzuführen. Die Lichtgeschwindigkeit kann dabei mit einer Genauigkeit von 1,5% bestimmt werden. Für Universitätsmittel und den geringen Aufwand eine recht hohe Genauigkeit!

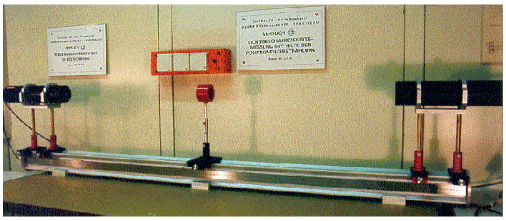


Bild 10.1: Messung von *c* anhand von Positronenvernichtungsstrahlung

Eine recht interessante Methode mit „Haushaltsmitteln“ stellte kürzlich Manfred Aigner als Physiklehrer eines Gymnasiums im Internet vor. Dabei nahm er „gleichzeitig“ zweimal den Ton der „Tagesschau“ der ARD mit dem Computer auf. Die Besonderheit war, dass er einmal seinen Kabelanschluss benutzte, bei dem das Signal auf terrestrischem Weg „ins Haus“ gelangt, und als andere Quelle das Signal per Satellit empfing. Nach Information bei der ARD erfuhr er,dass für den Satellitenempfangsweg der Fernmeldesatellit Kopernikus benutzt wurde und errechnete für den Satellitenweg eine Strecke von 77181km. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Spannungsstößen auf Koaxialkabeln

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

ist, wobei ε_r die relative Dielektrizität des Isolators zwischen Innen- und Außenleiter ist. Wir nehmen ein $\varepsilon_r \approx 1$ an, so dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Information über den Kabelweg gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Die Subtraktion der Strecken ist also zulässig.

$$\Delta s = s_{Sat.} - s_{Kabel} = 77181\text{km} - 392\text{km} = 76789\text{km}$$

Am Computer mass Aigner mit Hilfe eines Musikprogramms, welches den genauen Frequenzgang bis auf Hundertstelsekunde aufzeichnet, eine Laufzeitdifferenz der beiden Signale von $\Delta t = 0{,}26$s.
Damit bestimmte er c auf:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} \approx \frac{76789\text{ km}}{0{,}26\text{ s}} = 295342\,\frac{\text{km}}{\text{s}} \qquad (15)$$

Höhepunkt der Lichtgeschwindigkeitsmessungen

In den siebziger Jahren letzten Jahrhunderts hatte man die Lichtgeschwindigkeitsmessungen im Vakuum auf eine maximale Genauigkeit von $c = 2{,}99792485 \cdot 10^8\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \pm 1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ bestimmt. Dabei war klar, dass man die Genauigkeit nun nur noch minimal verbessern konnte. Das war der Anlass dafür, dass im Oktober 1983 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum als eben diesen Wert definiert wurde.
Bislang war c von Meter und Sekunde abhängig. Mit der Definition der Lichtgeschwindigkeit wurde der Urmeter abgeschafft und abhängig von der Lichtgeschwindigkeit beschrieben. Deshalb kann man genaugenommen heute die Lichtgeschwindigkeit nicht mehr messen, da man nicht mehr die Geschwindigkeit des Lichtes, sondern die Länge des Meters misst, man also zu der Genauigkeit bei der Festlegung des Meters beiträgt. (24)

DISKUSSION DER FORM DER AUSBREITUNG DES LICHTS

Zwei Thesen geraten aneinander

Bereits Issac Newton (1642-1727) setzte sich schon im 17.Jahrhundert in seiner „Principia“, seinem physikalischem Lebenswerk, welches von großer Bedeutung für die gesamte vorrelativistische Physik (= die Physik vor dem für die Physik bedeutsamen Jahr 1905 (Entwicklungsjahr der Speziellen Relativitätstheorie)) war, mit dem Problem auseinander, in welcher Form sich das Licht ausbreiten würde. Da es sich bekanntlich geradlinig ausbreitet war er von der Überzeugung, dass das Licht, ähnlich wie Materie auch, aus vielen kleinen elastischen Teilchen bestünde, die er Korpuskeln nannte. (Nicht zu verwechseln mit den heute bekannten Photonen!). Sie werden nach Newton aus einer Lichtquelle „herausgeschleudert“. Er konnte so Brechung und Reflexion des Lichtes erklären. Ein Rätsel blieb ihm aber immer noch die Beugung des Lichtes. Als Beugung bezeichnet man die Abweichung der Ausbreitung des Lichtes von der geometrischen Strahlrichtung an einem Hindernis oder einer Öffnung im Strahlengang. Die Auswirkung der Beugung des Lichtes ist zum Beispiel, dass ein Objekt abhängig von der Farbe des Lichtes einen verhältnismäßig unscharfen Schatten wirft.
Newtons Theorie wurde später aufgrund der von ihm vorausgesagten Korpuskeln „Korpuskulartheorie“ genannt. (1) (5)

