

Jahresarbeit – Physik

Thema:

Experimente mit Subnanosekunden Lichtpulsen

Name: Frank Stützer

Inhaltsverzeichnis:

| | |
|--|----|
| <u>Vorwort</u> | 3 |
| <u>1. Einleitung</u> | 4 |
| <u>1.1. Motivationen</u> | 4 |
| <u>1.2. Ziele</u> | 4 |
| <u>1.3. Kurze Beschreibung der Arbeit</u> | 4 |
| <u>2. Geräte und Aufbau</u> | 6 |
| <u>2.1 Experimenteller Aufbau</u> | 6 |
| <u>2.2 Gepulste Lichtquelle</u> | 6 |
| <u>2.3 Lichtdetektor</u> | 10 |
| <u>2.4. Charakterisierung der Geräte</u> | 12 |
| <u>2.4.1. Verstärker</u> | 12 |
| <u>2.4.2. Lasermulator und Laserdiode</u> | 13 |
| <u>3. Experimente</u> | 14 |
| <u>3.1. Allgemeiner Aufbau</u> | 14 |
| <u>3.2. Messung der Lichtgeschwindigkeit</u> | 15 |
| <u>3.3. Messung der Abstände</u> | 18 |
| <u>3.4. Messung der Brechzahl</u> | 20 |
| <u>4. Zusammenfassung und Ausblick</u> | 24 |
| <u>4.1. Zusammenfassung und Auswertung</u> | 24 |
| <u>4.2. Ausblick und Weiterführungen</u> | 24 |
| <u>Glossar</u> | 26 |
| <u>Quellen</u> | 29 |

Vorwort

Diese Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Chemnitz. Daher möchte ich mich bei Professor Gerlich und seinem Team für die geleistete Unterstützung bedanken. Besonderer Dank geht an Dr. Ivo Cermak, der uns hilfreich zur Seite stand und einen wesentlichen Beitrag zur Fertigstellung dieses Projektes geleistet hat.

1. Einleitung

1.1. Motivationen

Gemeinsam mit Dr. Ivo Cermak überlegte ich mir, welches Thema mit einem Laser bearbeitet werden kann. Die Entscheidung fiel auf ein Gerät, womit in irgend einer Weise Geschwindigkeiten oder Entfernungen gemessen werden können.

Dazu gibt es vorwiegend zwei Varianten. Eine der Möglichkeiten besteht darin, die Intensitätsabnahme des Lichtes zu benutzen, um Entfernungen zu messen. Die andere Methode basiert darauf, mit Hilfe eines gepulsten Lasers die Laufzeitverschiebungen zu ermitteln und aus dieser dann die gewünschten Werte zu berechnen.

Die Lichtgeschwindigkeit ist dabei nur Mittel zum Zweck. Wie allgemein bekannt, liegt die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum bei $c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Daraus ergibt sich eine Laufzeit für einen Lichtpuls von $3 \text{ ns} \cdot \text{m}^{-1}$. Mit diesem Wert für die Laufzeit ist es theoretisch möglich, Abstände oder Brechzahlen zu ermitteln.

Um Werte wie die oben genannten hinreichend genau messen zu können, bedarf es einer großen Genauigkeit der Messinstrumente. Um beispielsweise Laufzeitverschiebungen genau bestimmen zu können ist eine zeitliche Messauflösung im ps-Bereich erforderlich. Ist dies nicht der Fall, so werden die Ungenauigkeiten in den ermittelten Werten zu groß und eine exakte Angabe ist dann nicht mehr möglich.

1.2. Ziele

Wie eingangs beschrieben soll das Ziel unserer Arbeit die Bestimmung von Abständen und Brechzahlen sein.

Die dazu verwendete Messmethode ist für beide Fälle gleich. Es wird die Laufzeitdifferenz zweier Lichtpulse gemessen, und anschließend der entsprechende Wert errechnet. Weiterhin sollte ermittelt werden, wie genau man solche Messungen überhaupt mit einfachen Mitteln durchführen kann, um zu brauchbaren Ergebnissen zu gelangen.

1.3. Kurze Beschreibung der Arbeit

Es wurden verschiedene Geräte zur Durchführung der Experimentes verwendet. Zur Erzeugung der Lichtpulse wird ein schneller Lichtmodulator und als Ausgang, eine Laserdiode genutzt. Um die Pulse aufzufangen bedarf es zudem noch eines Empfängers. Die-

ser Lichtdetektor muss zusätzlich noch schnell und empfindlich sein, um die kurzen und in der Intensität schwachen Lichtpulse empfangen zu können. Es handelt sich dabei um eine Photodiode mit anschließenden Verstärker.

Um die Abstandsmessungen durchzuführen, werden nun Laserdiode und Photodiode nebeneinander gestellt. Damit die Lichtpulse auch auf den Empfänger treffen, werden diese mit Hilfe eines planen Spiegels reflektiert. Mit einem Oszillograph werden dann die Laufzeitunterschiede deutlich und man kann schon durch Ablesen der Zeitdifferenz den groben Abstand bestimmen.

Nicht so einfach ist jedoch die Bestimmung der Brechzahl. Dazu wird zwischen Sender und Empfänger ein Lichtleiterkabel gebracht. Der Laser befindet sich nicht genau in einer Linie zum Lichtleiter, sondern es wird ein gewisser Einfallswinkel eingestellt. Auf dem Oszillograph wird dann nicht nur eine Zeitverzögerung, abhängig von der Länge des Lichtleiter und des Einfallswinkels deutlich, sondern auch eine zeitliche Verlängerung des Pulses. Um mit den Laufzeitdifferenzen die exakte Brechzahl des Stoffes zu errechnen, ist es sinnvoll, die Daten mit Hilfe eines PCs auszuwerten.

2. Geräte und Aufbau

2.1 Experimenteller Aufbau

Die Versuchsanordnung besteht aus folgenden Teilen:

einer gepulsten Lichtquelle,

einem schnellen und empfindlichen Lichtdetektor,

einem schnellen Speicheroszillograph und

verschiedenen optischen Elementen (Linsen und Spiegeln mit entsprechenden Halterungen) zur Fokussierung des Lichtstrahls.

Als gepulste Lichtquelle dient eine Laserdiode, für die im Rahmen dieser Arbeit ein Modulator entwickelt wurde. Die Lichtdetektion erfolgt mittels einer schnellen Photodiode, die mit einem Vorverstärker ausgestattet wurde, der ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entstand. Diese elektronischen Schaltungen zusammen mit den Details von dem experimentellen Aufbau werden im weiteren näher beschrieben.

2.2 Gepulste Lichtquelle

Die Lichtquelle besteht aus einem Laserdiodenmodulator und einem Treiber. Der Treiber passt das digitale Eingangssignal und die Stromversorgung an. Die beiden Einheiten

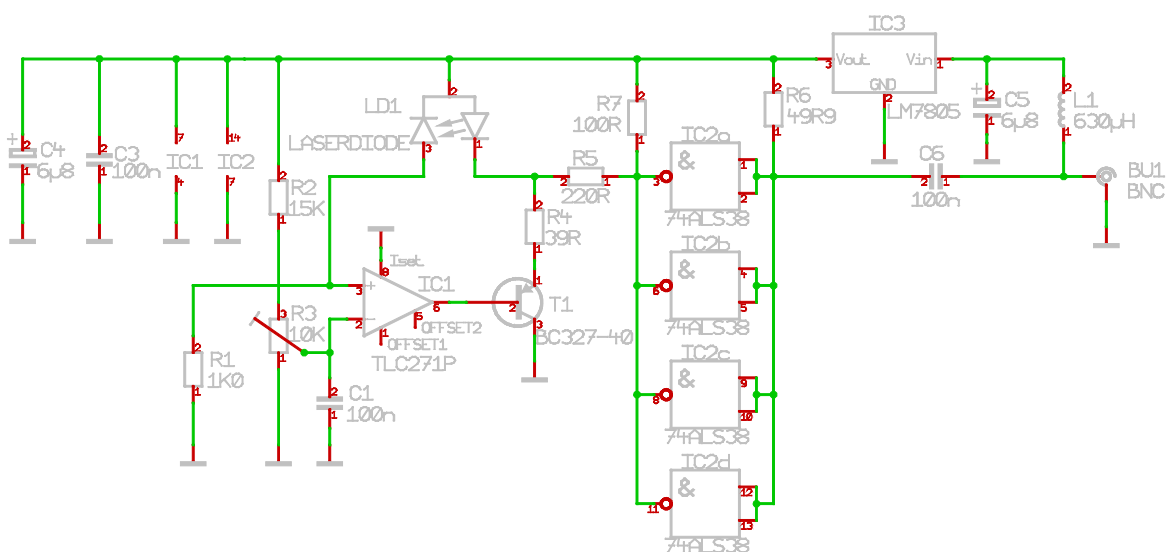


Abb. 1. Laserdiodenmodulator: Schaltplan.

