

Bachelorarbeit
„Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in der
Sekundarstufe II“

Christina Lütke Sundrup

22. Juni 2009

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 2 | Die Natur und Eigenschaften des Lichts | 5 |
| 2.1 | Elektromagnetische Wellen und Wellenspektrum | 6 |
| 2.1.1 | Elektromagnetische Wellen | 6 |
| 2.1.2 | Das elektromagnetische Spektrum | 8 |
| 2.2 | Welle-Teilchen-Dualismus | 9 |
| 2.2.1 | Die Wellennatur des Lichtes | 9 |
| 2.2.2 | Die Teilchennatur des Lichtes | 11 |
| 3 | Ein Historischer Überblick | 13 |
| 3.1 | Methoden nach Galilei und Römer | 13 |
| 3.2 | Methoden nach Fizeau und Foucault | 15 |
| 4 | Heutige Festlegung der Lichtgeschwindigkeit | 17 |
| 4.1 | Mirkowellen- Interferometer | 17 |
| 4.2 | Die endgültige Festlegung der Lichtgeschwindigkeit | 18 |
| 5 | Moderne Messungen in der Sekundarstufe II | 19 |
| 5.1 | Die Voraussetzungen und die Einordnung in den Lehrplan | 19 |
| 5.2 | Die Lecherleitung | 20 |
| 5.2.1 | Grundlagen | 20 |
| 5.2.2 | Versuchsaufbau und Durchführung | 22 |
| 5.2.3 | Messergebnisse und Erörterung | 23 |
| 5.3 | LEYBOLD - LD Didactic Lehrmittelgerät | 24 |
| 5.3.1 | Grundlagen | 24 |
| 5.3.2 | Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Ausbrei- tungsmedien | 26 |
| 5.3.3 | Versuchsaufbau und Durchführung | 26 |
| 5.3.4 | Messergebnisse und Erörterung | 28 |
| 6 | Didaktischer Vergleich: Lecher - LEYBOLD | 30 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7 | Lichtgeschwindigkeitsmessung mittels elektronischer Schaltungen | 32 |
| 7.1 | Aufbau und Funktion | 32 |
| 7.2 | Messergebnisse und Erörterung | 34 |
| 7.3 | Erfahrungen mit der Umsetzung des Low Cost Experimentes | 37 |
| 8 | Didaktische Grundlagen von Experimenten und neuen Medien | 38 |
| 8.1 | Das Experiment im Unterricht | 38 |
| 8.1.1 | Die didaktisch methodischen Funktionen des Experiments im Physikunterricht | 39 |
| 8.1.2 | Klassifikationen von Experimenten | 40 |
| 8.2 | Einsatz neuer Medien | 41 |
| 8.2.1 | Der Computer im Physikunterricht | 41 |
| 8.2.2 | Modellbildung und Simulation | 42 |
| 8.2.3 | Einsatz von Simulationen im Physikunterricht | 43 |
| 9 | Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit als Simulation | 45 |
| 9.1 | Simulation von physikalischen Versuchen | 45 |
| 9.2 | Programmiersystem „Easy Java Simulations“ (EJS) | 45 |
| 9.3 | Programmierung: „Simulation zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit“ | 46 |
| 9.3.1 | Handhabung der Simulation | 46 |
| 9.3.2 | Berechnung der Lichtgeschwindigkeit: | 48 |
| 9.3.3 | Quellcode und Besonderheiten der Programmierung | 48 |
| 10 | Schulbezogene Erfahrungen mit dem Low Cost Experiment und der Simulation | 50 |
| 10.1 | Planung und Ablauf der Stunden | 50 |
| 10.2 | Meine Erfahrungen mit der Durchführung des Low Cost Experiments . | 51 |
| 10.3 | Meine Erfahrungen mit der Durchführung der Simulation | 52 |
| 10.4 | Resümee des Unterrichtsverlaufes | 53 |
| 11 | Fazit | 55 |

1 Einleitung

Bereits in der Antike befassten sich griechische Philosophen und Wissenschaftler mit dem Phänomen Licht. Sie diskutierten verschiedene Theorien über den Sehvorgang und die Natur des Lichtes, hierbei stimmten sie überein, dass sich das Licht zeitlos ausbreite. Demnach wäre die Lichtgeschwindigkeit c (von lat. *celeritas* „Schnelligkeit“) unendlich groß. Diese Annahme über die Natur des Lichtes verblieb bis ins 16. Jahrhundert hinein in den Köpfen der Forscher. Galileo Galilei (1564 - 1642) versuchte im Jahr 1638 als erster Mensch eine experimentelle Klärung der Frage nach der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Dieser Versuch ergab zwar kein eindeutiges Ergebnis, war jedoch wegweisend für die weitere Forschung. So wiesen der dänische Astronom Ole Christensen Römer (1644 - 1710), der niederländische Wissenschaftler Christiaan Huygens (1629 - 1695) und der englische Astronom James Bradley (1692 - 1762) die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit nach. Hippolyte Fizeau (1819 - 1896) gelang im Jahr 1849 die erste terrestrische Messung der Lichtgeschwindigkeit.

Nicht nur die Geschwindigkeit des Lichtes wurde im Laufe der Zeit erforscht, auch die Natur des Lichtes wurde vielseitig untersucht. So erlebte die Wellentheorie des Lichtes um das Jahr 1860 seinen Höhepunkt als Maxwell (1831 - 1879) seine Idee der elektromagnetischen Wellen vorstellte. Einige Zeit später deutete Albert Einstein (1879 - 1955) den photoelektrischen Effekt durch die Teilcheneigenschaft des Lichtes. Der Welle-Teilchen-Dualismus war geboren. In der Moderne hat das Licht eine bedeutende Rolle eingenommen und in vielfältigen Anwendungsgebieten Eingang gefunden. Zu diesen Anwendungen gehören zum Beispiel die Lasertechnik, die Daten- und Informationsübertragung und die astronomische Abstandsmessung. Die Vakuumlichtgeschwindigkeit wurde inzwischen auf folgenden Wert festgelegt:

$$c = 299.792.458 \frac{m}{s}$$

Nicht nur für die Forschung ist das Licht ein interessantes Themengebiet, auch im Physikunterricht der Schule hat dieses Thema Einzug erhalten. In der Sekundarstufe II des Gymnasiums ist die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in die Unterrichtseinheit „Optik“ eingebettet, hierbei stehen verschiedene Messmethoden zur Verfügung. In meiner Arbeit möchte ich einige dieser Methoden und eine selbsterstellte Simulation vorstellen und didaktisch analysieren.

2 Die Natur und Eigenschaften des Lichts

Licht ist eine elektromagnetische Schwingungsenergie, welche sich wie alle elektromagnetischen Wellen, im Vakuum ausbreiten kann. Im Gegensatz zur periodischen Bewegung von Materieteilchen, wie bei Wasser- oder Schallwellen, kommt es bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen zu periodischen Änderungen von elektrischen und magnetischen Feldern im Raum.

Die elektromagnetische Strahlung in dem Wellenlängenbereich zwischen $\lambda = 380nm$ und $\lambda = 780nm$ wird im Allgemeinen vom menschlichen Auge als Licht wahrgenommen. Dieser Bereich weist jedoch keine scharfen Grenzen auf, da die Empfindlichkeit des Auges nicht exakt bei einer Wellenlänge endet, und so auch die Lichtwahrnehmung in diesen Grenzbereichen allmählich abnimmt. Das kurzwellige Ende dieses Bereiches empfinden wir als violett, das langwellige als rot. Photometrische Größen sind durch internationale Verabredungen festgelegt. Die spektrale Empfindlichkeit des Auges stiftet den Zusammenhang zwischen physikalischen und physiologischen Größen. Jede physikalische Strahlungsgröße weist ein physiologisches Gegenstück auf. Zu diesen Grundgrößen gehören die Lichtmenge, der Lichtstrom und die Lichtstärke [11].

Lichtmenge Q : in Lumenstunde [lmh]

$$Q = \Phi \cdot t \quad (1)$$

Lichtstrom Φ : in Lumen [lm]

$$\Phi = \frac{Q}{t} = 4\pi \cdot I \quad (2)$$

Lichtstärke I : in Candela [cd]

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (3)$$

Die Lichtstärke ist in der Lichttechnik die Grundgröße und bezieht sich auf den, in eine bestimmte Richtung ausgesandten Teillichtstrom $d\Phi$, bezogen auf den durchstrahlten Raumwinkel $d\omega$. Sie wird des Weiteren definiert als der Lichtstrom pro Raumwinkel-einheit, der von $\frac{1}{60}cm^2$ eines schwarzen Strahlers bei einer Temperatur von $T = 2042K$ ausgesandt wird. Eine weitere physiologische Größe ergibt sich aus dem Quotienten des Lichtstroms und der angestrahlten Fläche. Diese wird als Beleuchtungsstärke, bzw. Intensität bezeichnet.

Beleuchtungsstärke, bzw. Intensität: in Lux [lx]

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (4)$$

Die Intensität nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle ab, so dass sich folgendes photometrisches Entfernungsgesetz ergibt:

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (5)$$

2.1 Elektromagnetische Wellen und Wellenspektrum

2.1.1 Elektromagnetische Wellen

Nachdem James Clerk Maxwell (1831 - 1879) die elektromagnetische Welle bereits 1865 theoretisch vorhergesagt hatte, beobachtete Heinrich Hertz (1857 - 1894) 1887 erstmals solche Wellen im Labor. Elektromagnetische Wellen werden durch Beschleunigung elektrischer Ladung erzeugt und bestehen aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld. Diese beiden Felder stehen senkrecht aufeinander und breiten sich transversal im Raum aus, elektromagnetische Wellen sind dementsprechend Transversalwellen. Die vier Maxwell'schen Gleichungen stellen die verallgemeinerten Gesetze des Elektromagnetismus dar, aus ihnen kann unmittelbar auf die Existenz von elektromagnetischen Wellen geschlossen werden. Mit diesen vier Gleichungen lassen sich alle Probleme der klassischen Theorie der Elektrizität und des Magnetismus lösen. Sie lauten:

| differentiell | integral |
|--|---|
| $rot \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} + \mu_0 \vec{j}$ | $\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} d\vec{A} + \mu_0 \int \vec{j} d\vec{A}$ |
| $rot \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$ | $\oint \vec{E} d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} d\vec{A}$ |
| $div \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$ | $\int \vec{E} dA = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$ |
| $div \vec{B} = 0$ | $\int \vec{B} d\vec{A} = 0$ |

Tab. 1: Maxwellsche Gleichungen

Dieser vollständige Satz von Feldgleichungen drückt eine völlige Symmetrie zwischen elektrischen und magnetischen Feldern aus:

„Ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Wirbelfeld. Ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld.“ [9]

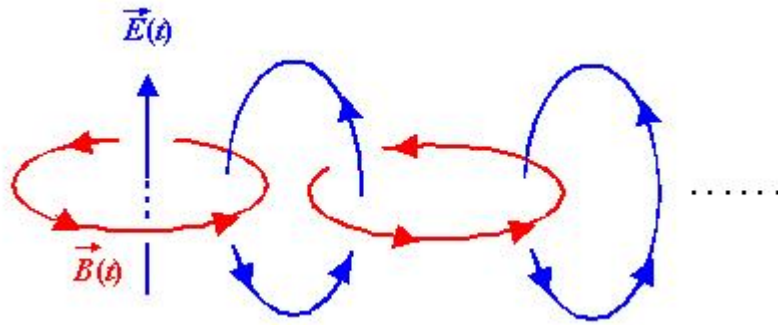


Abb. 1: Elektrische und magnetische Felder

Durch die Maxwell'schen Gleichungen wissen wir, dass die beiden Felder zu jeder Zeit in Phase sind, d.h. ihre Intensitätsmaxima sind am gleichen Ort. Die Feldstärken des elektrischen und magnetischen Feldes sind immer und überall durch folgende Beziehung miteinander verknüpft:

$$\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} \cdot \vec{B} \quad (6)$$

Im Vakuum gilt $\epsilon_r = \mu_r = 1$, so dass sich Folgendes ergibt:

$$\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \vec{B} = c \vec{B} \quad (7)$$

Die elektromagnetische Welle breitet sich im Vakuum mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ aus. Sie kann folgendermaßen berechnet werden:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (8)$$

Die klassische Theorie der elektromagnetischen Strahlung zeigt einen Zusammenhang zwischen Energie E und Impuls p auf:

$$E = pc \quad (9)$$

Mit dieser Wellentheorie des Lichtes lassen sich eine Vielzahl optischer Phänomene deuten und erklären. Hierzu gehören Interferenzerscheinungen, Brechung, Streuung und Polarisationserscheinungen.

2.1.2 Das elektromagnetische Spektrum

Elektromagnetische Wellen werden nach ihrer Wellenlänge λ bzw. Frequenz ν in verschiedene Bereiche eingeteilt. Die Gesamtheit aller Wellenlängen und Frequenzen wird als elektromagnetisches Spektrum bezeichnet. Das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ist hierbei gleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der entsprechenden Welle, also gleich der Lichtgeschwindigkeit, $c = \lambda \cdot \nu$. In der nachfolgenden Abbildung [Abb. 2] sind die verschiedenen Wellenlängen- und Frequenzbereiche mit ihren gebräuchlichen Namen aufgelistet. Das Spektrum des sichtbaren Lichtes liegt zwischen der Infrarotstrahlung und der Ultraviolettstrahlung.

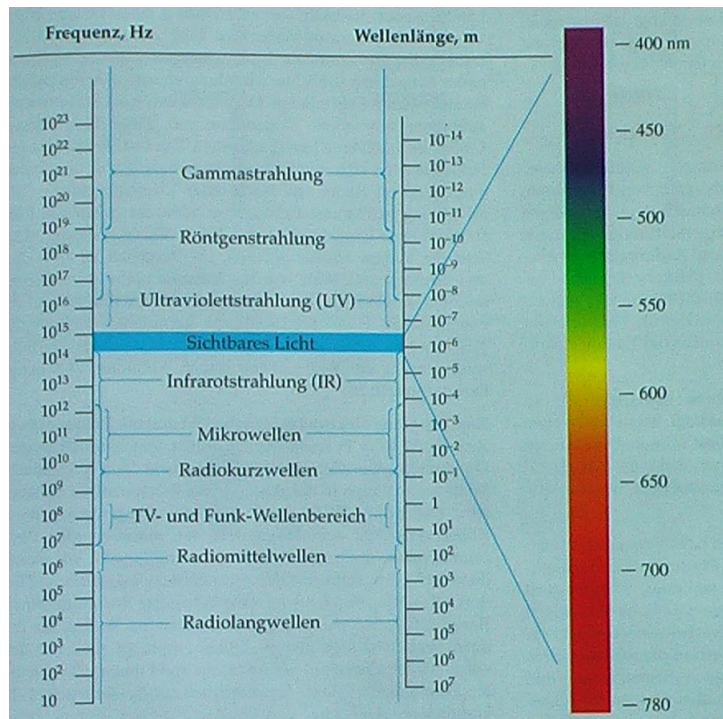


Abb. 2: Elektromagnetisches Spektrum

Wellenlängen in der Größenordnung von Dezimeter bis Kilometer umfassen den Radiobereich; Rundfunk-, Fernsehsender und Handys senden mit genau diesen Wellenlängen. Die kleinste Wellenlänge finden wir in der kosmischen Höhenstrahlung, welche aus dem Weltraum stammt [1]. Wie in der obigen Abbildung [Abb. 2] zu erkennen ist das elektromagnetische Spektrum kontinuierlich. Die Namen einzelner Spektrumsbereiche sind lediglich Bezeichnungen für verschiedene Größenordnungen der Wellenlänge. Für die Namensgebung spielt die Quelle der Strahlung eine Rolle, so wird Strahlung mit der Wellenlänge um $0,1 \text{ nm}$ gewöhnlich Röntgenstrahlung genannt, entsteht diese Strahlung jedoch durch einen Kernzerfall bezeichnet man sie als Gammastrahlung [12].

2.2 Welle-Teilchen-Dualismus

In der Geschichte der Wissenschaft war die Frage immer von großem Interesse, ob das Licht einen Teilchenstrahl oder eine Welle darstellt. Die klassische Lichttheorie als elektromagnetische Welle konnte zwar viele optische Erscheinungen beschreiben und erklären, zum Beispiel Brechung, Streuung oder Polarisationserscheinungen. Sie versagte jedoch zum ersten Mal bei der Erklärung der Emission und Absorption des Lichts. Mit der Beschreibung des Wirkungsquantums h öffnete Max Planck (1858 - 1947) das Tor zur Quantenphysik und erlaubte damit eine vollständige Beschreibung aller Lichtphänomene. Licht zeigt sowohl Wellen- als auch Teilchennatur.

2.2.1 Die Wellennatur des Lichtes

Licht breitet sich geradlinig im Raum aus, wird an Kanten oder Öffnungen jedoch gebeugt. Die Energie einer ebenen Welle ist gleichmäßig in Raum und Zeit verteilt. Die Wellenfront wechselwirkt kontinuierlich mit der Materie, in der sie sich ausbreitet, und überträgt somit Energie.

Da Licht Welleneigenschaften besitzt, weist es genau wie Wasser- oder Schallwellen, bei Beugung Interferenzmuster auf. Zwei oder mehr Lichtwellen müssen kohärent und monochromatisch sein, damit sie stationäre Interferenzerscheinungen erzeugen können. Allgemein gilt für Wellen und somit auch für Lichtwellen:

„Lichtwellen sind kohärent, wenn die Zeitabhängigkeit ihrer elektrischen Felder $E_1(t)$ und $E_2(t)$ bis auf eine Phasenverschiebung δ die gleiche ist:

$$E_2(t) = \text{const} \cdot E_1(t + \delta) \text{ [10].}$$

Daraus folgt, dass zwei harmonische Wellen mit gleicher Frequenz, Wellenlänge und Polarisation, aber unterschiedlicher Phase, zu einer harmonischen Welle interferieren, deren Amplitude von der Phasendifferenz abhängt. Beträgt die Phasendifferenz zwischen den beiden Wellen null oder ein ganzzahliges Vielfaches von 2π , so schwingen sie in Phase und interferieren konstruktiv, ihre Amplituden addieren sich. Beträgt die Phasendifferenz jedoch ein ungeradzahliges Vielfaches von π , befinden sich die eintreffenden Wellen in Gegenphase und interferieren destruktiv, sie löschen sich bei gleicher Amplitude gegenseitig aus. Der Zusammenhang zwischen Gangunterschied Δr und der Phasendifferenz δ ist gegeben durch:

$$\delta = \frac{\Delta r}{\lambda} \cdot 2\pi \quad (10)$$

Da im Allgemeinen Licht von einzelnen, unabhängigen Quellen spontan emittiert wird, ist es unwahrscheinlich, dass diese kohärente Wellenzüge ausstrahlen. In der Praxis erzielt man Kohärenz durch die Verwendung einer einzelnen Lichtquelle, dessen Wellenzüge durch Spiegelung, Brechung, Streuung oder Beugung aufgeteilt und dann wieder zusammengeführt werden. Wenn die aufgeteilten Wellenzüge unterschiedlich lange Lichtwege zurückgelegt haben, so besteht ein Gangunterschied zwischen ihnen und es kommt zur Interferenz. Heute sind Laser die wichtigsten und gebräuchlichsten Quellen für kohärentes Licht.