Eine weitaus „widerstandsfähigere“ Theorie lieferte Newtons Zeitgenosse Christiaan Huygens, der 1629 in Den Haag geboren wurde. Obwohl Jura studiert, widmete er sich später ausschließlich den Naturwissenschaften. Seine Theorie beschreibt Licht als eine Form von Wellen, ähnlich der Schallwellen oder Wasserwellen. Damit konnte Huygens nicht nur Brechung und Reflexion des Lichtes erklären, seine Theorie lieferte auch eine Erklärung für die Beugung des Lichtes. Im Laufe des 19.Jahrhunderts fand man mehrere Hinweise darauf, dass diese, auch Undulations- oder Wellentheorie genannte Theorie der Wirklichkeit zumindest recht nahe kommt. Newtons Korpuskulartheorie erwartete nämlich eine höhere Geschwindigkeit des Lichts in Materie als im Vakuum, während die Undulationstheorie das Gegenteil voraussagte. Messungen von Fizeau, Foucault, u.a. ergaben eine geringere Geschwindigkeit, je höher die optische Dichte eines Stoffes war.
Der entscheidende Siegeszug der Wellentheorie begann jedoch, als man die Interferenz des Lichtes entdeckte. (1) (4) (5)

Interferenz

Interferenz entsteht bei jeglichen Wellenformen und bedeutet, dass sich mehrere Wellen überlagern. Wir gehen von gleichen Frequenzen der Wellen aus.
Das Besondere an der Überlagerung ist, dass sich die Wellen und damit die jeweiligen Elongationen addieren.

$s_1(t) = \sin(\omega t)$
$s_2(t) = \sin(\omega t+\varphi)$

$$s_r(t) = \sin(\omega t) + \sin(\omega t+\varphi)$$
$$= 2\sin\frac{\omega t + (\omega t+\varphi)}{2} \cdot \cos\frac{\omega t - (\omega t+\varphi)}{2}$$
$$= 2\sin\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}$$

Das bedeutet zum einen, dass wenn zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler sich überlagern, die resultierende (beim Schall hörbare, beim Licht sehbare) Welle genau so groß wie beide Wellenberge (oder –täler) zusammen, ist. Dieses Phänomen wird als konstruktive Interferenz bezeichnet, da sich die überlagerten Wellen verstärken. Dieses wird in Bild 11.1 und Bild 11.2 dargestellt, wobei Bild 11.1 zwei leicht phasenverschobene sich überlagernde Wellen darstellt (roter und violetter Graph), bei der die resultierende Amplitude (blauer Graph) nur leicht größer ist als die der einzelnen Wellen (teilweise konstruktive Interferenz). In Bild 11.2 wird eine vollständige konstruktive Interferenz dargestellt, bei der zwei nicht-phasenverschobene Wellen (roter und blauer Graph) eine resultierende Welle mit doppelter Amplitude ergeben (grüner Graph).

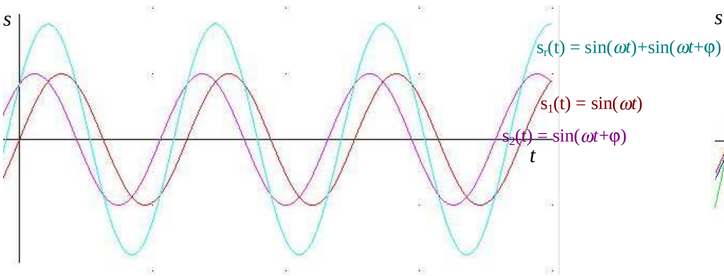


Bild 11.1: teilweise konstruktive Interferenz

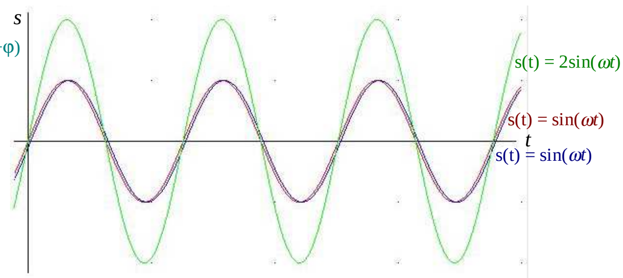


Bild 11.2: vollständige konstruktive Interferenz

Zum anderen erlaubt Addition der Elongationen aber auch, dass die Wellen sich im „ungünstigsten“ Fall gegenseitig auslöschen, oder zumindest vermindern. Wenn ein Wellenberg sich mit einem Wellental überlagert, ist das beispielsweise der Fall. Das Wellental hat eine negative Elongation, der Betrag wird also von der positiven Elongation des Wellenberges abgezogen und die Elongation der resultierenden Welle ist kleiner als die der überlagerten Welle. Dies bezeichnet man als destruktive Interferenz.