sind mit einer koaxialen Leitung verbunden, die den Modulator sowohl mit dem Modulationssignal als auch mit der 5V Spannung versorgt. Der Modulator steuert die angeschlossene Laserdiode. Mit dem entwickelten Aufbau konnten Anstiegs- und Abfallzeiten im Nanosekundenbereich mit einer exzellenten Reproduzierbarkeit erreicht werden.

Der Laserdiodenmodulator (siehe Abb. 1) erfüllt zwei Aufgaben:

einerseits wird die mittlere Ausgangslichtleistung der Laserdiode stabilisiert und andererseits wird diese anhand des digitalen Eingangssignals moduliert.

Die Schaltung besteht aus einer Frequenzweiche, einer Schalterstufe, einem Regler der Lichtleistung und der Laserdiode. Die Frequenzweiche dient der Aufteilung der durch das Kabel zugeführten Signale. Mit Hilfe der Spule L1, die als Tiefpass wirkt, werden die hochfrequenten Signale herausgefiltert, um so an die Versorgungsspannung zu gelangen. Die zum Steuern der Laserdiode erforderlichen Signale werden über den Kondensator C6 ausgekoppelt.

Der Stabilisator IC3 dient der Bereitstellung der Betriebsspannung von 5V und gleicht Schwankungen der Versorgungsspannung aus. Der nächste Teil ist die Schalterstufe. Sie besteht aus vier parallel geschalteten Gattern (IC2a-IC2d). Die Verstärkung dieser Bausteine bewirkt, dass die Flanken des ankommenden Signals pro Zeiteinheit schneller ansteigen. Diese vier Gatter steuern mit Hilfe der Widerstände R6 und R7 die Laserdiode an.

Wie im Schaltplan zu erkennen, besteht die Laserdiode aus einer Photodiode und der eigentlichen Laserdiode. Die Photodiode dient dabei der Stabilisierung der Lichtleistung des Lasers. Um die Intensität der Laserdiode einstellen zu können, wurde zu dem noch ein Operationsverstärker IC1 mit integriert. Die Spannung am Widerstand R1 ist proportional zum Photostrom I_{ph} .

Weiterhin kann man durch die Widerstände R2 und R3, wobei R3 ein veränderlicher Widerstand ist, einen Sollwert für die detektierte Lichtintensität der Photodiode einstellen. Der Operationsverstärker vergleicht die Spannungen, die über diesen Widerständen abfallen und steuert somit die Laserdiode. Dies geschieht mittels des Transistors T1 und dem Widerstand R4, die den Arbeitspunkt der Laserdiode bestimmen. Die restlichen Kondensatoren C3, C4, C5 sind zum Ausfiltern von Nebenschwingungen vorhanden, die eine Beeinflussung des Signals hervorrufen könnten.

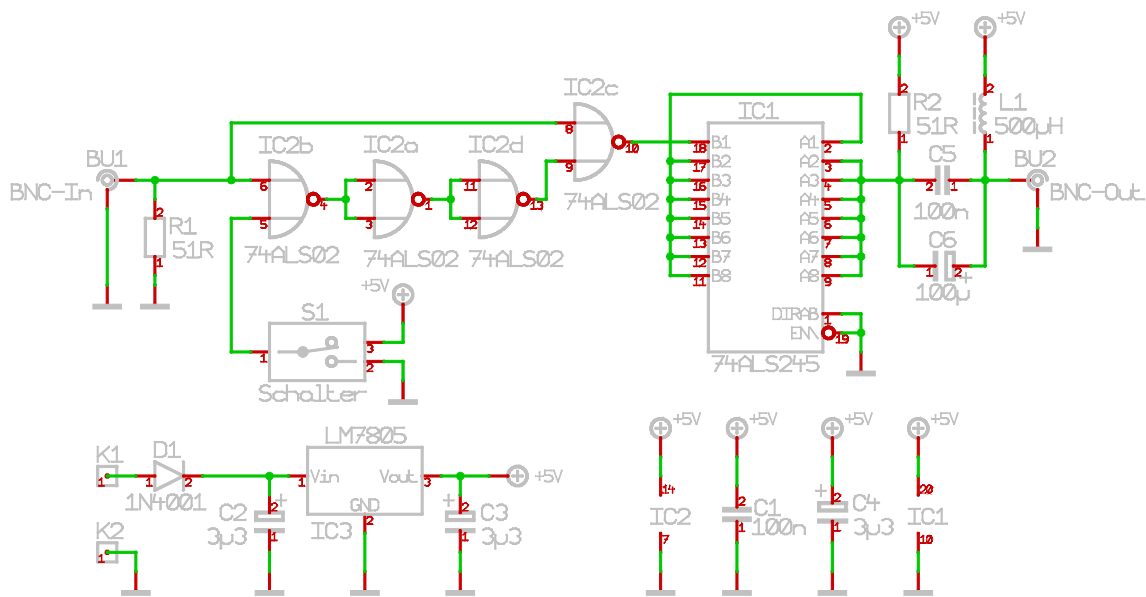


Abb. 2. Treiber vom Laserdioden-Modulator: Schaltplan.

Zum mechanischen Aufbau wurde eine für Hochfrequenzen geeignete Box verwendet. Die Übertragung der Signale erfolgt mit einem Koaxialkabel, welches mit BNC- Stekern am Laserdiodenmodulator befestigt wird.

Das Signal wird im Treiber erzeugt (siehe Abb. 2). Dieser besteht aus einem Stabilisator, einer Schaltung zur Anpassung der Pulse und einer Frequenzweiche. Der Treiber besitzt selbst zwei getrennte Eingänge, einen für die Versorgungsspannung (U_{eingang} zwischen 9-25V) und noch einen für die Einspeisung der Trägerfrequenz (f bei etwa 500 kHz).

Der Anschluss für die Versorgungsspannung ist zusätzlich noch mit einer Diode (D1) gegen Verpolen geschützt. Danach folgt der Stabilisierungsbaustein IC3. Dieser bringt an seinem Ausgang eine konstante Spannung von 5V. Die Kondensatoren C2 und C3 dienen wieder zum Ausfiltern von hochfrequenten Schwingungen.

Um möglichst kurze Lichtpulse zu erzeugen, ist in dem Treiber eine Schaltung aus logischen Gattern vorhanden. Die Funktion ist wie folgt zu erklären. Am Eingang BU1 wird die Trägerfrequenz angelegt. Diese Frequenz gelangt nun an die NOR-Gatter IC2c und IC2b bis IC2d. Im Bereich von IC2b bis IC2d wird das Signal invertiert, wenn der Schalter S1 auf Masse liegt. Durch die Zeitverzögerung in den Gattern (etwa 10ns pro Gatter) ist der Puls, der am Anschluss 13 entsteht, ist nicht nur invertiert sondern auch zeitlich verzögert.

