

Prak.: P2 Semester: SS22 Wochentag: Mo Gruppennr.: 08

Name: Lohrke Vorname: Leonardo

Name: Fuhrmann Vorname: Markus

Emailadresse(n): _____

Versuch: Laser B (P2-V23) Fehlerrech.: Nein

Betreuer: Karim Elyaouti Durchgeführt am: 05.05.202

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

1. Abgabe am: _____

Rückgabe am: _____ Begründung:

2. Abgabe am: _____

Ergebnis: + / 0 / - Fehlerrechnung: Ja / Nein

Datum: _____ Handzeichen: _____

Bemerkungen:

Obwohl A.Einstein schon 1917 von der theoretischen Existenz stimulierter Emission berichtet hat, wurde erst 1954 dieses Phänomen experimentell nachgewiesen. Mit dem darauf basierenden optischen Laser stehen der Forschung und der Technik seit 1960 Lichtquellen zur Verfügung, die sich durch extrem große Kohärenzlänge, sehr gute Parallelität und große 'Energiedichte' auszeichnen.

Sie verwenden bei diesem Versuch den Laser als ideale Lichtquelle für Beugungs- und Interferenzexperimente und lernen Anwendungen wie z.B. die Holographie kennen.

SICHERHEITSHINWEISE:

DER LASERSTRAHL IST GEFÄHRLICH FÜR DIE AUGEN!

NIE DIREKT IN DEN STRAHL HINEINSEHEN!

Bei allen Justier- und Aufbauarbeiten Laserschutzbrillen tragen!

Da beim Experimentieren spiegelnde Flächen im Strahl unvermeidlich sind und die Strahlage nicht festliegt, ist besondere Vorsicht geboten. Bleiben Sie beim Experimentieren in der Regel stehen, mit den Augen also weit über der Strahlhöhe. Stark aufgeweitetes oder gestreutes Laserlicht, z.B. von matten Flächen, vom Schirm, vom Hologramm etc., ist bei den verwendeten, relativ schwachen Lasern ungefährlich.

Aufgaben:

1. Messen Sie in einem 'on-line'-Experiment die Beugungsfigur eines Spaltes aus und gewinnen Sie durch Fourier-Transformation ein Bild des Spaltes zurück.

Das Experiment hat demonstrativen Charakter. Es soll mit den übrigen Gruppen gemeinsam und mit Unterstützung des Betreuers ausgeführt werden. Ein Phototransistor mit schmalen Spalt wird rechnergesteuert von einem Schrittmotor durch die Beugungsfigur geführt und die Intensitäten werden gemessen. Der Verstärkungsfaktor eines Vorverstärkers wird dabei rechnergesteuert um bis zu drei Zehnerpotenzen verändert und an die jeweilige Intensität angepaßt. Die intensitätsproportionalen Gleichspannungen werden durch einen Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert und im Rechner gespeichert. Das Rechnerprogramm enthält neben den Steuerrountinen (z.B. für den Schrittmotor und für die Verstärkerumschaltung) und den Messrountinen (z.B. für die A/D-Wandlung nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation) auch Auswerterountinen. Eine dieser Rountinen setzt voraus, daß ein Einfachspalt als Beugungsobjekt dient. Dann kann zu den Wurzeln aus der Intensität jeweils das richtige Vorzeichen ergänzt und so eine Amplitudenfigur gewonnen werden. Ein FFT-Programm ('Fast Fourier Transform') transformiert diese dann zurück in ein Spaltbild. Die Darstellungen der Beugungsfigur und des berechneten Spaltbildes am Bildschirm können als Hardcopy am Drucker ausgegeben werden.

Wegen der bei der Messung von Beugungsfiguren komplizierterer Objekte fehlenden Phaseninformation ist das Verfahren der Fourier-Rücktransformation dann nicht so einfach. Über Einzelheiten des Versuchsaufbaus, der Elektronik und des Programms informiert bei Interesse gerne das Personal im Praktikum. Beim Versuch wird aber keine Befassung mit Details erwartet.

2. Anwendungen des Michelson-Interferometers

2.1 Beobachten Sie interferometrisch die sehr geringe magnetostruktive Längenabhängigkeit vom Magnetfeld bei Nickel und bestimmen Sie den Magnetostruktionskoeffizienten. Einer der Interferometerspiegel sitzt bei diesem Interferometer auf der Stirnfläche des untersuchten Ni-Stabes, der von einer Spule umgeben ist. Der Strom durch die Spule soll nicht über 0,5A betragen und jeweils nur kurz eingeschaltet sein, weil sonst die thermische Ausdehnung den Magnetostruktionskoeffizienten überdeckt. Nutzen Sie beide Stromrichtungen.

2.2 Bestimmen Sie aus den beobachteten Änderungen der Interferenzfigur bei gemessener Verschiebung eines der Spiegel die Wellenlänge des Laserlichts. Ab hier wird ein anderes Interferometer als bei 2.1 benutzt! Notieren Sie mehrere Verschiebungen und die zugehörigen Anzahlen von Wechseln in der Interferenzfigur, denn die Auswertung soll mit Ausgleichsrechnung erfolgen.