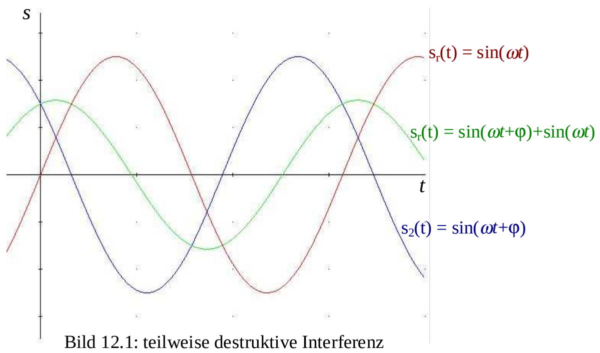


Bild 12.1: teilweise destruktive Interferenz

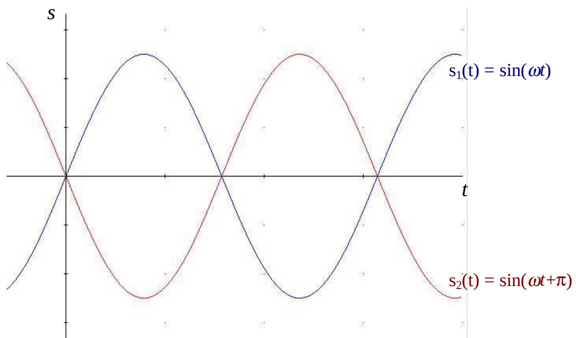


Bild 12.2: vollständige destruktive Interferenz

In Bild 12.1 ist eine teilweise destruktive Interferenz dargestellt, da die resultierende Welle (grüner Graph) eine kleinere Amplitude hat als die beiden Ausgangswellen (roter und blauer Graph). Bild 12.2 zeigt eine vollständige destruktive Interferenz, bei der sich die beiden Graphen (rot und blau) bei der Überlagerung komplett auslöschen und die resultierende „Welle“ auf der 1.Achse liegt, weil die Elongation der einen Welle zu einem Zeitpunkt immer gleich dem negativen Betrag der anderen Elongation ist, die Summe der Elongationen (und demnach die Summe der Wellen) zu jedem Zeitpunkt gleich null ist. Die Phasenverschiebung der roten Welle beträgt dann genau $\varphi = \pi$. Das zu beobachtende Resultat ist dann „nichts“, nämlich Dunkelheit, da im Grunde ja keine resultierende Welle existiert. (1) (2) (10) (16)

