

Versuche P2-16,17,18

Laser B
Versuchsvorbereitung

Thomas Keck und Marco A. Harrendorf, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 16.05.2011

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabe 1: Beugungsfigur eines Spaltes	3
2 Aufgabe 2: Michelson Interferometer	4
2.1 Michelson Interferometer	4
2.2 Aufgabe 2.1: Magnetostriktive Längenänderung	4
2.3 Aufgabe 2.2: Wellenlänge des Laserstrahls	5
2.4 Aufgabe 2.3: Optischer Dopplereffekt	5
2.5 Aufgabe 2.4: Akustischer Dopplereffekt	6
3 Aufgabe 3: Faraday-Effekt und Pockels-Effekt	6
3.1 Aufgabe 3.1: Modulierung durch den Faraday-Effekts	7
3.2 Aufgabe 3.2: Bestimmung der Verdetschen Konstanten von Bleisilikatglas	8
3.3 Aufgabe 3.3: Modulierung durch den des Pockels-Effekts	8
3.4 Aufgabe 3.4: Bestimmung von k	9
4 Aufgabe 4: Optische Aktivität - Saccharimetrie	10
4.1 Aufgabe 4.1: Optisches Drehvermögen - Haushaltszucker	10
4.2 Aufgabe 4.2: Optisches Drehvermögen - Sorbose	10
Literatur	11

1 Aufgabe 1: Beugungsfigur eines Spaltes

Bei diesem Versuch wird ein Spalt der Breite b mit einem Laserstrahl der Wellenlänge λ durchstrahlt und das Beugungsmuster auf einem Schirm im Abstand L mithilfe eines Phototransistors quantitativ vermessen. In der Fraunhofernäherung $L \gg b$ ist die gemessene Intensität I proportional zum Betragsquadrat der Fouriertransformierten der Spaltfunktion. In diesem Fall also $I \sim \left| \frac{\sin x}{x} \right|^2$.

$$\begin{aligned}
 b &= 2 \cdot a && \text{Breite des Spaltes} \\
 T(x) &= \Theta(x + a) - \Theta(x - a) && \text{Die Spaltfunktion} \\
 I &\sim \left| \int_{-\infty}^{\infty} T(x) e^{-i\omega x} dx \right|^2 && \text{Intensität} \\
 &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} (\Theta(x + a) - \Theta(x - a)) e^{-i\omega x} dx \right|^2 = \left| \int_{-a}^a e^{-i\omega x} dx \right|^2 \\
 &= \left| \frac{1}{-i\omega} \cdot (e^{-i\omega a} - e^{i\omega a}) \right|^2 = \left| \frac{2}{\omega} \cdot \sin(\omega a) \right|^2 \\
 &\sim \left| \frac{\sin(\omega a)}{\omega a} \right|^2 && \text{q.e.d.}
 \end{aligned}$$

Man beachte, dass die Intensität dann eigentlich als Funktion von ωa aufgefasst werden müsste. Die exakte Skalierung auf dem Schirm hängt jedoch sowieso vom Abstand L ab und uns interessiert lediglich der Verlauf des Beugungsmusters, nicht die Skalierung.

Die per beweglichem Phototransistor gemessene Intensität I wird an einen Rechner übertragen. Im Anschluss kann über eine weitere Fouriertransformation von $\pm\sqrt{I}$ wieder die ursprüngliche Spaltfunktion gewonnen werden. Das Auswertungsprogramm kann für einen Einzelspalt hierbei automatisch das jeweilige Vorzeichen der Wurzelfunktion ermitteln. Die Beugungsfigur und das zurückgewonnene Spaltbild sollen am Ende dieses Demonstrationsversuchs als Messergebnis ausgedruckt werden.