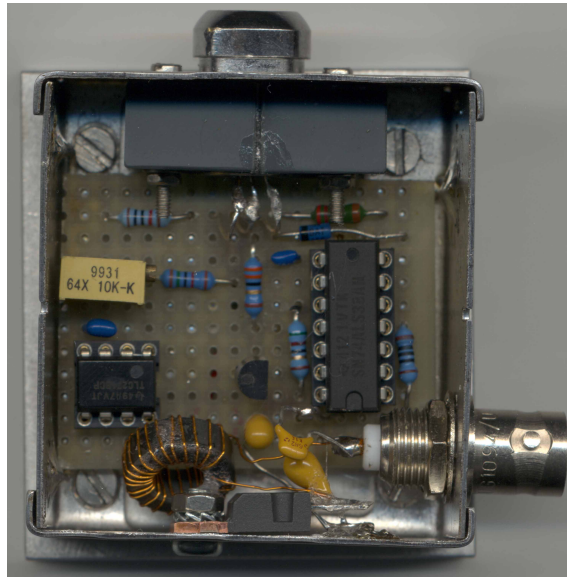


Abb. 3. Laserdioden-Modulator: Aufbau.

Im Schaltkreis IC2c werden dann diese beiden Pulse (Originalfrequenz und invertierte Frequenz) zu einem Signal verknüpft. Dies geschieht in folgender Weise. Wenn beide Signale einen entgegengesetzten Zustand aufweisen („high“ (1) oder „low“ (0)), so wird dieses in dem Gatter zu einem logisches „low“ verknüpft. Dagegen kommt es beim gleichzeitigen Auftreten von low, zu einem „high“ am Ausgang. Das Auftreten von zweimal „high“ ergibt dagegen ein „low“. Durch die vorhandene Zeitdifferenz, ist damit die Länge des Pulses gegeben.

Bei dem Baustein IC1 handelt es sich um einen Verstärker, der die kurzen Lichtpulse

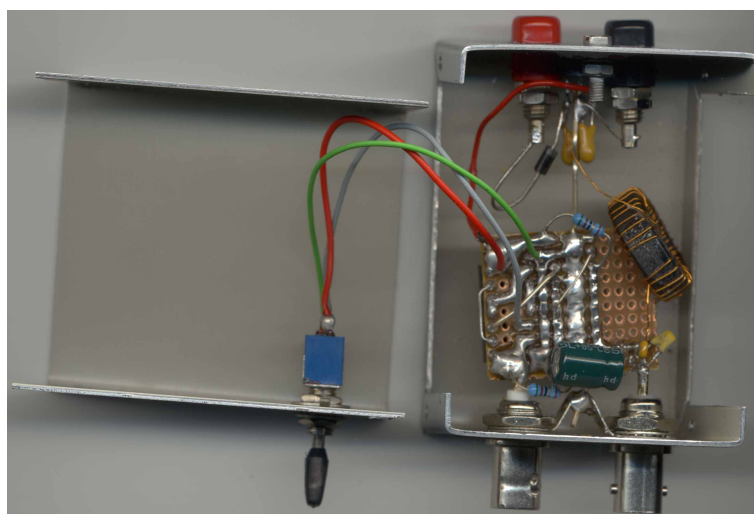


Abb. 4. Treiber vom Laserdioden-Modulator: Aufbau.

nochmals verstärkt und an die Frequenzweiche weiterleitet, wo sie dann der Versorgungsspannung überlagert werden. Dadurch ist es möglich, Versorgungsspannung und Signal auf einem Kabel zu übertragen.

2.3 Lichtdetektor

Der Lichtdetektor besteht aus zwei Einheiten:

aus einem Photodiodenverstärker und

einer Frequenzweiche.

Beide sind mit einer koaxialen Leitung verbunden.

Die Leitung dient, wie bei der Lichtquelle, der gleichzeitigen Übertragung von Stromversorgung und Signal.

Der in Abbildung 5 gezeigte Schaltplan ist der Aufbau des Photodiodenverstärkers. Dieser Hochfrequenzverstärker besteht im Wesentlichen aus drei Stufen. Die erste Stufe ist ein Strom-Spannungswandler, der wie folgt wirkt:

Bei einem Photostrom I_{ph} , ist ein Spannungsabfall über den Lastwiderstand R1 vorhanden. Dieser wird durch den Transistor T1 verstärkt, was ein Sinken der Drainspannung zur Folge hat. Dadurch erhöht sich der Spannungsabfall über dem Widerstand R2. Zusätzlich wird die sinkende Spannung mit Hilfe des Kondensators C9 auf den Anschluss 1 des Widerstands R15 geleitet, was zur Abnahme des Spannungsabfalls über dem Widerstand R1 führte, wodurch die Drainspannung ansteigt. Diese Rückkopplung ist für die Bestimmung der Ausgangsspannung am Transistor T1 verantwortlich. Ist die Verstärkung des Transistors T1 hinreichend groß, stellt sich durch die Rückkopplung ein Gleichgewicht ein, bei dem die Änderung des Spannungsabfalls über dem Widerstand R1 durch den vom Widerstand R15 fließenden Strom kompensiert wird. Die Ausgangs-

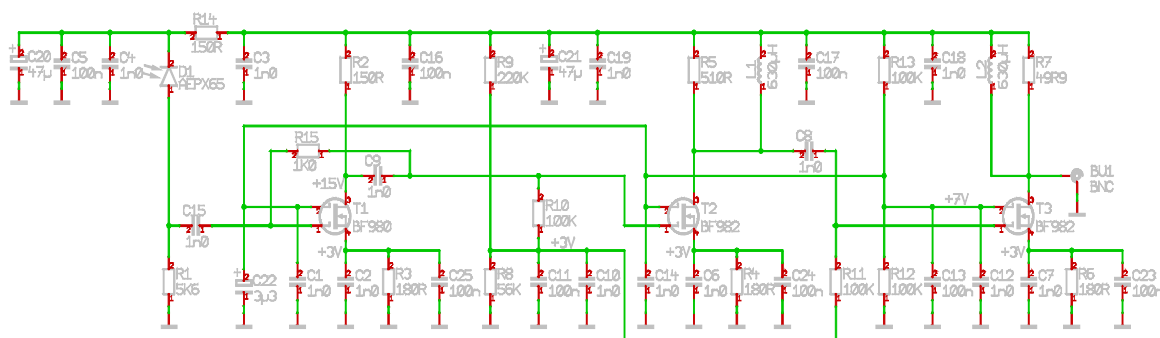


Abb. 5. Photodiodenverstärker: Schaltplan

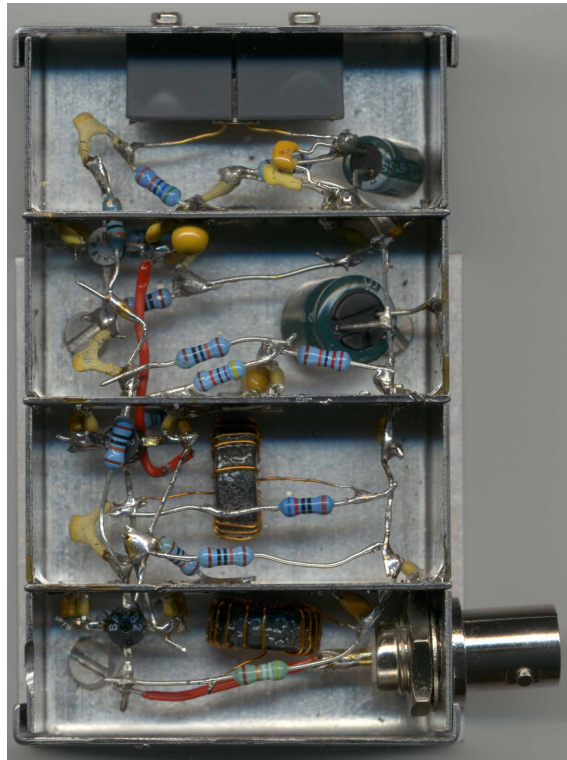


Abb. 6. Photodiodenverstärker: Aufbau.

spannung erreicht somit etwa $I_{ph} \cdot R_{15}$.