Die allgemeine Akzeptanz der Äthertheorie

Gerade dieses Phänomen der völligen Auslöschung zweier Wellen entdeckte man im 19.Jahrhundert, welches man mit Newtons Korpuskulartheorie nun endgültig nicht mehr erklären konnte. Die einzige (im wahrsten Sinne des Wortes) „einleuchtende“ Erklärung war die der Wellentheorie.
Die Folge war, dass diese Theorie mehr und mehr zu allgemeiner Akzeptanz führte und schließlich von keinem ernsthaftem Wissenschaftler oder Forscher mehr angezweifelt wurde.
Unklar war jedoch die Ausbreitung. Von bisherigen Wellen war bekannt, dass sie jeweils ein Medium für ihre Ausbreitung benötigten. Man ging davon aus, dass da, wo Wellen (gleich Schwingungen) sind, auch etwas sein muss, das schwingt. Wasserwellen breiteten sich nur auf Wasser aus, von Schallwellen war bekannt, dass sie sich im Vakuum nicht ausbreiteten, Schallwellen nutzen also die Luft als Ausbreitungsmedium.
Deshalb war man davon überzeugt, dass auch Lichtwellen ein Medium zur Ausbreitung benötigte. Dieses Medium musste den gesamten Weltraum ausfüllen (zumindest soweit man mit damaligen Mitteln in den Raum gucken konnte, gab es Licht!), es musste nahezu reibungsfrei auf bewegte Materie wirken (sonst würde sich die Bewegung der Himmelskörper verlangsamen), und es musste dicht und elastisch genug sein, um die Fortpflanzung elektromagnetischer Schwingungen jeder Frequenz zu gestatten, die bis damals schon recht genau bekannt waren (wie oben schon erwähnt entdeckte man, dass Lichtwellen nichts anderes als eine Form von elektromagnetischen Wellen sind). Dieses Medium für die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen benannte man im 19. Jahrhundert als *Äther*.
Schon in der Vergangenheit hatte man Medien, die man für eine Erklärung bestimmter Sachverhalte benötigte, erfunden und sie Äther genannt. Keiner von ihnen war jedoch so verbreitet und so lange so allgemein akzeptiert worden wie die Hypothese des Lichtäthers. James Clerke Maxwell (1831-1879) hierzu: „Äther wurden erfunden, damit Planeten darin schwimmen können, um elektrische Atmosphären und magnetische Ausstrahlung zu beherbergen, um Empfindungen von einem Teil unseres Körpers zu einem anderen zu übertragen und so fort, bis der ganze Raum mit drei bis vier Äthern erfüllt war. [...] Der einzige Äther der überlebt hat, wurde von Huygens eingeführt, um die Fortpflanzung des Lichts zu erklären. [...] Die Eigenschaften dieses Mediums [...] erweisen sich als genau die, welche man zur Erklärung elektromagnetischer Phänomene benötigte.“
Maxwell selbst benutzte zwar diesen Begriff, kennzeichnete die Sache jedoch als „äußerst mutmaßliche Hypothese“. Die weit verbreitete Akzeptanz nicht nur unter Naturwissenschaftlern, sondern auch in der Gemeinschaft der Bürger, wird daran deutlich, dass selbst in Kirchenlieder wie das von Carl Boberg von einem Äther gesprochen wird: „und seh [ich] der Sterne unzählbare Schar, wie Sonn und Mond im lichten *Äther* zelten, gleich goldnen Schiffen hehr und wunderbar.“
Aufgabe der Physiker war es nun, diesen theoretisch vorausgesagten Äther experimentell festzustellen. Es stellte sich die Frage ob die Erde im Äther rotiert, oder ob dieser von der Erde mitbewegt würde. Dass die Erde im Bezug zum kompletten Äther ruhen würde, wäre ein zu großer Zufall, und deshalb recht unbefriedigend. Dagegen sprach auch die schon vorher angesprochene, von Bradley entdeckte Aberration des Lichts, die zeigte, dass das Licht eines Stern geradlinig zur bewegten Erde läuft.

Im Jahr 1851 postulierte Armand Hippolyte Fizaeu, dass der Äther teilweise von Materie mitgeführt würde (partielle Mitführung), als er die Lichtgeschwindigkeit in strömendem Wasser maß. Er entdeckte nämlich, dass die Lichtgeschwindigkeit in seiner Anordnung von der Fließrichtung und der Fließgeschwindigkeit des Wassers abhing. Daraus entwickelte er den sogenannten Fresnelschen Mitführungskoeffizienten *F*, der ein Maß für die Größe der Mitführung des Äthers eines Stoffes war. 1868 gelang es Hoeck mit Hilfe eines verbesserten Versuchsaufbau, eine Gleichung für *F* aufzustellen

$$F = 1 - \frac{1}{n^2}$$

wobei n die Brechungszahl eines Stoffes ist. Daraus ergibt sich, dass der Äther durch die Luftatmosphäre der Erde kaum eine Mitführung erfährt, da $n_{Luft} \approx 1$.
Man beschrieb den Äther also als ruhendes Medium, das von der Erde nicht mitgeführt würde und demnach auf der Erde durch ihre Bewegung einen *Ätherwind* erzeugen müsste, den man aufgrund des nicht vorhandenden Widerstandes zwar nicht direkt spüren könne, der aber messbar sei. (2) (18) (19) (23)

Das Experiment von Michelson-Morley

Maxwell schlug im vierten Quartal des 19. Jahrhunderts ein Experiment vor, um jenen Ätherwind zu messen, welches im Jahr 1887 von den Physikern Albert Michelson und Abraham Morley durchgeführt wurde, und deshalb später als „Michelson-Morley-Experiment“bezeichnet wurde.
Wie beim Schall auch, sollte sich die Geschwindigkeit der Wellen (Lichtwellen), in Abhängigkeit von der „Windrichtung“ („Ätherwindrichtung“) verändern, da man davon ausging, dass sich das Licht relativ zum Äther immer mit der gleichen Geschwindigkeit bewege.
Um diese Änderung zu messen, müsse man lediglich zwei Lichtstrahlen gleichzeitig über verschiedene Strecken gleicher Länge schicken und sie nachher zusammenzuführen, so dass sie sich überlagern und Interferenz auftritt. Damit hätte man das Problem der geringen Unterschiede der Laufzeiten der beiden Lichtstrahlen umgangen und es wäre sogar anhand des auftretenden Interferenzmusters eine quantitative Analyse möglich.