2.3 Demonstrieren Sie den 'Dopplereffekt' mit Lichtwellen im Falle $v \sim c$ und messen Sie interferometrisch eine extrem geringe Geschwindigkeit. Bewegen Sie dazu motorgetrieben einen der Interferometerspiegel gleichmäßig, und beobachten Sie die resultierende geringe Frequenzänderung $\Delta\nu$ anhand des 'Durchlaufens' der Interferenzfigur. Der Betreuer gibt Hinweise zur geeigneten Justierung des Interferometers. Der bewegte Spiegel stellt bei diesem Versuch sowohl einen bewegten Empfänger als auch eine bewegte Quelle dar. Bestimmen Sie $\Delta\nu$ durch Auszählen der Intensitätsschwankungen über bekannte Zeiten (Stoppuhr). Berechnen Sie dann aus $\Delta\nu$ und $\lambda(\text{Laser})$ die Spiegelgeschwindigkeit, die Sie zum Vergleich auch auf direkte Weise ermitteln sollen. Daß hier von Dopplereffekt gesprochen wird, obwohl es sich wie bei 2.2 um Änderungen der Interferenzfigur bei veränderter Spiegellage handelt, ist kein Widerspruch sondern eine äquivalente Beschreibung.

2.4 Akustisches Analogon zu 2.3: Bewegen Sie eine schwingende Stimmgabel von Ihrem Ohr weg und auf Ihr Ohr zu und zwar einmal, wenn keine und dann, wenn eine reflektierende Wand in der Nähe ist.

3. Faraday-Effekt und Pockels-Effekt

3.1 Modulieren Sie die Intensität des Laserlichts durch Anwendung des Faraday-Effekts (Magnetooptischer Effekt, Magnetorotation), indem Sie das linear polarisierte Laserlicht erst einen Bleisilikatglasstab im longitudinalen Magnetfeld und dann ein Polarisationsfilter durchlaufen lassen. Die Magnetfeldspule speisen Sie vom Zweitlautsprecher-Ausgang eines MP3-Players. Fangen Sie das modulierte Licht mit dem Photoelement in der Frontplatte des NF-Verstärkers mit Lautsprecher auf. Suchen Sie die günstigste Stellung des Polarisationsfilters (in der Nähe des Intensitätsminimums). Warum werden die hohen Frequenzen hier wohl so deutlich hörbar benachteiligt? Stellen Sie hier und bei den weiteren Aufgaben das Polarisationsfilter an Stellen möglichst großen Strahlquerschnitts auf!

3.2 Bestimmen Sie die Verdettsche Konstante $V = \alpha / B \cdot l$ von Bleisilikatglas. Betreiben Sie dazu die Spule mit Gleichstrom. Wegen der Gefahr der Zerstörung und wegen hinderlicher Strahlkrümmung bei starker Erwärmung sind maximal 3A für kurze Zeit erlaubt. Eventuell sind Abkühlungspausen nötig. Wegen des kleinen Drehwinkels α ist die erreichbare Genauigkeit recht schlecht. Nutzen Sie beide Stromrichtungen aus. So gewinnen Sie immerhin den Faktor 2. Sie können probeweise statt der direkten Winkelmessungen auch Intensitätsmessungen machen und das Malus-sche Gesetz ausnutzen.

3.3 Modulieren Sie die Intensität des Laserlichts durch Anwendung des Pockels-Effekts (linearer elektrooptischer Effekt, induzierte Doppelbrechung, $\Delta n(E) = k \cdot E$), indem Sie das linear polarisierte Laserlicht einen Lithiumniobat-Kristall mit transversalem elektrischen Feld (Feldrichtung 45° gegen die Polarisationsrichtung des Laserlichts gedreht) und ein Polarisationsfilter (90° gegen die Polarisationsrichtung des Laserlichts gedreht) durchlaufen lassen. Die Kondensatorplatten (Elektroden) am Kristall werden an die Serienschaltung von Gleichspannung (wenige 100V) und NF-Spannung (vom Lautsprecher-Ausgang eines MP3-Players über einen Transformator) angeschlossen.

Moduliertes Licht wird mit dem Photoelement in der Frontplatte des NF-Verstärkers mit Lautsprecher an einer günstigen Stelle des Strahlungsfeldes empfangen. Das Laserlicht wird mit einer +10mm-Linse stark divergent gemacht. Dieses divergente Licht wird mit einer +30mm-Linse im Zentrum der Pockelszelle fokussiert, damit es die Zelle ohne Reflexion an den Seitenflächen des Kristalls passiert. Das austretende Licht liefert hinter einem Polarisationsfilter auf einem Schirm ein großflächiges Bild mit Hyperbelstruktur. Erläutern Sie das Zustandekommen dieses Bildes.

3.4 Bestimmen Sie die Konstante $k = \Delta n(E) / E$ für den Pockels-Effekt bei LiNbO_3 für die Wellenlänge des Laserlichts. Die Anordnung ist die bei 3.3 beschriebene ohne NF-Einkopplung. Variieren Sie die Spannung an der Pockelszelle von -2000V bis +2000V und notieren Sie die Werte, bei denen im Zentrum der Hyperbelfigur Helligkeitsextrema (Maxima oder Minima) auftreten. Numerieren Sie diese Extrema fortlaufend und bestimmen Sie die Steigung der Ausgleichsgeraden 'Spannung über Nummer'. Die Steigung heißt 'Halbwellenspannung'. Sie erhalten daraus $d\phi/dU$, die Änderung der Phasenverschiebung

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_{ao} - n_o) s = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n \cdot s \quad \text{zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl längs der Strecke } s$$

mit der Änderung der angelegten Spannung U. Mit der bekannten Vakuumwellenlänge λ_0 des Laserlichts und den bekannten geometrischen Daten des LiNbO₃-Kristalls ergibt sich dann die Konstante k. Beim Messen kann auf ein Photoelement mit Meßinstrument verzichtet und auf das Auge vertraut werden. Beachten Sie, daß der verwendete Kristall auch ohne elektrisches Feld schon doppelbrechend ist. Beachten Sie die Ähnlichkeiten bei der Veränderung der Doppelbrechung bei mechanischer Spannung und bei Einwirkung eines elektrischen Feldes.