2 Aufgabe 2: Michelson Interferometer

2.1 Michelson Interferometer

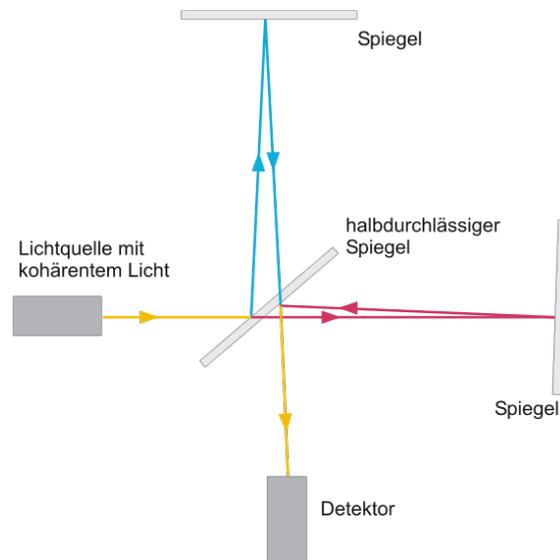


Abbildung 1: Michelson Interferometer

Das Michelson Interferometer besteht aus einem Laser, welcher auf einen Strahlteiler gerichtet ist. Dieser lenkt jeden der beiden Teilstrahlen auf einen Spiegel, welcher den Teilstrahl zurückreflektiert. Die Strahlen werden nun über den Strahlteiler auf einen Detektor gelenkt, dort interferieren sie miteinander. Kleine Längenänderungen, im Bereich der Wellenlänge λ des Laserstrahles, entlang der optischen Wege des Michelson Interferometers können über das Interferenzmuster sehr genau bestimmt werden, indem die Hell-Dunkel Durchgänge, also die Wechsel zwischen Konstruktiver und Destruktiver Interferenz, gezählt werden. Jeder Wechsel entspricht einer Längenänderung von $\frac{\lambda}{4}$, da das Licht den Weg jeweils zweimal durchläuft.

2.2 Aufgabe 2.1: Magnetostriktive Längenänderung

Einer der beiden Spiegel ist am Ende eines Nickelstabes der Länge l befestigt, welcher von einer Spule umgeben ist. Fließt Strom I durch die Spule der Länge L mit n Windungen so entsteht ein Magnetfeld. Die magnetische Erregung ist also gegeben durch:

$$H = I \cdot \frac{n}{L} \quad (1)$$

Der ferromagnetische Nickelstab dehnt sich unter Einwirkung dieser magnetischen Erregung aus, der Magnetostruktionskoeffizient α wird definiert und gemessen als:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot H} = \frac{\Delta l \cdot L}{n \cdot I \cdot l} \quad (2)$$

Die Anzahl der Hell-Dunkel Durchgänge m wird gezählt und über der Stromstärke I aufgetragen. Über eine lineare Regression kann dann die Steigung a ermittelt werden. Es gilt für $l = L$:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{2} \cdot m$$

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot m}{2 \cdot n \cdot I} = \frac{\lambda \cdot a}{2 \cdot n}$$

2.3 Aufgabe 2.2: Wellenlänge des Laserstrahls

Das vorgehen ist analog wie im vorherigen Teilversuch, lediglich wird nun eine definierte Längenänderung an einem der Spiegel vorgenommen. Die Längenänderung Δl wird über der Anzahl der Wechsel in der Interferenzfigur m aufgetragen, es ergibt sich die Steigung b .

Es gilt wieder:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{2} \cdot m$$

$$\lambda = 2 \cdot \frac{\Delta l}{m} = 2 \cdot b$$

2.4 Aufgabe 2.3: Optischer Dopplereffekt

Der Dopplereffekt bezeichnet das Phänomen, dass ein periodisches Signal für einen bewegten Empfänger eine veränderte Frequenz und für eine bewegte Quelle eine veränderte Wellenlänge aufweist. Da Licht kein Trägermedium besitzt und die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, macht es keinen Unterschied, ob man von einer bewegten Quelle oder einem bewegten Empfänger spricht. Es gilt für die Frequenzänderung bei einer relativen Geschwindigkeit v zwischen Empfänger f_E und Sender f_S :

$$f_B = f_S \cdot \frac{c + v_B}{c - v_S}$$

$$\Delta f' = f_B - f_S$$

$$= f_S \cdot \left(\frac{c + v_B}{c - v_S} - 1 \right)$$

$$= f_S \cdot \frac{v_B + v_S}{c - v_S}$$

Exakt gilt dies nur im Vakuum, der Fehler in Luft ist jedoch vernachlässigbar. Im Versuch ist der mit v bewegte Spiegel erst Empfänger und anschließend Sender $v = v_S = v_B$ und f_S ist die ursprüngliche Frequenz des Laserlichts f_L :

$$\Delta f = f_L \cdot \frac{2 \cdot v}{c - v} \quad (3)$$

Auf dem Schirm überlagern sich also nun 2 Wellen mit unterschiedlicher Frequenz:

$$I(t) \sim |E(t)|^2 = |(E_1(t) + E_2(t))|^2 \quad (4)$$

$$= |(E_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_L \cdot t) + E_0 \cdot \sin(2\pi \cdot (f_L + \Delta f) \cdot t))|^2 \quad (5)$$

$$= 2 \cdot E_0^2 \left| \sin \left(2\pi \cdot \left(f_L + \frac{\Delta f}{2} \right) \cdot t \right) \cdot \cos(\pi \cdot \Delta f \cdot t) \right|^2 \quad (6)$$

$$(7)$$

Durch die Frequenzänderung kommt es, neben der Änderung des Interferenzmusters durch die Längenänderung, zu einer Schwebung. Mit einer Stoppuhr kann diese Schwebung vermessen werden. Die Periodenlänge ΔT dieser Schwebung entspricht gerade $\Delta f = \frac{2}{\Delta T}$. Weiterhin wird die Zeit Δt bestimmt, in der der Wagen Δx zurücklegt. Man erhält so direkt die Geschwindigkeit zum späteren Vergleich $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Für die Geschwindigkeit v des Spiegels nach der Dopplereffektmethode ergibt sich schlussendlich:

$$v = \frac{c}{1 + \frac{2}{\alpha}} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\Delta f}{f_L} \quad (9)$$

$$v = \frac{c}{1 + T \cdot f_L} \approx \frac{c}{T \cdot f_L} = \frac{\lambda}{T} \quad (10)$$

2.5 Aufgabe 2.4: Akustischer Dopplereffekt

Eine Stimmgabel sendet ebenfalls ein periodisches Signal aus. Wird diese auf eine Wand zu oder wegbewegt, so wirkt die Wand als Spiegel und der von der Stimmgabel erzeugte Ton erfährt eine Schwebung, da er mit dem reflektierten Signal von der Wand, welches infolge der Bewegung eine Frequenzänderung aufweist, interferiert. Zu diesem Teilversuch findet keine quantitative Auswertung statt.

3 Aufgabe 3: Faraday-Effekt und Pockels-Effekt

Verwendet man ein Magnetfeld in Ausbreitungsrichtung von linear polarisiertem Licht durch ein transparentes Medium, so dreht sich die Polarisationssebene des linear polarisierten Lichtes aufgrund des Faraday-Effektes. Der Drehwinkel α hängt dabei von der Stärke des angelegten Magnetfeldes B und dem Weg l , den das Licht durch das Medium zurücklegt, ab:

$$\alpha = V \cdot B \cdot l \quad (11)$$

V ist die Verdettsche Konstante. Es handelt sich hierbei um einen magnetooptischen Effekt.

Wird ein elektrisches Feld E an einen piezoelektrischen Kristall angelegt, so induziert dieses neue optische Achsen im Kristall, es kommt zur Doppelbrechung. Bei einem angelegten E-Feld

E ist die Differenz der Brechungsindizes entlang der Achsen gegeben durch:

$$\Delta n = \frac{1}{2} \cdot n_0^3 \cdot r \cdot E \quad (12)$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot n_0^3 \cdot r \quad (13)$$

Die Konstante k soll im Versuch später für den $LiNbO_3$ Kristall bestimmt werden.

Das E-Feld ist im Versuch an den Kristall so angelegt, dass die beiden Achsen jeweils 45° gegen die Polarisationsrichtung gedreht sind. Fällt nun eine linear polarisierte Lichtwelle in den Kristall ein, so wird dieser in 2 linear polarisierte Wellen gleicher Amplitude, jedoch mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Achsen aufgespalten. Die beiden Polarisationsrichtungen treten deshalb mit einem Phasenunterschied δ aus dem Kristall aus:

$$\delta = 2\pi \cdot r \cdot n_0^3 \frac{U}{\lambda_0} \quad (14)$$

Dabei ist r die lineare elektrooptische Konstante, U die angelegte Spannung, n_0 die ursprüngliche Brechzahl des Mediums und λ_0 die Wellenlänge des Lichtes im Vakuum. Einen Phasenunterschied von $\delta = \pi$ dreht die Polarisationssebene gerade um 90° , man nennt die hierzu anzulegende Spannung die Halbwellenspannung U_{HW} :

$$U_{HW} = \frac{\lambda_0}{2 \cdot r \cdot n_0^3} \quad (15)$$

[Literatur zu den Versuchen]

