

# **Licht + Licht = Dunkelheit?**

## **Das Mach-Zehnder- und das Michelson-Interferometer**

### **Inhalt**

#### **1. Grundlagen**

##### **1.1 Interferenz**

##### **1.2 Das Mach-Zehnder- und das Michelson-Interferometer**

##### **1.3 Lichtgeschwindigkeit und Brechzahl**

#### **2. Experimente**

##### **2.1 Aufbau und Justierung des Interferometers (Experiment 1)**

##### **2.2 Bestimmung der Brechzahl eines Gases (Experiment 2)**

#### **3. Quellen**

# Licht + Licht = Dunkelheit?

## Das Mach-Zehnder- und das Michelson-Interferometer

### 1.1 Interferenz

Interferenzerscheinungen bei Licht lassen sich mit Hilfe des Wellenmodells deuten. Licht wird hierbei als „sinusförmige Lichtwelle“ aufgefasst<sup>1</sup>.

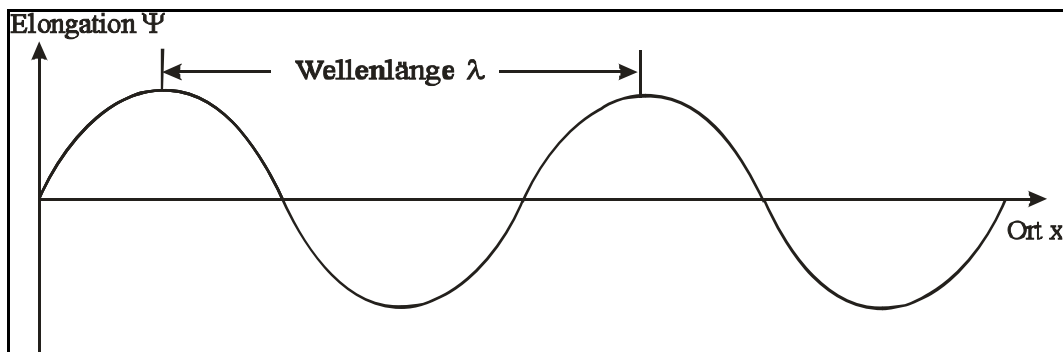


Abbildung 1: Elongation  $\Psi$  zu einem festen Zeitpunkt  $t_0$  einer sich ausbreitenden Welle

Die Elongation  $\Psi$  steht für die oszillierende physikalische Größe der Welle. Bei einer Schallwelle ist dies der Druck, bei einer elektromagnetischen Welle wie beispielsweise Licht ist es die elektrische bzw. die magnetische Feldstärke.

Bei der Überlagerung zweier Lichtwellen sind häufig Interferenzerscheinungen zu beobachten<sup>2</sup>, d.h. je nach Größe der Phasendifferenz verstärken sich die Wellen oder schwächen sich gegenseitig. Die Phasendifferenz ist oft eine Folge eines *Gangunterschieds* der beiden Wellen. Der Gangunterschied entsteht durch unterschiedlich lange Wege, die die einzelnen Lichtwellen zurücklegen.