4. Optische Aktivität (Saccharimetrie)

4.1 Bestimmen Sie das spezifische optische Drehvermögen $[\alpha] = \alpha / k \cdot l$ einer Haushaltszuckerlösung bei verschiedenen Konzentrationen sowie die Drehrichtung. (α in °; k in g/cm³; l in dm)

Zeigen Sie, daß der Drehwinkel α proportional zur Länge l des Lichtweges durch die Lösung (nur zwei Meßpunkte: Küvette längs und quer durchstrahlt) und zur Konzentration k (Masse des gelösten Stoffes durch Lösungsvolumen, bis etwa 0,3 g/cm³, Lösungsmittel Wasser, mit höchster Konzentration beginnen) ist. Von welchen weiteren Parametern ist α wohl abhängig? Wenn Sie die Konzentration ändern, während Sie den durchtretenden Laserstrahl beobachten, scheint dieser 'krumme Wege zu gehen'. Beachten Sie Ähnlichkeiten bei der optischen Aktivität und beim Faraday-Effekt.

4.2 Bestimmen Sie das spezifische optische Drehvermögen einer entgegengesetzt drehenden Sorbose-Lösung mit vorgegebener Konzentration.

Spülen Sie vor dem Einfüllen der Sorboselösung die Küvette gründlich. Zuckerreste stören! Verändern Sie hier die Konzentration nicht, und füllen Sie die vergleichsweise teure Lösung in die Flasche zurück.

ZUBEHÖR: (Das Zubehör befindet sich teils an den Versuchsplätzen, teils im Schrank. Sehr teures Gerät ist nur zweifach für drei Versuchsplätze vorhanden. Absprache zwischen den Gruppen über die Nutzungsreihenfolge ist erforderlich.)

P 2 / 23 (Kabine 1)	P 2 / 24 (Kabine 2)	P 2 / 25 (Kabine 3)
Experimentiertisch (mit 3m-Zeißschiene), dazu: diverse Verschiebereiter		
2mW-He-Ne-Laser, 632,8nm (geschlossene Bauweise mit integriertem Netzteil, polarisiert)		
mit Schlüsselschalter	mit Kippschalter	mit Schlüsselschalter
<ul style="list-style-type: none"> • Strahlaufweitungssystem • Justieraufbau mit Fassungen • Halter für Linsen, Blenden • Schirm (groß, weiß) 	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlaufweitungssystem • Justieraufbau mit Fassungen • Halter für Linsen, Blenden • Schirm (groß, weiß) 	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlaufweitungssystem • Justieraufbau mit Fassungen • Halter für Linsen, Blenden • Schirm (groß, weiß)
Vielfachmessinstrument Voltcraft M-4660A	Vielfachmessinstrument Voltcraft M-4650	Vielfachmessinstrument Voltcraft 6500
Amperemeter (Gossen Manometer, ohne Zusatzwiderstände 100mV/1mA {Vorsicht!}, dazu Shunts für 500mA und für 5A zur Messung der Spulenströme)		
Funktionsgenerator FG 800 / 0,2 Hz – 200 KHz		
Netzgerät für die Gleichspannung an der Pockelszelle, einstellbar bis ca. 1900V, -mit integriertem Modulationstrafo (Eigenbau)		
NF-Verstärker für mod. Strahlung / AF-Amplifier		
Stromversorgungsgerät / Labor-Netzgerät (stufenlos einstellbar, kurzzeitig bis 4A)		
Glan-Thompson Polarisationsfilter; d=10mm, auf Stift drehbar mit Winkelskala, Extinction-Ratio: 10 ⁵ /1 nicht im unaufgeweiteten Strahl benutzen!		
Folgende Elemente in 25mm-Fassungen:		

<ul style="list-style-type: none"> • Polarisationsfilter ohne Skala, • Spalt 0,4mm, • Lochblende 1mm • Irisblende • Achromat $f=10\text{mm}$, Sammellinsen $f=30\text{mm}$, 60mm und $f=150\text{mm}$. • Tischlampe • Taschenlampe • 2 Laserschutzbrillen 	<ul style="list-style-type: none"> • Polarisationsfilter ohne Skala, • Spalt 0,4mm, • Lochblende 1mm • Irisblende • Achromat $f=10\text{mm}$, Sammellinsen $f=30\text{mm}$ und $f=150\text{mm}$. • Tischlampe • Taschenlampe • 2 Laserschutzbrillen 	<ul style="list-style-type: none"> • Spalt 0,4mm, • Irisblende • Achromat $f=10\text{mm}$, Sammellinsen $f=30\text{mm}$ und $f=150\text{mm}$. • Taschenlampe
--	--	---

Im Schrank:

- Lichtdetektor Si-Photoelement (BPW34, kleinflächig, $2,7\text{mm} \bullet 2,7\text{mm}$, wird nur im Elementbetrieb verwendet, d.h. ohne Betriebsspannung direkt an Spannungs- oder Strommessgerät angeschlossen. Anschluss an den mit + und - bezeichneten Stiften mit spezieller Leitung) ,einfach vorhanden
- Lichtdetektor Si-Photoelement ($d=12\text{mm}$, wie bei Versuchsteil A), einfach vorhanden
- Lichtdetektor für moduliertes Licht (mit Photoelement $2,7\text{mm} \bullet 2,7\text{mm}$, NF-Verstärker und Lautsprecher, Netzbetrieb),
- 3-mal: Michelson-Interferometer (mit Feinverstellung eines Spiegels durch 10:1-Hebeluntersetzung und Mikrometerschraube, dazu aufsteckbare Antriebsrolle für Motorantrieb)
- Jeweils einmal. Michelson-Interferometer (ein Spiegel auf Ni-Stab bzw. Fe-Stab, $l=105\text{mm}$, in Spule $n=2000$ Wdgn.),
- Synchronmotor (1U/min, mit Antriebsrolle und Gummiriemen für Bewegung des Interferometerspiegels),
- Küvette ($198\text{mm} \bullet 58\text{mm}$, in Halter auf Stift, für optisch aktive Lösungen (2 x in Plastik, 1x in Glas)
- Haushaltszucker, 2 Gefäße
- Chemikalienwaage, 1mal Mettler H 315 auf Wägetisch und 3 verschiedene mechanische Waagen
- Bechergläser, Messzylinder, Trichter
- Sorbose-Lösung (optisch aktiv, linksdrehend, $k=0,33 \text{ g/cm}^3$),
- Faraday-Modulator (Bleisilikatglas in Spule, $l=75\text{mm}$, $n=800$ Wdgn.)
- Radioapparat (mit Zweitlautsprecherausgang und zugehöriger Anschlussleitung, als Modulationsquelle)
- Lichtdetektor für moduliertes Licht (mit Photoelement $2,7\text{mm} \times 2,7\text{mm}$, NF-Verstärker und Lautsprecher, Netzbetrieb)
- Pockelszelle im Drehhalter mit Skala (Winkel zwischen Feld- und Laserpolarisationsrichtung), LiNbO_3 -Kristall, Höhe = Elektrodenabstand = $h = 2\text{mm}$, Länge = $s = 20\text{mm}$, optische Achse parallel zur Feldrichtung),
- Stimmgabel 1700Hz 2x , Maßband 1x , Stoppuhr 5x
- Aufbau für die optische Bank mit Phototransistor, Schrittmotor und Endschaltern
- Vorverstärker, Schrittmotor- und Relais-Interface.
- 2 Laserschutzbrillen (für Betreuungspersonal)
- Nur 1 –mal vorhanden: Rechner (IBM-kompatibler PC 386SX) mit VGA-Graphikkarte, Graphik-Drucker, Maus, Festplatte, 1,2MB- und 1,44MB-Laufwerk und spezieller Interface-Karte (ADC, DAC, PIO)

Literatur:

- Demtröder, *Experimentalphysik 2*, Elektrizität und Optik, Springer-Verlag, 2006
- F. Pedrotti et al., *Optik für Ingenieure*, Grundlagen, Springer-Verlag, 2002
- Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik*, Bd.3, Optik
- Landolt - Börnstein, Neue Serie, 1986, Springer – Verlag Band III/19a
- Hecht, Zajac: *Optics*
- Koppelmann: *Der Laser - Eine elem. Darst.*, Praxis der Naturwiss., Heft 1/35 (1986), S.37
- Mallwitz (Firma Spindler & Hoyer): *Arbeitsunterlagen zum He-Ne-Laser*, Versuche mit kohärentem Licht
- Kempas (Firma Leybold Didactic), *Elektrisch induzierte Doppelbrechung in einem Kristall*, contact 2/1993
- Tradowsky: *Laser, kurz und bündig*
- Brändli, Dändliker, Hatz: *Laserphysik*
- Mollwo, Kaule: *Maser und Laser*

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Intensitätsverteilung eines beugenden Objekts	1
1.3	Fourier-Transformation	1
2	Optische Fourier-Transformation am Einzelspalt	3
3	Anwendungen des Michelson-Interferometers	5
3.1	Das Michelson-Interferometer	5
3.2	Magnetostriktive Längenabhängigkeit von Nickel	6
3.3	Bestimmung der Wellenlänge des Lasers	9
3.4	Dopplereffekt bei Lichtwellen	10
3.5	A3.4 - Dopplereffekt bei Schallwellen	12
4	Faraday-Effekt und Pockels-Effekt	13
4.1	Intensitätsmodulierung mit dem Faraday-Effekt	14
4.2	Bestimmung der Verdet'schen Konstante für Bleisilikatglas	14
4.3	Intensitätsmodulierung mit dem Pockels-Effekt	15
4.4	Bestimmung der Konstante k beim Pockels-Effekt	15
5	Optische Aktivität	17
5.1	Optisches Drehvermögen einer Haushaltszuckerlösung bei verschiedenen Konzentrationen	17
5.2	Optisches Drehvermögen einer Sorbose-Lösung	20
	Literaturverzeichnis	22

Abbildungsverzeichnis

2.1	Messergebnis Einzelspalt mit zusätzlich eingezeichnetem Verlauf der Kurve, zur Verdeutlichung des Spalts	3
3.1	Aufbau Michelson-Interferometer [Dem18]	5
3.2	Aufbau zu Aufgabe 2.1 [TA]	6
3.3	graphische Darstellung der Messwerte mit Ausgleichsgerade	8
5.1	schematische Darstellung zweier chiraler Moleküle [ma]	17
5.2	Drehvermögen der Zucker-Lösung	19
5.3	Messung Sorbose	20

Tabellenverzeichnis

3.1	Messergebnisse zu Aufgabe 2.1	7
3.2	Messergebnisse zu Aufgabe 2.1	9
3.3	Messergebnisse zu Aufgabe 2.3	11
3.4	Messergebnisse zu Aufgabe 2.3	12
4.1	Messergebnisse zu Aufgabe 3.2	14
4.2	Verdet Konstante für Messwerte aus 4.1	15
4.3	Halbwellenspannung	16
4.4	Pockels-Konstante für Halbwellenspannung aus 4.3	16
5.1	Messdaten zu Aufgabe 5	18
5.2	Messdaten der Sorbose-Lösung	20

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Einleitung

Der Versuch Laser B dient dem Zweck erste Berührungspunkte im Bereich der Laseroptik zu sammeln und grundlegende Effekte des Lasers, sowie dessen Wechselwirkung mit unterschiedlichen Materialien genauer zu untersuchen.