3.1 Aufgabe 3.1: Modulierung durch den Faraday-Effekts

Bei diesem Versuch ist das von der Spule erzeugte Magnetfeld proportional zur Spannung eines MP3-Players. Der Drehwinkel des Lichts ist also ebenfalls proportional zu dieser Spannung, solange die Änderung des Magnetfelds klein gegenüber der Zeit ist, die das Licht benötigt, um die Strecke l im Medium zurückzulegen. Bei hohen Frequenzen ist dies nicht unbedingt erfüllt, diese werden daher nicht korrekt moduliert werden.

Hinter dem Medium, welches im Versuch aus Bleisilikat besteht, wird ein Polarisationsfilter gestellt, welcher bei unmodulierter Welle das Licht nicht durchlässt. Wird das Licht nun um den Winkel α gedreht, so ändert sich, in erster Näherung, die Intensität hinter dem Polarisationsfilter proportional zum Drehwinkel und somit proportional zur Spannung des MP3-Players.

Zuletzt wird mithilfe einer Photodiode die Intensität des Lichtes vermessen, die abfallende Spannung an der Diode ist wiederum proportional zum Ausgangssignal des MP3-Players und das Spannungssignal der Diode kann über einen Lautsprecher wiedergegeben werden.

3.2 Aufgabe 3.2: Bestimmung der Verdet'schen Konstanten von Bleisilikatglas

In diesem Teilversuch wird die Verdet'sche Konstante von Bleisilikat bestimmt. Die Spule wird mit einem Strom I betrieben und erzeugt dabei das Magnetfeld B

$$B = \mu_0 \mu \frac{N}{l} \cdot I \quad (16)$$

Gemessen wird ebenfalls der Drehwinkel α des Lichts, es ergibt sich:

$$V = \frac{\alpha}{\mu_0 \mu N \cdot I} \quad (17)$$

Beide Stromrichtungen werden verwendet, wobei der Strom I dem Betrage nach unter 3A bleiben sollte. Die Drehwinkelmessung wird versuchsweise auch über das Malussche Gesetz durchgeführt. Die Intensität hinter einem Polarisationsfilter, der ursprünglich in Durchlassrichtung ausgerichtet war, ist:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (18)$$

Voraussichtlich wird die Intensitätsmessung jedoch noch wesentlich ungenauer sein, als die direkte Drehwinkelmessung nur mit Hilfe eines Polarisators, der auf ein Minimum der Intensität eingestellt wird.

3.3 Aufgabe 3.3: Modulierung durch den des Pockels-Effekts

Wie oben bereits erklärt, gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen der angelegten Spannung und dem Gangunterschied δ der austretenden Welle. Wird hinter die Pockelszelle wiederum ein Polarisationsfilter gebracht, sodass kein Licht transmittiert wird, wenn keine Spannung (oder eine Gleichspannung U_0) anliegt, so kann man die Spannung U wiederum mit dem Ausgang eines MP3-Players modulieren. Diese Modulation ist dann proportional zur Intensität hinter dem Polarisationsfilter, da dass für einen beliebigen Gangunterschied elliptisch-polarisierte Licht nur teilweise durch den Filter hindurchgelassen wird. Die Modulationsspannung darf dabei die Halbwellenspannung U_{HW} nicht überschreiten, da hier die maximale Transmission herrscht. Es gilt für die durchgelassene Frequenz:

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U}{U_{HW}} \right) \quad (19)$$

[Literatur zu den Versuchen]

Im Versuch wird, da es sich um einen nichtlinearen Effekt handelt, eine Gleichspannung U_0 über die Modulationsspannung gelegt, um die Nichtlinearität zu erreichen. Diese Spannung sollte so eingestellt werden, dass bei unmoduliertem Licht der Filter kein Licht transmittiert.

Das modulierte Licht kann mithilfe einer Photodiode wiederum aufgefangen werden und an den Lautsprecher gekoppelt werden.