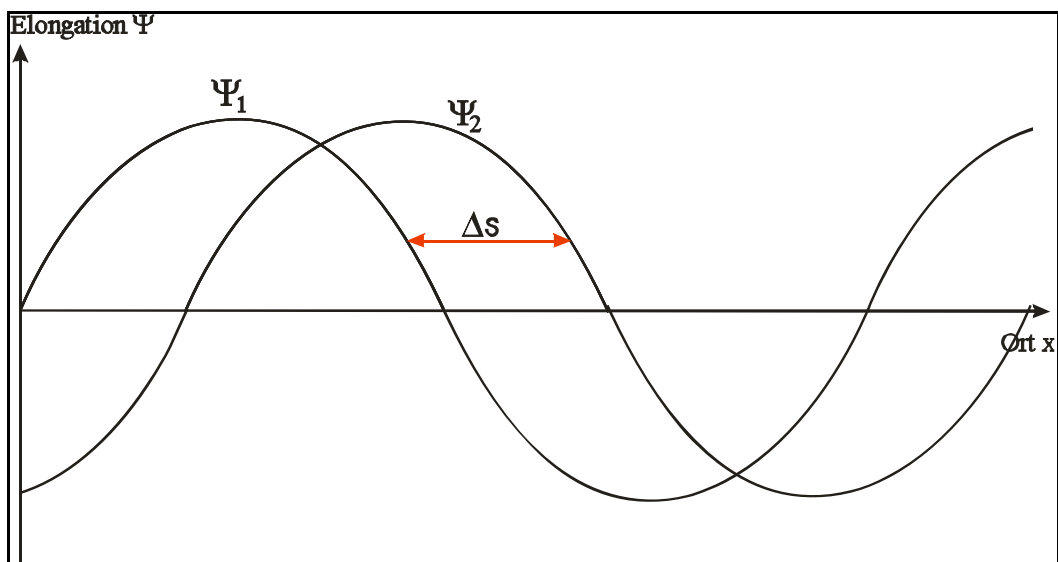


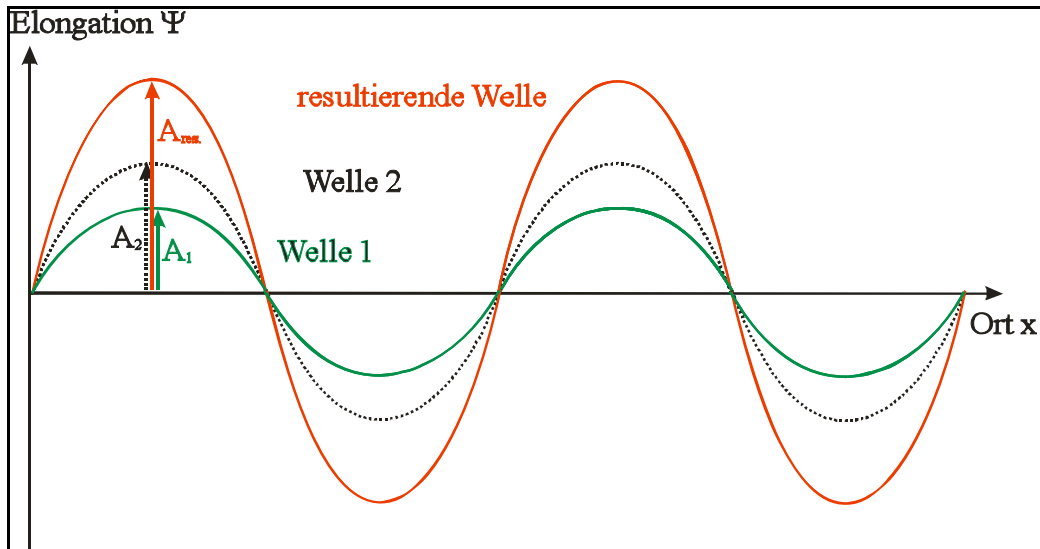
Abbildung 2: Darstellung des Gangunterschiedes

<sup>1</sup> Wichtig: Licht ist keine Welle – Licht ist auch kein Teilchen! Licht ist etwas „anderes“, welches sich jedoch in vielen Fällen mit dem Wellen- oder dem Teilchenmodell beschreiben lässt.

<sup>2</sup> Damit stationäre, d.h. zeitlich konstante Interferenzmuster zu erkennen sind, müssen die sich überlagernden Wellen kohärent sein. Bei harmonischen Wellen bedeutet dies, dass sie die gleiche Frequenz haben. Das in unserem Experiment verwendete Laserlicht ist kohärent!

