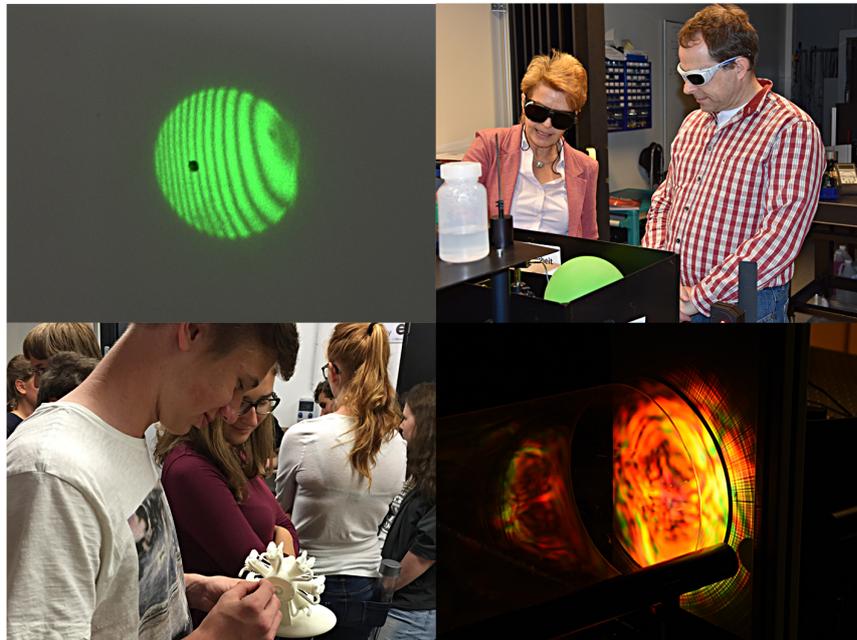


INT - Interferometrie

Versuchsanleitung



| | |
|--------------|---|
| Fachbereich: | Physik |
| Teilgebiet: | Optik |
| Thema: | Wellenoptik, Interferometrie, Längenmessung |

| | |
|---------------------------|--|
| Zeitbedarf Minimum: | 1,5 h |
| Zeitbedarf Maximum: | 3,0 h |
| Hilfreiche Vorkenntnisse: | Wellenmodell des Lichts, Welleneigenschaften |

| | |
|------|---|
| Ort: | Physikalisches Praktikum Maschinenwesen |
|------|---|

Die Teilnehmer sollten Schreib- und Zeichenutensilien dabei haben. Dazu diese Anleitung und einen Ausdruck der Logbook-Vorlage.

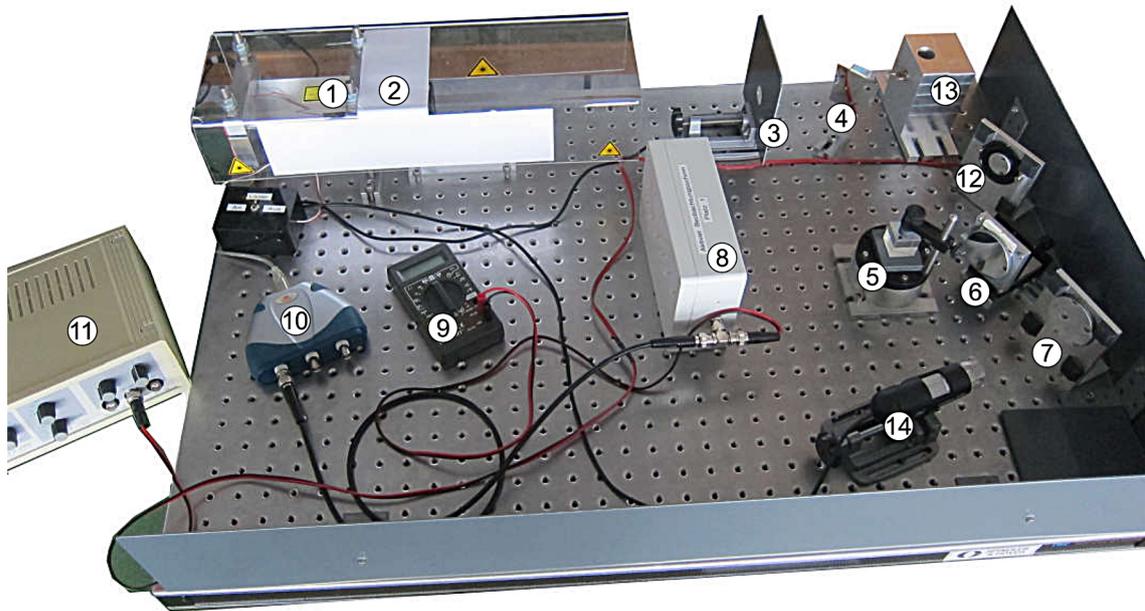
Wir danken der Fakultät für Physik für die Möglichkeit der Nutzung dieses Praktikumsversuchs.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Wichtige Elemente | 3 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 1.1 Allgemeines | 7 |
| 1.2 Historisches | 7 |
| 1.3 Forschung | 8 |
| 1.4 Technische Anwendungen | 10 |
| 1.5 Warum ist dieser Praktikumsversuch interessant? | 10 |
| 2 Fachliche Grundlagen | 11 |
| 2.1 Einleitung | 11 |
| 2.2 Wellen | 11 |
| 2.3 Harmonische Wellen | 11 |
| 2.4 Interferenz | 13 |
| 2.5 Kohärenz | 14 |
| 2.6 Das Michelson-Interferometer | 15 |
| 3 Aufgaben | 17 |
| 3.1 Vorbereitung der Apparatur | 17 |
| 3.1.1 Aufbau des Experiments | 18 |
| 3.1.2 Empfindlichkeit des Aufbaus | 18 |
| 3.2 Intensitätsmessungen | 19 |
| 3.3 Hochgenaue Längenmessung | 20 |
| 3.4 Schwingungsmessung | 20 |

Zusammenfassung

Dieser Versuch ist Teil eines physikalischen Praktikums für Studierende der TU München. Die zugrundeliegende Modellvorstellung des Lichts geht deutlich über die des Strahlenmodells (im Versuch ABB) hinaus. Licht muss hier im Wellenmodell betrachtet werden. Die Interferenz von Lichtwellen erlaubt es, Längen auf Lichtwellenlängen genau zu messen. Das folgende Bild gibt einen Überblick über den Aufbau.



| | | |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 Laser | 5 Strahlteiler | 10 Datenlogger (Oszi) |
| 2 Raumfilter | 6 Spiegel (justierbar) | 11 Funktionsgenerator |
| 3 Sammellinse | 7 Spiegel (nicht justierbar) | 12 Lautsprecher mit Spiegel |
| 4 Umlenkspiegel | 8 „aktiver“ Beobachtungsschirm | 13 Alu-Körper (nicht verwendet) |
| | 9 Multimeter | 14 Digital-Kamera |

Das Ziel ist die Vermessung eines Lautsprechers, d.h. der Hub der Membran (Amplitude) und deren Geschwindigkeit sollen bestimmt werden. Dazu können eventuelle Abweichungen von der Erregerfrequenz festgestellt werden.

Zunächst geht es aber darum, das Interferometer aufzubauen und zu justieren. Einführende Experimente beschäftigen sich mit dem Phänomen *Interferenz* und der Genauigkeit der Längenmessung. Dabei wird auch die elektronische Datenerfassung eingeführt. Zum Schluss wird die eigentliche Fragestellung, die Vermessung des Lautsprechers, angegangen.