Die zweite Stufe ist ein Spannungsverstärker. Die benutzten MOSFETs besitzen eine Steilheit von etwa $25 \text{ mA} \cdot \text{V}^{-1}$. Das bedeutet, dass bei einem Eingangssignal von 1V ein Ausgangsstrom von 25mA resultiert. In Verbindung mit dem Lastwiderstand R5 berechnet sich der Verstärkungsfaktor zu $R_5 \cdot 25 \text{ mS}$. Dies gilt aufgrund der Anwesenheit der Spule L1 allerdings nur für hinreichend hohe Frequenzen. Die letzte Stufe des Verstärkers ist nur eine Anpassung an die Impedanz von 50Ohm. Die Steilheit des Transistors ergibt nach der Formel $R_7 \cdot 25 \text{ mS}$ eine Verstärkung von rund 1. Diese Anpassung ist notwendig, um eine optimale Datenübertragung über die koaxiale Leitung zu gewährleisten. Im Anschluss an diesen Widerstand folgt wiederum eine Frequenzweiche zur Kopplung der Spannungsversorgung des Verstärkers und des vom Empfänger kommenden Signals. Der Ausgang wird an das Oszilloskop angeschlossen. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

2.4. Charakterisierung der Geräte

2.4.1. Verstärker

Es handelt sich hier um einen Hochfrequenzverstärker (HF-Verstärker). Er dient dazu, das Signal aus der Photodiode zu verstärken. Die entsprechenden Ströme sind die Folge der Lichtpulse der Laserdiode. Da die Funktionsweise im Vorrangegangenen bereits erklärt wurde, werde ich an dieser Stelle nicht weiter darauf eingehen.

Der Verstärker hat die Eigenschaft empfangene Signale die größer als 2V sind, nicht mehr zu verstärken. Dies liegt an den verwendeten Photodiode. Diese kann keine größeren Spannungen liefern, da keine weiteren Elektronen in der Photodiode herausgelöst werden können. Erreicht man diese Obergrenze, so zeigt sich der ankommende Puls stark abgeflacht. Das bedeutet, dass man Spannungen die größer als 2V sind, nicht mehr klar aufzeigen kann und somit keine Messungen mehr möglich sind. Dies geschieht allerdings nur bei sehr intensiven Lichtquellen oder bei geringem Abstand zwischen Sender und Empfänger. Als weitere Eigenschaft ist die Geschwindigkeit zu nennen. Wie man in Abbildung 7 sieht, ist dieser Verstärker in der Lage, schnell ansteigende Span-

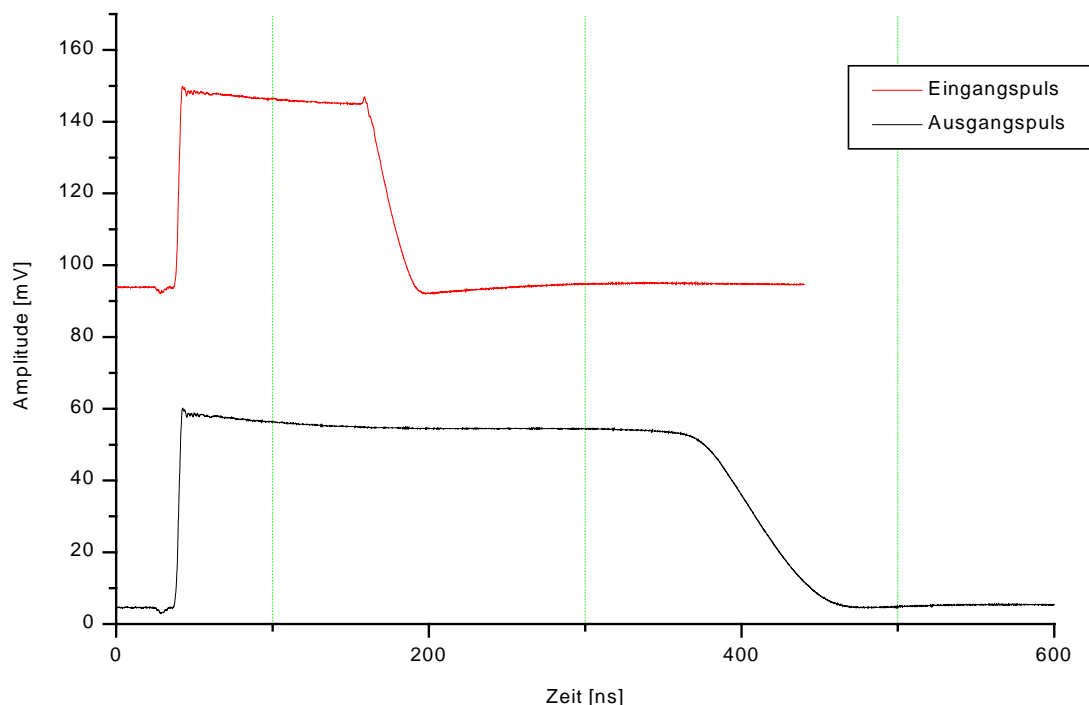


Abb. 7. Ausgangspulse vom Laserdiodenmodulator. Die Lichtpulse vom Laserdiodenmodulator wurden mit einer Photodiode aufgenommen. Die Pulsform wurde mit einem Oszilloskop aufgenommen.

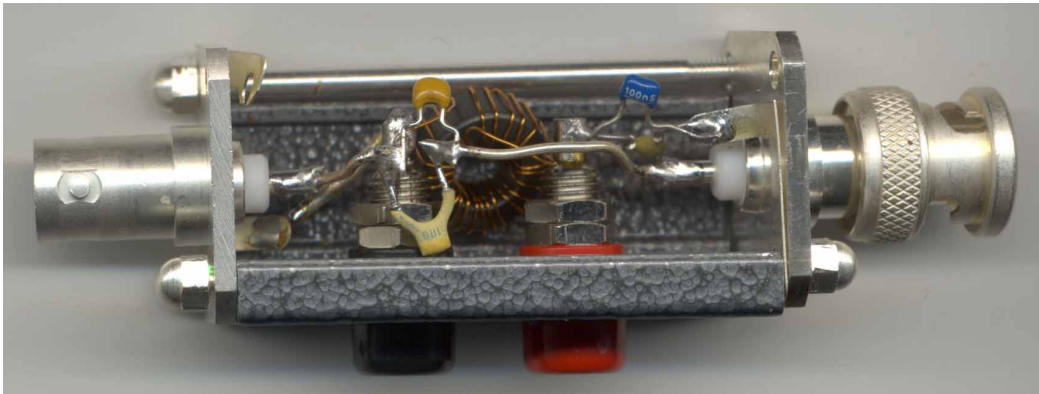


Abb. 8. Frequenzweiche und Stromversorgung vom Photodiodenverstärker: Aufbau.

nungen zu verstärken.

Das ist wichtig, da es sich in der Gesamtlänge um Lichtpulse handelt die eine Dauer von 100ns oder weniger besitzen, so dass man einen schnellen Anstieg der Amplitude benötigt, um eine ausreichende Signalstärke zu erhalten.

Zum Übertragen der Signale und zum Einspeisen der Betriebsspannung für den Verstärker wird eine Frequenzweiche mit Spannungseingang benutzt (Abbildung 8). Diese besteht im wesentlichen aus einer Spule und einem Kondensator, die in einem Standardgehäuse eingebaut sind.

2.4.2. Lasermodulator und Laserdiode

Der Laserdiodenmodulator ist so gebaut, dass er für Frequenzen bis 10 MHz anwendbar ist. Den Zweck den er zu erfüllen hat, ist einmal die Regulierung der Leuchtstärke und zum anderen die Sicherstellung, dass die Laserdiode auch wirklich leuchtet.