Zwei Spezialfälle sind besonders interessant:

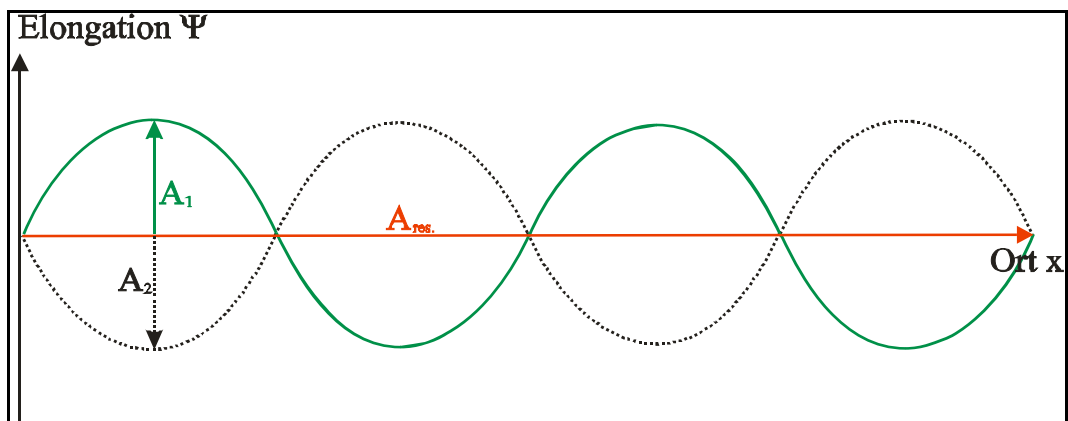
(1) Wenn der Gangunterschied  $\Delta s$  null oder ein ganzzahliges Vielfaches von  $\lambda$  ist, dann handelt es sich um konstruktive Interferenz und die Intensität ( $I \sim \psi^2$ ) wird maximal (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3 (konstruktive Interferenz):**

Die Amplituden  $A_1$  und  $A_2$  der Teilwellen addieren sich hier bei gleicher Phase (oder einer Phasendifferenz von einem ganzzahligen Vielfachen von  $2\pi$ ) zur Amplitude  $A_{res} = A_1 + A_2$  der resultierenden Welle. Ein Gangunterschied  $\Delta s = m \cdot \lambda$  entspricht einer Phasendifferenz  $\Delta\varphi = m \cdot 2\pi$ , wobei  $m$  eine ganze Zahl ist.

(2) Tritt hingegen ein Gangunterschied  $\Delta s$  von  $\lambda/2$  oder einem ungeradzahligen Vielfachen hiervon auf, so ist die Interferenz destruktiv und die Intensität erreicht ihr Minimum, bis hin zur totalen Auslöschung, wenn beide Amplituden den gleichen Wert besitzen (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4 (destruktive Interferenz):**

Bei gleichen Amplituden  $A_1$  und  $A_2$  der Teilwellen ergibt sich als Amplitude der resultierenden Welle  $A_{res} = 0$ . Ein Gangunterschied  $\Delta s = (m + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$  entspricht einer Phasendifferenz  $\Delta\varphi = (m + \frac{1}{2}) \cdot 2\pi$ , wobei  $m$  eine ganze Zahl ist.

## 1.2 Interferometer

### a) Das Mach-Zehnder-Interferometer

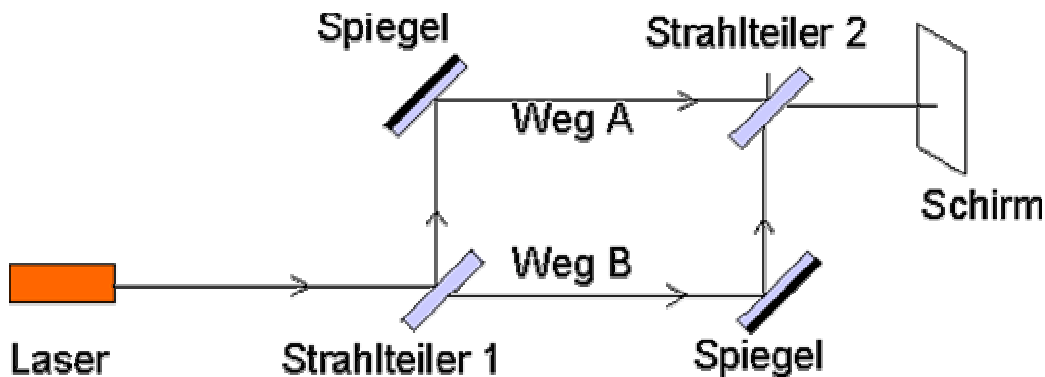


Abbildung 5: Das Mach-Zehnder-Interferometer<sup>3</sup>

Die obige Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines **Mach-Zehnder-Interferometers**.