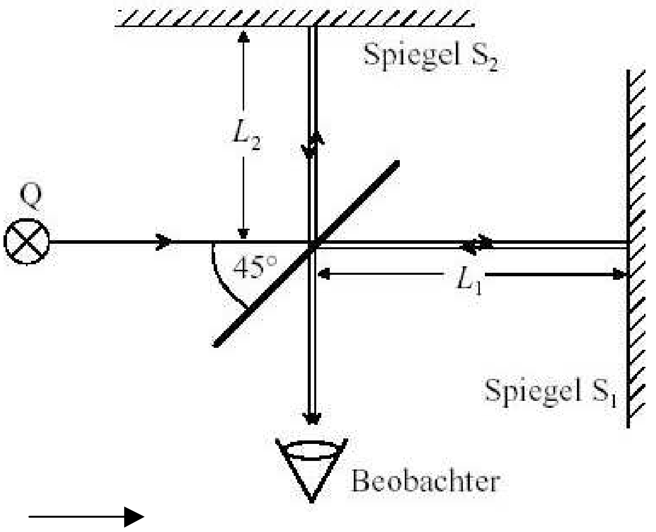


Bild 13.1: Schema des Michelson-Morley-Experimentes

Dabei wurde, wie in Bild 13.1 als Schema des Experimentes dargestellt, ein halbdurchlässiger Spiegel (Glasplatte) als Strahlteiler benutzt, der die Lichtstrahlen in Ätherwindrichtung beziehungsweise senkrecht zum Ätherwind aufsplittete. Dadurch ergaben sich für die Laufzeiten folgende Formeln:

a) die Zeit des Lichts für die Strecke l_1 (parallel zum Ätherwind)
auf dem Hinweg hat das Licht (Äther-)Rückenwind, für einen Beobachter aus dem System des Äthers also die Geschwindigkeit $c + v_{Erde}$ d.h. die Laufzeit:

$$t_{Hinweg} = \frac{l_1}{c + v_{Erde}}$$

und für den Rückweg die Zeit:

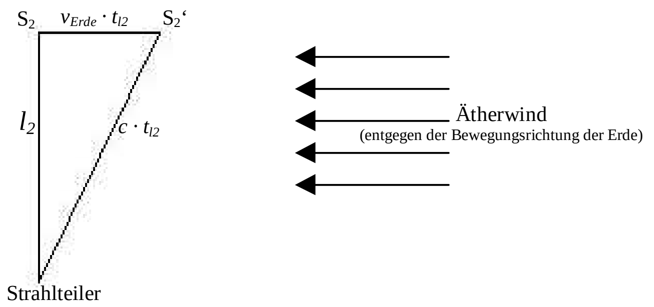
$$t_{Rückweg} = \frac{l_1}{c - v_{Erde}}$$

Für den Gesamtweg l_1 hin und zurück also die Zeit:

$$t_{l1} = t_{Hinweg} + t_{Rückweg} = \frac{l_1}{c + v_{Erde}} + \frac{l_1}{c - v_{Erde}} = \frac{l_1(c - v_{Erde}) + l_1(c + v_{Erde})}{c^2 - v_{Erde}^2}$$

$$= \frac{2\, l_1\, c}{c^2 - v_{Erde}^2}$$

b) die Zeit des Licht für die Strecke l_2 (im rechten Winkel zum Ätherwind):
Man vergleiche den zurückzulegenden Weg des Lichtes mit dem eines Flugzeuges, dass Seitenwind hat (auch Jetstream genannt). Dabei muss es durch Gegensteuern die Seitendriftgeschwindigkeit v_{Erde} ausgleichen. Für einen Beobachter im System des Äthers sieht die Flugbahn auf dem Hinweg also so aus:



S_2 : Ort des Spiegels bei Ankunft des Lichtes am Strahlteiler

S_2' : verschobener Ort des Spiegels bei Ankunft des Lichtes am Spiegel

Nach Phytagoras:

$$l_2^2 + v_{Erde}^2 \cdot t_{l2H}^2 = c^2 \cdot t_{l2H}^2 \qquad | - v_{Erde}^2 \cdot t_{l2}^2$$

$$l_2^2 = c^2 \cdot t_{l2H}^2 - v_{Erde}^2 \cdot t_{l2H}$$

$$l_2^2 = t_{l2H}^2 \cdot (c^2 - v_{Erde}^2) \qquad | : (c^2 - v_{Erde}^2)$$

$$\frac{l_2^2}{c^2 - v_{Erde}^2} = t_{l2H}^2 \qquad | \sqrt{}$$

$$t_{l2H} = \frac{l_2}{\sqrt{c^2 - v_{Erde}^2}}$$

Das entsprechende gilt für den Rückweg. Die Gesamtzeit ist also

$$t_{l2} = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v_{Erde}^2}}$$

Um die Berechnung des Laufzeitunterschiedes zu vereinfachen, benutzt man die Binominalentwicklung:

$$(1 + x)^n \approx 1 + n \cdot x \quad \text{für } x \ll 1$$

Um sie anzuwenden, muss man die beiden Terme noch entsprechend umformen. Dabei wird auf eine weitere Unterscheidung zwischen l_1 und l_2 abgesehen, weil wir davon ausgehen, dass die Strecken gleich lang sind.