Der Gangunterschied zwischen zwei interferierenden Wellenzügen darf eine gewisse Kohärenzlänge L nicht überschreiten. Sie ist im günstigsten Fall so groß wie die mittlere Wellenlänge eines von einem Atom ausgesandten Wellenzuges $L = c\tau$. Hierbei ist τ die Zeitspanne, in der das Paket einen bestimmten Raumpunkt passiert, sie wird Kohärenzzeit genannt.

Als Grundkonstruktion der Interferenzoptik betrachtet man das berühmt gewordene Doppelspalt-Experiment, welches zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Thomas Young (1773 - 1829) erstmals durchgeführt wurde. Er realisierte zwei kohärente Lichtquellen dadurch, dass er zwei enge parallele Spalte einer Blende mit einer Lichtquelle beleuchtete. Nach dem Elementarwellenprinzip von Huygens wirken die beiden Spalte als linienförmige Quellen. Auf einem Schirm im Abstand l kann das Interferenzmuster beobachtet werden. Auf einem Punkt P_k auf dem Schirm beträgt der Gangunterschied der beiden Wellenzüge $\Delta r = a \cdot \sin(\alpha_k)$, wobei a der Abstand der beiden Spalte ist. Dies ist in der folgenden Abbildung [Abb. 3] noch einmal schematisch dargestellt:

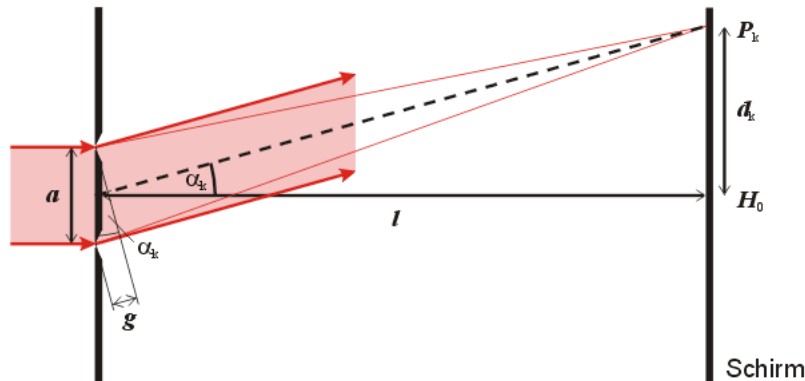


Abb. 3: Doppelspaltversuch

Für die Interferenzmaxima ergibt sich:

$$\sin(\alpha_k) = \frac{k\lambda}{a} \quad (11)$$

Für die Interferenzminima ergibt sich:

$$\sin(\alpha_k) = \frac{(k - 0.5)\lambda}{a} \quad (12)$$

Hierin ist k die Ordnung der Maxima, bzw. der Minima.

2.2.2 Die Teilchennatur des Lichtes

In der physikalischen Beschreibung bewegen sich Teilchen immer geradlinig, treffen sie auf ein Hindernis oder stoßen mit einem anderen Teilchen zusammen, ändern sie ihre Richtungen und ggf. Geschwindigkeiten. Teilchen tauschen Energie nicht kontinuierlich mit ihrer Umgebung aus, sondern nur dann, wenn es zu Zusammenstößen kommt. Dies geschieht im Allgemeinen an bestimmten Punkten in Raum und Zeit. In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckten Wissenschaftler, dass eine Lichtwelle ihre Energie nur in bestimmten, diskreten Portionen austauscht. Diese Eigenschaft kannte man bis zu diesem Zeitpunkt nur von Teilchen, daraus lässt sich ableiten, dass die Lichtenergie quantisiert ist. Diese Lichtpakete werden als Photonen bezeichnet.

Albert Einstein (1879 - 1955) konnte 1905 den photoelektrischen Effekt mit Hilfe der Energiequantisierung erklären, dieses Experiment ist ebenfalls ein Nachweis der Teilchennatur des Lichts. Beim sogenannten Photoeffekt werden negativ geladene Metallplatten mit ultraviolettem Licht bestrahlt, welches Elektronen aus der Kathode herauslöst. Die Elektronen werden zur Anode hin beschleunigt, der so erzeugte Strom kann mit einem Ampèremeter gemessen werden. Um die maximale Bewegungsenergie der emittierten Elektronen zu bestimmen, wird an die Anode eine negative Gegenspannung angelegt. Sobald der Strom verschwindet, ist die maximale Elektronenenergie erreicht. Nach den Prinzipien der klassischen Physik würde man erwarten, dass die emittierten Elektronen eine größere Beschleunigung erfahren, je höher die Lichtintensität wird. Die Messung hat jedoch gezeigt, dass die Energie nur von der Frequenz des einfallenden Lichtes abhängt, sie ist unabhängig von der Intensität. Einstein erklärte dieses Ergebnis mit der Quantisierung des Lichtes. Die Strahlungsenergie ist in Photonen gebündelt, für die Energie eines Photons gilt die Einstein'sche Gleichung:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = pc \quad (13)$$

In dieser Gleichung bezeichnet ν die Frequenz des einfallenden Lichtes und h das Planck'sche Wirkungsquantum mit dem Wert: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s = 4,136 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$. Da ein Lichtstrahl aus Teilchen besteht, wechselwirkt er durch Zusammenstöße mit den Elektronen der Metalloberfläche der Kathode. Hierbei können Photonen absorbiert werden. Durch die Quantisierung der Energie gibt jedes Lichtteilchen seine ganze Energie an das Elektron ab, mit dem es zusammenstößt. Nach Abzug der Austrittsarbeit W_0 bleibt als maximale kinetische Energie der abgelösten Elektronen:

$$E_{kin,max} = h\nu - W_0 \quad (14)$$

Dieser Ausdruck wird Einstein'sche photoelektrische Gleichung genannt. In ihr ist W_0 diejenige Energie, die mindestens aufzubringen ist, um ein Elektron aus der Metalloberfläche auszulösen, sie ist materialabhängig. Um Elektronen aus der Kathode herauszuschlagen zu können, benötigt das Licht eine gewisse Grenzfrequenz ν_k , die entsprechende Grenzwellenlänge λ_k ergibt sich zu: $\lambda_k = \frac{c}{\nu_k}$. Die Austrittsarbeit W_0 ergibt sich aus Gleichung (14), indem die maximale kinetische Energie der Elektronen gleich null gesetzt wird.

$$W_0 = h\nu_k = \frac{hc}{\lambda_k} \quad (15)$$

Die Austrittsarbeit liegt im Allgemeinen bei einigen Elektronenvolt.

Nach der ersten Erklärung der Teilchennatur des Lichtes im photoelektrischen Effekt, erklärte Arthur H. Compton (1892 - 1962) im Jahre 1923 die Beobachtungen seiner Experimente mit ihr. In seinen Versuchen streute er Röntgenstrahlen an freien Elektronen: Trifft eine elektromagnetische Welle auf eine Probe mit freien Ladungsträgern, so wird laut klassischer Physik der Stoßpartner mit der selben Frequenz zum Schwingen angeregt, wie die einlaufende Welle und emittiert so eine Strahlung mit der gleichen Frequenz der einfallenden Strahlung. In den Versuchen von Compton bestand diese emittierte Strahlung aus gestreuten Photonen, welche eine geringere Energie aufweisen, als das Röntgenphoton vor dem Stoß besaß. Das gestreute Photon besitzt eine geringere Frequenz und eine dementsprechend größere Wellenlänge.

Aus Gleichung (13) lässt sich der Impuls eines Photons wie folgt beschreiben:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (16)$$

Für Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie gelten Impuls- und Energieerhaltung. Diese müssen also auch für den Stoßprozess des Photons mit einem freien Elektron

gelten. Nach dem Stoß hat das gestreute Lichtquant eine Wellenlänge λ_2 und einen Impuls p_2 , der Winkel θ bezeichnet den Winkel zwischen den Bewegungsrichtungen des gestreuten und des einfallenden Photons. Mit der Gleichung

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} \cdot (1 - \cos\theta) \quad (17)$$

wird die Änderung der Wellenlänge des ausfallenden Photons beschrieben, diese Differenz hängt nicht von der Wellenlänge des einfallenden Photons ab, sondern von der sogenannten Compton- Wellenlänge:

$$\lambda_{Compton} = \frac{h}{m_e c} \approx 2,43 \text{ pm} \quad (18)$$

Comptons Messwerte für die Änderung der Wellenlänge $\lambda_2 - \lambda_1$ stimmt mit dem Zusammenhang gemäß der Gleichung (17) überein, somit war die Teilchennatur des Lichtes bestätigt [10],[12].

3 Ein Historischer Überblick

3.1 Methoden nach Galilei und Römer

Bereits im griechischen Altertum spekulierten Naturwissenschaftler und Philosophen über die Vorgänge des Sehens und die Natur des Lichts. Die einhellige Meinung, dass sich Licht mit unendlicher Geschwindigkeit ausbreite, hielt sich bis in das 17. te Jahrhundert. Galileo Galilei versuchte als erster Mensch im Jahr 1638 die Lichtgeschwindigkeit experimentell zu bestimmen. Seine Ergebnisse veröffentlichte er in den „Discorsi“. Galileo positionierte sich mit einer auf- und abblendbaren Laterne auf einem Hügel, sein Assistent bezog auf einem circa einer Meile weit entfernten Hügel Position. Auch der Assistent hielt eine Laterne bereit, die er auf- und abdecken konnte. Galileo wollte seine Laterne zuerst aufleuchten lassen, sein Gehilfe sollte auf dieses Signal antworten, indem er seine Leuchte ebenfalls aufdeckt. Die Zeitspanne zwischen dem Auftaktsignal und der Antwort wollte der Wissenschaftler messen, ebenso die Strecke, die das Licht zurücklegt. Die Lichtgeschwindigkeit berechnet sich so zu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (19)$$

Die Geschwindigkeit ist jedoch zu groß, als dass man das extrem kurze Zeitintervall, welches das Licht braucht um eine Strecke von einer Meile zurückzulegen, mit Hilfe der

menschlichen Reaktion bestimmen könnte. So ist es nicht verwunderlich, dass Galilio mit seiner Messung keine eindeutigen Ergebnisse erzielen konnte. Er selber schrieb:

„Ich habe den Versuch nur in geringer Entfernung angestellt, in weniger als einer Meile, woraus noch kein Schluß über die Instantanität des Lichtes zu ziehen war; aber wenn es nicht momentan ist, so ist es doch sehr schnell, ja fast momentan [...]“ [13]

Erst dem dänischen Astronom Ole Christensen Römer (1644 - 1710) gelang der konkrete Nachweis der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit. Er arbeitete zu dieser Zeit mit Giovanni Domenico Casini (1625 - 1712) in der Pariser Sternwarte und beobachtete unter anderem die Bewegungen der Jupitermonde. Römer bemerkte im Jahre 1675, dass der Jupitermond „Io“ Unregelmäßigkeiten aufweist. Der Mond trat später aus dem Schatten des Jupiter aus, wenn die Erde sich auf ihrer Bahn von diesem Planeten entfernte. So kam es zu unterschiedlichen Umlaufzeiten des „Io“, je nach Position der Erde. Römer schloss aus seinen Beobachtungen, dass die Geschwindigkeit des Lichts endlich sei und veröffentlichte, dass das Licht etwa 22 Minuten brauche, um den Erdbahndurchmesser zu durchlaufen. Der heute ermittelte Werte ist $16 \text{ Min} 38 \text{ s}$. Der Astronom gab keinen exakten numerischen Wert für die Lichtgeschwindigkeit an, da der genaue Erdbahndurchmesser noch nicht endgültig bekannt war, die Bedeutung in Römers Arbeit liegt in der Feststellung der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit [13]. In der unteren Abbildung [Abb. 4] ist einmal schematisch gezeigt, wie die „Verspätung“ des „Io“, also sein verspäteter Austritt aus dem Planetenschatten im Herbst, zustande kommt:

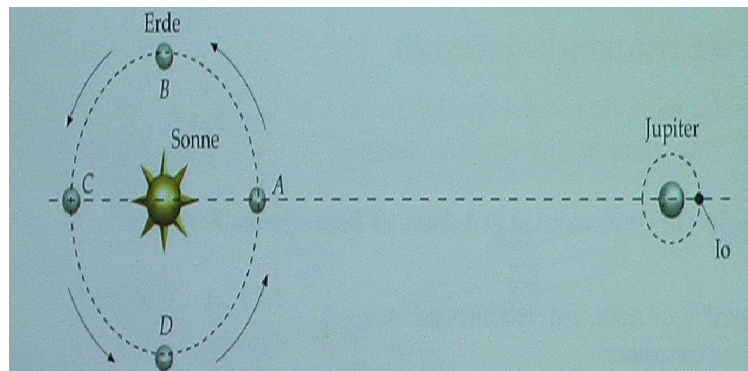


Abb. 4: Messmethode nach Römer

James Bradley (1692 - 1762), ein englischer Astronom, schloss 1729 durch seine Beobachtung der Abberation des Lichtes auf die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit. Der Astronom untersuchte die Parallaxe des Fixsterns γ Draconis im Sternbild des Drachen,

hierbei beobachtete er eine scheinbare Ortsverschiebung. Diese Ortsverschiebung rührt daher, dass das Licht eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzt und somit auch eine gewisse Zeit benötigt, um von der Quelle bis zum Betrachter auf der Erde zu gelangen. Während dieser Zeit dreht sich die Erde um ihre eigene Achse und somit von dem Stern weg, der Himmelskörper erscheint durch ein Teleskop an einer verschobenen Position. Dieses Phänomen nennt man „Aberration“. Seit James Bradleys Beobachtungen setzte sich die Vorstellung einer endlichen Lichtgeschwindigkeit endgültig durch. Bradley errechnete, dass das Licht $8 \text{ Min}13\text{s}$ braucht, um den Weg von der Sonne zur Erde zurückzulegen. [13]

3.2 Methoden nach Fizeau und Foucault

Ende des 17. Jahrhunderts erlangte die Frage der Lichtgeschwindigkeit neue Bedeutung, dies steht im Zusammenhang mit den beiden konkurrierenden Theorien über die Natur des Lichts. Huygens entwickelte die Wellentheorie, Newton hingegen setzte eine Teilchennatur des Lichtes voraus. Die enormen experimentellen Schwierigkeiten erlaubten eine exakte Messung erst Mitte des 19. Jahrhunderts. Armand Fizeau (1819 - 1896), ein französischer Physiker, entwickelte die erste nichtastronomische Methode um die Lichtgeschwindigkeit zu messen. Im Jahr 1849 erprobte er seine terrestrische Messung, welche auf einem rotierenden Zahnrad mit 720 Zähnen basierte. Der Versuchsaufbau, den Fizeau auf einem Hügel in der Nähe von Paris aufbaute, ist in der unteren Abbildung [Abb. 5] schematisch dargestellt.

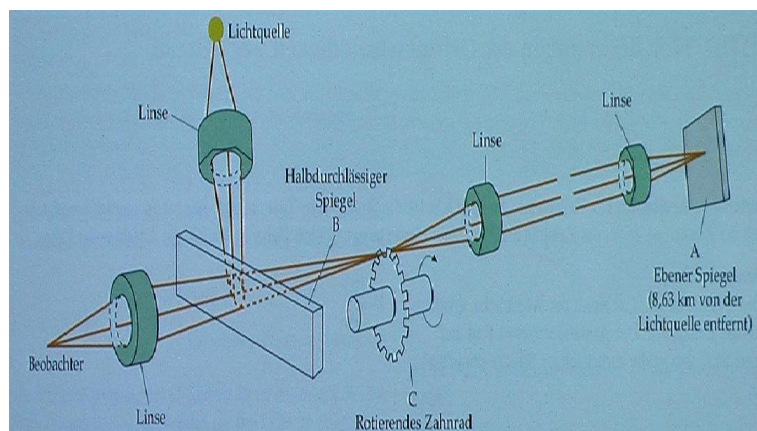


Abb. 5: Messmethode nach Fizeau

Das Licht aus einer Lichtquelle wurde über einen halbdurchlässigen Spiegel durch ein rotierendes Zahnrad geführt und traf in 8633m Entfernung auf einen planaren, statischen Spiegel, wo es reflektiert wurde. Linsen fokussierten den Lichtstrahl, drehte sich

das Zahnrad mit einer geringen Frequenz, so fiel der reflektierte Strahl durch die gleiche Lücke auf den halbdurchlässigen Spiegel. Eine weitere Linse fokussierte diesen Strahl, sodass ein Beobachter ihn sehen konnte. Rotierte das Zahnrad schneller, so wurde das reflektierte Licht durch den jeweils nachfolgenden Zahn abgedeckt, der Beobachter sah nur noch Dunkelheit. Fizeau berechnete die Lichtgeschwindigkeit mittels des Zusammenhangs:

$$c = \frac{2l}{\Delta t} \Rightarrow c = \frac{2l\omega}{\Delta\Theta} \quad (20)$$

Hierbei ist $\Delta\Theta$ die Winkeländerung, ω die Kreisfrequenz, mit der sich das Zahnrad dreht und l der Abstand zwischen dem Rad und dem planaren Spiegel. Der Physiker erhielt mit seinen Messwerten eine Geschwindigkeit des Lichtes in Luft von etwa:

$$c \approx 315.300 \frac{km}{s}$$

Erhöhte der Experimentator die Drehfrequenz noch weiter, durchlief das Licht die nachfolgende Lücke des Zahnrades, wodurch sich dem Beobachter wieder Helligkeit zeigte [12].

Im darauffolgenden Jahr führte Jean Bernard Léon Foucault (1819 - 1868) den Versuch von Fizeau in verbesserter Form durch. Er ersetzte das Zahnrad durch einen rotierenden Spiegel, der Lichtstrahl fiel zunächst auf diesen beweglichen Spiegel und dann auf einen Hohlspiegel. Dadurch, dass der Krümmungsmittelpunkt direkt auf der Höhe des Drehspiegels lag, wurde das Licht in sich selbst zurück reflektiert. Bei hohen Drehfrequenzen (bis zu 800 Hz) traf der Strahl auf seinem Rückweg an einer anderen Position auf den Spiegel und wurde aus seiner ursprünglichen Einfallrichtung abgelenkt. Aus dem Drehwinkel, der Ablenkung und der Länge der Messstrecke konnte Foucault bei bekannter Rotationsgeschwindigkeit die Zeit ermitteln, die das Licht für die Strecke zum festen Spiegel und zurück benötigte. Diese Angaben reichten um die Lichtgeschwindigkeit mittels Gleichung (19) bestimmen zu können. In die $2m$ lange Messstrecke positionierte er eine wassergefüllte Röhre und konnte somit das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium Wasser zur Luft errechnen. Foucault stellte fest, dass die Geschwindigkeit des Lichtes in Wasser circa $\frac{3}{4}$ der Geschwindigkeit in Luft entspricht.