Hinweis: Tipps und Verweise auf das *Glossar* finden Sie am Rand mit der Kennzeichnung **Tipp!** bzw. . Die Glossar-Stichworte sind in der Regel schräg gedruckt.

Wichtige Elemente im Detail

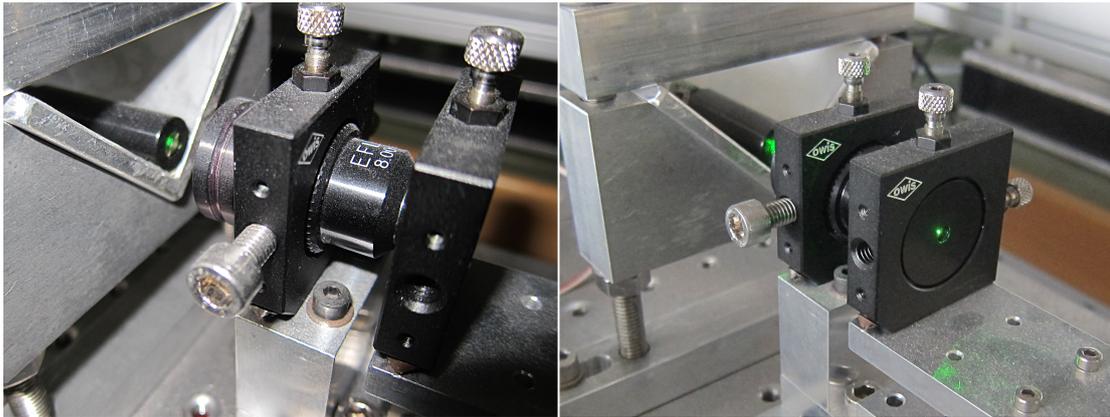


Abbildung 0.1: Bei der Lichtquelle handelt es sich um einen Diodenlaser der Laserklasse 2 mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$. Vor dem Laser ist ein Raumfilter. Es besteht aus einem Mikroskopobjektiv und einer Lochblende (sehr kleines Loch).

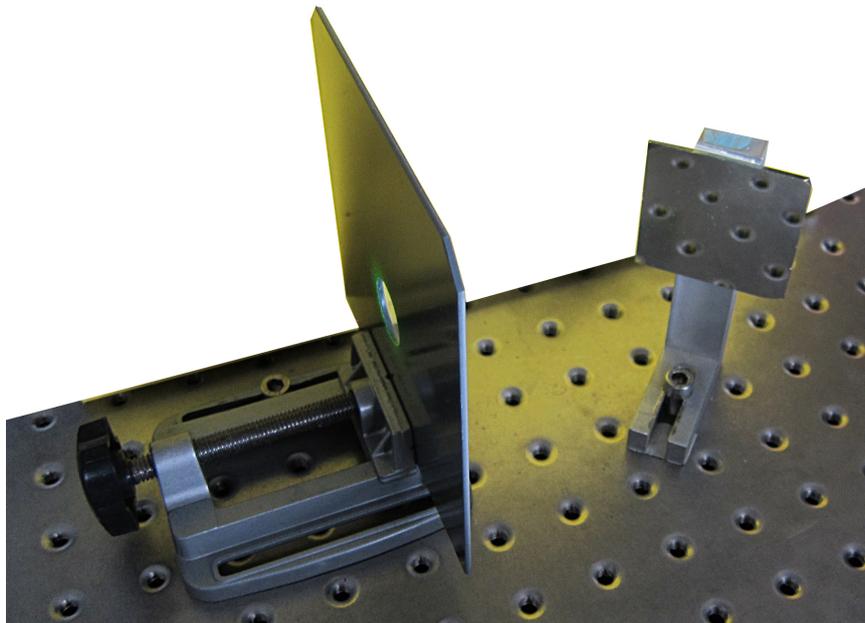


Abbildung 0.2: Eine Sammellinse ($f = 360 \text{ mm}$) erzeugt ein sehr gut paralleles Lichtbündel (die Lochblende des Raumfilters ist der Brennpunkt). Das Licht wird durch den folgenden Planspiegel umgelenkt. Dieser Teil des Aufbaus muss i.a. nicht verändert werden.

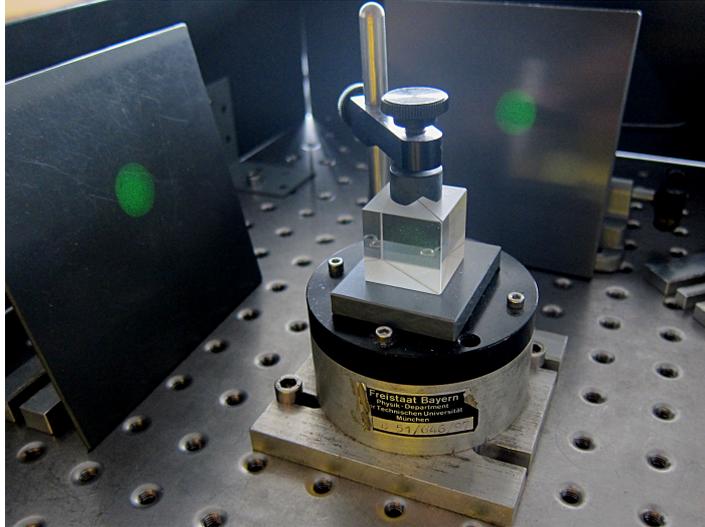


Abbildung 0.3: Der Strahlteiler teilt das Lichtbündel in zwei Teilbündel. Er besteht aus zwei zusammengekitteten Prismen. Ein Lichtstrahl wird an der Grenzfläche teilweise reflektiert und teilweise transmittiert.

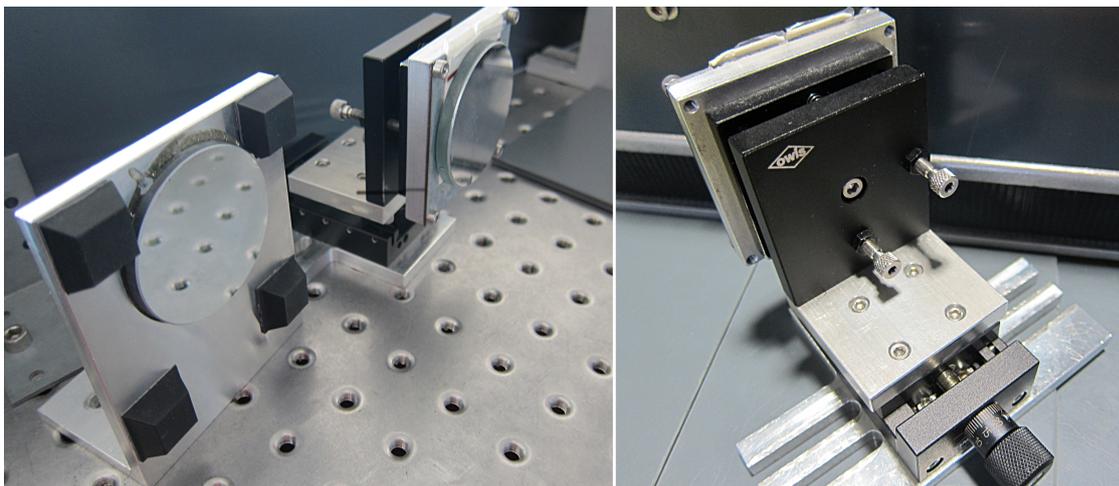


Abbildung 0.4: Die beiden Spiegel reflektieren die Teilbündel aus dem Strahlteiler. Der justierbare Spiegel erlaubt es ein Teilbündel genau mit dem zweiten Teilbündel zur Deckung zu bringen. Dazu gibt es die beiden Rändelschrauben an der Spiegelrückseite (rechtes Bild), mit denen der Spiegel vertikal und horizontal verkippt werden kann. Auch zu sehen ist der Längsversteller, der bei der Längenmessung verwendet wird.