Es gibt nämlich bei kalter Witterung die Situation, dass der Laser nicht oder erst nach mehrmaligen Versuchen anspringt. Die Diode wurde aus einem handelsüblichen Laserpointer ausgebaut. Ebenfalls wurde daraus das Schaltungsprinzip für den Modulator übernommen. Jedoch musste dieses noch auf Hochfrequenz abgestimmt werden, was Änderungen in dem Aufbau der Schaltung nach sich zog.

3. Experimente

3.1. Allgemeiner Aufbau

Mit Hilfe der Laserdiode, dem Empfänger und einem Spiegel ist es möglich die Lichtgeschwindigkeit und Abstände zu messen.

Die von dem Empfänger ausgehenden Signale werden mit Hilfe eines Oszilloskops (LeCroy Waverunner LT342) aufgenommen und gespeichert. Mit diesem Messgerät ist es möglich 25GS/s aufzunehmen. Das bedeutet, dass die einzelnen Werte einen zeitli-

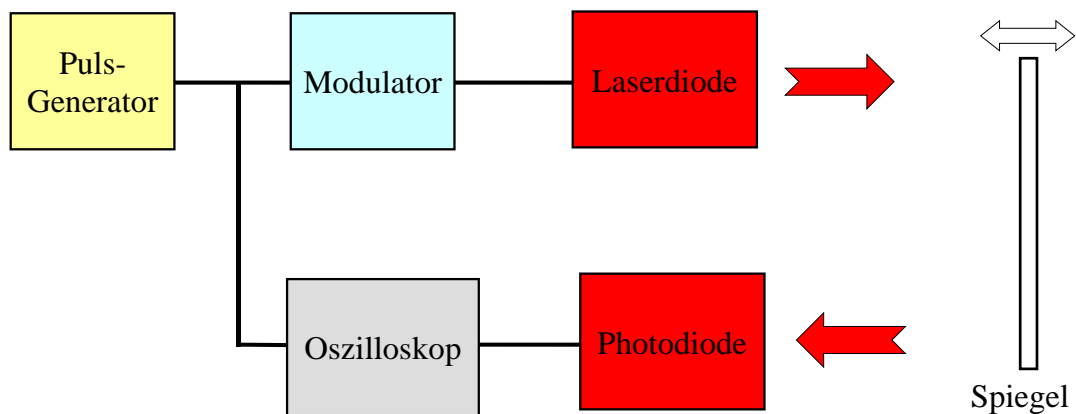


Abb. 9. Experimenteller Aufbau zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung (Photodiodenverstärker mit Frequenzweiche, Laserdiodenmodulator mit Treiber, Oszilloskop, Pulsgenerator, Linsen, Spiegel, Lichtleiter)

chen Abstand von 4ps haben. Man erhält daher sehr genaue Messwerte, die gespeichert und am PC weiterverarbeitet werden können.

Die in Abbildung 9 gezeigte Skizze des Aufbaus verdeutlicht die Anordnung der einzelnen Geräte.

Ein etwas anderer Aufbau ist bei der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in einem Lichtleiter notwendig. Man braucht dazu einen genau zentrierten und fokussierten Lichtstrahl, der auf die Glasfaser trifft. Diese Fokussierung ist die Voraussetzung für eine möglichst hohe Intensität, der empfangenen Pulse. In Abbildung 10 wird dieser Aufbau gezeigt.

3.2. Messung der Lichtgeschwindigkeit

Um die Lichtgeschwindigkeit messen zu können, benötigt man den genauen Wert der Strecke zwischen Sender und Empfänger. Um nun daraus die Geschwindigkeit zu berechnen, ist noch die Zeit für die zurückgelegte Strecke erforderlich. Diese Zeit erhält man aus der Differenz der jeweiligen Laufzeiten der Lichtpulse.

Es wurden zwei zeitlich unterschiedliche Messwerte aufgenommen. Dabei ist wichtig, sich einen Wert auf der Zeitskala zu suchen, damit ein gemeinsamer Ausgangspunkt zur Bildung der Laufzeitdifferenz zwischen den Pulsen vorhanden ist.

Die zeitlichen Werte für die zu bestimmenden Abstände lassen sich mit Hilfe der Verschiebung der jeweiligen Graphen (Abbildung 11) der Pulse messen. Man lässt einen Puls unverändert und passt den anderen Puls an. Die Größe der Verschiebung auf der x-Achse ist dann die Zeitdifferenz Δt .

Es ergeben sich folgende Messwerte:

| | | |
|----------------|----|---------|
| Zeitdauer [ns] | 80 | 96,6827 |
| Strecke [cm] | 1 | 500 |

Es ist nun mit einfachen Formeln möglich, die Geschwindigkeit zu berechnen. Es handelt sich bei dieser Bewegung um eine gleichförmig, geradlinige Bewegung. Daher

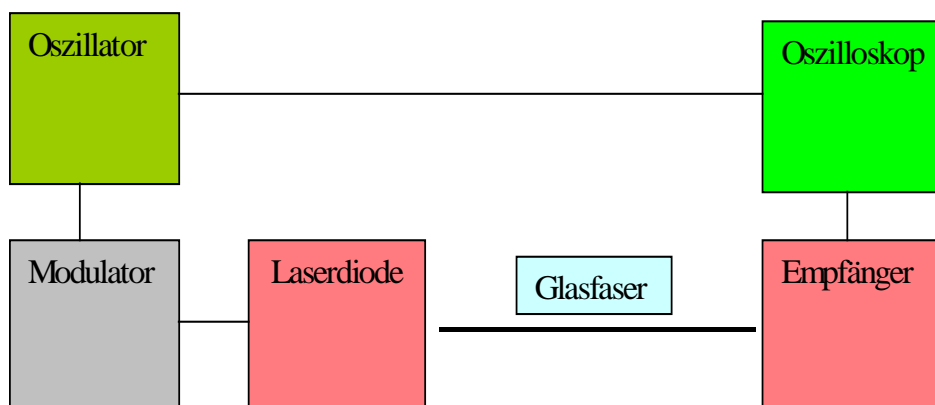


Abb. 10: Aufbau zum Messen der Lichtgeschwindigkeit in Glasfaser

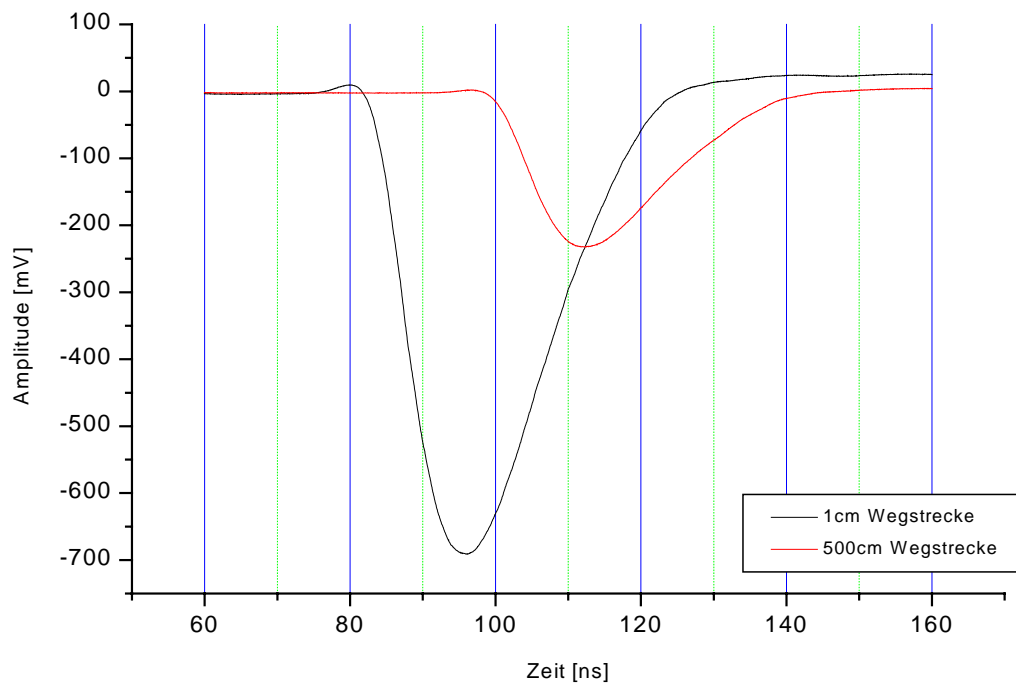


Abb. 11: Pulsverzögerung bei bestimmter Entfernung

folgt die Formel: $v = \frac{s}{t}$. Auf dieses Experiment angewendet, muss man aber mit Weg-

und Laufzeitdifferenzen arbeiten. Damit ergibt sich die erweiterte Form $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$.