Die Drehspiegelmethode wurde im Laufe der Jahre immer weiter optimiert, so verwendete Albert Abraham Michelson (1852 - 1931) in seinen Messungen einen achteckigen, rotierenden Spiegel. Dreht sich dieser Spiegel mit der passenden Frequenz, so bewegt er sich um genau eine achte Drehung, während das Licht den Weg zum Spiegel und

zurück durchläuft. Das Beobachtungsteleskop befindet sich somit in einer Linie mit der Lichtquelle. 1924 erhielt Michelson damit einen Wert für die Lichtgeschwindigkeit von

$$c = 299.796 \frac{km}{s}$$

Eine modernere Methode der Lichtgeschwindigkeitsbestimmung ist eine indirekte Methode. Hierbei misst man die elektrische Feldkonstante ϵ_0 und die magnetische Feldkonstante μ_0 . Wie schon in Kapitel 2.2.1 beschrieben besteht zwischen der Lichtgeschwindigkeit und den beiden Konstanten folgender Zusammenhang: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$. Aus diesen Werten lässt sich die Geschwindigkeit des Lichts in Vakuum ermitteln [12].

4 Heutige Festlegung der Lichtgeschwindigkeit

In der heutigen Zeit ist sich die Lichtgeschwindigkeit eine genau bestimmte Naturkonstante. In diesem Kapitel möchte ich die Basis und die Experimente vorstellen, welche die Grundlage für die Definition dieses Wertes darstellen.

4.1 Mikrowellen- Interferometer

Mit einem Interferometer lassen sich Wellenlängen und kleinste Längenunterschiede messen. Der Physiker Keith Davy Froome bestimmte in den 1950er Jahren mit einem Mikrowellen-Interferometer die Wellenlänge der verwendeten Mikrowellen. Er verwendete eine Mikrowellenquelle mit einer Frequenz von $\nu = 72 GHz$, dieser Wert war hinreichend genau bekannt. Aus dieser bekannten Größe und seiner gemessenen Wellenlänge konnte er die Lichtgeschwindigkeit ermitteln: $c = \lambda \cdot \nu$. Mit einem Interferometer wurde zu Beginn der modernen Physik die genaue Länge des Urmeters gemessen. Interferometer arbeiten nach folgendem Grundprinzip: Ein kohärenter Lichtstrahl wird mittels Strahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgespalten [15], [16]. Die Teilstrahlen legen unterschiedliche Wege zurück, bis sie auf einem Schirm oder Detektor wieder zu einem Strahl zusammengefügt werden. Sind die beiden Lichtwege gleich lang, so fügen sich die Teilstrahlen wieder zum ursprünglichen Wellenzug zusammen, sie interferieren in einem Punkt. Wenn jedoch die Wegstrecken unterschiedlich lang sind, so ist dies an den Interferenzerscheinungen auf dem Detektor/Schirm zu beobachten. Das Spektrum des zusammengeführten Lichtes weist dann eine Reihe von dunklen Strichen in signifikanten Abständen auf. Aus diesen Interferenzerscheinungen lässt sich die Entfernung oder Dicke des zu vermessenden Objektes ableiten. Verändert sich nun der Weg, den die Wel-

lenzüge während der Messung zurücklegen, so ändert sich auch deren Phasenbeziehung zueinander, die Orte der Interferenzmaxima wandern. Durch die genaue Kenntnis der Streckenänderung und die Anzahl der Interferenzmaxima lässt sich die Wellenlänge des emittierten Lichtes bestimmen. Grundlage bei diesen Messungen mit dem Interferometer „ist die Aussage über das Auftreten von Minima und Maxima in Abhängigkeit von der Wellenlänge, der Wegdifferenz zwischen den interferierenden Teilstrahlen sowie der Anzahl der Interferenzstreifen, die pro Streckendifferenz messbar sind“ [15]. Es gilt:

- für Maxima: $\delta = 2 \Delta s = n\lambda$
- für Minima: $\delta = 2 \Delta s = \frac{2n+1}{2} \cdot \lambda$

4.2 Die endgültige Festlegung der Lichtgeschwindigkeit

Die Boulder- Gruppe führte im Auftrag des National Bureau of Standards (USA) die genaueste Messung der Lichtgeschwindigkeit durch, der Projektleiter war Kenneth M. Evenson. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht durch einige Probleme gekennzeichnet. Zwar konnte die Frequenz der verwendeten Mikrowellen oder niederfrequenten Wellen exakt bestimmt werden, die dazugehörige Wellenlänge jedoch nicht. Bei sichtbarem Licht kehrte sich dieses Dilemma um, hier war die Wellenlänge hinreichend bekannt, die Frequenz jedoch nicht. Die Boulder- Gruppe entwickelte 1972 eine neue Methode, um diese Beschränkung zu umgehen.

Die Gruppe verwendete einen methanstabilisierten Helium- Neon- Laser und ermittelte sowohl die Frequenz, als auch die Wellenlänge hinreichend genau. Hierbei bestimmten sie mittels infraroter Frequenzsynthese-Techniken die Frequenz des Laser. Ein Interferometer ergab die Wellenlänge von $\lambda = 3,392231376\mu m$, die Multiplikation dieser beiden Messwerte ergab einen Wert für die Lichtgeschwindigkeit, welcher um einen Faktor 100 genauer war, als der bis dahin angenommene Wert. Die Messergebnisse der Boulder-Gruppe wurden durch einige internationale Laboratorien bestätigt. Im gleichen Jahr wurde eine Asymmetrie in der Kryptonlinie gefunden, dies lieferte eine exakte Definition des Meters. In der 17. Generalversammlung für Maß und Gewicht im Jahr 1983 wurde das Meter wie folgt definiert [19], [20]:

„Ein Meter ist die Strecke, die das Licht im Vakuum in einer Zeit von $\frac{1}{299.792.458}$ Sekunden zurücklegt“

Des Weiteren erhielt die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Vakuum seine endgültige Festlegung:

$$c = 299.792.458 \frac{m}{s}$$

5 Moderne Messungen in der Sekundarstufe II

5.1 Die Voraussetzungen und die Einordnung in den Lehrplan

Das Thema „Licht“ und im Besonderen die Geschwindigkeitsmessung wird im Lehrplan der gymnasialen Oberstufe [18] in die Klassen 12/13 eingeordnet. Sowohl im Grund- als auch im Leistungskurs wird es im Zusammenhang mit dem übergeordneten Gebiet der „Elektromagnetischen Strahlung“ thematisiert. Der Lehrplan formuliert den Kontext als „Physikalische Grundlagen der drahtlosen Nachrichtenübertragung“ [18] und spezifiziert nachfolgend „Informationsübertragung durch Licht“ [18]. Diese Themen bedürfen fundamentaler Vorkenntnisse der Schüler¹, sie setzen die Behandlung der mechanischen Schwingungen und Wellen voraus, ebenso weitreichende Kenntnisse über Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung. Die Vorkenntnisse ermöglichen den Schülern erkenntnisleitende Analogiebetrachtungen im Bereich der elektrischen Phänomene.

In diesem Zusammenhang lernen die Schüler vielfältige Aspekte des Lichts kennen:

- Geometrische Optik und Modellvorstellungen
- Welleneigenschaften des Lichts
- Licht als elektromagnetische Welle

Im Einzelnen sollen nun die Gegenstände dieser drei physikalischen Eigenschaften des Lichts erläutert werden. Zum ersten Kontextbaustein gehören die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus historischer und moderner Sicht, Modellvorstellungen des Lichtes, die Ausbreitungsgeschwindigkeit in verschiedenen Medien und das Brechungsgesetz. Im Kontext der Welleneigenschaften des Lichts lernen die Schüler Beugung und Interferenz, Kohärenz, sowie Emission- und Absorptionsspektren kennen. Der dritte Baustein bietet die mögliche Thematisierung der Polarisation, des Faraday-Effekts, des

¹Für die gesamte Arbeit gilt ausdrücklich: Auch wenn aus praktischen Gründen nur die männliche Bezeichnung verwendet wird, sind immer auch die weiblichen Pendanten gemeint.

Brewster'schen Gesetzes, der Modulation des Lichts, des elektromagnetischen Spektrums als auch einen Ausblick auf die Atomphysik. In dem Ausblick auf die Atomphysik sollen Atome als Sender und Empfänger betrachtet werden. In diesem letzten Kontextbaustein kann die Lehrperson konkret auf die Informationsübertragung mittels Licht eingehen [18].

Im Physikunterricht der Sekundarstufe II gelangen zwei physikalische Grundgleichungen zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit zur Anwendung:

- $v = \frac{s}{t} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$
- $c = \nu \cdot \lambda$

Auf diesen beiden Zusammenhängen der Physik basieren auch die nachfolgenden zwei Messprinzipien, welche in der Schule durchgeführt werden können.

5.2 Die Lecherleitung

Im Schulunterricht wird meist der Versuchsaufbau von Foucault verwendet, um die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen. Dieses Experiment ist die optische Methode mit dem geringsten Zeit-, Raum- und Justieraufwand, hierbei wird die Lichtgeschwindigkeit mittels der Gleichung $v = \frac{s}{t}$ bestimmt. Eine andere, nicht optische Möglichkeit für den Unterricht ist ein Versuchsaufbau mit Lecherleitungen. In diesem Experiment ergibt sich die Geschwindigkeit aus dem Produkt von Frequenz und Wellenlänge, es kommen nur elektromagnetische Wellen im Hochfrequenzbereich infrage. Da die Vakuumlichtgeschwindigkeit gleich der Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum ist, ist dieser Versuchsaufbau sehr gut geeignet. Der Versuch ist nach dem Physiker Ernst Lecher (1856 - 1926) benannt.

5.2.1 Grundlagen

Lecherleitungen sind im Alltag aus Fernsehantennenkabeln älterer Bauart bekannt. Ein Lecher-System besteht aus zwei parallelen Leitungsdrähten, zum Beispiel aus Messing. An diese Drähte wird induktiv ein Sender gekoppelt, das heißt an und zwischen diesen beiden Leitern bildet sich eine elektromagnetische Welle aus, die sich in den Leitern ausbreitet. Es gibt zwei Zustände, in denen sich das Lecher-System befinden kann, zum einen kann es ein offenes, zum anderen ein geschlossenes Ende aufweisen. In beiden Fällen bilden sich die elektromagnetischen Wellen in Form von stehenden Wellen aus. Bei einem offenen Ende kommt es zu einem Phasensprung der Spannung, so dass an diesem

Ende ein Spannungsknoten entsteht. Ist das Ende geschlossen, zum Beispiel durch eine Kurzschlussbrücke, so wird die Welle reflektiert, es kommt zu keinem Phasensprung. Sowohl das Reflektionsverhalten, als auch die Lage der Bäuche und Knoten von Spannung und Stromstärke sind komplementär zueinander, dies ist auch in der folgenden Abbildung [Abb. 6] zu erkennen. „Strom und Spannung verhalten sich wie Geschwindigkeit und Druck am geschlossenen oder offenen Ende einer Pfeife“ [10]. Im Folgenden ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt:

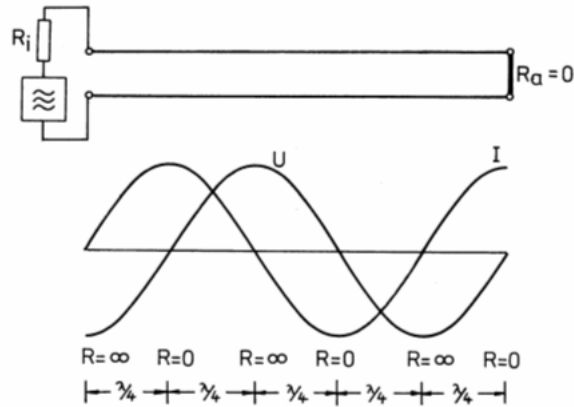


Abb. 6: Das Lechersystem

Die Anfangsspannung an den Messingrohren sei $U(t) = U_0 \sin(\omega t)$, an beliebiger Stelle zwischen den Leitern ist die Spannung so gegeben durch:

$$U_1 = U_0 \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) \quad (21)$$

Hierbei ist x die aktuelle Position auf dem Leiter vom Sender aus betrachtet und v die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. An dem geschlossenen Ende der Leitung wird die einlaufende Welle mit einem Phasensprung von π reflektiert, für die rücklaufende Welle ergibt sich somit:

$$U_2 = -U_0 \sin\left(\omega\left(t + \frac{x}{v}\right)\right) \quad (22)$$

Überlagern sich diese beiden, entsteht eine stehende elektromagnetische Welle, welche eine dementsprechende Wellengleichung aufweist:

$$U = -2U_0 \sin\left(\omega \frac{x}{v}\right) \cos(\omega t) \quad (23)$$

Durch eine Kurzschlussbrücke kann man beliebige stehende Wellen auf den Leitungsdrähten erzeugen. An der Position der Brücke ist die Spannung stets Null, diese Stelle wählt man als $x = 0$. Um nun weitere Spannungsnullstellen bzw. -knoten zu bestimmen setzt man den zeitunabhängigen Faktor der Wellengleichung gleich Null und ermittelt die x - Positionen.

$$\begin{aligned} \cos(\omega \frac{x}{v}) = 0 &\Leftrightarrow \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x) = 0 \\ \Rightarrow x &= \frac{n\lambda}{2} \end{aligned} \tag{24}$$

Damit ist der Abstand zwischen zwei Spannungsknoten gleich einer halben Wellenlänge oder Vielfache n davon. Wie schon eingangs skizziert verhalten sich Strom und Spannung komplementär. Dies rührt daher, dass aufgrund der veränderlichen Spannung entlang der Leiter, elektrische Ladungen verschoben werden. Diese Ladungsänderungen verursachen einen veränderlichen Strom. Auch hier bildet sich eine stehende Welle aus:

$$I = I_0 \sin(\omega t) \cos(\omega \frac{x}{v}) \tag{25}$$

Mit diesem Wissen kann man nun die Wellenlänge ermitteln und mit der Kenntnis der Sendefrequenz schlussendlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen bestimmen.

5.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Abschnitt meiner Arbeit möchte ich den Versuchsaufbau des Lechersystems so vorstellen, wie er in der Physikdidaktiksammlung der Universität Bielefeld zu finden ist. Dieser Aufbau ist ebenfalls für den Schulunterricht einsetzbar.

Ein Sender, mit einem $48,083 \text{ MHz}$ Schwingquarz, wird mittels Bananenstecker mit den beiden Messingrohren verbunden, diese befinden sich in einer Halterung aus Kunststoff und sind parallel zueinander angeordnet [14]. Neben den Lecherleitungen lässt sich ebenfalls ein Frequenzzähler an den Sender anschließen. Die Frequenz des Quarzes wird vom Sender vervierfacht, bevor sie induktiv auf die Leitungen gekoppelt wird. Nun sind zwei Vorgehensweisen möglich, um die Wellenlänge λ zu vermessen. Zum einen kann eine Glühlampenbrücke, die sich zwischen den beiden Leitern befindet, soweit verschoben werden, bis sie maximale Helligkeit aufweist. Dann wird sie so weit verschoben, bis sie erneut maximal leuchtet. Diese Strecke ist, wie im oberen Abschnitt erläutert der Abstand zwischen zwei Strommaxima, und somit gleichzeitig gleich der halben Wellenlänge. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass sich die maximale Helligkeit nicht exakt

bestimmen lässt und somit nur ungenaue Messwerte erreicht werden.

Die andere Methode der Wellenlängenbestimmung sieht derart aus, dass eine Kurzschlussbrücke über beide Leiter gelegt wird. Ein am Sender befindliches Glühlämpchen erlischt genau dann, wenn das System optimal abgestimmt ist. Dass heißt an dieser Position verhält sich das System wie ein Schwingkreis und dem Sender wird maximale Energie entzogen. Die Lecherleitungen entziehen dem Kontrolllämpchen am Sender die nötige Energie, um zu leuchten. Auch die Kurzschlussbrücke wird soweit auf den Leitern verschoben, bis die Glimmlampe ein zweites mal erlischt. Dieser Abstand ist wiederum gleich der halben Wellenlänge der elektromagnetsichen Wellen mit der Frequenz $4 \cdot 48,083 \text{ MHz}$. Mit diesem zweiten Verfahren lassen sich genauere Ergebnisse erzielen, da man das Erlöschen der Kontrolllampe sehr gut und genau beobachten kann.

5.2.3 Messergebnisse und Erörterung

Bei der Durchführung des Versuches habe ich mich für die zweite vorgestellte Methode der Wellenlängenbestimmung entschieden. In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Messungen mittels Kurzschlussbrücke aufgeführt:

| Abstand $\Delta s = \frac{\lambda}{2}$ in m | Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = \lambda \cdot \nu$ in $[10^8 \frac{m}{s}]$ |
|---|---|
| 0,766 | 2,947 |
| 0,753 | 2,897 |
| 0,763 | 2,935 |
| 0,764 | 2,939 |
| 0,764 | 2,939 |

Tab. 2: Messergebnisse der Lecherleitung

Für die Wellenlänge λ ergibt sich eine Standardabweichung von $\Delta s = 0,01 m$, als Mittelwert für die gemessenen Werte

$$\lambda = (1,524 \pm 0,01) m$$

Die Schwankungen des Quarzoszillators ist angegeben mit $\nu_{Schwank.} = 20 \text{ Hz}$, dies entspricht einer Ungenauigkeit von $4 \cdot 10^{-7}$ der ausgehenden Sendefrequenz und kann vernachlässigt werden.

Aus diesen Messwerten ergibt sich eine durchschnittliche Lichtgeschwindigkeit von:

$$c = (2,931 \pm 0,02) \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Die so bestimmte Geschwindigkeit des Lichts bedarf jedoch noch zweier Korrekturen:

- Die Lichtgeschwindigkeit ist unter normalen Laborbedingungen im Vakuum rund $95 \cdot 10^3 \frac{m}{s}$ größer, als in Luft.
- Aufgrund des Skin-Effektes dringt die elektromagnetische Welle auch in das Ausbreitungsmedium, in diesem Fall das Messingrohr ein, dies verringert die Lichtgeschwindigkeit ebenfalls.