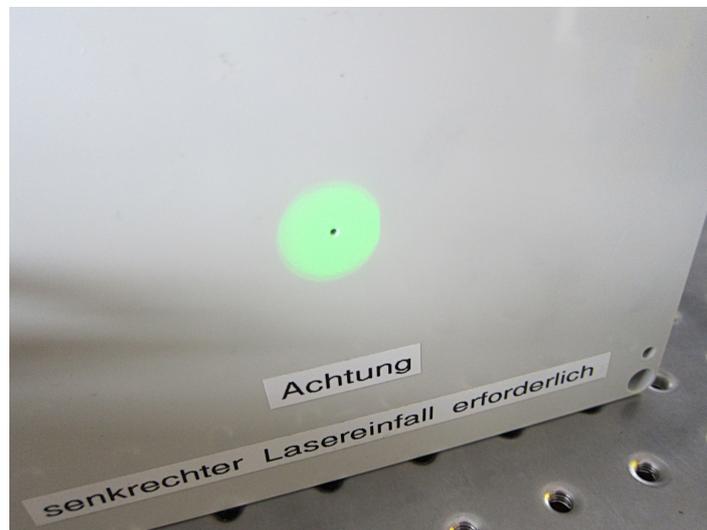


Abbildung 0.5: Ein kleines Loch im Beobachtungsschirm lässt Licht auf den Lichtdetektor fallen. Das Loch ist genau mittig angebracht. Es hat einen Durchmesser von 1,5 mm. Dahinter befindet sich der Lichtsensor (Phototransistor). Die Ausgangsspannung des Lichtsensors steht am (BNC-)Kontakt zur Verfügung. Sie ist direkt proportional zur detektierten Lichtintensität und nimmt einen Wert zwischen 0 V und -15 V an. (Bei einer Spannung von -15V ist die maximal detektierbare Lichtintensität erreicht).

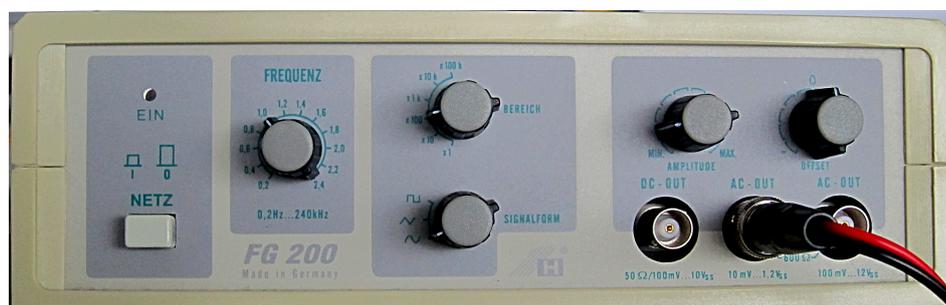


Abbildung 0.6: Der Funktionsgenerator liefert die Wechselspannung, die am Lautsprecher anliegt. Als Signalform wird „Sinus“ gewählt. Die Frequenz lässt sich einstellen (Bereichswahl beachten). Die Amplitude kann nach Bedarf eingestellt werden. Der Offset soll „Null“ sein.

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Im Versuch ABB (optische Abbildung) wird das einfachste Modell des Lichts verwendet, das Strahlenmodell. Dabei wird beim Experiment zur Beugungsbegrenzung des Auflösungsvermögens offensichtlich, dass dieses Modell nicht allgemein anwendbar ist. An dieser Stelle muss das Wellenmodell verwendet werden.

Wellen sind uns aus dem Alltag z.B. in Form von Wasserwellen bekannt. Lichtwellen können wir aber nicht sehen, d.h. wir müssen aufgrund bestimmter *Wellenphänomene* (s.u.) schließen, dass Licht als Welle zu beschreiben ist. Eines dieser Phänomene ist die Interferenz.



Abbildung 1.1: Wasserwellen aufgenommen am Silbersee, Bobenheim-Roxheim. *Wikipedia:* Hermann Luyken, gemeinfrei.

1.2 Historisches

Bereits 1660 schlug ROBERT HOOKE eine einfache Wellentheorie des Lichts vor. Ein Argument war die enorme Geschwindigkeit der Ausbreitung (Vergleich Blitz und Donner), die mit einem Materietransport unvereinbar erschien. Die reine Auslenkung eines Mediums (ähnlich Schall in Luft) war für HOOKE die beste Erklärung.

Zum Gegner dieser Vorstellung entwickelte sich ISAAC NEWTON. Er vertrat eine (materielle) *Korpuskulartheorie*. Das 18. Jahrhundert war geprägt von der Vorstellung eines Lichtteilchenstroms. Die Reflexion von Licht ist damit (mechanisch) leicht zu erklären; für die Brechung braucht es aber eine zusätzliche Kraft an der Oberfläche, die auf die Teilchen wirkt. Dies führte schließlich zu Widersprüchen, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

Um 1800 begann sich die Wellentheorie durchzusetzen. Man glaubte, dass Licht vermutlich eine elastische Welle in einer unbekanntem Substanz ist, die *Äther* genannt wurde.

1864 veröffentlichte JAMES CLERK MAXWELL eine Theorie des elektromagnetischen Feldes aus der sich die mögliche Existenz elektromagnetischer Wellen ergab. Die Maxwell-Gleichungen zeigen nämlich, dass ein zeitlich sich änderndes Magnetfeld ein elektrisches Feld erzeugt, und dass

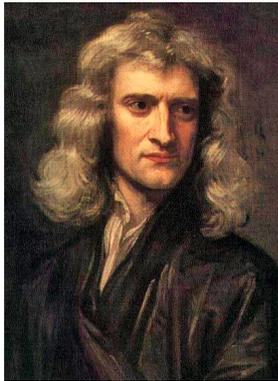


Abbildung 1.2: ISAAC NEWTON (1649 - 1727) hatte einen enormen Einfluss auf die Entwicklung der Physik. In der Schule ist er vor allem durch seine Arbeiten zur Mechanik bekannt. Das Gemälde entstand 1689 durch Godfrey Kneller (Wikipedia, gemeinfrei).



Abbildung 1.3: JAMES CLERK MAXWELL (1831 - 1879) gelang es alle elektromagnetischen Erscheinungen mit vier Gleichungen, den *Maxwell-Gleichungen* zu erklären. JAMES CLERK MAXWELL war ein schottischer Physiker und wurde in Kirkcubrightshire in den „Lowlands“ von Schottland geboren. Das Bild stammt von G. J. Stodart (Wikipedia, gemeinfrei).

ein zeitlich sich änderndes elektrisches Feld ein magnetisches Feld erzeugt. Die Felder induzieren sich gegenseitig. Licht konnte also eine solche elektromagnetische Welle sein. Es wurde Strahlung auch im nicht-sichtbaren Bereich (also bei anderen Frequenzen) vermutet. 1888 konnte HEINRICH HERTZ tatsächlich auch *Radiowellen* nachweisen.