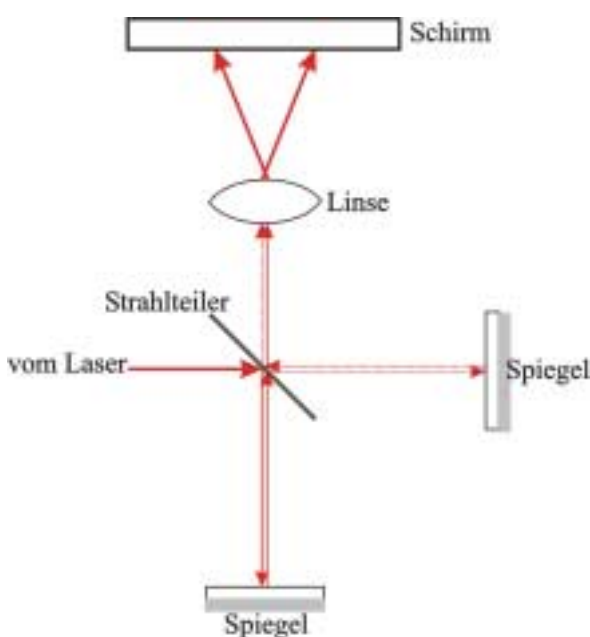
Als Lichtquelle wird ein Laser verwendet, da dieser intensives und vor allem kohärentes Licht liefert, was sich besonders gut für Interferenzexperimente eignet.

Das Laserlicht fällt auf den ersten Strahlteiler (einen halbdurchlässigen Spiegel) und wird von diesem in zwei Anteile aufgespalten, die entlang verschiedener Wege laufen (Weg A und Weg B). Je nach Länge der durchlaufenen Wege tritt zwischen beiden Lichtwellen ein Gangunterschied auf.

Beide Teilwellen werden durch Spiegel um  $90^\circ$  umgelenkt. Ein weiterer Strahlteiler überlagert die beiden Lichtwellen wieder, so dass sie interferieren.

Der bei uns verwirklichte Aufbau (vgl. Kapitel 2.1) enthält zusätzlich vor dem Schirm zwei Linsen, um das Interferenzmuster vergrößert und scharf abzubilden, sowie zwei Irisblenden im Strahlengang.

### b) Das Michelson-Interferometer



Ein weiteres wichtiges Interferometer ist das **Michelson-Interferometer**. Auch hier wird die ursprüngliche Lichtwelle durch einen Strahlteiler in zwei Teilwellen zerlegt, welche nach Durchlaufen unterschiedlicher Wege wieder zur Interferenz gebracht werden (vgl. Abb. links).

Das Michelson-Interferometer ist **erheblich einfacher zu justieren** als das Mach-Zehnder-Interferometer, weshalb wir es für die Durchführung der nachfolgend beschriebenen Experimente eindeutig empfehlen!

Abbildung 6: Das Michelson-Interferometer<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Quelle: <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap3/k31p02.html>

<sup>4</sup> Quelle: unbekannt

### 1.3 Lichtgeschwindigkeit und Brechzahl

Trifft Licht auf die Grenzfläche zweier Medien, in denen es sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreitet, dann tritt ein Teil des Lichtes in das andere Medium ein und wird dabei gebrochen. Der andere Teil wird reflektiert.

Der Brechungswinkel  $\theta_2$  ist abhängig vom Einfallswinkel  $\theta_1$  und von den Brechzahlen  $n_1$  und  $n_2$  der beiden Medien.

Das von Willebrord Snellius im Jahre 1621 gefundene Brechungsgesetz lautet:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 .$$

In dem hier vorliegenden Experiment wird der Vorgang der Reflexion und Brechung nicht näher untersucht. Wir benötigen jedoch den Begriff der *Brechzahl*, welche historisch durch das oben genannte Brechungsgesetz eingeführt wurde.