Diese Messwerte kann man nun in die Formel einsetzen und die Lichtgeschwindigkeit ausrechnen:

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

$$v = \frac{500\text{cm} - 1\text{cm}}{96,6827\text{ns} - 80\text{ns}}$$

$$v = \underline{\underline{299112,254 \frac{\text{km}}{\text{s}}}}$$

Um den berechneten Wert möglichst genau anzugeben, ist es notwendig, eine Fehlerrechnung durchzuführen. Da man mit einem Lineal eine kleinste Einheit von 1mm hat und am Oszilloskop eine zeitliche Auflösung von minimal 4ps vorhanden ist, gibt es eine definierte Abweichung. Man kann nun mit der Formel für die Fehlerrechnung $\Delta v = v * \left(\frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta s}{s} \right)$, diese Abweichung ermitteln (Δt ; Δs : Hälfte der kleinsten messbaren Einheit).

Es ergibt sich:

$$\begin{aligned}\Delta v &= v * \left(\frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta s}{s} \right) \\ \Delta v &= 299112254 \frac{m}{s} * \left(\frac{0,062ns}{16,6827ns} + \frac{0,0005m}{4,99m} \right) \\ \Delta v &= \underline{\underline{1141599 \frac{m}{s}}}\end{aligned}$$

Die bekannte Größe für die Lichtgeschwindigkeit in der Luft beträgt $c=299711km*s^{-1}$. Im Vergleich mit den experimentell ermittelten Wert gibt es nur eine sehr geringe Abweichung (0,2%). Dies zeigt, wie genau man die Lichtgeschwindigkeit mit relativ geringem materiellen Aufwand

ermitteln kann. Der relative Fehler der Versuchsanordnung beträgt lediglich $1141,599km*s^{-1}$, bei einer experimentell bestimmten Geschwindigkeit von $299112,254km*s^{-1}$. Dies entspricht einen Fehler von 0,4%.

Die in Abbildung 11 gezeigten Pulse sind die Grundlage zur Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit. Die zeitliche Versetzung auf der x-Achse und die Abnahme der Intensität des Lichtpulses ist dabei deutlich zu erkennen. Diese Abnahme ist damit zu begründen, dass der Laserstrahl nicht genau zentriert und parallel verläuft. Daraus ergibt sich, dass die Fläche des auf den Empfänger auftreffenden Strahls größer wird, wodurch die Intensität pro Fläche abnimmt.

Bei der Bearbeitung der beiden Graphen muss man also nicht nur die Zeitachse verschieben sondern auch die Intensität anpassen.

3.3. Messung der Abstände

Bei der Bestimmung von Abständen ist es nun wichtig, die Lichtgeschwindigkeit genau zu kennen. Ohne einen exakten Wert ist eine Ermittlung der Entfernung in cm- oder gar mm-Bereich nicht möglich. Schon geringe Abweichungen in diesem Bereich führen zu einem großen Fehler. Das zweite wichtige Kriterium ist die zeitliche Auflösung, mit der die Lichtpulse untersucht werden. Es wird wieder mit dem selben Verfahren, wie schon bei der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, gearbeitet. Die beiden Pulse werden in einem Graphen übereinander gelegt, wobei ein Graph zeitlich und in der Amplitude angepasst wird. Diese x-Achsenverschiebung ist dann die Zeit Δt , die das Licht für eine unbekannte Strecke benötigt hat. Um möglichst große Strecken zu bekommen, kann man einen Spiegel verwenden, der den Lichtstrahl umlenkt und ihn wieder in die Richtung des Empfängers wirft (Abbildung 9). Zur zusätzlichen Verbesserung der Intensität wurde vor den Empfänger eine Lupe gestellt, die eine Fokussierung des auseinandergehenden Lichtstrahls auf die Empfängerdiode ermöglicht.

Bei der Bestimmung der Abstände geht man so vor, dass man einen Lichtpuls aufnimmt, den man dann als Grundlage für die Zeitverzögerung nimmt. Danach kann man beliebige Abstände ermitteln, da man ja eine Differenz zwischen den Pulsen ermitteln

kann. Diese Zeit Δt ist dann in die Formel $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ einzusetzen. Die Geschwindigkeit ist

hier der Wert für die Lichtgeschwindigkeit, der experimentell ermittelt wurde. Man übernimmt diesen Wert deshalb, um damit den Fehler der Messanordnung beizubehalten. Durch Umstellen nach dem Weg s wird der Abstand berechenbar $\Delta t * v = \Delta s$.

Bei der Auswertung des Graphen (Abbildung 12) erhält man folgende Werte für die Zeitverzögerung:

| | | |
|---|------------|---------|
| Abstand [cm] | 2 | S |
| Zeitverzögerung [ns] | 80 | 199,669 |
| Lichtgeschwindigkeit [km*s ⁻¹] | 299112,254 | |

Nun ist es erforderlich die Werte einzusetzen und den Abstand zu berechnen:

$$s = v * \Delta t$$

$$s = 299112254 \frac{m}{s} * (199,669ns - 80ns)$$

$$\underline{\underline{s = 35,7945m}}$$

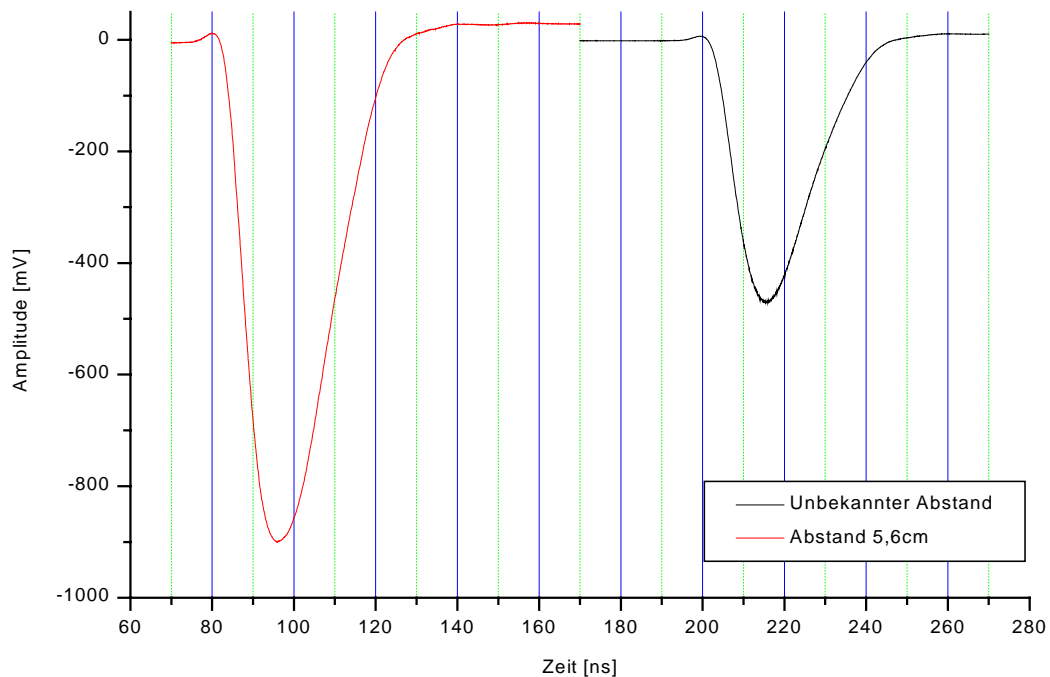


Abb. 12: Zeitverzögerung bei unbekanntem Abstand zu einem bekannten Abstand von 5,6cm

Auch hier ist es notwendig, eine Fehlerrechnung zu machen. Der relative Fehler der Geschwindigkeit wurde schon in Experiment 1 ermittelt.