Viel älter ist allerdings eine Idee die heute grundlegend bei der Behandlung von Wellenphänomenen ist. Sie ist das nach CHRISTIAAN HUYGENS (1629 - 1695) benannte *Huygensche Prinzip*. Danach können alle Punkte einer Wellenfront als Ausgangspunkt von Kugelwellen (Elementarwellen) aufgefasst werden. Die Einhüllende der Kugelwellen ergibt die (neue) Wellenfront. Am Rand von Hindernissen fehlt es einseitig an Partnerwellen und es kommt zur Beugung. AUGUSTIN JEAN FRESNEL (1788 - 1827) hat das *Huygensche Prinzip* um die Interferenz der Elementarwellen erweitert und hat dadurch die Beugungsbilder z.B. eines Spaltes erklären können.

Um weitere Aussagen über einen möglichen *Äther* machen zu können, wurde 1887 das berühmte *Michelson-Morley-Experiment* durchgeführt. Das dabei eingesetzte Interferometer wird heute als *Michelson-Interferometer* bezeichnet.

Ein Interferometer dieses Typs verwenden wir in diesem Versuch.

1.3 Forschung

- © Besonders spektakulär ist die Entdeckung der *Gravitationswellen* mit dem Detektor „Advanced-LIGO“ am 14. September 2015. Es handelt sich um zwei fast baugleiche Anlagen in Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana). Sie entsprechen im Prinzip dem Michelson-Interferometer unseres Versuchs, allerdings betragen die Armlängen (Strahlteiler-Spiegel) 4 km bzw. 3 km. Arbeiten zu Gravitationswellen hat ALBERT EINSTEIN 1916 und 1918 veröffentlicht. Sie folgten seiner Veröffentlichung der *Allgemeinen Relativitätstheorie* im Jahr 1915. Er selbst hielt aber

ihren Nachweis für unmöglich.

Mit modernen Methoden ist somit eine weitere Bestätigung der Richtigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie gelungen und einige Forscher hoffen, mit der Gravitationswellenastronomie ganz neue Erkenntnisse über das Universum zu erhalten.



Abbildung 1.4: Nördlicher Arm des LIGO-Interferometers in Hanford (Umptanum, Wikipedia CC BY-SA 3.0).

Auch mit Radioteleskopen sind Interferometer möglich. Ein Spezialfall ist das „very-long-baseline“ Interferometer. Die Antennen stehen dabei auf verschiedenen Kontinenten. Durch Messung eines genau bekannten Radioobjektes kann die Entfernung der Antennen sehr genau bestimmt werden. Damit kann die Kontinentaldrift gemessen werden. Die Wellen werden dabei nicht direkt überlagert, sondern mithilfe einer genauen Zeitinformation (Atomuhr) „im Computer“ zusammen gebracht. Bild 1.5 zeigt die 20m-Radioantenne in Wettzell, die Teil eines solchen Interferometers ist.



Abbildung 1.5: 20m-Radioteleskop, Geodätisches Observatorium Wettzell (H. Raab, Wikipedia CC BY-SA 3.0).

1.4 Technische Anwendungen

Ein wichtiges Gebiet, bei dem interferometrische Auswertung zum Tragen kommt, ist die sogenannte *Vibrometrie*. Dabei geht es um das berührungslose Erfassen von Schwingungen (Ort und Frequenz). Zum Einsatz kommt z.B. ein *Laser-Doppler-Vibrometer* (LDV).

Die Frequenz des vom schwingenden Bauteil reflektierten Strahls ist moduliert (Doppler-Effekt), woraus sich die Geschwindigkeit des schwingenden Teils ergibt. Die Methode zur Bestimmung der Auslenkung werden wir in diesem Versuch kennenlernen.

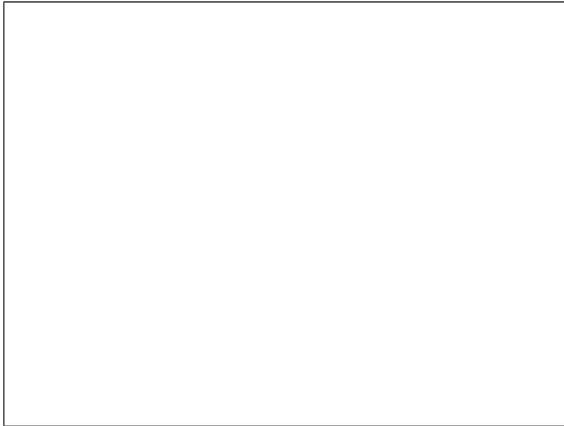


Abbildung 1.6: (Beispiel mit Foto iw - Institut für Werkzeugmaschinenbau)

Die Anwendungen sind vielfältig. In der Akustik ist es eine Standardmethode bei der Lautsprecherentwicklung. Auch Musikinstrumente können damit untersucht werden. In der Automobilindustrie werden Schwingungen an Bauteilen und ganzen Fahrzeugen erfasst. Das ist z.B. wichtig bei der Geräuschdämmung. Das Schwingungsverhalten von Gebäuden und Brücken ist ein Beispiel aus dem Bauingenieurbereich. In der Medizin kann das Trommelfell mit Hilfe eines LDV untersucht werden.

Es gibt auch Methoden bei denen Objekte z.B. durch Schallwellen zu Schwingungen angeregt werden und die Vermessung dieser Schwingungen mittels LDV erlaubt es, Inhomogenitäten zu finden. Vielversprechend ist diese Methode z.B. bei der Suche nach Landminen.

Es ist auch gelungen über die Schwingungen von Bauteile Audiosignale (z.B. Sprache) zu detektieren.

1.5 Warum ist dieser Praktikumsversuch interessant?

Mit dem Wellenmodell des Lichts lernen Sie ein bedeutendes Modell der Physik kennen. Im Vergleich zum Versuch ABB (optische Abbildung) erfahren Sie, wie unterschiedliche Fragestellungen mit unterschiedlichen Modellen (und damit unterschiedlichen Aufwand) behandelt werden können.

Sie werden im folgenden das experimentelle Vorgehen selbst bestimmen und dokumentieren. Damit entwickeln sie Methodenkompetenzen, die in vielen alltäglichen Situationen zur Problemlösung eingesetzt werden können.

Der fachliche Hintergrund ist ein wichtiger Beitrag zum Verständnis der Physik. Anwendungen in Technik und Forschung sind weit verbreitet und betreffen auch viele Ergebnisse, die öffentlich diskutiert werden. Zur objektiven Bewertung dieser Informationen sind die physikalische Grundlagen entscheidend.

2 Fachliche Grundlagen

2.1 Einleitung

In der Strahlenoptik (Versuch ABB) werden die geradlinige Ausbreitung von Licht, sowie Brechung und Reflexion beschrieben. Über die Natur des Lichts und die mikroskopische Wechselwirkung mit Materie (z.B. bei Brechung und Reflexion) wird nichts gesagt.

Zudem gibt es Phänomene (Wellenphänomene), die innerhalb des Strahlenmodells nicht zu erklären sind. Dies sind:

- Polarisierung
- Beugung
- Interferenz

Polarisierung, Beugung und Interferenz sind typische Welleneigenschaften.