Bei hohen Frequenzen im Wechselstromkreis tritt der sogenannte Skin-Effekt auf. Dieser besagt, dass die freien Ladungsträger bei hohen Frequenzen durch die innere Selbstinduktivität an die Leiterwände gedrückt werden. Diese Ladungsträger behindern somit die freien Ladungsträger auf ihrem Weg und verringern indirekt den Leiterquerschnitt. Der Skin-Effekt führt zu einer Erhöhung des Widerstands.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Korrekturen stimmt der ermittelte Wert für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen im Rahmen der Fehler-toleranz gut mit dem Literaturwert überein.

5.3 LEYBOLD - LD Didactic Lehrmittelgerät

Neben optischen Messmethoden und der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit dem Lechersystem, kann im Physikunterricht ein professionelles Lehrmittelgerät eingesetzt werden. Verschiedene Lehrmittelfirmen, wie zum Beispiel LEYBOLD Lehr- und Didaktiksysteme oder PHYWE, bieten fertige Versuchseinheiten an. In diesem Kapitel möchte ich beispielhaft das Gerät der Firma LEYBOLD vorstellen. Die Funktionsweise und Konzeption entspricht dem der Firma PHYWE.

5.3.1 Grundlagen

In dem vorherigen Kapitel wurde das Lechersystem zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit skizziert, dieses verfolgte den Ansatz, die Geschwindigkeit als Produkt der Wellenlänge λ und Frequenz ν zu ermitteln. Das Lehrmittelgerät von LEYBOLD beschreitet einen anderen Weg, die Lichtgeschwindigkeit c wird als Quotient einer Strecke s und der Zeit t betrachtet: $\nu = c = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ [21]. Der Versuchsaufbau enthält einen Lichtsender,

einen Empfänger und ein Netzteil. Der Sender besteht aus einer LED, welche Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 670 \text{ nm}$ ausgibt, als Sensor fungiert eine Silizium PIN-Diode im Empfänger. Die Intensität des ausgehenden Lichtsignals, Referenzsignal genannt, wird mit einer Frequenz von $\nu = 60,0 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$ moduliert, hierbei handelt es sich um eine Amplitudenmodulation. Die Wellenlänge dieses modulierten Signals beträgt, unter Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit, $\lambda_{mod.} = \frac{c}{\nu} = 4,98 \text{ m}$. Das Signal durchläuft eine Strecke Δs und trifft dann auf die Empfangsdiode. Die Laufzeitverschiebung des Lichts macht sich in der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \nu \cdot \Delta t \quad (26)$$

des Empfängersignals gegenüber dem Referenzsignal bemerkbar. In Schulsammlungen sind meist ältere, einfache Oszilloskope zu finden, deren Zeitauflösung nicht schnell genug ist, um ein Signal mit einer Frequenz von $\nu = 60,0 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$ auflösen zu können. Aus diesem Grund werden Empfängers- und Referenzsignal mit einem Signal der Frequenz $\nu' = 59,9 \text{ MHz}$ gemischt, dieses Signal weist nun die Frequenz $\nu_1 = \nu - \nu' = (100 \pm 10) \text{ kHz}$ auf. Der hochfrequente Anteil des Sendesignals ist durch diesen Tiefpass unterdrückt und für das Empfängersignal gilt:

$$U_1 = a \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_1 \cdot t - \Delta\varphi) \quad (27)$$

Die Phasenverschiebung hat sich durch das Mischen nicht geändert, da sowohl Sendesignal als auch Empfangssignal durch eine lineare Operation gleichermaßen verändert wurden. Auf dem Oszilloskop erscheint jetzt eine scheinbare Laufzeitdifferenz Δt_1 zwischen den beiden Signalen. Die Laufzeitdifferenz rührt daher, dass das Licht des Senders für die zurückgelegte Laufstrecke Δs eine gewisse Zeit braucht und somit das Signal am Empfänger verspätet gegenüber dem Referenzsignal des Senders ankommt. Um der Mischung der Signale Rechnung zu tragen muss am Oszilloskopbildschirm zusätzlich die Periodendauer T_1 abgelesen werden, so dass für die tatsächliche Laufzeit Δt auf der Messstrecke Δs gilt:

$$\Delta t = \Delta t_1 \cdot \frac{T}{T_1} = \frac{\Delta t_1}{T_1 \cdot \nu} \quad (28)$$

Aus diesen Informationen setzt sich die Bestimmungsgleichung der Lichtgeschwindigkeit mit dieser Versuchseinheit von LEYBOLD wie folgt zusammen [20]:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t_1} \cdot \frac{T_1}{T} = \frac{\Delta s}{\Delta t_1} \cdot T_1 \cdot \nu \quad (29)$$

5.3.2 Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Ausbreitungsmedien

Neben der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft kann mit dem LEYBOLD Versuchsaufbau auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in verschiedenen Medien ermittelt werden. Typischerweise bieten sich hier destilliertes Wasser, organische Flüssigkeiten und Kunstglas an. Für die Flüssigkeiten liefert die Lehrmittelfirma ein Rohr mit zwei Endfenstern und passendem Sockel mit. Um in diesen Ausbreitungsmedien die scheinbare Laufzeitänderung Δt gegenüber Luft gut am Oszilloskop ablesen zu können, sollte man die Zeitbasis $0,2 \frac{\mu s}{DIV}$ wählen und zuerst die Messung in Luft durchführen. Anschließend wird das Rohrsystem direkt vor dem Sender positioniert. Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im Medium ist eine Erweiterung der Grundgleichung notwendig:

$$c_n = \frac{c_0}{1 + \frac{c_0 \Delta t}{d \cdot \nu \cdot T_1}} \quad (30)$$

Hierbei ist c_0 die Lichtgeschwindigkeit in Luft und d die Strecke, die das Licht durch das von Luft verschiedene Medium zurücklegt. Für die Brechzahl n des Ausbreitungsmediums ergibt sich aus dem physikalischen Zusammenhang $n = \frac{c_0}{c_n}$:

$$n = 1 + \frac{c_0 \Delta t}{d \cdot \nu \cdot T_1} \quad (31)$$

Bei der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Kunstglas wird das Rohrsystem durch den Kunstglaskörper ersetzt, dieser wird dann in den Strahlengang gebracht und die Messung analog zur Flüssigkeitsmessung durchgeführt [21].

5.3.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau ist in der folgenden Abbildung [Abb. 7] schematisch dargestellt.



Abb. 7: Versuchsaufbau nach LEYBOLD

In dem Gehäuse, welches in der linken Bildhälfte der Abbildung 7 zu sehen ist, befindet sich sowohl der Empfänger, das Netzteil, als auch die weitere Elektronik zur Mischung der Signale. Ein sechs Meter langes Koaxialkabel verbindet den Sender (rechte Bildhälfte) mit dem Netzteil, zusätzlich sind für diesen Versuchsaufbau eine Linse mit einer Brennweite von $f = +150 \text{ mm}$, zwei Sockel und ein Zweikanal-Oszilloskop notwendig. Diese zusätzlichen Materialien sollten in jeder Schulphysiksammlung zu finden sein. Die beiden Sockel ermöglichen ein einfaches und sicheres Positionieren des Lichtsenders und der Linse, wie in der Abbildung (Abb. 7) gezeigt, zur weiteren Stabilisierung empfiehlt sich die Verwendung einer optischen Bank. Auf dieser können Sender und Linse geradlinig vor dem Empfänger justiert werden und verrutschen während des Experimentierens nicht unbeabsichtigt.

Zunächst wird der Sender in ca. einem Meter Abstand zur Eintrittsöffnung der Empfangsdiode positioniert und über das lange Koaxialkabel mit dem Netzteil an Position a verbunden. Nach dem Einschalten des Netzteils, kann der rote Lichtfleck des Lichtsenders auf der Front des Gehäuses abgebildet werden. Damit der Lichtfleck möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet wird, kann der Einsatz mit der LED relativ zum Kondensator des Senders verschoben werden. Dann wird der Abstand zwischen Sender und Empfänger auf ca. 50 cm verringert, die Linse in den Strahlengang gebracht und beides so justiert, dass das Licht die Eintrittsöffnung des Empfängers trifft. Der Ausgang des Empfängersignals wird mit Kanal II des Oszilloskop (Zeitbasis: $2 \frac{\mu\text{s}}{\text{DIV}}$, Kopplung: AC) durch das kurze Koaxialkabel verbunden und die Position des Lichtsenders als Position 1 vermerkt. Der Lichtsender wird im Anschluss um $s = 1 \text{ m}$ längs der optischen Achse verschoben, hier hilft die optische Bank die Ausrichtung des Senders und der Linse beizubehalten. Diese Position der LED soll ebenfalls markiert werden (Position 2). Verbindet man nun den Ausgang des Referenzsignals mit dem Oszilloskop (Kanal I), sind sowohl Sende- als auch Empfangssignal auf dem Oszilloskopschirm zu sehen. Zur exakten Messung sollten die vertikalen Positionen der beiden Kanäle symmetrisch zur mittleren Horizontallinie des Displays ausgerichtet werden, des Weiteren sollten die Signale mit dem Phasensteller am Netzteil möglichst genau zur Deckung gebracht werden. Die Periodendauer T_1 der modulierten Signale ist zu bestimmen, dann kann der Sender auf Position 1 zurück gebracht werden. Hierbei ist eine Verschiebung des Empfangssignals zu beobachten, diese Laufzeitdifferenz der beiden Signale t_1 soll abgelesen werden.

Mit dem gerade beschriebenen Versuchsaufbau lässt sich ebenfalls die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien bestimmen. Die Firma LEYBOLD stellt hierzu ein befüllbares Rohr zur Verfügung. Dieses weist Glasscheiben an den Enden auf, so dass

das Lichtsignal ungehindert eindringt. Das Rohr kann durch eine Öffnung mit Flüssigkeiten gefüllt werden und wird durch zwei Rohrhalter fixiert. Um das Rohr möglichst blasenfrei zu befüllen, stülpt man einen Schlauch mit Trichter über die untere Öffnung des Rohres, hält den Trichter höher als das Rohr und füllt destilliertes Wasser ein. Das Rohrsystem wird unmittelbar vor dem Lichtsender in den Strahlengang gebracht und dann, wie bei der Messung in Luft, die Laufzeitdifferenz t_1 bestimmt.

5.3.4 Messergebnisse und Erörterung

- Beobachtungen in Luft:

| Periodendauer T_1 in μs | Strecke s in m | Zeitdifferenz t_1 in μs | Lichtgeschwindigkeit c in $10^8 \frac{m}{s}$ |
|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--|
| 10 | 1,00 | 2 | $3,0 \pm 0,08$ |
| 10 | 0,90 | 1,7 | $3,1 \pm 0,1$ |
| 10 | 0,80 | 1,6 | $3,0 \pm 0,1$ |
| 10 | 0,60 | 1,2 | $3,0 \pm 0,1$ |
| 10 | 0,40 | 0,8 | $3,0 \pm 0,2$ |

Tab. 3. Messergebnisse des Lehrmittelgerätes

Nach Kapitel 5.3.1 ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit in Luft nach Gleichung (29) und einer Modulationsfrequenz von $\nu = 60 \text{ MHz}$:

$$c = \frac{s}{t_1} \cdot T_1 \cdot \nu$$

Als Fehler der einzelnen Messgrößen werden folgende Werte angenommen:

$$\sigma s = \pm 0,1 \text{ cm}$$

$$\sigma t_1 = \pm 0,05 \mu s$$

$$\sigma T_1 = \pm 0,1 \mu s$$

$$\sigma \nu = \pm 5 \text{ kHz}$$

Der Fehler des ermittelten Wertes für die Geschwindigkeit des Lichts mittels dieser Versuchseinheit von LEYBOLD ergibt sich nach Gauß:

$$\sigma c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial t_1} \cdot \sigma(t_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial s} \cdot \sigma s\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial T_1} \cdot \sigma T_1\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial \nu} \cdot \sigma \nu\right)^2}$$

$$\Rightarrow \sigma c = \sqrt{\left(\frac{-s \cdot T_1 \cdot \nu}{t_1^2} \cdot \sigma t_1\right)^2 + \left(\frac{T_1 \cdot \nu}{t_1} \cdot \sigma s\right)^2 + \left(\frac{s \cdot \nu}{t_1} \cdot \sigma T_1\right)^2 + \left(\frac{s \cdot T_1}{t_1} \cdot \sigma \nu\right)^2}$$

Die ermittelten Werte finden sich in der rechten Spalte der obenstehenden Tabelle wieder. Das Verhältnis von Messstrecke zur Zeit ist konstant. Im Rahmen der Fehlertoleranz stimmen alle diese Werte mit dem Literaturwert für die Lichtgeschwindigkeit $c = 2,997.924.58 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ im Rahmen der Fehlertoleranz überein. Das Ergebnis dieser Messung ist zufriedenstellend.

• Beobachtungen in Wasser:

Bei dieser Messung wurde zunächst der Sender in einer Entfernung von 1,5 m zum Empfänger positioniert und fokussiert. Die beiden Signale, das Sende- und das Empfangssignal, wurden mittels Phasenregler am Empfänger auf dem Oszilloskopschirm (Zeitbasis $2 \mu s / DIV$) zur Deckung gebracht. Daraufhin wurde das Rohrsystem ($d = 1 m$), welches mit destilliertem Wasser gefüllt war, direkt in den Strahlengang gebracht und die entstehende scheinbare Laufzeitdifferenz t am Oszilloskop abgelesen. Es stellte sich heraus, dass sich zum Ablesen der Differenz die Nulldruchgänge der beiden Sinuskurven am besten eignen. Bei mehrfachen Messen, ergab sich folgender Durchschnittswert für die Zeitdifferenz:

| Periodendauer T_1 in μs | Zeitdifferenz t_1 in μs | Lichtgeschwindigkeit c_n in $10^8 \frac{m}{s}$ |
|--------------------------------|--------------------------------|--|
| 10,0 | $0,6 \pm 0,1$ | $2,3 \pm 0,2$ |

Tab. 4: Messergebnisse in Wasser

Für die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium Wasser wurde die Gleichung (28) und mit der oben ermittelten Lichtgeschwindigkeit in Luft c verwendet. Der Fehler der Ausbreitungsgeschwindigkeit in diesem Medium ergibt sich nach Gauß:

$$\sigma c_n = \sqrt{\left(\frac{\partial c_n}{\partial \Delta t} \cdot \sigma \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial c_n}{\partial c} \cdot \sigma c\right)^2 + \left(\frac{\partial c_n}{\partial T} \cdot \sigma T\right)^2 + \left(\frac{\partial c_n}{\partial \nu} \cdot \sigma \nu\right)^2 + \left(\frac{\partial c_n}{\partial d} \cdot \sigma d\right)^2}$$

Die Fehler der einzelnen Messwerte habe ich angenommen zu:

$$\sigma c_0 = \pm 0,12 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

$$\sigma t_1 = \pm 0,1 \mu s$$

$$\sigma T = \pm 0,1 \mu s$$

$$\sigma \nu = \pm 5 kHz$$

$$\sigma d = \pm 0,01 m$$

Der ermittelte Wert für die Geschwindigkeit von Licht in Wasser stimmt im Rahmen der Fehlertoleranz mit dem Literaturwert von $c_n = 2,25 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ überein. Aus der Gleichung (29) lässt sich nun auch der Brechungsindex für Wasser ableiten.

- Beobachtungen in Kunstglas:

In diesem Versuchsabschnitt wurde das Rohrsystem der Wassermessung durch ein $d = 0,05m$ dickes Kunstglas ausgetauscht. Das Kunstglas wurde, wie in der Messung mit Wasser, direkt in den Strahlengang des Senders eingebracht. Hier erhält man folgende Durchschnittswerte:

| Periodendauer T_1 in μs | Zeitdifferenz t_1 in μs | Lichtgeschwindigkeit c_n in $10^8 \frac{m}{s}$ |
|--------------------------------|--------------------------------|--|
| 10,0 | $0,2 \pm 0,1$ | $1,0 \pm 0,2$ |

Tab. 5: Messergebnisse in Luft

Die Fehlerwerte und -rechnung ist äquivalent zu den Beobachtungen in Wasser. Der hier bestimmte Wert für das Ausbreitungsmedium Kunstglas weicht von dem Literaturwert für Glas mit hoher optischer Dichte $c_n = 1,16 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ab.

6 Didaktischer Vergleich: Lecher - LEYBOLD

Im Vergleich der beiden Versuchseinheiten nach Lecher und LEYBOLD zeigen beide sowohl didaktische Vor-, als auch Nachteile. Beide Messmethoden weisen eine, für Schulniveau, akzeptable Abweichung vom Literaturwert der Lichtgeschwindigkeit auf. Des Weiteren zeichnet beide Systeme die mathematische Einfachheit aus, da bei der Berechnung der Lichtgeschwindigkeit in beiden Experimenten nur Grundrechenarten nötig sind. Die verwendeten Gleichungen $c = \nu \cdot \lambda$ und $c = \frac{s}{t}$ gehören zu den Grundgleichungen, die als Basiswissen jedem Schüler in der Sekundarstufe II geläufig sein sollten.

Das Lechersystem ist für den Schuleinsatz trotz seiner Genauigkeit nur sehr bedingt einsetzbar. Da mit dieser Versuchsanordnung die generelle Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle bestimmt wird, ist es für Schüler nicht sofort offensichtlich, dass diese Geschwindigkeit mit der des Lichts übereinstimmt. Dies erfordert eine sehr genaue Kenntnis der Thematik „Elektromagnetische Welle“ und eine große Abstraktionsfähigkeit. Ein weiterer Nachteil der Lecherleitung ist die Verwendung von Bauteilen, welche den Schülern unbekannt sind, wie zum Beispiel dem Schwingquarz. Die Schüler erlangen zwar ein generelles Grundverständnis der Funktionsweise dieses Versuchs, jedoch bleibt ihnen ein tiefergehendes Verständnis versagt. Das Lechersystem bietet keine visuelle Unterstützung, den Schülern wird, im Gegensatz zum Versuchsaufbau von LEYBOLD, keine optisch sichtbare „Welle“ geboten. Des Weiteren bedarf dieses Experiment einer großen didaktischen Reduktion der mathematisch-physikalischen Theorie, da diese, wie sie in Kapitel 5.2.1 dargestellt ist, das Schulniveau übersteigt. Die mathematische Herleitung der Strommaxima muss stark reduziert werden. Da in einer Schulsammlung meist nur ein Lechersystem vorhanden ist, kann dieser Versuch den Schülern nur als Lehrerexperiment vorgeführt werden. Die Schüler erhalten nicht die Möglichkeit selbstständig Erfahrungen im Umgang mit dem elektronischen Versuchsaufbau zu sammeln. Insgesamt erscheint die Lecherleitung zwar geeignet die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen, ihre didaktischen Nachteile überwiegen jedoch, so dass der Einsatz im Schulunterricht überdacht werden sollte.