Im konkreten Fall spielen hierbei das sogenannte Michelson-Interferometer, der Faraday-Effekt sowie der Pockels-Effekt eine zentrale Rolle im Versuch.

1.2 Intensitätsverteilung eines beugenden Objekts

Die allgemeine Formel für die Intensitätsverteilung an einem beugenden Objekt ist gegeben durch

$$\frac{I}{I_0} = \left| \int T(x) \cdot e^{ik \cdot x} dx \right|^2 . \quad (1.1)$$

Dabei stellt $T(x)$ die Transmissionsfunktion des beugenden Objektes dar, gibt also an, an welcher Stelle das Licht passieren kann. Die Besonderheit daran ist, dass sich mit dieser Formel im allgemeinen alle Beugungsbilder von jedem beugenden Objekt bestimmen lassen. Darüber Hinaus ist die Intensitätsverteilung eines beugenden Objektes gleich der Intensitätsverteilung seines Komplements, weshalb sich auch diese durch die obige Formel berechnen lassen. Unter genauerer Betrachtung der Gleichung fällt auf, dass diese gerade die Fourier-Transformation der Transmissionsfunktion darstellt. Auf die Fourier-Transformation wird im Folgenden näher eingegangen.

1.3 Fourier-Transformation

Eine sehr wichtige mathematische Methode, welche in der Physik, vor allem in der Wellenlehre, häufig Anwendung findet, ist die Fourier-Transformation.

Das von Joseph Fourier entwickelte Konzept der Fourier-Reihe dient ursprünglich zur Reihenentwicklung einer periodischen, abschnittsweise stetigen Funktion in eine Reihe aus trigonometrische Funktionen. Dabei beschreibt die Fourier-Synthese den Prozess, dass sich jede harmonische Funktion aus der Addition beliebig vieler harmonischer Komponenten derselben Frequenz zusammen setzen lässt. Während die die Fourier-Analyse den dazu inversen Prozess, dass sich jede harmonische Funktion in harmonische Komponenten aufteilen lässt, darstellt. Mathematisch lassen sich die beiden Methoden wie folgt darstellen:

$$f(t) = \frac{a_0(f)}{2} + \sum_{k=0}^n a_k(f) \cos kt + b_k(f) \sin kt , \quad (1.2)$$

wobei a_k und b_k die charakteristischen Fourier-Koeffizienten darstellen.

Der entscheidende Übergang zur Fourier-Transformation ergibt sich nun aus der Überführung dieser Reihe in ein Integral. Dadurch ist es möglich auch nicht-periodische Funktionen zu entwickeln, welche in der Anwendung wesentlich häufiger auftreten. Für die Fourier-Transformation ergibt sich dann

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int f(t)e^{i\omega t} dt . \quad (1.3)$$

Hiermit können nun auch nichtperiodische Funktion als Überlagerung harmonischer Schwingungen beschrieben werden. Zudem fällt an der Abhängigkeit der Funktionen auf, dass die zeitabhängige Funktion $f(t)$ eine frequenzabhängige Fourier-Transformierte $F(\omega)$ aufweist. Damit wird also aus der zeitlichen Dimension in den Frequenzraum transformiert. Ganz analog lassen sich auf diese Weise zwischen den verschiedenen Räumen transformieren. Die Rücktransformation ist im gleichen Sinne beschrieben durch

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int F(\omega)e^{-i\omega t} d\omega . \quad (1.4)$$

Wichtig an der Fourier-Transformation ist, dass sie eindeutig ist, das bedeutet: Wird eine Testfunktion transformiert und wieder zurück-transformiert, kommt die Testfunktion wieder heraus. Diese Eigenschaft wird im ersten Versuch untersucht, in dem das Beugungsbild aufgenommen und rücktransformiert wird, wobei das Ergebnis dann das Bild des beleuchteten Spaltes ist.

2. Optische Fourier-Transformation am Einzelspalt

Die erste Aufgabe stellt einen Demonstrationsversuch dar. Das bedeutet, dass der Versuch vom Betreuer vor allen Praktikanten durchgeführt wird und das Ergebnis im Vordergrund demonstrativen Charakter besitzt.

In diesem Fall wird das Beugungsbild eines Einzelspaltes computerunterstützt gemessen und mittels der Fourier-Transformation ein Bild des ursprünglichen Spaltes zurückgewonnen. Dazu wird der zu untersuchende Einzelspalt in einem festen Abstand zum Schirm auf der optischen Bank installiert und von einem vorab installierten Laser angestrahlt. Die Messung besteht nun darin, dass das Beugungsbild des beleuchteten Einzelspaltes von einer, mit einem Schrittmotor verbundenen, Fotodiode abgefahren wird, und der angeschlossene Computer direkt die dazugehörige Intensitätsverteilung ausgibt. Über eine Auswertungs-Software, in welcher der Abstand zwischen Schirm und Spalt vorab eingestellt wird, lässt sich nun die vom Computer registrierte Intensitätsverteilung des Einzelspaltes ohne weitere Umwege durch eine automatische Fourier-Transformation in das Beugungsbild des Einzelspaltes rücktransformieren. Das Prinzip der Fourier-Transformation und die Intensitätsverteilung eines beugenden Objekts wurden dazu bereits in den theoretischen Grundlagen erläutert.