2.2 Wellen

Wellen kennen wir als Wasserwellen und den meisten sind wohl auch *Schallwellen* ein Begriff. Eine allgemeine Definition des Begriffs *Welle* ist:

Wellen sind periodische Veränderungen einer physikalischen Größe in Raum und Zeit.

Bei Wasserwellen verändert sich die Auslenkung der Wasserteilchen, bei Schallwellen die Dichte der Luft (bzw. des Gases oder der Flüssigkeit).

Periodisch bedeutet, dass sich eine bestimmte Sequenz ständig wiederholt. Alle Aussagen zur Welle sind also bereits in dieser Sequenz enthalten.

Eine fortschreitende Welle transportiert zudem Energie und Impuls.

2.3 Harmonische Wellen

Im weiteren es ist sinnvoll, sich auf *harmonische Wellen* zu beschränken. Das sind Wellen, die durch eine Sinus-Funktion

$$A = A_0 \sin(\varphi) \tag{2.1}$$

beschrieben werden können.

Folgende Bezeichnungen werden verwendet:

- A ist die *Auslenkung*,
- A_0 ist die *Amplitude* (also die maximale Auslenkung),
- φ ist die *Phase*.

Oben erwähnte Sequenz wäre eine komplette Sinus-Schwingung (Bild 2.1), also die Funktionswerte von $0 \dots 2\pi$ (*Bogenmaß*) bzw. $0^\circ \dots 360^\circ$.

G

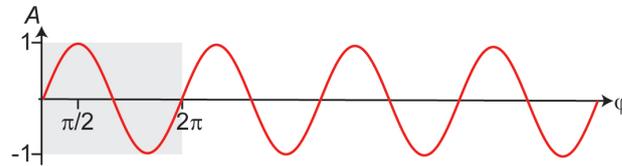


Abbildung 2.1: Die Funktion $A = \sin(\varphi)$. Der grau hinterlegte Bereich enthält alle Informationen über die Funktion.

Der Wellenzug von $\varphi = 0$ bis $\varphi = 2\pi$ beinhaltet die gesamte Information über die Welle.

Die Welle soll jetzt als Funktion der Zeit t und der Ortskoordinate x (eindimensionaler Fall) beschrieben werden. Diese sogenannte *Wellenfunktion* gibt die Auslenkung A der Welle in Abhängigkeit von der Zeit t und vom Ort x an. Für eine Amplitude A_0 ergibt sich:

G

$$\boxed{A(t, x) = A_0 \sin(\omega t - kx)} \quad \text{Wellenfunktion} \quad (2.2)$$

Als neue Größen kommen die *Kreisfrequenz* ω und die *Wellenzahl* k vor. Sie hängen mit der *Periode* T und der *Wellenlänge* λ zusammen. T ist die Zeit für eine komplette Schwingung, λ ist die Länge der Welle von 0 bis 2π . Es gilt:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{und} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.3)$$

Das negative Vorzeichen des Terms kx folgt aus der Annahme, dass sich die Welle von links nach rechts ausbreitet.

Die elektromagnetische Welle

Licht ist eine elektromagnetische Welle. Die physikalischen Größen, die durch eine Wellenfunktion beschrieben werden, sind das elektrische Feld mit der Feldstärke E und das magnetische Feld mit der Flussdichte B .

$$E(t, x) = E_0 \sin(\omega t - kx) \quad (2.4)$$

$$B(t, x) = B_0 \sin(\omega t - kx + \pi) \quad (2.5)$$

Hier ist berücksichtigt, dass elektrisches und magnetisches Feld um π gegeneinander phasenverschoben sind. Auf eine vektorielle Schreibweise wurde verzichtet. Wie in Bild 2.2 gezeigt, stehen die Felder zueinander und zur Ausbreitungsrichtung senkrecht.

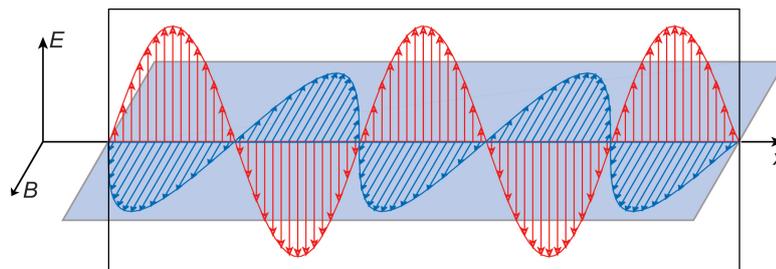


Abbildung 2.2: Die elektromagnetische Welle. Die Welle schreitet in x -Richtung fort.

Intensität der elektromagnetischen Welle

Eine elektromagnetische Welle transportiert Energie (Strahlungsenergie). Interessant ist natürlich die Strahlungsenergie, die pro Zeit auf eine bestimmte Fläche (z.B. den Detektor) trifft.

Unter Intensität verstehen wir hier die Energie pro Zeit und pro Fläche.

Anmerkung: Genaugenommen spricht man heute von *Bestrahlungsstärke*. In vielen Schulbüchern wird aber immer noch die Bezeichnung *Intensität* verwendet und deshalb soll das hier auch geschehen.

Es lässt sich zeigen, dass für die Intensität gilt:



$$I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2 \quad \text{Intensität} \quad (2.6)$$

Dabei ist ε_0 die elektrische Feldkonstante und E_0 die Amplitude des elektrischen Feldes.

Die Intensität (Bestrahlungsstärke) ist proportional dem Quadrat der Amplitude E_0 des elektrischen Feldes.

Anmerkung: Natürlich ist die Energie zu gleichen Teilen im elektrischen und magnetischen Feld. Im allgemeinen gibt man deshalb, wie auch hier, einfach die doppelte Energie des elektrischen Feldes an.

2.4 Interferenz

Als Interferenz bezeichnen wir die Überlagerung zweier oder mehrerer (monochromatischer) Wellen, die zu einer resultierenden Welle führt. Die resultierende Welle ist die Summe der Einzelwellen. Dabei wird natürlich angenommen, dass sich die Wellen in die selbe Richtung ausbreiten. Die resultierende Welle hängt davon ab, wie weit die beiden Wellen gegeneinander verschoben sind. Man drückt das durch die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ aus (Bild 2.3).