Außerdem wird das Laserlicht wie beschrieben mithilfe eines Linsensystems direkt in die Pockelszelle fokussiert, um Reflexionen an den Seitenflächen des Kristalls zu vermeiden. Das hinter dem Polarisationsfilter austretende Licht wird auf einem Schirm aufgefangen. Es zeigt sich eine Hyperbelstruktur. Diese entsteht durch den unterschiedlichen Gangunterschied und die damit unterschiedliche Intensität der Strahlen, die unter verschiedenen Winkeln zu den optischen Achsen in den Kristall einfallen.

3.4 Aufgabe 3.4: Bestimmung von k

Der Aufbau bleibt gleich wie beim letzten Teilversuch, diesmal ist nur das Zentrum der Hyperbelstruktur von Interesse. Liegt hier ein Minimum vor, besitzt das Laserlicht, das gerade durch den Kristall transmittiert wurde, keinen Gangunterschied. Wird die Spannung an der Pockelszelle verändert, im Versuch von -2000V bis 2000V , so wechseln sich Minima und Maxima im Zentrum ab, das Laserlicht wird jeweils um 0° oder 90° (bzw 180° und 270°) verschoben sein. Die Spannungsdifferenz zwischen Minima und Maxima, entspricht also gerade der oben beschriebenen Halbwellenspannung U_{HW} . Man erhält aus dieser Steigung also die Spannung differenziert nach der Phasenverschiebung:

$$U_{HW} = \frac{dU}{d\phi} = \frac{1}{\frac{d\phi}{dU}}$$

Wie aus der Literatur (und dem Aufgabenblatt) entnommen werden kann, folgt hieraus:

$$\Delta n = k \cdot E \tag{20}$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \Delta n \cdot s \tag{21}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot k \cdot E \cdot s \tag{22}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot k \cdot \frac{U}{d} \cdot s \tag{23}$$

$$\frac{d\phi}{dU} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{k}{d} \cdot s \tag{24}$$

Dies ist die Phasenverschiebung des außerordentlichen Strahles gegenüber dem ordentlichen längs der Strecke s . Für die zu messende Konstante k folgt:

$$k = \frac{d \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot s \cdot U_{HW}} \tag{25}$$

Die Ähnlichkeit zwischen der Doppelbrechung bei mechanischer Spannung und elektrischer Spannung am Kristall ist nicht verwunderlich, da der Kristall wie oben bereits erwähnt piezoelektrisch ist.

4 Aufgabe 4: Optische Aktivität - Saccharimetrie

Wird Laserlicht an Molekülen gestreut, so wird seine Polarisationsrichtung ein wenig gedreht. Handelt es sich um chirale Moleküle, summieren sich diese infinitesimalen Drehungen zu einer endlichen Drehung auf. Sie hängt ab von der Konzentration der Moleküle k , der Länge l , die das Licht im Stoff zurücklegt, und dem spezifischen optischen Drehvermögen $[\alpha]$.

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{k \cdot l} \quad (26)$$

[Aufgabenstellung]

4.1 Aufgabe 4.1: Optisches Drehvermögen - Haushaltszucker

Der Drehwinkel α wird in Abhängigkeit zum Lichtweg l und in Abhängigkeit zur Konzentration k bestimmt und das spezifische optische Drehvermögen von Saccharose berechnet. Dabei wird die Proportionalität zu α überprüft werden. Sehr wahrscheinlich ist α auch von der Wellenlänge und dem Brechungsindex des Lösungsmittels abhängig. Verändert man die Konzentration des Stoffes, während man den Laserstrahl beobachtet, so erkennt man, dass der Strahl gekrümmt wird, dies ist auf den sich ändernden Brechungsindex zurückzuführen. Das Lösungsmittel besitzt in diesem Moment einen nicht-isotropen Brechungsindex, der durch die endliche Diffusionsgeschwindigkeit der Moleküle hervorgerufen wird.

4.2 Aufgabe 4.2: Optisches Drehvermögen - Sorbose

In diesem letzten Teilversuch wird das spezifische optische Drehvermögen von Sorbose bestimmt. Dieser Stoff dreht entgegengesetzt zur Saccharose, dem Haushaltszucker. Weshalb die Küvette besonders gründlich gereinigt werden muss, da sich die Effekte sonst gegenseitig aufheben.

Abbildungsverzeichnis

1	http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/Michelson-Morley.svg	4
---	---	---

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-16,17,18

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-16,17,18 (falls vorhanden)

[Literatur zu den Versuchen] Literatur zu den Versuchen P2-16,17,18 (falls vorhanden)

[Hecht - Optik]