Die Formel lautet:

$$\Delta s = s * \left(\frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta t}{t} \right)$$

$$\Delta s = 35,7945m * \left(\frac{1141599 \frac{m}{s}}{299112254 \frac{m}{s}} + \frac{0,062ns}{119,669ns} \right)$$

$$\underline{\underline{\Delta s = 0,1552m}}$$

Der Fehler entsteht dadurch, da man erstens die experimentell bestimmte Lichtgeschwindigkeit und deren relativen Fehler in die Rechnung mit einbezieht. Der zweite Punkt ist die Genauigkeit des Oszilloskops. Es hat zwar eine Auflösung von 4ps, jedoch ist es bei der Auswertung dieser Daten nicht mehr so genau möglich, die Graphen auf-

einander zu legen. Es ist aber zu erwähnen, dass die Lichtgeschwindigkeit einen größeren Einfluss auf diese Rechnung hat.

Berechnet man den Abstand mit den in Tabellenbüchern angegebenen Geschwindigkeiten, erhält man eine Strecke von $s=35,866\text{m}$. Dies entspricht einer relativen Abweichung von 0,43%. Damit wird die Richtigkeit der ermittelte Werte und der Fehlerrechnung bestätigt. Weiterhin kommt zum Ausdruck, dass es unbedingt notwendig ist die experimentell bestimmte Lichtgeschwindigkeit zu benutzen, um den Fehler klein zu halten.

3.4. Messung der Brechzahl

Bei der Bestimmung der Brechzahl kommt es auf die richtige Fokussierung des Laserstrahls an. Diese ist notwendig, da der Lichtleiter nur eine bestimmte Oberfläche besitzt, in die das Licht eindringen kann.

Im Lichtleiter gilt es zwei verschiedene Probleme zu beachten. Zum einen wird durch die Dispersion des Lichts die Frequenz im optisch dichteren Stoffen verringert. Die Folge ist die zeitliche Verlängerung des Pulses. Dieser Effekt wurde bei den experimentellen Untersuchungen nicht festgestellt, so dass ich deshalb nicht weiter darauf eingehe. Das zweite Problem ist die Verringerung der Frequenz. Aus dieser Verringerung ergibt sich eine niedrigere Ausbreitungsgeschwindigkeit im optisch dichteren Medium.

Zum Bestimmen der Brechzahl benötigt man auch hier wieder die Laufzeitunterschiede zweier Lichtpulse für genau definierte Lichtleiterlängen. Es ist darauf zu achten, bei beiden Lichtleitern mit gleichem Einfallswinkel die Zeit zu messen. Bei unterschiedlichem Winkel kann es passieren, dass durch die Reflektion im Lichtleiter der zurückgelegte Weg länger wird als der äußerlich messbare und somit die Ergebnisse verfälscht werden. Der Ansatz ist wieder die Formel $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$.

Um nun die Brechzahl zu ermitteln, muss man das Brechungsgesetz anwenden. Dieses setzt das Verhältnis der Brechzahlen mit dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten gleich.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}$$

c_1 : Lichtgeschwindigkeit in Luft
 c_2 : Lichtgeschwindigkeit in Glas
 n_1 : Brechzahl von Luft
 n_2 : Brechzahl von Glas

Es wird auch hier wieder die in Experiment 1 ermittelte Lichtgeschwindigkeit verwendet und aus dieser die Brechzahl von Luft bestimmt. Die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum wird dagegen einem Tabellenbuch entnommen.

Es ergeben sich folgende Werte:

| | | |
|-----------------------|-------|--------|
| Zeiten [ns] | 80 | 93,277 |
| Lichtleiterlänge [cm] | 249,9 | 499,4 |

1. Bestimmung der Brechzahl von Luft:

$$n_{Luft} = \frac{c_{Vakuum}}{c_{Luft}}$$

$$n_{Luft} = \frac{299792458 \frac{m}{s}}{299112254 \frac{m}{s}}$$

$$\underline{n_{Luft} = 1,00227}$$

2. Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Glasfaser:

$$c_{Glas} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$
$$c_{Glas} = \frac{4,994m - 2,499m}{93,277ns - 80ns}$$
$$\underline{\underline{c_{Glas} = 187918957 \frac{m}{s}}}$$

3. Bestimmung der Brechzahl der Glasfaser:

$$n_{Glas} = \frac{v_{Luft} * n_{Luft}}{v_{Glas}}$$
$$n_{Glas} = \frac{299112254 \frac{m}{s} * 1,00227}{187918957 \frac{m}{s}}$$
$$\underline{\underline{n_{Glas} = 1,5953}}$$

Um auf die Genauigkeit der berechneten Werte zu kommen, ist es auch hier wieder notwendig die Fehlerrechnung durchzuführen:

$$\Delta n_{Glas} = n_{Glas} * \left(\frac{\Delta c_{Luft}}{c_{Luft}} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta t}{t} \right)$$
$$\Delta n_{Glas} = 1,595321 * \left(\frac{1141599 \frac{m}{s}}{299112254 \frac{m}{s}} + \frac{0,0005m}{4,994m - 2,499m} + \frac{0,062ns}{13,277ns} \right)$$

Damit ist bei der Bestimmung der Brechzahl eine große Genauigkeit erreicht worden (relativer Fehler 1%). Der ermittelte Wert ist dem von Flintglas ähnlich. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Lichtleiter aus diesem Material besteht oder es zum größten Teil enthält.

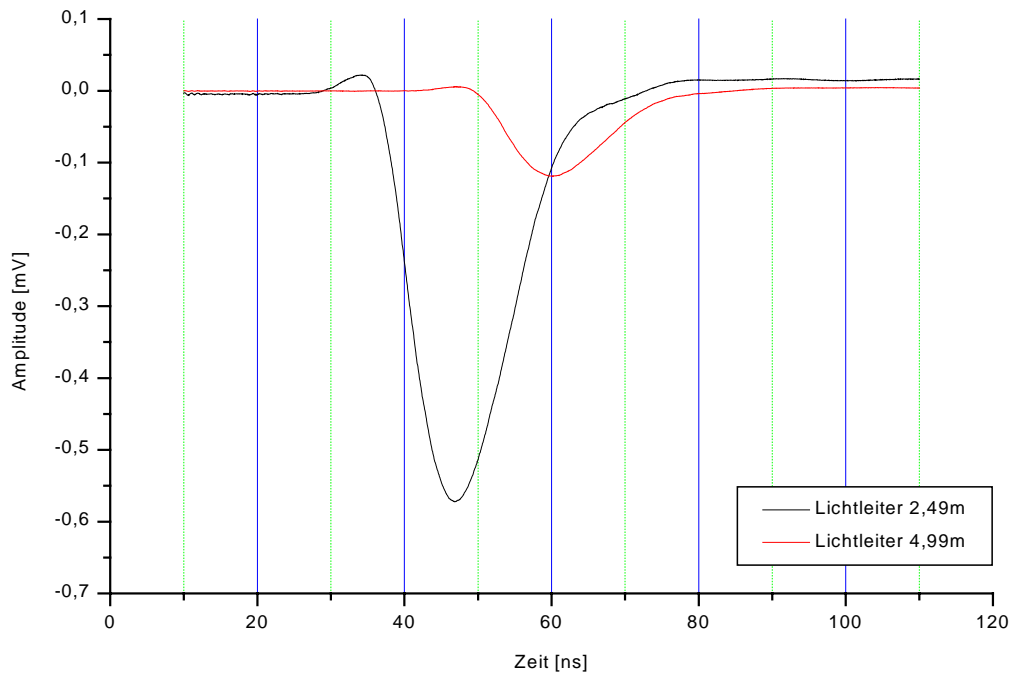


Abb. 13: Laufzeitdifferenzen in unterschiedlich langen Lichtleitern

In Abbildung 13 ist die Abnahme der Intensität des Lichts beim Durchlaufen des Lichtleiters gut zu erkennen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

4.1. Zusammenfassung und Auswertung

Im Ergebnis der Experimente kann man zusammenfassend einschätzen, dass man brauchbare Werte mit relativ geringen Aufwand zu erreichen in der Lage ist. Die ermittelten Werte stimmen gut mit den bereits Bekannten überein. Anhand der Fehlerrechnungen, die zu jedem Experiment vorhanden sind, wird die Genauigkeit der Ergebnisse belegt. Dies ist wichtig, da man nie ohne Fehler messen kann, denn selbst genaue Geräte, wie das Oszilloskop, besitzen gewisse Ables- und Gerätefehler.