Im Falle dieses Versuches gibt die Software das folgende qualitative Abbild des Spaltes aus.

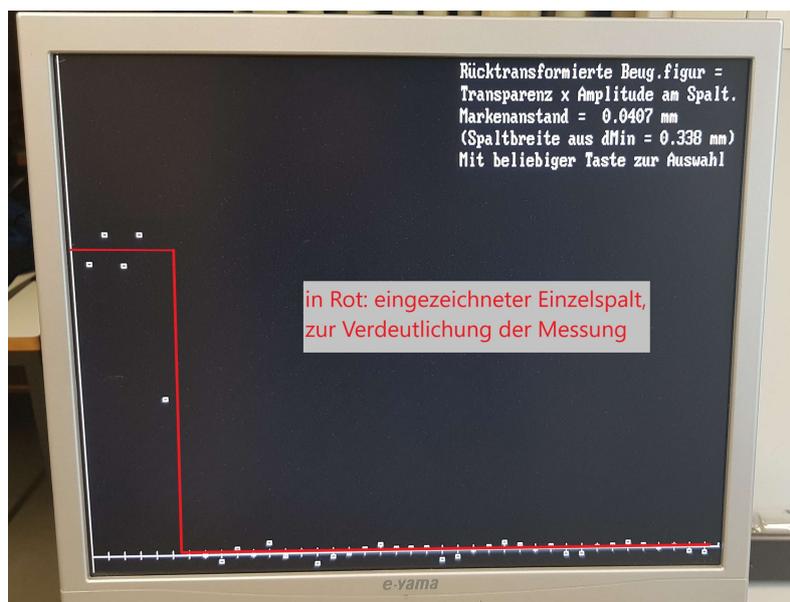


Abbildung 2.1: Messergebnis Einzelspalt mit zusätzlich eingezeichnetem Verlauf der Kurve, zur Verdeutlichung des Spaltes

Die Spalt-Breite lässt sich nun leicht ablesen und beläuft sich hier auf

$$b = 0,338 \text{ mm} . \quad (2.1)$$

Im Vergleich dazu gibt der Hersteller des Einzelspalt eine Spaltbreite von $b_h = 0,4 \text{ mm}$ an. Das Experiment kommt dem wahren Wert damit sehr nahe. Die geringe Abweichung ist dabei hauptsächlich auf die Abstandsmessung zwischen Schirm und Spalt, sowie deren geringem Abstand von nur $d = 105 \text{ cm}$, durch welchen die Fernfeldnäherung nicht ideal eintritt, zurückzuführen. Mit einer Abweichung von lediglich 18% lässt sich damit die Genauigkeit der Messung untermauern und das Verfahren der optischen Fourier-Transformation eindrucksvoll veranschaulichen.

3. Anwendungen des Michelson-Interferometers

3.1 Das Michelson-Interferometer

Das im Jahre 1881 von Albert Michelson entwickelte Interferometer wurde ursprünglich dafür konstruiert, um im berühmten Michelson-Morley-Experiment die Äther-Theorie zu überprüfen und Ausbreitung von Licht in verschiedenen Medien zu untersuchen. Aufgrund des relativ einfachen Aufbaus und der hohen Präzision kommt es bis heute zum Einsatz und findet in unterschiedlichsten Bereichen der Physik Verwendung. Zurecht erhielt Michelson im Jahr 1907 dafür den Nobelpreis.

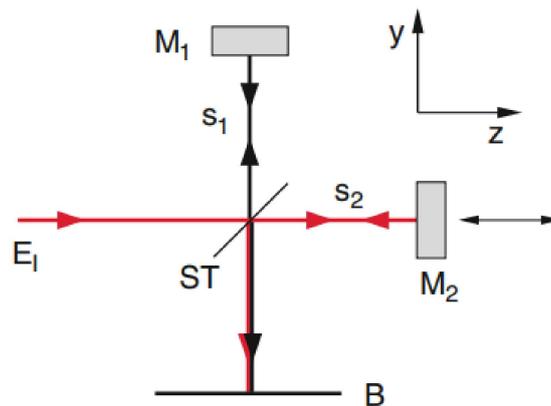


Abbildung 3.1: Aufbau Michelson-Interferometer [Dem18]

Das Interferometer ist dabei wie folgt aufgebaut. Monochromatisches und kohärentes Licht aus einem Laser trifft auf einen halbtransparenten Spiegel, sodass sich der Strahl in zwei Teilbündel aufteilt. Einer dieser Teilstrahlen wird auf einen, in einem festen Abstand montierten, Spiegel geworfen. Dort wird er vollständig reflektiert und anschließend direkt zum Schirm/Detektor weitergeleitet. Der andere Teilstrahl hingegen trifft auf einen beweglichen Spiegel und wird dort total reflektiert, damit er danach auf den Schirm zurückgeworfen wird. Dabei Überlagern sich die beiden Teilstrahlen und interferieren je nach Gangunterschied ΔS (siehe Abbildung 3.1). Diese konstruktive oder destruktive Interferenz lässt sich am Schirm beobachten. Dabei resultiert der Gangunterschied aus der Differenz der beiden Laufwege des Lichts bis zum Spiegel und zurück und kann über die Stellung des beweglichen Spiegels variiert werden.