$$t_1 = \frac{2 \cdot l \cdot c}{c^2 - v_{Erde}^2}$$

$$= 2 \cdot l \cdot c \cdot \frac{1}{c^2(1 - \frac{v_{Erde}^2}{c^2})}$$

$$= \frac{2 \cdot l}{c} \cdot (1 - \frac{v_{Erde}^2}{c^2})^{-1}$$

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v_{Erde}^2}}$$

$$= 2l \cdot [c^2(1 - \frac{v_{Erde}^2}{c^2})]^{-½}$$

$$= \frac{2 \cdot l}{c} \cdot (1 - \frac{v_{Erde}^2}{c^2})^{-½}$$

Da $\frac{v_{Erde}^2}{c^2} \approx 10^{-8} \ll 1$, ist die Binominalentwicklung als Näherungsumformung also zulässig:

$$t_1 \approx \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \left(1 + \frac{v_{Erde}^2}{c^2}\right)$$

$$t_2 \approx \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2}\right)$$

Mit diesen Termen kann man leicht die Laufzeitdifferenz Δt errechnen, von der das erwartete Interferenzbild abhängt:

$$\begin{aligned} \Delta t = t_1 - t_2 &= \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \left(1 + \frac{v_{Erde}^2}{c^2}\right) - \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2}\right) \\ &= \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \left(1 + \frac{v_{Erde}^2}{c^2} - 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2}\right) \\ &= \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2} \\ &= \frac{l}{c} \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2} \end{aligned}$$

An diesem Term sieht man, dass Δt nur null werden kann wenn $l = 0$ ist, da $v_{Erde} \neq 0$ ist. (Trivial: Das Licht würde gar keine Strecke durchlaufen, sondern direkt am Strahlteiler, der dann ja kein Strahlteiler in dem Sinne mehr wäre, zum Beobachter abgelenkt. Logisch also, dass in dem Fall keine Interferenz auftritt)
In jedem anderen Fall muss also aber ein Interferenzbild zu beobachten sein.
Um dieses zu berechnen, leitet man den Gangunterschied δ der beiden Wellen her, welcher der im Wellenbild zweier Wellen auffällige Wegunterschied ist.

Der Gangunterschied hier:

$$\delta = c \cdot \Delta t = l \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2}$$

Auf der Mattscheibe, bei der die beiden überlagerten Lichtstrahlen sichtbar gemacht werden, müsste also eine Interferenzerscheinung zu beobachten sein, da $\delta \neq 0$. Da Interferenz aufgrund der geringen Wellenlänge des sichtbaren Lichtes aber auch schon durch unvermeidbare leichte Erschütterungen oder Luftzirkulationen auftreten kann, wollten Michelson und Morley die Versuchsanordnung langsam um 90° drehen und erwarteten dadurch eine Veränderung des Interferenzbildes.

Der Gangunterschied wäre dann (nach der Drehung):

$$\delta' = -\delta = -l \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2}$$

Der Unterschied zwischen δ' und δ

$$\Delta\delta = \delta - \delta' = \delta + \delta = 2\delta$$

Bei einer Drehung der Versuchsanordnung müssten also

$$m = \frac{\Delta\delta}{\lambda} = \frac{2\delta}{\lambda} = 2l \cdot \frac{v_{Erde}^2}{c^2} \cdot \frac{1}{\lambda}$$

m: Anzahl der auftretenden Interferenzmaxima
λ: Wellenlänge des verwendeten Lichtes

Interferenzmaxima zu beobachten sein.

Michelson und Morley wählten l = 30 m, λ = 600 nm (gelbes Licht), so wird mit $v_{Erde} = 3 \cdot 10^4 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ und $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ die Zahl der Interferenzmaxima m = 1,0. Obwohl die beiden Experimentatoren in ihrem historischen Experiment eine Streifenverschiebung um $m = 10^{-3}$ hätten nachweisen können, wurde **keine Veränderung beobachtet**, die auf eine Relativbewegung der Erde schließen ließe.
Dieses Ergebnis hatten die beiden Physikern, geschweige denn irgendwelche sonstigen Naturwissenschaftler erwartet. Viele versuchten Erklärungsansätze für den Ausgang des Michelson-Morley Experimentes.