Die Versuchseinheit der Lehrmittelfirma benötigt von ihrem Aufbau mehr Platz als das Lechersystem, welches recht kompakt ist. Auch das Experiment von LEYBOLD wird in den meisten Fällen nur einmal in der Schulsammlung zu finden sein, so dass auch dieses als Lehrerexperiment durchgeführt werden muss. Im Gegensatz zur Methode nach Lecher ist es hier jedoch gut möglich, die Schüler in den Versuchsablauf mit einzubinden, so können die Schüler in Arbeitsteilung die verschiedenen Positionen des Senders einstellen, das Oszilloskop bedienen und die entsprechenden Messwerte festhalten. Didaktisch wertvoll ist die optische Darstellung des modulierten Signales auf dem Bildschirm des Oszilloskops und die direkte Umsetzung des Zusammenhangs zwischen Abstand und Laufzeit des Lichts. Des Weiteren wird den Schülern eine visuelle Unterstützung durch die Verwendung eines sichtbaren, roten Sendersignals geboten. Die Schüler sehen das Licht, welches sie „vermessen“. LEYBOLD bietet die Möglichkeit, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in verschiedenen Medien zu bestimmen, hierzu lässt sich ein Rohrsystem oder ein Kunstglaskörper bestellen. Diese Erweiterungen ermöglichen eine einfache und unproblematische Anwendung. Zwar bedarf auch diese Versuchseinheit einer didaktischen Reduktion der mathematischen Theorie, diese ist jedoch einfacher für

Schüler zugänglich als die der Lecherleitung. Die zeitlich anspruchsvollen Justierarbeiten, sowie der leicht defokussierbare Aufbau erschweren den reibungslosen Umgang mit diesem Experiment und erfordern Geduld. Insgesamt lässt sich die Versuchseinheit der Lehrmittelfirma als didaktisch wertvoll kategorisieren und als geeignet zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.

7 Lichtgeschwindigkeitsmessung mittels elektronischer Schaltungen

Bereits im Jahr 1973 erschienen in der Fachzeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften - Physik“ die ersten Veröffentlichungen zur elektronischen Lichtgeschwindigkeitsmessung. So stellten B. Fedders und G. Ludwig in ihrem Artikel einen „einfachen Versuch für Schule und Praktikum“ [5] vor. Diese beiden Physiker der Universität Kiel modulierten die Intensität einer Lumineszenzdiode mittels eines Quarzes und eines Transistors mit einer Frequenz von $\nu = 25 \text{ MHz}$, dieses Signal wurde von einer schnellen Silizium Planar-Fotodiode empfangen. Das Signal durchlief eine Strecke s , bevor es auf den Empfänger traf, ein Zweikanaloszillograph ermöglichte den Vergleich der beiden Signale. Da Licht eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzt, ist das Empfangssignal gegenüber dem Sendesignal phasenverschoben. Wählte man den Abstand s so, dass die Phasendifferenz zwischen den beiden Signalen ein ganzzahliges Vielfaches von π war, mussten die beiden Sinuskurven auf dem Oszilloskop deckungsgleich sein. Im Versuch verschoben die beiden Experimentatoren dann den Empfänger so weit, bis die Signale ein zweites Mal übereinstimmten. Dieser Abstand entsprach der Wellenlänge der Modulationsschwingung. Aus der Kenntnis s dieser Strecke und der Modulationsfrequenz ließ sich dann die Lichtgeschwindigkeit errechnen:

$$c = \nu \cdot s \tag{32}$$

7.1 Aufbau und Funktion

Seit den ersten Publikationen 1973 wurde die Bestimmungsmethode der Lichtgeschwindigkeit mittels Elektronik immer weiter entwickelt. Das Aufkommen von Laserdioden, schnelleren Oszilloskopen und anderen technischen Bauteilen ermöglichten diese Weiterentwicklung und Optimierung. Verschiedene Autoren diskutierten, entwickelten und testeten über mehrere Jahrzehnte unterschiedliche elektronische Schaltungen und stell-

ten ihre Ergebnisse in den Fachzeitschriften „Praxis der Naturwissenschaften - Physik“ (später umbenannt in „Physik in der Schule“) vor. Im Fundus der Universität Bielefeld befindet sich ein Nachbau der Schaltungen, wie sie im Artikel „Lichtgeschwindigkeitsmessung mit dem Laserpointer - ein einfacher Aufbau für Schule und Hochschule“ [10] aus dem Jahre 2003 beschrieben ist.

Die Autoren planten, einen Laserpointer so zu pulsen, dass er als Sender fungiert und mittels zweier Empfänger eine Wegdifferenz Δs zu erzeugen. Das Sendesignal sollte zunächst auf einen Strahlteiler treffen, der reflektierte Strahl sollte auf Empfänger 1 und der durchgängige Strahl sollte über einem Spiegel reflektiert in einer größeren Entfernung auf Empfänger 2 treffen. Das Signal des Senders liefert die Triggerung für das Oszilloskop, die beiden Empfangssignale sollten Eingang Ch1 und Ch2 des Oszilloskops belegen. Auf dem Oszilloskop ist so die Laufzeitdifferenz der beiden Lichtwege direkt ablesbar. Die Streckendifferenz lässt sich ebenfalls bestimmen. Aus diesen Angaben sollte sich die Geschwindigkeit des Lichts ermitteln lassen:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (33)$$

Die Versuchseinrichtung aus dem Fundus der Universität Bielefeld besteht aus zwei Schaltungsplatinen: einer Sendeeinheit und einer Empfangseinheit. Um den Versuchsaufbau zu vereinfachen und didaktisch klarer zu strukturieren habe ich mich entschieden, mit nur einem Empfänger zu arbeiten. Für Schüler stellt ein Strahlteiler eine zusätzliche Komplexität dar, welche dem erkenntnisorientierten Arbeiten mit diesem Versuchsaufbau abträglich ist. Des Weiteren entfallen, durch die Verwendung eines optisch fokussierten Laserpointers der Firma „hama“ mit der Kennung „LP6 Mini“ und einer Wellenlänge von $\lambda = (640 - 660) \text{ nm}$, aufwendige Justierarbeiten mittels Linsen. Den vorgeschlagenen Aufbau des Experimentes habe ich derart modifiziert, dass ich Sender und Empfänger parallel direkt nebeneinander angeordnet habe. Der Strahl des Laserpointers wird durch einen planaren Spiegel in variablem Abstand von $(0,2 - 2) \text{ m}$ reflektiert und auf die Fotodiode ausgerichtet. Die Wegstrecke des Laserstrahls lässt sich durch einfaches Verschieben des Spiegels variieren. Dem Betrachter eröffnet sich damit direkt die Einsicht in die Wegdifferenz Δs . Durch die Modifikation lässt sich der Versuchsaufbau in seiner Ausdehnung problemlos auf einem Schultisch ausführen.

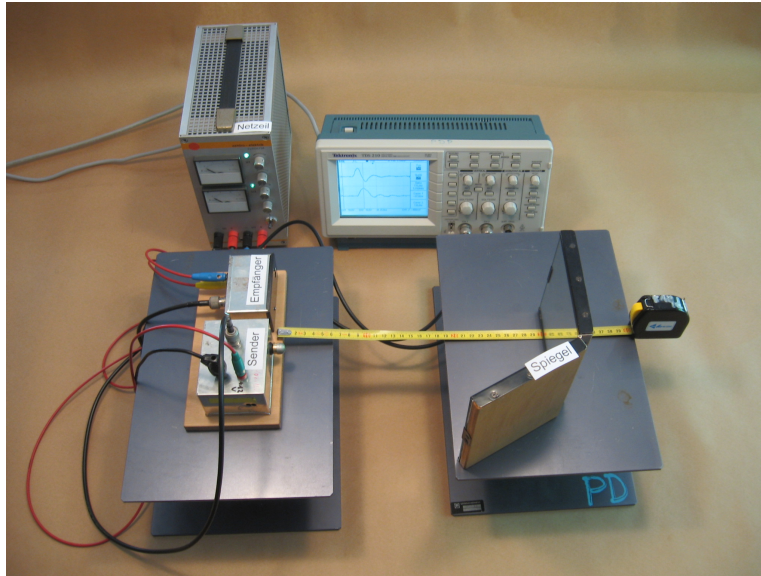


Abb. 8: Gesamtdarstellung des Versuchsaufbaus

In den folgenden Abbildungen [Abb. 9 und 10] sind Sende- und Empfangseinrichtung detailliert dargestellt. Die Schaltpläne vom Sender und Empfänger sind im Anhang zu finden.

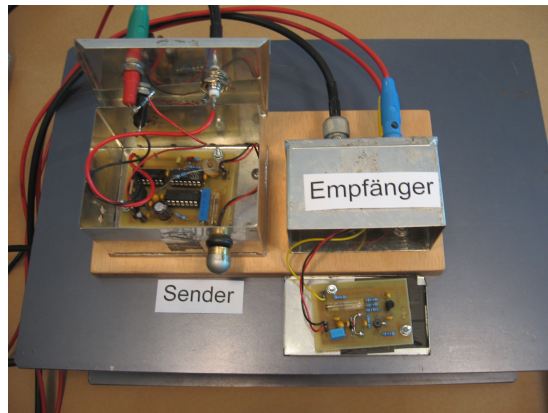
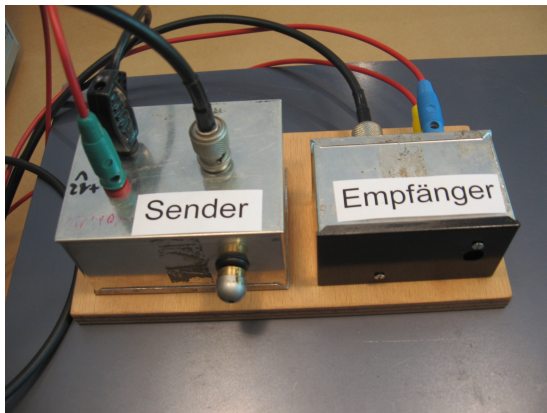


Abb. 9 und Abb. 10: Detailansicht der Versuchseinheit

7.2 Messergebnisse und Erörterung

Bei der Aufnahme der folgenden Messreihe wurde ein digitales Zweikanaloszilloskop (Tektronix TDS 210) mit einer Bandbreite von 60 MHz verwendet. Die Abbildung [Abb. 11] zeigt den zeitlichen Verlauf des Sende- und Empfangssignals. Neben der zeitlichen Wiederholrate/Periodendauer von $5,4\ \mu\text{s}$ lässt sich eine Modulationsfrequenz von $185,2\ \text{kHz}$ ablesen.

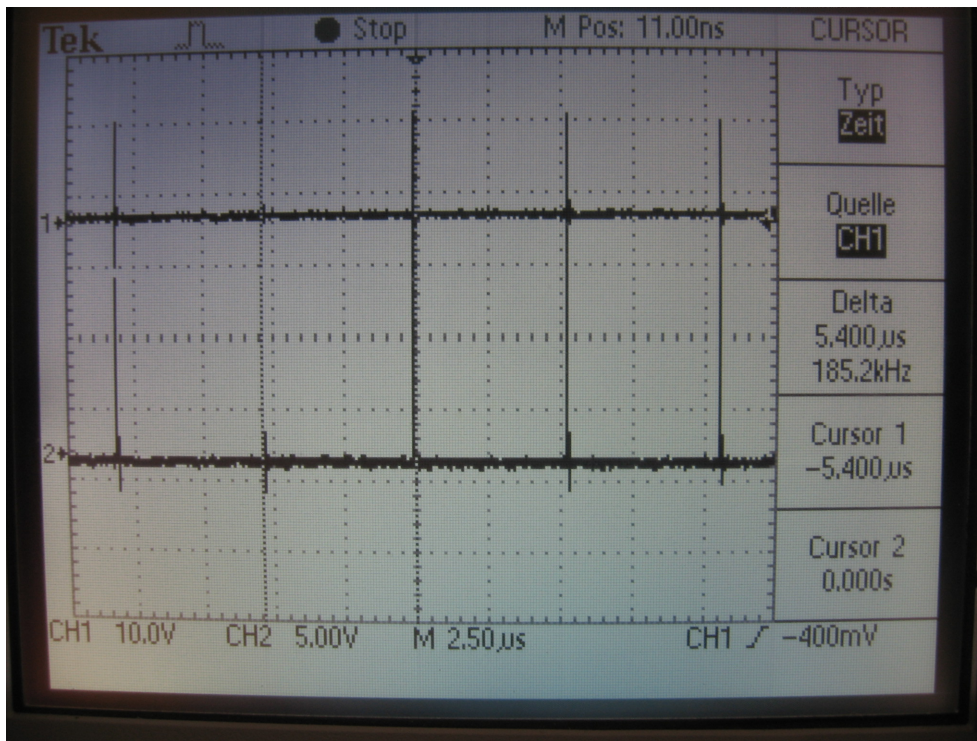


Abb. 11: Sende- und Empfangssignal

Der Kanal Ch2 ist mit dem Empfangssignal belegt, dieses erscheint in dieser Auflösung jeweils als Peak leicht verschoben zur Modulationsfrequenz des Senders.

Bei der folgenden linken Aufnahme [Abb. 12] wurde der Spiegel in einem Abstand von $0,20\text{ m}$ zur Sende/Empfangseinrichtung positioniert, womit die Laufstrecke des Lichtstrahls $0,40\text{ m}$ beträgt. In der rechten Abbildung [Abb. 13] wurde der Abstand des Spiegels auf $2,00\text{ m}$ erhöht, dies führt zu einer Änderung des effektiven Lichtweges von $\Delta s = 3,60\text{ m}$.

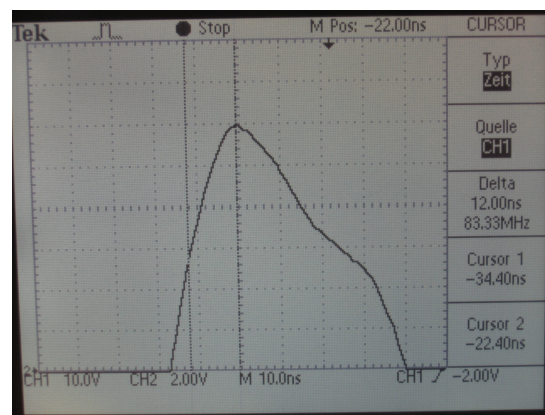
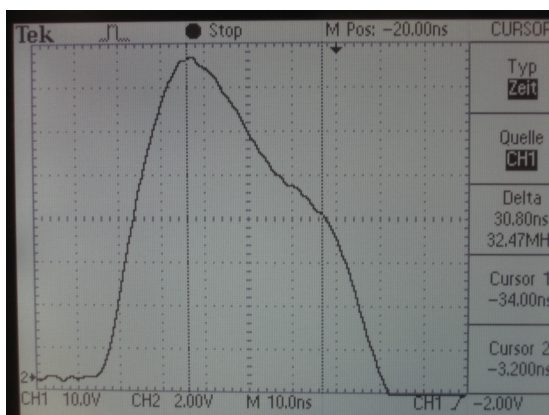


Abb. 12 und Abb. 13: Empfangssignal

Der Cursor des digitalen Oszilloskops wurde bei der ersten Messung auf den Maximalwert des Peaks des Empfangssignals eingestellt. Der Maximalwert in der zweiten Messung erscheint um 12 ns zu der Cursorposition verschoben. Aus diesen Messwerten errechnet sich die Lichtgeschwindigkeit zu:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{3,60\text{m}}{12 \cdot 10^{-9}\text{s}} = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

In der nachfolgenden Tabelle findet sich eine Messreihe für unterschiedliche Spiegelpositionen. Die erste Spiegelposition bei $0,2\text{ m}$ dient als Bezugspunkt für alle nachfolgenden Strecken. Ebenso beziehen sich die bestimmten Zeitdifferenzen auf diejenige der Spiegelposition 1, diese wird durch den Cursor festgehalten.

| Spiegelentfernung in m | Strecke Δs in m | Zeitdifferenz Δt in ns | Lichtgeschwindigkeit in $10^8 \frac{m}{s}$ |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| 0,2 | — | — | — |
| 0,8 | 1,2 | 4,0 | $3,0 \pm 0,3$ |
| 1,2 | 2,0 | 6,8 | $2,9 \pm 0,2$ |
| 1,6 | 2,8 | 9,2 | $3,0 \pm 0,1$ |
| 2,0 | 3,6 | 12,0 | $3,0 \pm 0,1$ |

Tab. 6: Messergebnisse des Low Cost Experiments

Der Fehler für die Werte der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich nach Gauß, wobei sie durch die Längenmessung mit dem Maßband und das Ablesen der Zeitdifferenz am Oszilloskop begründet sind. Für die Längenmessung ist mit einer Fehlertoleranz von $\sigma_s = 0,5 \cdot 10^{-2}\text{m}$ zu rechnen, als Ablesefehler der Zeit ist zu $\sigma_t = 0,4 \cdot 10^{-9}\text{s}$ anzunehmen.

$$\sigma_c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial t} \cdot \sigma_t\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial s} \cdot \sigma_s\right)^2} \Rightarrow \sqrt{\left(\frac{-\Delta s}{\Delta t^2} \cdot \sigma_t\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\Delta t}\right)^2}$$

Deutlich zeigt sich der lineare Zusammenhang zwischen Laufzeit und Wegstrecke des Lichts. Die ermittelten Werte der Lichtgeschwindigkeit des Versuches stimmen gänzlich im Rahmen ihrer Fehlertoleranz mit dem Literaturwert überein.

7.3 Erfahrungen mit der Umsetzung des Low Cost Experimentes

In diesem Abschnitt möchte ich meine Erfahrungen mit der praktischen Umsetzung des Low Cost Versuchsaufbaus darlegen. Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, ist die Umsetzung des Low Cost Experiments mit zufriedenstellenden Ergebnissen gelungen. Die ermittelten Werte der Lichtgeschwindigkeit liegen, im Rahmen der Messgenauigkeit, im Bereich des Literaturwertes. Die in der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften-Physik/ Physik in der Schule“ [9] publizierten Schaltpläne und Platinenlayouts sind grundsätzlich funktional.