Im Falle, dass die Laufstreckenunterschiede zwischen Strahlteiler und den beiden Spiegeln ein ganzzahliges Vielfaches von der Wellenlänge λ des Lichts sind, kommt es zu Konstruktiven Interferenz zwischen den Teilstrahlen und ein heller Ring tritt am Schirm auf. Somit lautet

die mathematische Bedingung für die konstruktive Interferenz:

$$\Delta S = k \cdot \lambda \implies \Delta X = \frac{k \cdot \lambda}{2}. \quad (3.1)$$

Dabei entspricht der Gangunterschied ΔS gerade zwei mal der Verschiebung ΔX , da das Licht den Weg hin und zurück läuft.

Entsprechend ergibt sich für die destruktive Interferenz, dass die Laufstreckenunterschiede gerade ein Vielfaches der halben Wellenlänge des Lichts sein müssen, da sich so Wellenberg und Wellental zu Null überlagern.

$$\Delta S = (2k + 1) \cdot \lambda \implies \Delta X = \frac{(2k + 1) \cdot \lambda}{2}. \quad (3.2)$$

3.2 Magnetostruktive Längenabhängigkeit von Nickel

In der ersten Aufgabe zum Michelson-Interferometer soll interferometrisch die sehr geringe magnetostruktive Längenabhängigkeit vom Magnetfeld bei Nickel untersucht und dessen Magnetostruktionskoeffizient ermittelt werden.

Der dem zu Grunde liegende Effekt ist dieser, dass ein ferromagnetisches Material in einem äußeren Magnetfeld H eine minimale Längenänderung erfährt. In einem ferromagnetischen Material befinden sich Weiß'sche Bezirke. Diese sind kleine Bereiche im Material, in denen die Elementarmagneten des Materials parallel ausgerichtet sind. Über das ganz Material hinweg sind diese Bezirke jedoch ungeordnet und ihre Magnetfelder heben sich im Mittel auf. Wird nun ein, zuvor nicht magnetisiertes, ferromagnetisches Material in ein Magnetfeld der Stärke H gebracht, so richten sich die Weiß'schen Bezirke entlang der Magnetfeldlinien aus. Die damit einhergehende Neuordnung führt zu einer minimalen Längenänderung des Materials.

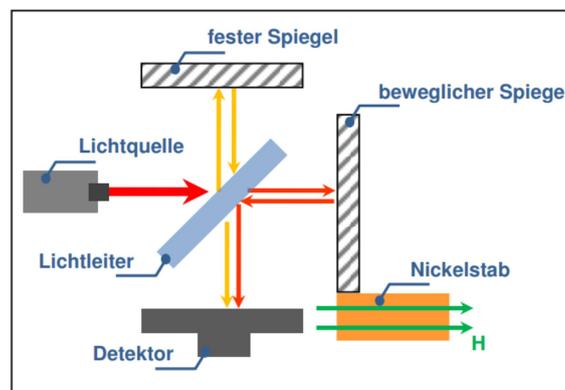


Abbildung 3.2: Aufbau zu Aufgabe 2.1 [TA]

Diese Änderung lässt sich nun im Michelson-Interferometer untersuchen. Dazu wird einer der Interferometerspiegel auf der Stirnfläche des zu untersuchten Nickel-Stabes angebracht. Der Stab ist dabei von einer Spule umgeben sodass sich das Magnetfeld regulieren lässt (siehe Abbildung 3.2). Tritt nun der oben beschriebene Effekt der Längenänderung ein, so werden am Detektor Interferenzerscheinungen auftreten, die sich beobachten lassen. In Abhängigkeit der erscheinenden Intensitätsmaxima bzw. -minima können so Rückschlüsse über die Materialkennwerte gezogen werden.

Dabei gilt für das Magnetfeld einer langen Spule, mit Windungszahl n und Länge L_{spule} bei einem Strom der Stärke I der Zusammenhang

$$H = \frac{n \cdot I}{L_{spule}}. \quad (3.3)$$

Gemäß der Vorbereitungsmappe gilt für den Zusammenhang der Längenzunahme ΔX des Material und der anliegende Feldstärke H die lineare Gleichung

$$\Delta X = c_{mag} \cdot l_0 \cdot H, \quad (3.4)$$

wobei l_0 die ursprüngliche Länge des Stabs und c_{mag} beschreibt den materialspezifischen Magnetostruktionskoeffizienten, der in diesem Versuch für Nickel bestimmt werden soll. Mit der obigen Gleichung für die Interferenzmaxima auf dem Schirm des Michelson-Interferometers folgt schlussendlich die Formel

$$c_{mag} = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot n \cdot I}. \quad (3.5)$$

Dabei wurde ausgenutzt, dass die Länge der Spule gerade der anfänglichen Länge des Stabs entspricht $L_{spule} = l_0$.

In der Messung wird der Spulenstrom I und damit die magnetische Feldstärke H schrittweise erhöht und über das Michelson-Interferometer, mittels der auftretenden Interferenzerscheinungen die dazugehörige Längenänderung des Nickelstabs gemessen. Dazu wird der verschiebbare Spiegel des Interferometers zunächst so verschoben, dass sich auf dem Schirm ein Minimum im Zentrum ausbildet. Anschließend wird der Stromfluss in der Spule eingeschaltet und die Stromstärke I so lange erhöht, bis sich das nächste Minimum ausbildet. Die Wertepaare aus Stromstärke I und Nummer des Minimums werden notiert und die Stromstärke weiter erhöht, bis zu Maximal $I = 0,5$ A. Daran anschließend wird der Versuch mit umgepolter Spannungsquelle erneut durchgeführt.