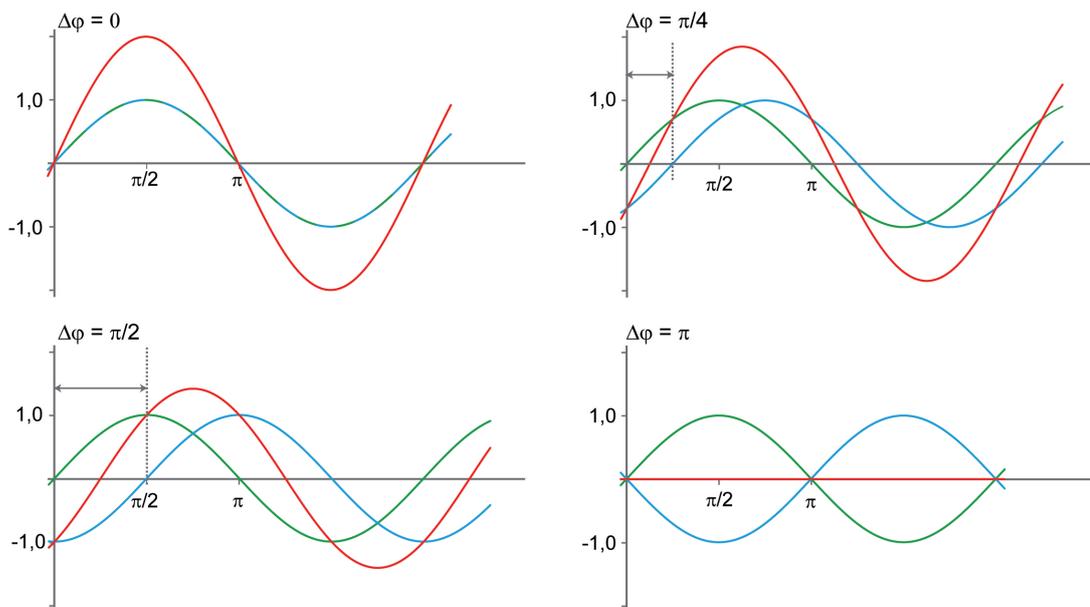


Abbildung 2.3: Die beiden Sinus-Funktion (grün und blau) addieren sich. Die resultierende Welle (rot) hängt von der relativen Phase $\Delta\varphi$ der beiden ursprünglichen Wellen ab.

- Ⓒ Die **Phasendifferenz** $\Delta\varphi$ der Wellen bestimmt die Interferenz. Sind die Wellen in Phase ($\Delta\varphi = 0$), so führt dies zur konstruktiven Interferenz, sind sie um $\Delta\varphi = \pi$ (180°) außer Phase, so führt dies zur destruktiven Interferenz. Dazwischen nimmt die Amplitude der resultierenden Welle ab.

Wir stellen uns jetzt eine Lichtquelle vor, die eine unendlich lange Welle aussendet (Bild 2.5). Diese wird in zwei Teilwellen mit gleicher Amplitude aufgeteilt (Strahlteiler I in Bild 2.5). Mit Hilfe eines zweiten Strahlteilers werden die Teilwellen wieder überlagert und interferieren. Die Amplitude der resultierenden Welle ist durch die Phasendifferenz der beiden Teilwellen bestimmt und diese wiederum ist eine Folge der Weglängendifferenz.

- Ⓒ **Anmerkung:** Genaugenommen muss der **optische Weg** betrachtet werden. Für einen Brechungsindex $n \approx 1$ (Luft) ist der optische Weg aber gleich dem tatsächlichen Weg. Außerdem wurden die Eigenschaften der Strahlteiler nicht berücksichtigt.

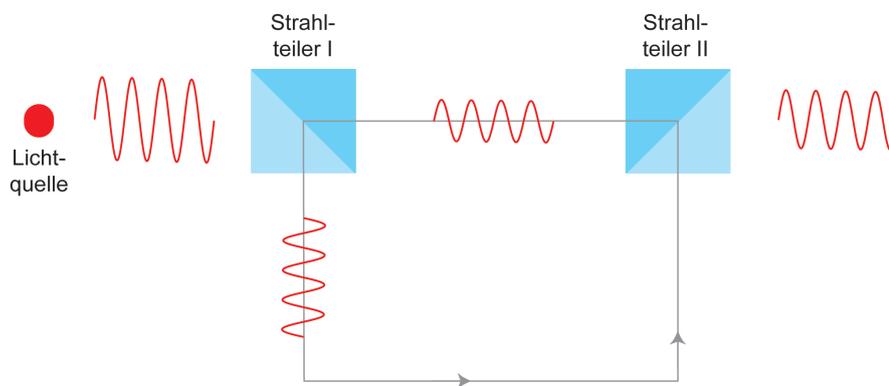


Abbildung 2.4: Das Licht einer Lichtquelle wird aufgeteilt und nach unterschiedlichen Weglängen wieder zusammengeführt. Die Phasendifferenz der Teilwellen ist durch die Weglängendifferenz gegeben.

Es ist leicht einzusehen, dass eine Weglängendifferenz entsprechend einer halben Wellenlänge, also $\Delta l = \lambda/2$ zu destruktiver Interferenz führt, während eine Weglängendifferenz $\Delta l = \lambda$ zu konstruktiver Interferenz führt. Allgemein tritt destruktive Interferenz auf für $\Delta l = m' \cdot 1/2\lambda$ mit $m' = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$ und konstruktive für $\Delta l = m \cdot \lambda$ mit $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Mit Hilfe der Interferenz lassen sich Weglängenunterschiede entsprechend der halben Wellenlänge des verwendeten Lichts messen.

Anmerkung: Wir haben oben ein Gedankenmodell betrachtet. Darin könnten sich zwei Wellen völlig auslöschen. Damit verschwindet auch die von ihnen transportierte Energie. Das Modell beschreibt also die Natur nicht richtig, ist aber für unsere Überlegungen sehr hilfreich.

2.5 Kohärenz

Bisher wurde immer von unendlich langen Wellenzügen ausgegangen. Bei der Aufteilung in Teilwellen war dadurch garantiert, dass diese zunächst in Phase schwingen bzw. eine konstante Phasendifferenz erreicht werden kann. Es ist offensichtlich, dass kein Interferenzphänomen beobachtbar ist, wenn dies nicht so ist. Ein Wellenzug könnte z.B. kürzer sein als die Phasendifferenz und die folgenden Wellenzüge könnten eine zufällige Phasenbeziehung untereinander haben.

- Ⓒ Der Fachbegriff, der hier verwendet wird, lautet **Kohärenz**. Zwei Wellen sind kohärent, wenn sie, bis auf die Phasendifferenz, gleich schwingen. Im folgenden setzen wir also kohärentes Licht voraus.

2.6 Das Michelson-Interferometer

Jetzt geht es um die praktische Durchführung der Messung einer (optischen) Wegdifferenz. Eine entsprechende Anordnung bei der das Phänomen Interferenz genutzt wird, heisst *Interferometer*. Das bekanntest und vermutlich am meisten eingesetzte ist das *Michelson-Interferometer*.

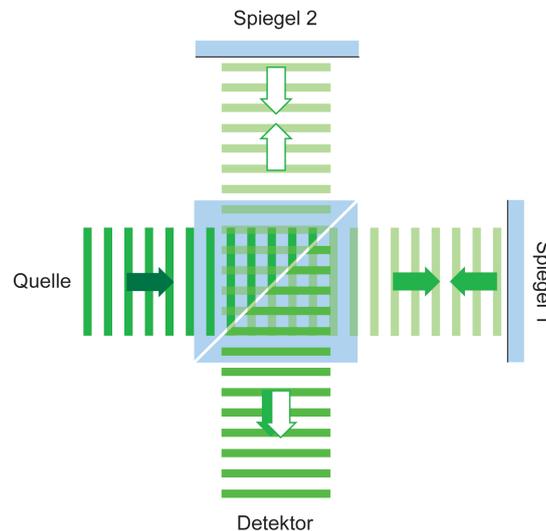


Abbildung 2.5: Schemazeichnung eines Michelson-Interferometers.

Das Licht einer Lichtquelle trifft auf einen Strahlteiler (Bild ??). Ein Teil geht geradlinig durch und wird von Spiegel 1 zurück reflektiert, der andere Teil wird um 90° abgelenkt, trifft auf Spiegel 2 und wird ebenfalls reflektiert. Beide Teilwellen haben die selbe Intensität. Die zurückreflektierten Wellen werden vom Strahlteiler so gelenkt, dass sie zum Detektor fortschreiten. Dort ist die Interferenz beobachtbar. Das Verschieben eines Spiegels verändert die Weglänge für eine Teilwelle und damit die Phasendifferenz.