Jedoch muss man in der Wichtung des Fehlers der Messwerte ihre Auswirkung auf das Ergebnis beachten. So hat eine geringe Änderung der Zeit im ns-Bereich eine große Auswirkung auf das Ergebnis, da sie im Zähler der Formel steht (Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit). Dagegen hat eine weniger genaue Messung der Entfernung geringeren Einfluss, da es sich nicht um solche relativ kleinen Werte handelt, wie dies bei der Zeit der Fall ist.

4.2. Ausblick und Weiterführungen

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Grundlagen von heute selbstverständlichen Anwendungen der Lasertechnik, wie Entfernung- oder Abstandsmessungen. Daher kann man sagen, dass die durchgeführte Experimente noch weiter ausbaufähig sind. Man kann zum Beispiel weitere Geräte entwickeln, die schon von selbst Entfernungen mit Hilfe der Laufzeitdifferenz bestimmen und entsprechend ausgeben können. Jedoch würde dies einen noch größeren Aufwand erfordern, da man eine sehr hohe Genauigkeit in der Zeitauflösung benötigt, um den Fehler möglichst gering zu halten.

Jedoch sind die im Rahmen von „Jugend forscht“ gebauten Geräte und durchgeführten Experimente, nicht ohne Sinn. Es bietet sich an, im Physikunterricht in unserer Schule solche Experimente mit Hilfe der entwickelten Geräte durchzuführen. Dies wäre sicherlich ein großer Gewinn für die Qualität des Unterrichtes. Denn hier lernen die Schüler ein einfaches Prinzip der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit kennen. Gleichzeitig werden Grundlagen der modernen elektronischen Schaltungstechnik vermittelt. Des weiteren wird die Notwendigkeit und Anwendung der Fehlerrechnung am praktischen Experiment belegt.

Durch die einfache Verwendung ist es nicht nur den Lehrern vorbehalten, damit zu experimentieren, sondern es besteht auch für Schüler die Möglichkeit, diese Versuchsanordnung selbst zusammenzustellen und so die Zusammenhänge zwischen Abstand und Zeitverschiebung, anschaulich erfahren zu können.

Es stände mit diesem Versuchsaufbau auch eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Brechzahl von optischen Medien zur Verfügung.

Glossar

A

Amplitude

Ist die maximale Stärke eines Signals. Bei elektrischen Signalen wird es in Volt [V] angegeben.

B

BNC- Stecker

Standardisierter Stecker, der durch einfaches Stecken und Drehen auf die Buchse arretiert wird.

Brechzahl

Ein Faktor, der das Verhältnis zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Geschwindigkeit in einem optisch dichteren Medium (Luft, Glas) bildet. Bei bekannter Brechzahl kann man so die Lichtgeschwindigkeit des jeweiligen Stoffes errechnen.

D

Diode

Halbleiterbauelement, das den Strom nur in eine bestimmte Richtung hindurchlässt. Diese ist so gefertigt, dass es eine lochleitende (p-Gebiet) und eine elektronenleitende (n-Gebiet) Schicht gibt. Beim anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung werden die Elektronen durch das elektrische Feld in Richtung des p-Gebietes bewegt. Dadurch wird dieser Bereich mit Ladungsträgern überschwämmt und es kommt zum Leiten des Stromes. Beim Anschließen in Sperrrichtung werden die freien Ladungsträger durch das elektrische Feld vom p-Gebiet weggedrängt, wodurch keine freien Ladungsträger vorhanden sind die zum Leiten des Stromes benötigt werden. Dadurch erfolgt kein Stromfluss.

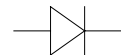
Drainspannung

Siehe MOSFET

E

Einheit

1ps = $1 \cdot 10^{-12}$ s (Pikosekunde)
1S = $1 \text{A} \cdot \text{V}^{-1}$ (Siemens)



G

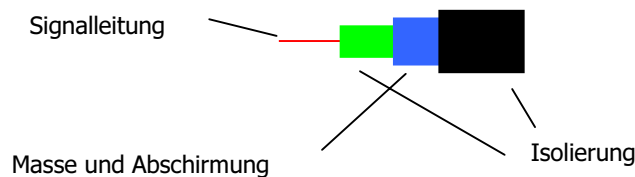
Gatter

Verknüpft logische Eingangssignale zu einem oder mehreren Ausgangssignalen.

K

Koaxialkabel

Ist ein Kabel zur Leitung hochfrequenter elektrischer Ströme.



L

Laser

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Bedeutet stimulierte Emission von Energie und Verstärkung von Licht. Diese sogenannte stimulierte Emission hat folgende Ursache:

Elektronen der Atome in dem Laser werden durch Anlegen einer Spannung auf ein erhöhtes Energieniveau gehoben. Trifft nun ein Photon mit passender Energie auf dieses Atom, so wird daraus ein weiteres Photon mit passender Energie herausgelöst. Dieses Photon ist mit dem anderen in gleicher Phase und Richtung. Dadurch wird der Phasenzug länger und bekommt die bekannten Eigenschaften.

Lichtleiter

Ist ein Material (Glas), das in der Lage ist, Licht zu Leiten. Es basiert auf der Eigenschaft der Totalreflektion. Das Licht wird in diesem Leiter immer an den Wänden reflektiert. Dadurch ist es möglich, bei flexiblen Lichtleitern auch in gekrümmten Verlauf das Licht hindurchzuleiten. Es gibt auch Lichtleiter die von innen heraus immer geringer werdenden Brechzahlen des verwendeten Materials haben, um so den Lichtstrahl möglichst in der Mitte zu halten um somit den geringsten Weg zu haben.

M

MOSFET

Metalloxid Feldeffekttransistor. Sein Vorteil liegt im leistungslosen Schalten. Der FET besitzt drei Anschlüsse: D -Drain; S -Source;

G -Gate. Zwischen D und S liegt ein n-leitendes Gebiet und dieses wird von einem p-leitenden umschlossen, woran G liegt. Legt man nun an G den Minuspol und an S den Pluspol an, so kann man den Stromfluss zwischen D und S steuern. Je größer U_{GS} ist desto kleiner ist I_{SD} .

O

Oszillator

Bauteil welches zur Erzeugung von Schwingungen dient. Bei Verwendung eines Schwingquarzes kann man genau definierte Schwingungen erzeugen.

Oszillograph

Gerät, zur graphischen Anzeige von elektrischen Signalen.

P

Photodiode

Ähnlicher Aufbau wie eine Diode, nur das die Grenzschicht zwischen p- und n-Leitenden Gebiet mit Hilfe von Photonen herausgelösten Elektronen überschwemmt wird und somit ein Stromfluss in der ursprünglichen Sperrrichtung zulassen.

Quellen

„Kuhn Physik band 2 12/13“ von Westermann (1993)

„Dorn – Bader Physik Oberstufe Gesamtband 12/13“ von Schroedel (1996)

„Kleine Enzyklopädie Technik“ von VEB Bibliographisches Institut Leipzig (1966)

„Das große Tafelwerk Sekundarstufen I und II“ von Volk und Wissen (1999)