Besonders wichtig ist der folgende Zusammenhang:

Die Brechzahl eines Mediums ist gleich dem Quotienten aus der Vakuumlichtgeschwindigkeit<sup>5</sup>  $c$  und der Lichtgeschwindigkeit im

$$n = \frac{c}{c_m} .$$

Anmerkungen:

- (1) Hieraus resultiert, dass die Brechzahl des Vakuums definitionsgemäß 1 ist ( $n_{\text{Vakuum}} = 1$ ).
- (2) Da die Lichtgeschwindigkeit in allen anderen Medien kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist, sind ihre Brechzahlen immer echt größer als 1.
- (3) Statt „Brechzahl“ wird oft auch der Begriff „Brechungsindex“ verwendet.

---

<sup>5</sup> Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c \approx 3,00 \cdot 10^8$  m/s .

## 2. Experimente

### 2.1 Aufbau und Justierung

#### *Aufbau und Durchführung:*

- Dunkeln Sie den Raum mit den Vorhängen ab.
- Richten Sie den LASER horizontal aus, arretieren Sie ihn und schalten ihn mit dem Schlüssel ein.

***Achtung! Nicht in den Strahl schauen! Vorsicht vor Reflexionen!***

- Positionieren Sie den Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) so vor dem LASER, dass der Strahl möglichst mittig auf den Spiegel trifft.
- Stellen Sie die Neigung des LASERs so ein, dass die Reflexion vom Strahlteiler in die Strahlaustrittsöffnung des LASERs gelangt. Somit wird gewährleistet, dass der Strahl parallel zur Arbeitsplattform verläuft.

(Anm.: Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf das Mach-Zehnder-Interferometer. Für das Michelson-Interferometer erfolgt der Aufbau analog.)

- Passen Sie die Höhe des zweiten Strahlteilers der des ersten an.
- Bringen Sie die Irisblenden zunächst geschlossen in den Strahlengang und stellen Sie sie so ein, dass der Strahl die leicht geöffneten Blenden auch nach Reflexion wieder durchlaufen kann.
- Passen Sie die Höhe der Spiegel der Höhe der Strahlteiler und Lochblenden an (Justierschrauben soweit lösen, dass der Spiegel frei beweglich ist).
- Orientieren Sie sich an der Aufbauzeichnung des Posters (bzw. für das Michelson-Interferometer an der Abbildung 6).
- Die beiden Teilstrahlen werden so mit Hilfe der Spiegel justiert, dass sie nach dem zweiten Strahlteiler möglichst parallel zueinander sind bzw. aufeinander liegen. Dafür müssen sich die Reflexe am zweiten Strahlteiler in Deckung befinden. Die Strahlen sind dann ausreichend parallel, wenn ihre Reflexe in einer Entfernung von ca. 3 Metern nach dem zweiten Strahlteiler keinen größeren Abstand voneinander besitzen als eine Daumenbreite.
- Die Linse mit einer Brennweite von  $f = 5 \text{ mm}$  wird nun so aufgestellt, dass das zu erwartende Interferenzmuster gut auf der Projektionsfläche (DIN A4-Blatt) zu erkennen ist.
- Die Linse mit 100mm Brennweite wird so aufgestellt, dass das Interferenzmuster maximal vergrößert und scharf erscheint.

#### *Aufgabe:*

Bauen Sie das Interferometer auf und untersuchen Sie seine Empfindlichkeit gegenüber Störungen, indem Sie auf den Boden treten, Luft in den Strahlengang blasen, es leicht dejustieren usw.

#### **Abbildung 7:**

Aufbau mit installierter Vakuumkammer



## 2.2 Bestimmung der Brechzahl eines Gases

### **Aufbau und Durchführung:**

- Der Aufbau ist so zu platzieren, dass die Interferenzstreifen auf einer weißen Wand deutlich zu erkennen sind.
- Die Vakuumkammer wird in den Strahlengang gebracht (Justierung des Strahlengangs überprüfen).
- Die Kammer wird mit der Drehschiebervakuumpumpe evakuiert.
- Die Lage der Interferenzstreifen wird auf dem an der Wand angebrachten Blatt markiert.
- Die evakuierte Kammer wird nun langsam mit Gas geflutet. Dabei wird die Anzahl  $z$  der durch die Markierung wandernden Interferenzstreifen gezählt.