Anmerkung: Die optische Weglänge ändert sich natürlich auch, wenn sich der Brechungsindex in einem Arm ändert. Das kann z.B. durch ein Gas geschehen.

3 Aufgaben

Sicherheitshinweis Im Versuch wird ein Laser der *Laserklasse 2* verwendet. Seine Leistung ist < 1 mW.
Die Laserstrahlung liegt im sichtbaren Bereich. Sie ist bei kurzzeitiger Einwirkung ($t < 0,25$ s) für das Auge ungefährlich. Dem liegt zu Grunde, dass sich die Augenlider reflexartig schließen. Allerdings kann dies durch Medikamente verlangsamt sein oder auch willentlich beeinflusst werden.

Allgemeine Hinweise:

Die optischen Komponenten müssen pfleglich behandelt werden. Bitte nur an den Metallsockeln und nicht an den optischen Flächen (Spiegel, Strahlteiler, Linsen) anfassen. Die Halterungen sollten nicht umkippen und auf die Spiegelflächen fallen. Reinigen Sie die Spiegel aber nicht selbst!

Der Lichtsensor reagiert sehr empfindlich auf den Winkel unter dem der Strahl einfällt. Der Strahleinfall erfolgt ideal senkrecht. Auf keinen Fall sollten Sie während einer Messreihe Position und Stellung des aktiven Beobachtungsschirms verändern, da dies die Messergebnisse verfälschen würde.

Es kommt im folgenden darauf an, dass Sie

- sich zunächst mit den einzelnen Komponenten, der Messmethode und der Datenerfassung vertraut machen
- ihre Vorgehensweise im Protokoll (logbook) beschreiben (auch Misserfolge oder Probleme). Das *logbook* sollte am Ende die Anleitung ersetzen können und zusätzlich alle Ergebnisse und Erkenntnisse beinhalten.

Tipp: Festschrauben der optischen Elemente ist sehr zu empfehlen, da das Interferometer ein sehr empfindliches Instrument ist. Tipp!

Es steht auch eine Kamera zu Verfügung mit der Sie Interferenzmuster oder Teile des Aufbaus aufnehmen können. Zur Kamera gehört das Programm „Macrocapture-DNT“.

Forschungsfrage: Bei einem Lautsprecher soll die Amplitude der Membran, ihre maximale Geschwindigkeit und eine mögliche Abweichung von der Erregerfrequenz bestimmt werden.

3.1 Vorbereitung der Apparatur

| <i>Material</i> | | |
|----------------------------|----------------------|----------------|
| Strahlteiler | justierbarer Spiegel | fester Spiegel |
| aktiver Beobachtungsschirm | Kamera | |

In dieser ersten Aufgabe soll zunächst ein Interferenzmuster am Schirm erzeugt werden. Dabei

sollen Sie auch einen Eindruck von der Empfindlichkeit des Interferometers erhalten.

3.1.1 Aufbau des Experiments

Der Strahlteiler ist bereits montiert. Planen Sie zunächst den weiteren Aufbau und beschreiben Sie Ihre (geplante) Vorgehensweise:

1. Notieren Sie im *logbook* das Ziel des Aufbaus
2. Schalten Sie den Laser ein
3. Skizzieren Sie im *logbook* den Strahlenverlauf ohne zusätzliche Spiegel
4. Positionieren Sie den festen Spiegel so, dass ein Teilstrahl zum Strahlteiler zurück reflektiert wird und am Schirm sichtbar wird (Position etwa zwei Lochreihen vom Strahlteiler)
5. Positionieren Sie den justierbaren Spiegel entsprechend
6. Schrauben Sie beide Spiegel am Tisch fest.
7. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen mit eigenen Worten im *logbook* und skizzieren Sie den Strahlenverlauf des fertigen Aufbaus.
8. Versuchen Sie die reflektierten Strahlen am Schirm möglichst gut zur Deckung zu bringen. Verwenden Sie dazu die beiden Justierschrauben.

Jetzt ist das Interferometer grob justiert und Sie können jetzt das Interferenzmuster „suchen“. Dazu gibt es einen Trick. An der Lochblende des Raumfilters sollten zwei zusätzliche Reflexe zu sehen sein. **Tipp:** Im folgenden kann es hilfreich sein die Spiegel abwechselnd abzudecken.

Tipp!

9. Erklären Sie im *logbook* wie die Reflexe am Raumfilter zustande kommen.
10. Beschreiben Sie im *logbook*, wie Sie die Reflexe nutzen können, um die Überlagerung der Teilstrahlen zu optimieren.
11. Versuchen Sie das Interferenzmuster zu finden und zu optimieren (guter Kontrast und eine Breite die sich für die Messung mit dem Photodetektor eignet).

Für den weiteren Verlauf ist es sinnvoll, die Position des Beobachtungsschirms reproduzierbar fest zu legen. Dazu können z.B. die beiden Aluminiumblöcke benutzt werden.

3.1.2 Empfindlichkeit des Aufbaus

Die Beobachtungen der qualitativen Experimente können teilweise mit der Kamera dokumentiert werden. Man versucht ein Gefühl dafür zu bekommen, wie leicht das Interferenzmuster beeinflusst werden kann.

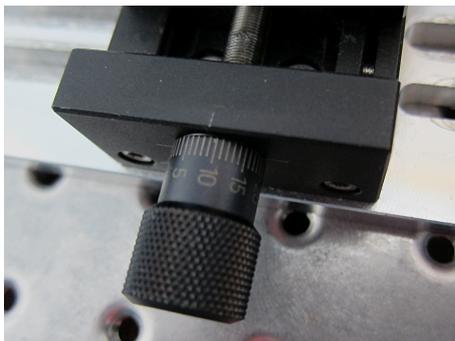


Abbildung 3.1: Ein Teilstrich entspricht einem Verstellweg von 1/100 mm.

1. Drücken Sie leicht gegen den Halter des justierbaren bzw. nicht justierbaren Spiegels. Notieren Sie im *logbook*, wie das Interferenzmuster reagiert.
2. Lassen Sie etwas Feuerzeuggas (ohne Flamme) in einen der beiden Teilstrahlengänge strömen. Was beobachten Sie und wie können Sie diese Beobachtung erklären? *Notieren Sie im logbook*.
3. Drehen Sie langsam am Einstellknopf des Lineartisches (Bild 3.1), so dass Sie eine (mehr oder weniger schnelle) Abfolge von sich abwechselnden Intensitätsmaxima und Intensitätsminima am Lichtdetektor beobachten können. Wie weit (in Einheiten der Lichtwellenlänge) wurde der Tisch verschoben, wenn aus einem Maximum ein Minimum und dann wieder ein Maximum wird? *Notieren Sie im logbook*.

3.2 Intensitätsmessungen

Dieses Experiment soll Ihnen ein tieferes Verständnis der Lichtinterferenz ermöglichen.

Die Intensität einer Lichtwelle mit (elektrischer) Amplitude E_0 ist (Gleichung 2.6):

$$I = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2$$

Der Faktor $1/2$ ergibt sich bei der Mittelung über $\sin^2 \phi$. c ist die Lichtgeschwindigkeit, ε_0 die elektrische Feldkonstante.