Nach Betrachtung der Schaltpläne für Sender und Empfänger, sowie der bereits im Fundus der Universität Bielefeld befindlichen Platinenschaltungen, zeigte sich eine recht hohe elektrotechnische Komplexität. Ohne fundiertes elektrotechnisches Hintergrundwissen und praktische Erfahrungen auf diesem Gebiet wird eine Realisierung extrem erschwert. Aktuell ist es nicht mehr möglich geätzte Platinen aus der in dem Artikel genannten Quelle zu beziehen. Als problematisch hat sich weiterhin die Suche nach einer funktionstüchtigen Sendediode erwiesen. Bei der Senderschaltung aus dem Fundus stellte ich einen mechanischen Defekt (Kathodenverbindung abgebrochen) an der verwendeten Laserdiode fest. Diese Diode stammte aus einem Laserpointer und war für die Schaltung modifiziert. Der Defekt war irreparabel. Es stellte sich die Frage nach einem adäquaten Ersatz. Eine einfache Leuchtdiode ließ sich zwar modulieren, jedoch nicht ausreichend fokussieren. Handelsübliche Laserdioden erwiesen sich als untauglich, da eine interne Schaltung zur Ansteuerung eine Modulation nicht zulässt. Die interne Schaltung der Laserdiode sorgt für eine zeitlich konstante Spannungsversorgung und ist bei dieser Bauart von außen nicht zugänglich. Bei experimentellen Versuchen mit verschiedenen Einsätzen aus unterschiedlichen Laserpointern zeigten sich sehr unterschiedliche Ergebnisse. Der Aufbau der Laserpointer ließ eine Manipulation der gerade beschriebenen internen Schaltung zu, diese konnte außer Betrieb gesetzt werden, womit eine Modulation des Lichtsignals ermöglicht wurde. Bei einer Reihe von Versuchen konnten zwar die Signale am Empfänger sichtbar gemacht werden, wurden jedoch zu stark von Rauschsignalen überlagert. Lediglich einer der zufällig ausgewählten Laserpointer zeigte sowohl ein klares Empfangssignal, als auch eine ausreichende Fokussierung und ermöglichte das Erzielen verwertbarer Ergebnisse. Hier zeichnen sich zwei häufige Problematiken in Bezug auf die Reproduzierbarkeit ab:

- Die Hersteller der Laserpointer lassen sich nicht ermitteln.

- Bei Laserpointern handelt es sich um Billigprodukte mit einer kurzen Laufzeit der entsprechenden Serie.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Problemfelder bleiben lediglich experimentelle Versuche, eine geeignete Laserdiode zu finden.

Auf Grund der geringen Materialkosten (unter 50 Euro) lässt sich dieser Versuchsaufbau in die Kategorie Low Cost Experiment einordnen. Bei Betrachtung der weiteren Randbedingungen und Grenzen:

- fundiertes elektrotechnisches Wissen
- praktische Erfahrungen mit dem Erstellen elektronischer Schaltungen
- experimentelle Suche nach geeigneten Bauteilen

erscheinen die Kosten in Höhe von circa 1700 Euro für die Anschaffung einer zuverlässigen Ausführung von einer kommerzielle Lehrmittelfirma als akzeptabel.

8 Didaktische Grundlagen von Experimenten und neuen Medien

8.1 Das Experiment im Unterricht

Im Fachlexikon ABC Physik (1974) findet sich folgende Definition des Begriffs Experiment [2]:

„Experimente, planmäßig durchgeführte wissenschaftliche Versuche, unter jeweils gleichen, möglichst übersichtlichen, vereinfachten Bedingungen, die qualitative oder quantitative Aussagen über Naturvorgänge zu machen gestattet [...] Das Experiment auch zur Prüfung der Theorie eingesetzt bleibt Mittel der Erkenntnis, als Kriterium der Wahrheit kann es Aussagen einer Theorie bestätigen oder als falsch verwerfen“ [2].

Diese Definition findet sowohl in der Wissenschaft, als auch in Experimenten im Physikunterricht Anwendung, jedoch auf sehr unterschiedlichen Niveaus. Das Experiment stellt eine Besonderheit im alltäglichen Unterricht dar. Nur in wenigen Fächern ist es möglich, regelmäßig Experimente durchzuführen, meist in den naturwissenschaftlichen Fächern wie Chemie, Biologie, Physik oder Technik. Anhand von Versuchen können

theoretische Lerninhalte didaktisch reduziert, veranschaulicht und für die Schüler fassbar gemacht werden. Neben der klassischen Einteilung von Experimenten in Schüler- und Lehrerversuche, können sie noch weiter eingeteilt werden. Versuche können in der Quantifizierbarkeit, den Unterrichtsphasen oder der Art der Sachbegegnung unterschieden werden.

8.1.1 Die didaktisch methodischen Funktionen des Experiments im Physikunterricht

Das Experiment im Physikunterricht verfolgt zahlreiche didaktische Ziele und erfüllt viele methodische Funktionen, welche durch qualitative oder quantitative Versuche erfüllt werden können. Qualitative Versuche zielen zum einen darauf ab, „primäre“ Erfahrungen bereit zu stellen, d.h. die Schüler treten zum ersten Mal mit einem physikalischen Thema in Kontakt und erleben im Klassenverband einen gemeinsamen Erlebnishintergrund. Diese Erfahrungen sollen induktiv oder deduktiv zur Gewinnung oder Festigung eines Begriffs bzw. Gesetzes führen. Des Weiteren sollen sie physikalische Phänomene visualisieren und überzeugend demonstrieren. Diese Erfahrung soll den Schülern Anreiz zur selbständigen Fragestellung und Hypothesenbildung bieten. Zur weiteren qualitativen Funktion des Experiments im Physikunterricht zählt die Arbeit mit Modellen. Hiermit ist gemeint, dass physikalische Konzepte und Vorstellungen von den Schülern als Modelle erkannt werden sollen und sie diese auf ihre Funktionstüchtigkeit prüfen. Diese Funktion eines Versuchs impliziert das didaktische Ziel, die Schüler an eine Abstraktionsfähigkeit heranzuführen, so dass sie in der Lage sind, modellhafte, abstrakte Strukturen als solche zu erkennen und diese auch auf andere Problemstellungen anzuwenden. Ein beispielhaftes Experiment für dieses didaktische Ziel ist die Sichtbarmachung eines Lichtstrahls eines Laserpointers mittels Kreidestaub. Anhand dieses Versuches sollen die Kinder erkennen, dass sich Licht geradlinig ausbreitet. Dieses physikalische Prinzip sollte dann von den Schülern z. B. auch auf die Funktionsweise einer Lochkamera übertragen werden können. Zwei weitere wichtige qualitative Funktionen von Experimenten im Unterricht sind zum einen die Motivation der Schüler, denn eine gesteigerte Motivation und Interesse sind Voraussetzungen für einen erfolgreichen Lernprozess. Zum anderen können und sollen Versuche nachhaltige Eindrücke hinterlassen, da diese auch im Langzeitgedächtnis abgespeichert werden und den Schülern so in Erinnerung bleiben.

Zu den quantitativen Funktionen eines Versuches gehören die Ermittlung von Messwerten und die Erkenntnis von Gesetzen und Regeln. Durch die Erfassung von Messwerten

sollen einerseits Hypothesen überprüft und physikalische Gesetze abgeleitet werden, andererseits können auch bereits bekannte Regeln verifiziert werden. Hierbei erwerben die Schüler die Fähigkeit, Daten zu erfassen und diese auch mit der wissenschaftlichen Theorie zu vergleichen. Insgesamt werden so physikalische Größen und Gesetzmäßigkeiten für die Schüler direkt erfahrbar gemacht. Bei den quantitativen Versuchen sollen die Schüler die wissenschaftliche Arbeitsweise beim Experimentieren erlernen, das Experiment ist gleichsam Lerninhalt. Die Kinder erlernen den Umgang mit Messgeräten, die Variation von Parametern, die Darstellung und Auswertung von Messwerten.

Es lassen sich folgende Nebenziele eines Experiments im Physikunterricht definieren:

- Fördert die Selbsttätigkeit des Schülers
- Schult die Beobachtungsgabe
- Erhöht die geistige Leistung
- Erzieht zu verantwortungsbewusstem Handeln und Gewissenhaftigkeit

Neben den erläuterten qualitativen und quantitativen Zielen von Experimenten im Unterricht können Versuche ebenfalls die Funktion erfüllen den Schülern Physik in Alltag und Technik und wichtige „Meilensteine unserer Kulturgeschichte“ [22] aufzuzeigen.

8.1.2 Klassifikationen von Experimenten

Experimente können, neben den unter Punkt 8.1.1 erläuterten didaktisch methodischen Funktionen, auch nach ihrer zeitlichen Einordnung im Lernprozess eingeteilt werden. Es gibt vier zeitliche Einteilungen von Versuchen: der Einführungsversuch, der Erarbeitungsversuch, der Wiederholungsversuch und der Hausaufgabenversuch.

Das Einführungsexperiment soll in ein neues Stoffgebiet einführen und neue Problemstellungen bzw. Hypothesen aufwerfen. Es ist im Allgemeinen qualitativ und soll zunächst einmal das Interesse der Schüler zu wecken. Um die Motivation der Kinder zu steigern, werden bei Einführungsversuchen häufig überraschende physikalische Effekte ausgewählt und kognitive Konflikte provoziert. Nach dem Einführungsversuch findet sich zeitlich das Erarbeitungsexperiment. Hierbei handelt es sich entweder um einen Erkenntnisversuch, d.h. hier sollen meist induktiv Erkenntnisse aus den Messdaten abgeleitet werden, oder es handelt sich um einen Bestätigungsversuch, in dem bereits aufgestellte Hypothesen oder Gesetzmäßigkeiten überprüft werden. Die erforderlichen

Messwerte werden meist quantitativ, d.h. als Zahlenwerte, erfasst. Bei dem Wiederholungsversuch handelt es sich um ein Bestätigungsexperiment, in dem keine neuen physikalischen Erfahrungen gesammelt werden sollen, stattdessen sollen bekannte Phänomene, Gesetze oder Modelle auf andere Beispiele übertragen werden. Diese Übertragungsleistung der Schüler sollte erst in der Vertiefungsphase eines Themas stattfinden, damit die Schüler ausreichende Kenntnisse zu dem entsprechenden Themengebiet gesammelt haben. Ein Beispiel für eine Übertragungsleistung ist die Variation eines Parameters, also eine Modifikation eines bereits bekannten Experiments. Der Wiederholungsversuch wird meist durch einen quantitativen Versuch kategorisiert, da dieser meist problemlos modifiziert werden kann. Der Hausaufgabenversuch ist ein recht seltenes Experiment im Physikunterricht, da es nicht zu jedem physikalischen Themengebiet geeignete Aufgabenstellungen gibt. Bei einem Hausaufgabenexperiment werden die Schüler aufgefordert, zu Hause, also in ihrer alltäglichen Umgebung, physikalische Effekte zu überprüfen [22]. Hierdurch soll den Schülern die Physik in ihrem Alltag bewusst gemacht werden und es soll ihnen Anreiz bieten sich außerhalb des Schulunterrichts mit naturwissenschaftlichen Themen zu befassen. Meist handelt sich bei Hausaufgabenexperimenten um qualitative Versuche, die wenig Aufwand erfordern.

8.2 Einsatz neuer Medien

8.2.1 Der Computer im Physikunterricht

Die Entwicklung der Mikrocomputer Ende der 70er Jahre eröffnete Physik Lehrern vielfältige Möglichkeiten dieses neue Medium im Unterricht einzusetzen [8]. In dieser Entstehungs- und Erprobungsphase wurden auch einige Irrwege beschritten, so wurden einige Realexperimente durch Simulationen ersetzt, obwohl dieses didaktisch nicht sinnvoll war. In den darauffolgenden Jahrzehnten zeichneten sich immer mehr Einsatzbereiche des Computers ab, sowohl innerhalb der Schule, als auch im alltäglichen Leben. Diese Entwicklung legitimierte den Computereinsatz im Unterricht aus didaktischer, methodischer und erkenntnisorientierter Sicht immer mehr. Physik Lehrer lernten im Laufe ihres Studiums großrechnerische Auswertungsverfahren für umfangreiches Datenmaterial kennen. Für die Schule lag es nahe, Computer für die Messwerterfassung und -auswertung einzusetzen. Es wurden Sensoren für die Erfassung physikalischer Größen gebaut und für ihre Auswertung Programme entwickelt, diese ließen sich auch grafisch präsentieren. In den 90er Jahren lieferten Lehrmittelhersteller Interface-Systeme samt Software, welche von Schülern transparent einsetzbar waren. Neben dieser Computerunterstützung für Realexperimente, entstanden Simulationsprogramme, welche kein

schlichter Ersatz für Realexperimente waren, sondern zur Erkenntnisgewinnung beitragen konnten. Sie wiesen vielfältige Optionen auf, um verschiedene Experimentierparameter einzustellen und zu verändern, sie ließen nachgebildete physikalische Abläufe verständlich werden.

Simulationsbaukästen für virtuelle Experimente stellen eine Weiterentwicklung dieser Programme dar. Die anfänglichen Simulationen legten den Anwender auf eine bestimmte physikalische Situation fest, die Simulationsbaukästen eröffneten den Schülern die Möglichkeit diese statischen Situationen zu verändern. Sie konnten physikalische Gesetzmäßigkeiten selbstständig nachbilden und definieren, das Programm übernimmt dann die Berechnung der Auswirkungen dieser selbstkonstruierten Systeme.

8.2.2 Modellbildung und Simulation

In der PRAXIS-Schriftenreihe findet sich im Band 54 „Modellbildung und Simulation mit dem Computer im Physikunterricht“ folgende Definition einer Simulation:

„Unter einer Simulation versteht man im Zuge des Modellbildungsprozesses nichts anderes als den Prozeß der Bildung einer Prognose mit Hilfe des Experimentierens innerhalb der Modellebene. Eine Simulation kann also immer erst dann stattfinden, wenn die Modellbildung für ein reales System abgeschlossen ist und man die sich aus diesem Modell ergebenden Folgerungen rechnerisch ermitteln möchte. Verwendet man für diese Rechnung ein Computerprogramm, spricht man von einer Computersimulation.“ [8]

In seiner Definition einer Simulation verweist Peter Goldkuhle auf Modellbildungsprozesse, diese Prozesse möchte ich im Zusammenhang mit dem Physikunterricht erläutern. Unter einem Modell versteht man ein inneres Scheinbild oder Symbol äußerer Gegenstände, also eine Abbildung der Realität in vereinfachte Schemata. Diese lassen sich auch rückwirkend lesen: Aus einem Modell können die realen Gesetzmäßigkeiten rekonstruiert werden. Mit der Physik möchte man aus der gezielten Beobachtung von Abläufen in Systemen Gesetzmäßigkeiten entwickeln, mit denen man ähnliche Naturabläufe vorhersagen kann [7]. Zu diesem Prozess der Modellbildung gehören sechs Schritte, diese werden auch bei der Entwicklung einer Simulation mehr oder weniger stark gewichtet durchgeführt.

Zu Beginn wird das reale System, welches man abbilden möchte, verbal beschrieben und analysiert. Hierbei werden Sachzusammenhänge und Wechselwirkungen beobachtet und die verschiedenen Systemgrößen identifiziert. Auf diese qualitative Darstellung

folgt meist eine Reduzierung der gefundenen Systemgrößen, da nicht alle Parameter in das Modell übernommen werden können oder nicht alle Parameter hinreichend bekannt sind. Des Weiteren muss in diesem Schritt ausgewählt werden, welche äußeren Wechselwirkungen und -einflüsse des realen Systems in das Modell übernommen werden sollen. Dieser zweite Schritt wird auch Idealisierungsprozess genannt. Im nächsten Abschnitt überträgt man die bisher verbale Beschreibung in eine grafische, ikonische Darstellung, zum Beispiel durch das Erstellen eines Fluss- oder Wirkungsdiagramms. Eine quantitative Darstellung erfolgt nun im vierten Schritt: Die grafische Beschreibung des Systems wird auf eine formale, meist mathematische Ebene übertragen. Computer sind in der Lage die mathematische Ebene zu simulieren und somit konkrete Vorhersagen über ähnliche Naturabläufe zu treffen. Die Güte des erarbeiteten Modells lässt sich durch vielfache Probeläufe der Simulation und den direkten Vergleich mit der Realität überprüfen. Dies ist auch der vorletzte Schritt im Modellbildungsprozess. Final bestätigt oder fordert die Modellkritik eine ausreichende Güte der Simulation. Gegebenenfalls muss das vorliegende Modell überarbeitet und geändert werden, bis eine zufriedenstellende Güte erreicht ist.

8.2.3 Einsatz von Simulationen im Physikunterricht

Der Einsatz von Simulationen im Physikunterricht muss bestimmte Kriterien erfüllen. Eine Simulation kann in vielen Fällen ein Realexperiment ersetzen, dies wird jedoch dann zum Missbrauch, wenn auf das reale, durchführbare Experiment zu Gunsten der Simulation verzichtet wird. Auf Realexperimente kann nur dann verzichtet werden, wenn diese nicht oder sehr schwer in der Unterrichtspraxis durchführbar sind. Zum einen laufen einige Versuche zum Beispiel zu schnell oder zu langsam ab, sind zu komplex oder zu gefährlich, so dass sie im Rahmen eines Schulexperimentes nicht durchgeführt werden können. Hier seien beispielhaft einige Bereiche genannt, in denen Versuche nicht durchführbar sind: Astronomie, Teilchenphysik oder Relativität. Zum anderen sind vielzählige physikalische Gesetzmäßigkeiten nicht mit der Schulmathematik analytisch beschreibbar. Schüler können Differentialgleichungen, welche Realsituationen beschreiben, nicht lösen, so dass diese Inhalte im Unterricht ausgelassen werden müssen. In den gerade beschriebenen Situationen kann die Computersimulation als Hilfsmittel zur Lösungsgewinnung verwendet werden. Diese Funktion eines Computers als Hilfsmittel lässt sich schematisch wie folgt [Abb. 14] beschreiben:

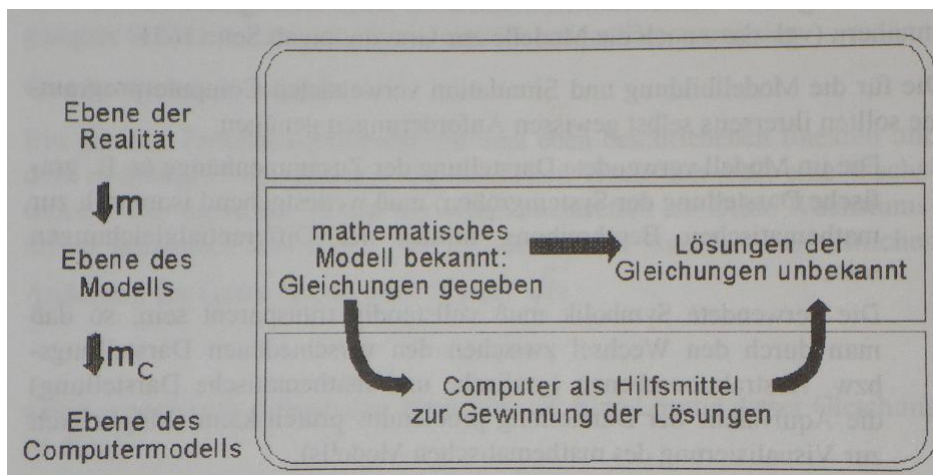


Abb. 14: Ebenenmodell einer Simulation

Internationale Studien über „Research in Physics Learning“ [3] zeigen als gemeinsame Ergebnisse, dass ein großer Schwerpunkt auf die Förderung der begrifflich-physikalischen Kompetenz der Schüler gelegt werden soll. Dies bedeutet, dass Schüler nicht eine große Zahl spezieller Formeln „auswendig“ lernen sollen, sondern Fragestellungen zunächst begrifflich strukturieren und dann erst auf das Handwerkszeug „Gleichung“ zurückgreifen sollen. Die Schüler sollen lernen Sachzusammenhänge physikalischer Problemstellungen zu erkennen und mit ihnen zu arbeiten. Diese Art der „physikalischen Konzeptualisierungsfähigkeit erfordert primär das qualitative Verständnis von Begriffen und Problemlösungsstrategien“ [3]. Hierbei kann der Einsatz des Computers unterstützend wirken. Der Computer übernimmt formal-mathematische Anteile und ermöglicht so eine Betonung der grundlegenden begrifflichen Struktur eines Systems. Er lässt komplexere physikalische, technische Phänomene zu, welche die Konzeptionsfähigkeit der Schüler stärker herausfordern. Des Weiteren lässt er Variablen und verschiedene Parameter für eine bestimmte Fragestellung oder physikalischen Zusammenhang zu, dieses bietet den Schülern mehr Möglichkeiten und Raum eigene Ideen zu entwickeln und gefahr- und problemlos zu testen.