Eine davon war dass der Äther von der Erde mitgeführt wird.
Deswegen ist keine Relativbewegung der Erde zum Äther vorhanden. Dann wäre $v_{Erde} = 0$ also auch m = 0. Dagegen spricht die oben schon angesprochene Gleichung für den Fresnelschen Mitführungskoeffizienten, nach der der Äther durch die Luftatmosphäre keine Mitführung erfahren solle.
Zusätzlich wurde später das Michelson-Morley Experiment in gewisser Höhe durchgeführt, wobei sich das Ergebnis nicht veränderte.

Eine andere besagte dass der Äther im Bezugssystem der Erde liege.
Damit wäre dann auch wieder $v_{Erde} = 0$.

Dagegen spricht jedoch, das zum einen dieser Sachverhalt ein ungemeiner Zufall wäre, schließlich dreht sich die Erde zum einen um sich selbst, um die Sonne, und zuletzt bewegt sich unser ganzes Sonnensystem. Ein solcher Zufall ist für Naturwissenschaftler als Erklärung im Grunde unbefriedigend. Zum anderen spricht dagegen, dass das Licht entfernter Sterne zu jeder Zeit geradlinig zur bewegten Erde läuft, was die von Bradley entdeckte Aberration des Lichts zeigt.

Es wurden einige Jahre viele Theorien und Hypothesen entwickelt und nachher wieder verworfen, welche alle aufzuführen hier den Rahmen sprengen würden. Keine Theorie lieferte eine logische Erklärung für den Ausgang des Experimentes. (4) (5) (10) (16) (18) (19) (21) (23)

Die Spezielle Relativitätstheorie

Es dauerte noch fast 20 Jahre bis ein junger Angestellter des Patentamtes in Bern, der Deutsche Albert Einstein eine Erklärung für den Ausgang des Michelson-Morley Experimentes lieferte. Als er seine Arbeiten in den „Annalen der Physik“im Jahre 1905 veröffentlichte, war sich keiner, vielleicht Einstein selbst am wenigsten über die Bedeutung seiner Ergebnisse bewusst.
Einziger Erklärungspunkt des Experimentes war für Einstein, dass die Berechnung der Laufzeiten nicht stimmten. Er kam zu dem Schluss, dass die Addition der Geschwindigkeiten ($c + v_{Erde}$) und ($c - v_{Erde}$) nicht zulässig ist.
Daraus postulierte er:

> Die Vakuumlichtgeschwindigkeit auf der Erde ist unabhängig der Relativbewegung der Erde stets gleich $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$.

Demnach gibt es für den Äther als Medium der Lichtausbreitung kein Ruhesystem. Damit wird der Begriff eines solchen Mediums (Ätherhypothese) hinfällig.
Aus der von Einstein postulierten Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich, dass sich die Zeit eines bewegten Systems streckt (=Zeitdilatation), und zwar um den Faktor $\frac{v^2}{c^2}$. Um den gleichen Faktor würde nach Einstein sich der Raum verkürzen (=Längenkontraktion). Raum und Zeit wären also nicht mehr absolut, sondern relativ. Die komplette Mechanik nach Newton wäre demnach hinfällig und nur noch als Näherung für Systeme mit $v << c$ zu gebrauchen.
Einsteins Theorie lieferte jedoch die einzige logische Erklärung für den Ausgang des Michelson-Morley-Experimentes. Da sie jedoch so schonungslos mit dem Physikgebäude des kompletten 19.Jahrhundert umging, dauerte es einige Zeit, bis sie sich durchsetzte, zumal man Einsteins Folgerungen im Alltag aufgrund der geforderten hohen Geschwindigkeiten für eine merkliche Veränderung kaum wahrnehmen konnte.
Aufgrund der Relativität zwischen Raum und Zeit nannte man Einsteins Theorie später „Spezielle Relativitätstheorie“.
Diese Theorie eröffnete ein ganz neues Zeitalter der Physik. Sie und die auch in der Zeit entwickelte Quantentheorie waren die Theorien, welche dann auch die Form der Ausbreitung des Lichts durch den Dualismus von Teilchentheorie und Wellentheorie festsetzten. Dabei geht man davon aus, dass sich das Licht zwar wellenförmig ausbreitet (Interferenzerscheinung, Beugung, etc.) in der Nähe der Lichtquelle aber in Form von gewissen Energieteilchen, den Photonen auftritt (geradlinige Ausbreitung, etc.). Dabei verbindet man in gewisser Weise Korpuskulartheorie (obwohl diese noch von diversen anderen Dingen ausging und die Vorstellung der Teilchen stark differiert) und Undulationstheorie bzw. Wellentheorie.
Quantentheorie, Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie, welche eine Fortführung hinsichtlich der Gravitation der Speziellen Relativitätstheorie ist, bilden den Grundstein der Entwicklung unseres heutigen Technologie-Zeitalters.
Damit hat sich das Michelson-Morley-Experiment zum bedeutendsten Negativ-Experiment der Geschichte der Physik entwickelt. (4) (5) (18) (19)