Interferieren zwei Lichtwellen, so addieren sich deren Amplituden E_0^a und E_0^b . Für den idealen Strahlteiler gilt $E_0^a = E_0^b$.

1. *Für Spezialisten (sonst weiter beim Punkt 4):* Welche Intensität I ergibt sich bei der (konstruktiven) Überlagerung zweier Wellen mit zwei gleich großen Amplituden E_0^a und E_0^b im Vergleich zur Intensität einer einzigen Welle?
2. Bei gleichen Amplituden E_0^a und E_0^b sollte die minimale Intensität bei destruktiver Interferenz Null sein. Welcher Mittelwert ergibt sich, wenn wir von konstruktiver zu destruktiver Interferenz verschieben?
3. *Notieren Sie Überlegungen, Rechnungen und Ergebnisse im logbook.*

Für eine optimale Messung kommt es im folgenden darauf an, dass der Beobachtungsschirm so aufgestellt wird, dass man nicht zu nahe am Rand des Interferenzflecks die Intensität detektieren kann. Wichtig ist senkrechter Lichteinfall und natürlich darf die Position des Schirms während der Messreihe nicht verändert.

Mit dem angeschlossenen Multimeter (DC-Messbereich) messen wir die Ausgangsspannung des Lichtsensors. Die Ausgangsspannung hängt linear von der Intensität ab (eine Annahme die natürlich überprüft werden müsste).

4. Konstruktiv interferierende Wellen gleicher Intensität ergeben eine Welle, die die 4-fache Intensität einer einzelnen Welle hat.
 - (a) Messen Sie die Ausgangsspannung U_{\max} im Interferenzmaximum
 - (b) Messen Sie die beiden Ausgangsspannungen U^a und U^b für die beiden Teilwellen.
 - (c) Berechnen Sie das Strahlteilverhältnis U^a/U^b
 - (d) Notieren Sie Ihr Vorgehen und Ihr Messergebnis im *logbook* und vergleichen Sie, in einer kurzen Aussage, mit der theoretischen Vorhersage. Begründen Sie, wenn möglich, auch eventuelle Abweichungen.

- Verstellen Sie den Lineartisch schnell, so dass sie ein zeitliches Mittel des sich ändernden Interferenzmusters messen. Als mittlere Intensität sollte sich die Hälfte der Intensität bei konstruktiver Überlagerung, also die Summe der Intensitäten der beiden Einzelwellen ergeben. Überprüfen Sie diese Aussage und notieren Sie das Ergebnis im *logbook*.

3.3 Hochgenaue Längenmessung

Jetzt wollen wir uns quantitativ mit der Genauigkeit der Messmethode beschäftigen. Dabei spielt die Linearverstellung (am justierbaren Spiegel) die zentrale Rolle (Bild 3.1). Ein Teilstrich entspricht einer Verstellung um $10\ \mu\text{m} = 1/100\ \text{mm}$.

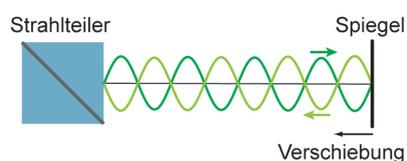


Abbildung 3.2: Sehr schematisch sind hier die Reflexion am Spiegel und die Linearverstellung dargestellt.

Ⓒ

Da Beobachten und Mitzählen etwas schwierig ist (probieren Sie es aus) nutzen wir den PC und eine vorgeschaltete Datenerfassungs-Hardware, ein *Datenlogger* (Computer-Oszilloskop). Diese wird auch bei der Vermessung des Lautsprechers benötigt. Dieses Experiment dient deshalb auch dem Kennenlernen der Software „EasyLogger“. Damit wird der zeitliche Spannungsverlauf am Lichtdetektor-Ausgang aufgezeichnet. Für die Einstellung der Parameter für Messung und Darstellung können Sie Vorüberlegungen anstellen oder versuchen durch Probieren zum Ziel zu kommen.

- Erläutern Sie *logbook* den Begriff *sampling rate*.
- Notieren Sie ebenfalls *logbook* die eingestellten Werte für Skalierung (x, y) und „*sampling rate*“ an und erläutern Sie ihre Wahl.

Jetzt soll die Messung durchgeführt werden. Dabei ist zu bedenken, dass die Spindel des Tisches eventuell ein gewisses Spiel aufweist. Man muss deshalb bei der Messung in derselben Richtung drehen, in der man unmittelbar vorher gedreht hat. In der Regel ist es auch von Vorteil, den Drehknopf über den passenden Inbusschlüssel zu betätigen. Falls Probleme beim genauen Ablesen der Skala auftreten, kann die Beleuchtung an der Digitalkamera hilfreich sein.

Um keine unnötig langen und unübersichtlichen Dateien zu erzeugen, startet bzw. stoppt man die Aufzeichnung möglichst kurz vor bzw. nach dem Verschieben des Tisches. Im Team ist das unproblematisch.

- Überlegen Sie, wie Sie möglichst genau die Anzahl der Maxima bei Verschiebung um einen Teilstrich bestimmen können.
- Wie errechnet sich daraus der Verstellweg (vgl. Bild 3.2)? Wie genau ist die Messung?
- Führen Sie die Messung durch.
- Notieren Sie alle Schritte und Ergebnisse im *logbook*.

3.4 Schwingungsmessung

Der nicht justierbare Spiegel des Michelson-Interferometers wird durch den Lautsprecher mit aufgeklebtem Spiegel ersetzt und man stellt ein Interferenzmuster ein, welches möglichst wenige

Streifen aufweist. Der Lautsprecher ist an einen Funktionsgenerator angeschlossen, welcher definierte Spannungssignale erzeugen kann, welche die Lautsprechermembrane in Schwingungen versetzen.

Der Funktionsgenerator wird auf sinusförmiges Ausgangssignal gestellt und die Frequenz 1 Hz ausgewählt.

1. Zeichnen Sie das Signal des Lichtdetektors auf.
2. Welchen Einfluss hat die Amplitudeneinstellung auf das Signal?
3. Interpretieren Sie das Ergebnis.
4. *Notieren Sie Überlegungen und Ergebnisse im logbook.*

Erhöhen Sie die Frequenz am Funktionsgenerator auf 100 Hz und stellen Sie die Amplitude auf einen mittleren Wert ein. Das per Auge sichtbare Interferenzmuster sollte nun verschwinden, weil das Auge maximal nur 20 Bilder pro Sekunde auflösen kann.

Mit dem Datenlogger zeichnet man für einige Sekunden den Spannungsverlauf des aktiven Schirms auf. Man dokumentiert alle für die spätere Auswertung notwendigen Parameter und Messwerte im Versuchsprotokoll. Die Messkurven können auch abgespeichert und z.B. auf einen USB-Stick kopiert werden.

5. Zeichnen Sie den Spannungsverlauf auf.
6. *Notieren Sie alle Parameter im logbook.*
7. Beschreiben Sie den Spannungsverlauf in Bezug auf die Lautsprecherbewegung.
8. Weshalb ändert sich die Amplitude der Spannung.
9. *Notieren Sie ihre Interpretation mit einer groben Skizze im logbook.*

Bestimmt werden sollen:

- Amplitude der Lautsprecherschwingung
- Geschwindigkeit des Spiegels
- Frequenz der Lautsprecherschwingung

10. Werten Sie die Messung aus.
11. *Notieren Sie ihre Ergebnisse im logbook.*