Weitere Vorteile einer Simulation im Physikunterricht sind die verbesserte grafische Darstellungsmöglichkeit, welche die Schüler selbst auswählen können. Auftretende Störeffekte bei Realexperimenten, welche den eigentlichen Untersuchungsgegenstand überdecken, werden vermieden. Der Computer bietet die Möglichkeit zu langsam oder zu schnell ablaufende Versuche, mittels Zeitlupe oder Zeitraffer effizient darzustellen. So sind eine Vielzahl an Experimenten möglich, ebenso wie deren einfache Variation. Der Einsatz einer Simulation geht mit gewissen Anforderungen an die Software einher. Zum

einen muss die Symbolik vollständig transparent sein, was bedeutet, dass die Schüler ohne weitere Anleitung die verwendeten Symbole mit ihrer Funktion assoziieren können sollen. Der Wechsel zwischen der grafischen und der mathematischen Darstellung muss problemlos verlaufen, da nur so die Äquivalenz zwischen Modell und Realität geprüft werden kann. Bei komplexen, umfangreichen Modellen ist die Möglichkeit wünschenswert, dass der Modellaufbau selbstständig verändert werden kann, dies bedeutet, dass Untermodelle erstellt werden können. Hierzu gehören ebenfalls auswählbare Variablen und Parameter, und die Möglichkeit die Ergebnisse sowohl textuell, numerisch als auch grafisch auszugeben. Die Simulation darf den physikalischen Sachzusammenhang nicht verzerren oder überdecken, eine Transparenz und Äquivalenz ist unumgänglich [3].

Simulationen sollten nach der Maxime konzipiert sein: So viel wie nötig, so wenig wie möglich.

9 Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit als Simulation

9.1 Simulation von physikalischen Versuchen

Simulationen spielen zunehmend eine wichtige Rolle in der Lehre und der Wissenschaft. Hierdurch werden Vorträge attraktiver für Schüler und Studenten, und es hilft ihnen ein tieferes Verständnis für das Thema zu erhalten. Ein natürliches Phänomen wird dabei durch die Visualisierung der einzelnen Abfolgen dargestellt. Jede Abfolge wird durch eine Reihe von Variablen sowie des zeitlichen Wandels aufgrund von Iteration und bestimmten Algorithmen beschrieben.

Werden anstelle von realen Versuchen Simulationen eingesetzt, entfallen zeitaufwändige Vorbereitungen und Versuchsdurchführungen, sowie die Anschaffung der notwendigen Apparaturen.

Lehrer und Schüler können vorhandene Simulationen nutzen oder aber eigene erzeugen. Voraussetzung hierfür ist allerdings ein umfassendes Verständnis des Phänomens, das es zu simulieren gilt [17].

9.2 Programmiersystem „Easy Java Simulations“ (EJS)

Das Programmiersystem „Easy Java Simulations“, kurz EJS, wurde speziell dafür entwickelt, einem breiten Publikum zu vermitteln, wie wissenschaftliche Simulationen in

Java auf schnelle und einfache Weise realisiert werden können. Den Nutzern werden grafische Elemente mit voller Funktionalität zur Verfügung gestellt. Die Hauptarbeit besteht darin, diese grafischen Elemente in das Projekt einzubinden, sowie diese mit den benötigten Gleichungen oder Algorithmen zu verbinden. EJS gibt damit den Nutzern die Möglichkeit, konzeptionell tätig zu werden und sich nicht um technische Aspekte der grafischen Aufbereitung kümmern zu müssen [17].

In Bezug auf ihre breite Akzeptanz ist die Wahl von Java als Programmiersprache gerechtfertigt. EJS und mit ihr erstellte Simulationen sind mit nahezu allen Betriebssystemen kompatibel und können über das Internet zur Verfügung gestellt werden. Erforderlich ist lediglich ein Java-fähiger Web-Browser. EJS ist Teil des Open-Source-Physics-Project, das am Davidson College in North Carolina, USA geleitet wird. EJS wird mit einer GNU-Lizenz (General Public License) betrieben und ist damit frei verfügbar. Die Software, sowie Dokumentationen und eine Vielzahl von Beispielsimulationen aus den Bereichen Physik, Chemie, Mathematik und Biologie sind unter <http://www.um.es/fem/EjsWiki/index.php> [17] erreichbar. In der Regel sind die Beispiele mit dem Quellcode zur weiteren eigenen Verwendung abgelegt.

9.3 Programmierung: „Simulation zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit“

Die Intention zur Erstellung der Simulation war eine möglichst große Realitätsnähe zu erzeugen. So sollte der Versuch selber und das Messinstrument „Oszilloskop“ funktional abgebildet werden. Als funktionale Teile des Oszilloskops finden sich der Bildschirm und Regler für die Amplitude und Schalter zur Zeitsteuerung (Zeit / Einheit) wieder. Aus der Umgebung des Versuchsaufbaus ist der wesentliche Bestandteil, ein Regler für die Entfernung Sender – Empfänger, in die Simulation integriert. Ferner sind ein Regler für die Einstellung der Sendefrequenz, sowie Wahlmöglichkeiten für verschiedene Untersuchungsmedien (Luft, Wasser, Glas) implementiert. Durch die Realitätsnähe ist diese Simulation als Einführung in die Nutzung eines Oszilloskops für Schüler der Sek. II verwendbar.

9.3.1 Handhabung der Simulation

Die Simulation ist komplett in der Datei „measuring_speed_of_light.jar“ enthalten, die auf den Rechner kopiert und gestartet wird. Diese Datei befindet sich auch auf der, dieser Arbeit beigelegten, CD. In der nachfolgenden Abbildung [Abb. 15] ist die

Oberfläche der Simulation beispielhaft wiedergegeben:

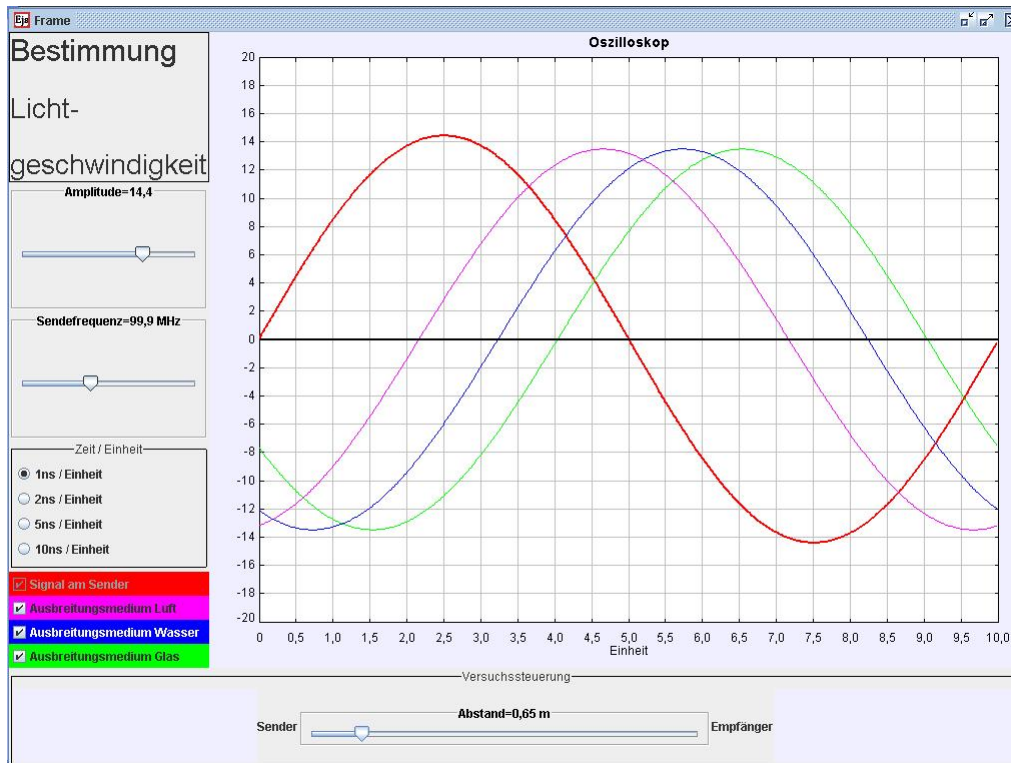


Abb. 15: Simulationsansicht

Bedienelemente, Funktion und Handhabung:

- Amplitude: Regelung der y-Auslenkung in der Darstellung im Wertebereich 0,1 – 20,0 Einheiten. Auf eine qualitative Angabe der Art des Werts wurde verzichtet. Bei einem realen Oszilloskop wird der Amplitude die gemessene Spannung zugeordnet.
- Sendefrequenz: Einstellung der Frequenz des Senders im Versuchsaufbau im Bereich von (10 – 240) MHz.
- Zeit / Einheit: Auswahl der Dimensionierung der x-Achse. Den zehn Einheiten in der Darstellung ist jeweils der entsprechend gewählte Faktor zuzuordnen.
- Auswahlfelder für Untersuchungsmedium: Mit den drei anklickbaren Auswahlfeldern lassen sich als Medium im Experiment Luft, Wasser und Glas simulieren und anzeigen. Standardmäßig ist das Empfängersignal für das Medium Luft ausgewählt. Die weiteren Auswahlfelder lassen sich beliebig zu- und abschalten. Damit ist ein direkter Vergleich der Signale möglich (4-Kanal-Oszilloskop). Die Farben der Auswahlfelder entsprechen den Farben der Graphen in der Darstellung.

- **Abstandssteuerung:** Im unteren Bereich befindet sich die Regelung für den Abstand zwischen dem ortsfesten Sender und dem verschiebbaren Empfänger im Bereich von $(0 - 5) m$.
- **Anzeige:** Die Anzeige enthält bis zu vier Graphen. Das Signal des ortsfesten Senders (rote Kurve) bleibt in seiner Phasenlage konstant. Abhängig vom Abstand verändern die Empfangssignale ihre Phasenlage im Vergleich zu derjenigen des Senders. Mit zunehmendem Abstand zwischen Sender und Empfänger verringert sich die Amplitude der Empfangssignale. Rein qualitativ wird hier die Auswirkung der Dämpfung im Medium als Verringerung der Amplitude des Empfangssignals dargestellt.

9.3.2 Berechnung der Lichtgeschwindigkeit:

Der Wert der Lichtgeschwindigkeit errechnet sich nach der allgemein gültigen Formel für geradlinig gleichförmige Bewegungen:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (34)$$

Mit Vergrößerung des Abstands zwischen Sender und Empfänger zeigt sich, dass die Empfangssignale zeitlich verzögert gegenüber dem Sendesignal erscheinen. Zum einfachen Ablesen der Zeitdifferenz eignet sich die Nulllinie ($y = 0$), hierbei bietet es sich an, den Wert $t = 0$ der roten Kurve als Referenzpunkt zu betrachten. Zu beachten, dass es sich unter Umständen um eine Verschiebung um mehrere volle Wellenzüge ($n \cdot 2\pi$) handelt. Grundsätzlich ist jedoch die Phasendifferenz, welche sich aus einer Änderung des Abstandes Sender - Empfänger ergibt, für die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit gültig. Der Wert des Abstands zwischen Sender und Empfänger wird am Regler direkt abgelesen.

9.3.3 Quellcode und Besonderheiten der Programmierung

- Beispielhafte Ansichten des Programmiertools:

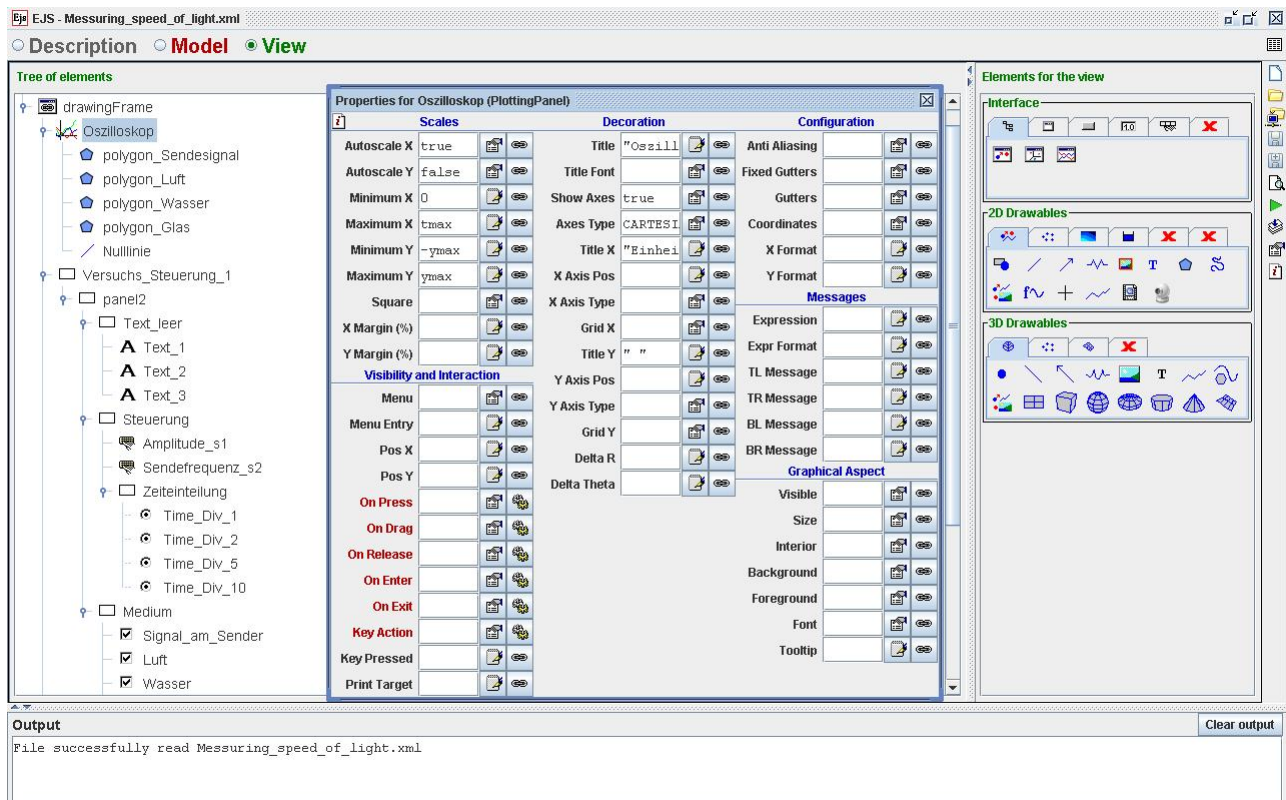


Abb. 16: Visuelle Oberfläche von EJS

| Name | Initial value | Type |
|------------------|----------------------------------|--------|
| Sendefrequenz | 100 | double |
| Amplitude | 6 | double |
| Abstand | 0.00 | double |
| pi | Math.PI | double |
| omega | $2 * \pi * \text{Sendefrequenz}$ | double |
| ymax | 20 | double |
| t | 0 | double |
| n | 10 | int |
| sin | 0 | double |
| dt | 0.05/100. | double |
| npt | 500 | int |
| tmax | 10. | double |
| Daempfung | 1.0 | double |
| Amplitudenfaktor | 1.0 | double |
| | | double |

Abb. 17: Variablenbenennung in EJS

Bei dem Erstellen der Simulation habe ich mich bemüht, den Quellcode so zu gestalten, dass ein Leser ihn ohne große Schwierigkeiten nachvollziehen kann [Abb. 16 und 17]. Dazu trägt die Aufteilung von Variablen und Funktionen in funktional zusammengehörige kleine Gruppen bei. Ferner habe ich selbsterklärende Namen verwendet.

Des Weiteren ist es dem Leser durch die Verwendung von ausführlichen Kommentaren ermöglicht, bestimmte Eigenschaften oder Funktionen der verwendeten Variablen nachzulesen. Ein Erweitern oder Anpassen der Simulation an veränderte Verhältnisse ist problemlos möglich.

Die Simulation habe ich sukzessiv - also in kleinen Teilschritten - erstellt. Dieses Vorgehen hat sich als richtig erwiesen, da Fehler bei jedem Teilschritt gleich eliminiert wurden und die Funktion getestet werden konnte. Bei abschließenden Testläufen der fertigen Simulation traten keine Unregelmäßigkeiten auf.