(Anm.: Wir führen das Experiment mit Luft durch – aber im Prinzip lässt sich auch jedes andere Gas verwenden.)

### **Überlegungen zur Auswertung:**

Zwischen *optischer Weglänge*  $d$  und *geometrischer Weglänge*  $l$  besteht der Zusammenhang:

$$d = n \cdot l .$$

Im Vakuum sind optische und geometrische Weglänge gleich, da  $n_{\text{Vakuum}} = 1$ . Für alle anderen Medien ist die optische Weglänge stets größer als die geometrische, da sich das Licht im Medium langsamer als im Vakuum bewegt - d.h. das Licht braucht *länger*, um den gleichen geometrischen Weg zurückzulegen, und in diesem Sinne spricht man von einer größeren *optischen* Weglänge.

In der mit Gas gefüllten Kammer ist also die Lichtgeschwindigkeit  $c_m$  geringer und die optische Weglänge damit größer als in der evakuierten Kammer. Während über ein Ventil langsam Gas in die zuvor evakuierte Kammer einströmt, wird die Anzahl der durchlaufenden Interferenzstreifen gezählt. Wenn das Interferenzmuster um einen Streifen weitergewandert ist, hat sich der Gangunterschied um eine Wellenlänge  $\lambda$  des verwendeten (Laser-)Lichts geändert.

Aus der Anzahl der gezählten Streifen lässt sich nun die Zunahme der optischen Weglänge  $\Delta d$  und schließlich die Brechzahl des Gases berechnen<sup>6</sup>.

Aus  $d = l + \Delta d$  folgt mit  $\Delta d = z \cdot \lambda$  (wobei  $z \in \mathbb{N}$ ):  $d = l + z \cdot \lambda$  .

Außerdem gilt:  $d = n \cdot l \Leftrightarrow n = \frac{d}{l}$  .

Beide Gleichungen ergeben schließlich<sup>7</sup>:  $n = \frac{l + z \cdot \lambda}{l} = 1 + \frac{z \cdot \lambda}{l}$  .

Hierbei sind:

$n$  : Brechzahl des Gases

$z$  : Anzahl der durch die Markierung gewanderten Streifen

$\lambda$  : Wellenlänge des He-Ne-Lasers (633nm)

$l$  : Länge der Vakuumkammer (50mm)

### **Frage:**

Welche Brechzahlen haben Flüssigkeiten und Festkörper? Schätzen Sie!

<sup>6</sup> Genauer: Die Brechzahl des Gases bei Zimmertemperatur und Atmosphärendruck.

<sup>7</sup> Achtung! Der erste Summand des rechten Terms ist eine „Eins“ und kein „l“!

### 3. Quellen<sup>8</sup>

Eine kurze Darstellung eines Mach-Zehnder-Interferometers findet man bei:  
[www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap3/k31p02.html](http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap3/k31p02.html) .

Kostenlose Simulationsprogramme findet man unter:

<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/> .

bzw. konkret zum Mach-Zehnder-Interferometer:

<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfer.html> .

Hier wird ein „Simulationsexperiment“ beschrieben:

[www.ikg.rt.bw.schule.de/qphfmat/interferometer.doc](http://www.ikg.rt.bw.schule.de/qphfmat/interferometer.doc) .

Eine Seite, welche umfassende Möglichkeiten zum „Durchklicken“ durch Erläuterungen zu verschiedenen physikalischen Themen bietet, ist:

<http://www.lmtm.de/PhysiXTM/quantenphysik/texte/mach-zehnder-interferometer.html> .

Internetadressen überprüft am 9.11.2004.

---

<sup>8</sup> Internetquellen veralten oft sehr schnell. Schon nach kurzer Zeit können bestimmte Links nicht mehr erreichbar oder Inhalte geändert sein. Darum ist es sinnvoll, mit Hilfe von Suchmaschinen (z.B. [www.google.de](http://www.google.de)) immer aktuell zu recherchieren. Interessante Texte sollte man sich herunterladen.