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich die Physik und damit alle Naturwissenschaften gerade in Bezug auf die Erforschung des Lichtes entscheidende Schritte weiterentwickelt haben.
Das Paradeexempel für diese Aussage ist sicherlich die Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie durch Albert Einstein, welche man fast ausschließlich auf dem Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erbaute. Damit ist es nicht übertrieben zu behaupten, dass die Lehre des Lichtes, also die Optik, zu einem der „ertragreichsten“Teilgebiete der Physik „gemausert“hat.
Nicht nur Einsteins Relativitätstheorie entwickelte sich aus der Beschäftigung der Wissenschaftler mit dem Licht. In seiner (vorher bereits erwähnten) „Principia“suchte schon Newton das Phänomen Licht zu ergründen. Die Wichtigkeit dieses Werkes ist auch noch für die heutige Physik unbestreitbar.

Ich bin froh, die Möglichkeit gehabt zu haben, gerade an diesem Thema meine „wissenschaftliche Arbeit“durchzuführen. Auch wenn es möglicherweise scheint, auf diesem Gebiet der Physik sei schon alles erforscht, so trügt doch der Schein. Meiner Meinung nach wird man nie die ganze Welt erklären können. Wir können nur versuchen, möglichst viele Geheimnisse zu lüften. Und gerade in dem Moment in dem es scheint, dass nichts mehr zu erforschen sei, so wird es uns dann genau so ergehen wie der Wissenschaft zu Beginn des 20.Jahrhunderts, die glaubte, die Welt in ihren Formeln gefasst zu haben, und der dann ein ganz neue Welt eröffnet wurde.

LITERATURVERZEICHNIS

Bücher

(1) Der Große Brockhaus, F.A.Brockhaus, Wiesbaden 1979
(2) Dorn-Bader Physik 12/13, Schroedel Verlag, Hannover 2000
(3) Dorn-Bader Physik 12/13, Schroedel Verlag, Hannover 1986
(4) Gerald Kahan: Einsteins Relativitätstheorie, DuMont Buchverlag, Köln 1987
(5) Harald Fritzsch: Eine Formel verändert die Welt, Deutscher Bücherbund, München 1988
(6) Leybold Gerätekarte, Kat.Nr. 476 40, Drehspiegel zur Lichtgeschwindigkeit
(7) Leybold Gerätekarte, Kat.Nr. 471 85, Interferometer-Grundplatte
(8) Leybold Handblätter Physik P5.3.4.1, Michelson-Interferometer
(9) Versuchekatalog Physik, Leybold Didactic, Hürth 2000

Internet

(10) http://rzstud1.rz.uni-karlsruhe.de/~upm5/referat/interferometrie.htm
(11) http://www.ebelu.s.bw.schule.de/natwiss/lindner99_01.pdf
(12) http://www.ebgymhollabrunn.ac.at/ipin/ph-chist.htm
(13) http://www.hausarbeiten.de/archiv/physik/physik-licht1.shtml
(14) http://www.muenster.de/~ullwer/P-Buch/Optik/Lichtausbreitung/lichtausbreitung.htm
(15) http://www.pfaffenwinkel.de/marktplatz/manni/optik/
(16) http://www.physik.uni-oldenburg.de/qubit/dokumente/Referate/Michelson.htm
(17) http://www.physik.uni-osnabrueck.de/resonanz/woehlecke/Laborversuche/Lab1Mod11.pdf
(18) http://www.pi1.physik.uni-stuttgart.de/nhp/seminars/ss00/9_spec_relativ.pdf
(19) http://www.quarks.de/relativ/02.htm
(20) http://www.tu-muenchen.de/jshpchooser.tupl
(21) http://www.uni-bonn.de/
(22) http://www.uni-dortmund.de/web/de/index.html
(23) http://www.uni-ulm.de/schulen/gym/sgu/michels2.htm
(24) http://www.veritas-md.de/schule/licht.htm

Erklärung über die selbständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass alle Literaturstellen, auf die ich mich bezogen habe, als solche kenntlich gemacht sind, indem ich am Ende des Absatzes mit Hilfe der in Klammern gesetzten Zahlen auf die entsprechenden Quellen verwiesen habe.

Heiligenhaus, den 3.3.02 Lukas Janssen