10 Schulbezogene Erfahrungen mit dem Low Cost Experiment und der Simulation

10.1 Planung und Ablauf der Stunden

Um die didaktischen Möglichkeiten des nachgebauten Low Cost Experimentes und der selbstgestalteten Simulation zu erkunden, erprobte ich diese in der Praxis. Ich übernahm im Mai 2009 eine Doppelstunde im Leistungskurs Physik des Goethe Gymnasiums in Ibbenbüren. In vorheriger Absprache mit dem Fach- und Kurslehrer, wählte ich einen historischen Zugang zu der Thematik „Messung der Lichtgeschwindigkeit“. Die Schüler erhielten im Vorfeld ein Arbeitsblatt [siehe Anhang], auf diesem wurden vier verschiedene historische Methoden (nach Galileo, Römer, Fizeau und Foucault) zur Geschwindigkeitsmessung vorgestellt. Des Weiteren sollten die Schüler selbstständig Informationen sammeln und vorbereiten. Der Kurs wurde in vier Gruppen aufgeteilt, jede Gruppe sollte jeweils einen der Texte zur nächsten Unterrichtsstunde vorbereitend lesen. Die Doppelstunde plante ich auf dieser Vorarbeit basierend, die praktische Umsetzung erfolgte genau wie geplant. In der nachfolgenden Tabelle [Tab. 7] findet sich in der ersten Spalte eine kurze Beschreibung des Unterrichtsinhaltes, die zweite und dritte Spalte geben an welche Methode zur Durchführung und wie viel Zeit ich geplante hatte.

| Unterrichtsstoff | Methode | Zeitumfang |
|---|---------------|------------|
| Begrüßung und Vorstellung | Plenum | |
| Einteilen der vier Gruppen und Materialausgabe (Folie etc.) | Plenum | 5 min |
| Erstellen einer Folie | Gruppenarbeit | 15 min |
| Gruppen präsentieren nacheinander ihre Folien | Plenum | 4 x 5 min |
| Arbeitsblatt zum Low Cost Versuch austeilern | | |
| Kleine Pause | | 5 min |
| Vorstellen und Diskussion des Low Cost Versuchs | Plenum | 10 min |
| Durchführen des Versuchs und Festhalten der Messwerte | Plenum | 10 min |
| Wechsel in den Computerraum | | |
| Start der Simulation und Erklärung der Einzelheiten | Plenum | 10 min |
| Durchführung der Simulation in Luft | Partnerarbeit | 10 min |
| Festhalten der Ergebnisse auf dem Arbeitsblatt | | |
| Hausaufgabe stellen | | |

Tab. 7: Unterrichtsverlauf

10.2 Meine Erfahrungen mit der Durchführung des Low Cost Experiments

Hilfreich bei der Durchführung des Experimentes in der Unterrichtssituation war das vorherige Bereitstellen und Testen der Versuchseinheit auf einem mobilen Experimentiertisch. Diese Vorbereitung nahm etwa 15 Minuten in Anspruch. In der Kursgröße von 19 Schülern war es gerade noch möglich die Schüler um den Versuchsaufbau zu versammeln. Durch die Nähe zum Experiment, die aktive Beteiligung bei der Justierarbeit und der Versuchsdurchführung waren alle Mitglieder des Kurses engagiert. Da als Sendediode ein Laserpointer der Klasse 2, der Firma „hama“ mit der Kennung LP6 Mini, verwendet wurde, mussten die Schüler vor Inbetriebnahme des Versuchs auf die Gefahren des Lasers hingewiesen werden. Die Sicherheitsbestimmungen und Richtlinien für den Umgang mit Laserstrahlung müssen generell beachtet werden.

Anschließend erklärte ich den Schülern detailliert die genaue Funktion der einzelnen Versuchselemente und den Versuch als Gesamtheit. Der Kurs zeigte durch sachbezogene Rückmeldung einen hohen Verständnisgrad für das Experiment. Der stabile Aufbau des Experimentes auf einer massiven Holzplatte ermöglichte ein sicheres Arbeiten. Neben den notwendigen Justierarbeiten traten keine weiteren Instabilitäten auf. Großer

Wert ist auf das exakte Einstellen des Cursors am Oszilloskop und auf die exakte Längenmessung zu legen, um die Messwerte nicht zu verfälschen.

Bei dieser Versuchsdurchführung verwendete ich ein digitales Zweikanaloszilloskop, dieses ist im Regelfall nicht in einer Schulsammlung vorhanden. Zusätzlich durchgeführte Tests mit Oszilloskopen der Schulsammlung ergaben, dass auch diese grundsätzlich nutzbar sind. Nachteilig bei ihrer Verwendung ist der fehlende Cursor, mit dem die Lage des Empfangssignales markiert und zwischen zwei Messungen ausgewertet werden können. Weiterhin erwies sich die run/stop- Funktion des digitalen Oszilloskopes beim Aufnehmen der Messwerte als hilfreich, da so an Hand eines ortsfesten Bildes weitere Erklärungen gegeben werden kann. Versuche mit einem 5 m langen Lichtwellenleiter haben bei dem Low Cost Experiment ebenfalls zu zufriedenstellenden Ergebnissen geführt. Es ist problemlos möglich einen Lichtwellenleiter direkt in den Lichtstrahl des Senders zu bringen und auf die Fotodiode des Empfängers zu richten. So lassen sich ebenfalls Laufzeitunterschiede auf dem Oszilloskop bestimmen. Mit diesem Versuchsaufbau ist es somit möglich, Schülern zu demonstrieren, dass die Ausbreitung von Licht auch in anderen Ausbreitungsmedien als Luft gemessen werden kann.

10.3 Meine Erfahrungen mit der Durchführung der Simulation

Voraussetzung für die Nutzung der Simulation im Unterricht ist die Bereitstellen der Software auf mehreren Schülercomputern. Hierzu bedarf es einer „SunJava“- Umgebung ab der Version 1.5. Auch hier ist es, wie bei der Durchführung des realen Experimentes, unabdingbar, die genaue Funktion der einzelnen Simulationselemente zu erläutern. Durch das exakte Herausstellen der Gemeinsamkeiten und der Unterschiede zwischen realem Versuch, welcher als Low Cost Experiment aufgebaut ist, und Simulation waren die Schüler in der Lage, die gewünschte Abstraktionsleistung zu erbringen. Explizit musste darauf hingewiesen werden, dass in der Simulation mit einem idealisierten Sendesignal gearbeitet wird, welches hier als Referenzsignal dient. Das Signal des Senders wurde in der Durchführung des realen Versuches nicht benötigt, da hier nur die Laufzeitdifferenzen zwischen zwei Orten mittels Empfängersignal bestimmt werden. Den Startpunkt der Messreihe bildet die erste Messung mit der Spiegelposition 1, diese ist gleichsam Referenzpunkt für alle nachfolgenden Messungen. Bei Verwendung der Simulation muss deutlich darauf hingewiesen werden, dass hier bereits der gesamte Abstand Δs zwischen Sender und Empfänger berücksichtigt ist. Aus dieser Differenz zwischen Simulation und Realexperiment resultierten Rückfragen der Schüler bezüglich der zu betrachtenden Wegstrecke.

Bei der Simulation ist es möglich, den Frequenzbereich des Senders über große Bereiche zu verändern. Hierdurch kann es zu Phasenverschiebungen zwischen Sende- und Empfangssignal von mehr als 2π kommen. Schüler erkennen dieses, für erfahrene Physiker offensichtliche, Verhalten nicht auf Anhieb und rechnen mit inkorrekt abgelesenen Werten. Um diese Fehlinterpretationen zu vermeiden und das unbedingt notwendige didaktische Maß einzuhalten, bieten sich zwei Lösungswege an:

- Der Startpunkt des Empfängersignals wird mit einer Markierung versehen, so dass sein genauer Verlauf auch über 2π hinaus verfolgt werden kann.
- Der Frequenzbereich wird derart eingeschränkt, dass maximal eine Phasenverschiebung von 2π auftreten kann.

Weitere Rückfragen zur Bedienung und Funktion der Simulation wurden nicht gestellt.

10.4 Resümee des Unterrichtsverlaufes

Insgesamt verlief die Doppelstunde sehr gut, die Schüler waren aufmerksam und interessiert an der Thematik. Sie arbeiteten engagiert und konzentriert mit. Für den Kurs stellte die Versuchsdurchführung, in welche die Schüler selbst miteinbezogen waren, ein Highlight dar. Sowohl das Realexperiment, als auch die Simulation sind im Unterricht gut durchführbar. Um für Schüler eine möglichst gute Verständlichkeit zu erreichen sind einige Randbedingungen zu beachten.

Wird als realer Versuch der Low Cost Aufbau gewählt und als Vertiefung die Simulation durchgeführt, müssen die Schüler auf die Unterschiede zwischen diesen beiden deutlich hingewiesen werden. So muss bei der Simulation das Sendesignal, sprich die rote Kurve, erläutert werden, ebenso die Abstandsmessung Δs , da diese sich vom Realexperiment unterscheiden. Als Alternative kann, wenn in der Schulsammlung vorhanden, auf die Versuchseinheit einer Lehrmittelfirma, wie zum Beispiel LEYBOLD, zurückgegriffen werden. Vorteil des Aufbaus der Firma LEYBOLD ist das hohe Maß an Übereinstimmung mit der Simulation. Sowohl in der Realität, als auch virtuell erhalten die Schüler hierbei die selben Oszilloskopbilder, da die Methoden der Längenmessungen Δs äquivalent zueinander sind. In beiden Versuchen werden Sinus-Kurven als Signale verwendet. Somit dient die Simulation der Festigung der Erkenntnisse, die die Schüler während des Experimentierens erlangt haben. Ein weiterer Vorteil des Lehrmittelgerätes liegt darin, dass die Firma entsprechende Materialien mitliefert, mit denen experimentell die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in unterschiedlichen Medien, wie Wasser und Glas, bestimmt werden können.

Die Durchführung der Simulation, ohne Bezug zu einem Realexperiment, ist nicht zu empfehlen. Den Schülern werden in der Simulation zwar literaturähnliche Messwerte und Ergebnisse ermöglicht, jedoch bleibt das physikalische Verständnis unterrepräsentiert. Wie in Kapitel 8.2 beschrieben sollen Simulationen keine durchführbaren Experimente verdrängen, dies gilt auch für die Simulation der Lichtgeschwindigkeit. Die Simulation ist eine sinnvolle Ergänzung und Vertiefungsmöglichkeit zur Thematik der Lichtgeschwindigkeitsmessung, jedoch kein vollwertiger Ersatz eines durchgeführten Versuches.

11 Fazit

Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Darlegung der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit von historischen Experimenten hin zu einem modernen Low Cost Experiment für den Einsatz im Physikunterricht der Sekundarstufe II. Den Low Cost Versuch kennzeichnet eine komplexe Elektronik, jedoch auch ein einfaches Funktionsprinzip. Bei der praktischen Umsetzung offenbarten sich jedoch einige Probleme, welche nur durch elektrotechnisches Hintergrundwissen und experimentelle Versuchsreihen gelöst werden konnten. Durch diese Hindernisse ist die Reproduzierbarkeit stark eingeschränkt. Eine sinnvolle und didaktisch wertvolle Alternative zu diesem Low Cost Experiment ist sich stabil funktionierende Versuchseinheit einer Lehrmittelfirma. An dieser Stelle ist es individuell abzuwägen, ob die Kosten dieses kommerziellen Experimentes die Zeit und Geduld zur Erstellung des Versuchs aufwiegen.

Für den didaktischen Einsatz im Physikunterricht erwies sich die Simulation zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit als wertvolle Ergänzung zum Realexperiment. Sie visualisiert Schülern noch einmal das Funktionsprinzip einer modernen Messung und gibt ihnen Gelegenheit selbstständig forschend zu lernen und arbeiten. Es empfiehlt sich die Simulation nicht alleinstehend im Unterricht zu verwenden, sondern im Kontext mit einem real durchgeführten Versuch. Die selbstständige Programmierung und Gestaltung der Simulation hat mir die Möglichkeit geboten mich mit dem Einsatz neuer Medien näher zu befassen und Erfahrungen zu sammeln. Diese Erfahrungen waren durchweg positiv, so dass ich für mein späteres Berufsleben plane sie weiter auszudehnen und umzusetzen. Mein guter Gesamteindruck der Versuchseinheit wurde durch die positiven Rückmeldungen der Schüler, sowohl auf das Low Cost Experiment, als auch auf die Simulation bestätigt.

Literatur

- [1] BADER, Franz; DORN, Friedrich: „*Physik 12/13 Gymnasium SEK II*“ Schroedel Verlag, Hannover 2000
- [2] BEHRENDT, H.: „*Physikalische Schulversuche-Didaktische Theorie, methodische Praxis und die Einstellung von Schülern zur Auswahl der Versuchsgeräte*“, Pädagogische Hochschule Kiel 1990
- [3] BETHGE, Thomas; SCHECKER, Horst: „*Materialien zur Modellbildung und Simulation im Physikunterricht*“ Universität Bremen, Fachbereich Physik/Elektrotechnik, Institut für Didaktik der Physik, Bremen 1992
- [4] BLEICHROTH, Wolfgang; DAHNCKE, Helmug; JUNG, Walter; KUHN, Wilfried; MERZYN, Gottfried; WELTNER, Klaus: „*Fachdidaktik Physik*“ Aulis-Verlag Deubner, Köln 1991
- [5] FEDDERS, B.; LUDWIG, G.: „*Elektronische Lichtgeschwindigkeitsmessung-ein einfacher Versuch für Schule und Praktikum*“, In: „Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e.V.“ 26. Jahrgang, Heft Nr. 1, Seite 21ff., 1973
- [6] FRIEDRICH, Artur; VOIT, Fritz: „*Handbuch der experimentellen Schulphysik-Optik*“ FRIEDRICH, Artur (Hrsg.), Aulis-Verlag Deubner, Köln 1963
- [7] GOLDKUHLE, Peter: „*Modellbildung und Simulation im Physikunterricht- Einsatzmöglichkeiten computerunterstützter Modellbildungssysteme*“ 2. überarbeitete Auflage, Landesinstitut für Schule und Weiterbildung (Hrsg.), In: „LERNEN mit neuen Medien im Unterricht“, Verlag für Schule und Weiterbildung, Bönen 1997
- [8] GOLDKUHLE, Peter: „*Modellbildung und Simulation mit dem Computer im Physikunterricht*“ FABER, Max-Ulrich (Hrsg.); In: „PRAXIS-Schriftenreihe“, Band 54, Aulis-Verlag Deubner, Köln 1997
- [9] KLEIN, D.; HÖLDTKE, K.P.; SCHMITT, A.; WENDT, K.: „*Lichtgeschwindigkeitsmessung mit dem Laserpointer- ein einfacher Aufbau für Schule und Hochschule*“ In: „PRAXIS der Naturwissenschaften- Physik“, Jahrgang 2003, Heft 8/52, Seite 22ff.

- [10] MESCHÉDE, Dieter: „*Gerthsen Physik*“ 23. Auflage Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006
- [11] RIECK, J.: „*Kleines Lehrbuch der Elektrotechnik-Lichttechnik*“ Band VI, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig 1966
- [12] TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene: „*Physik Für Wissenschaftler und Ingenieure*“ PELTE, Dietrich (Hrsg.); 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007
- [13] WEINMANN, Karl Friedrich: „*Die Lichtgeschwindigkeit-ein historischer Überblick*“ In: „Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e.V.“ 29. Jahrgang, Heft Nr. 8, Seite 456 ff, 1976.
- [14] WIESEKOPSIEKER, Heinz; TERLECKI, Hans-Georg: „*Die Messung der Lichtgeschwindigkeit*“, Physikalisch-didaktisches Praktikum, Bielefeld Wintersemester 1980/81
- [15] Homepage der Universität Greifswald: <http://www1.physik.uni-greifswald.de/lehre/seminar/28-Spahr-Handout.pdf> (Stand: 06/2009)
- [16] Homepage der Universität Stuttgart: <http://www.uni-stuttgart.de/aktuelles/presse/2001/78.html> (Stand: 06/2009)
- [17] Homepage des Programmes EJS: <http://www.um.es/fem/EjsWiki/index.php> (Stand: 06/2009)
- [18] Homepage des Schulministerium NRW: <http://www.standardsicherung.schulministerium.nrw.de/lehrplaene/kernlehrplaene-sek-i/gymnasium-g8/physik-g8/kernlehrplan-physik/kernlehrplan-physik.html>(Stand: 06/2009)
- [19] Homepage der Boulder-Gruppe: <http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/sp958-lide/191-193.pdf> (Stand: 05/2009)
- [20] Homepage zur Boulder-Gruppe: <http://www.its.bldrdoc.gov/pub/ntia-rpt/04-416/04-416.pdf> (Stand: 05/2009)
- [21] Homepage der Firma LEYBOLD: http://www.leybold-didactic.de/literatur/hb/d/p5/p5632_d.pdf (Stand: 06/2009)
- [22] Homepage der Universität Regensburg: http://www.physik.uni-regensburg.de/didaktik/expsem/Exp_i_PhUnt.pdf (Stand: 06/2009)

Abbildungsverzeichnis

- Abb. [1] http://www.elsenbruch.info/ph12_down/svnhanian.gif (Stand: 16/04/2009)
- Abb. [2] TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene: „*Physik Für Wissenschaftler und Ingenieure*“ PELTE, Dietrich (Hrsg.); 2. Auflage Springer-Verlag, Seite 971, Berlin Heidelberg 2007
- Abb. [3] http://www.mbaselt.de/licht/image/interf_doppelspalt6.gif (Stand: 06/2009)
- Abb. [4] TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene: „*Physik Für Wissenschaftler und Ingenieure*“ PELTE, Dietrich (Hrsg.); 2. Auflage Springer-Verlag, Seite 1001, Berlin Heidelberg 2007
- Abb. [5] TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene: „*Physik Für Wissenschaftler und Ingenieure*“ PELTE, Dietrich (Hrsg.); 2. Auflage Springer-Verlag, Seite 1003, Berlin Heidelberg 2007
- Abb. [6] <http://www.dj4uf.de/lehrg/a10/Bild10-6.gif> (Stand: 06/2009)
- Abb. [7] http://www.leybold-didactic.de/literatur/hb/d/p5/p5632_d.pdf (Stand: 06/2009)
- Abb. [8]-[13] Selbsterstellte Fotografien des Versuchsaufbaus
- Abb. [14] GOLDKUHLE, Peter: „*Modellbildung und Simulation im Physikunterricht-Einsatzmöglichkeiten computerunterstützter Modellbildungssysteme*“ 2. überarbeitete Auflage, Landesinstitut für Schule und Weiterbildung (Hrsg.), erschienen in LERNEN mit neuen Neuen Medien im Unterricht, Verlag für Schule und Weiterbildung, Seite 27, Bönen 1997
- Abb. [15]-[17]: Screen-shots der selbsterstellten Simulation und des Programmes EJS

Tabellenverzeichnis

- Tab. [1]: Maxwellsche Gleichungen aus: MESCHÉDE, Dieter: „*Gerthsen Physik*“
23. Auflage Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006
- Tab. [2]: Messergebnisse der Lecherleitung (selbsterstellt)
- Tab. [3]: Messergebnisse des Lehrmittelgerätes (selbsterstellt)
- Tab. [4]: Messergebnisse in Wasser (selbsterstellt)
- Tab. [5]: Messergebnisse in Glas (selbsterstellt)
- Tab. [6]: Messergebnisse des Low Cost Experiments (selbsterstellt)
- Tab. [7]: Unterrichtsverlauf (selbsterstellt)

Anhang