Allerdings lässt sich Gleichung 3.5 nur sehr schwierig auswerten. Es bietet sich demnach an, die Beziehung in eine Form umzustellen, in welcher alle bekannten Größen zu einer Hilfsgröße H zusammengefasst werden und der Magnetostruktionskoeffizient als Geradensteigung einfach ermittelt werden kann.

$$c_{mag} = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot n \cdot I} \iff \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot n} = c_{mag} \cdot I. \quad (3.6)$$

Die Angaben über die Windungszahl und die Wellenlänge entstammen dabei dem Aufgabenblatt und es konnten folgende Messwerte aufgezeichnet werden.

Tabelle 3.1: Messergebnisse zu Aufgabe 2.1

Minimum	Stromstärke in mA	Hilfsgröße in nm
-4	-0,297	-0,6328
-3	-0,218	-0,4746
-2	-0,128	-0,3164
-1	-0,073	-0,1582
0	0,000	0,000
1	0,080	0,1582
2	0,144	0,3164
3	0,216	0,4746
4	0,290	0,6328

Mittels Kafe2 lässt sich an diesen Daten nun eine lineare Regressionsanalyse durchführen, um aus der Geradensteigung auf die gesuchte Konstante zu schließen.

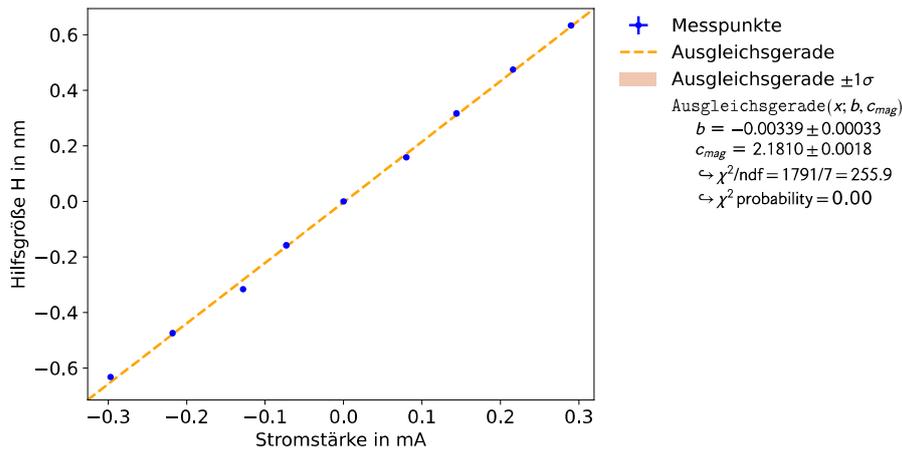


Abbildung 3.3: graphische Darstellung der Messwerte mit Ausgleichsgerade

Somit ergibt sich der Magnetostruktionskoeffizient direkt aus dem Diagramm 3.3 und beläuft sich auf den Wert

$$c_{mag} = 2,181 \frac{\text{nm}}{\text{A}} . \quad (3.7)$$

Es wird also ersichtlich, dass die Längenänderung in Folge der Magnetisierung des Nickel-Stabes nur äußerst gering ausfällt und im geringen Nanometer-Bereich liegt. Über den wahren Wert der Größe sind soweit keine Informationen gegeben, sodass der Wert nicht überprüft werden kann. Allerdings liegt die erhaltene Größenordnung durchaus im zu erwartenden Rahmen, denn bei einer größeren Längenänderung wäre der Effekt einfacher und auch ohne das Interferometer zu erkennen.

Insgesamt bestätigt der Versuch, über den Effekt der Längenänderung ferromagnetischer Stoffe hinaus, die extreme Genauigkeit des Michelson-Interferometers, durch welches solch kleine Abstände präzise gemessen werden können.

3.3 Bestimmung der Wellenlänge des Lasers

In diesem Abschnitt geht es darum, die Wellenlänge des Laserlichts zu bestimmen. Dabei wird der Spiegel des Michelson-Interferometers auf einem Mikrometerschlitten platziert und es werden die Abstandsänderungen gemessen, bei denen Minima auftreten. Da die Abstandsänderung sehr gering ist, wurde die Abstandsänderung Δx für jeweils fünf Minima mehrmals gemessen. Die Wellenlänge ergibt sich dann aus

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta x}{5} . \quad (3.8)$$

Die Messwerte sind in Tabelle 3.4 gegeben.

Tabelle 3.2: Messergebnisse zu Aufgabe 2.1

Anzahl der Minima	Δx in μm
5	2,0
10	1,5
15	1,0
20	2,0
25	1,5
30	2,0
35	1,7
40	2,0
45	1,8
50	1,5
55	1,9
60	1,8
65	2,0
70	2,0
75	1,9

Damit ergibt sich die mittlere Abstandsänderung zu und die Wellenlänge des Laserlichtes zu

$$\overline{\Delta x} = 1,773 \text{ und } \lambda = 709,3 \text{ nm} .$$

Vom bekannten Wert des Laserlichtes $\lambda_1 = 632,8 \text{ nm}$ weicht der gemessene Wert um ca. 12,1% ab. Einerseits kann die Abweichung statistischer Natur sein, da 14 Messungen mit mangelnder Präzision kein genaues Ergebnis liefern. Andererseits können statistische Fehlerquellen die Abweichung erklären. Zum Beispiel könnte der Mikrometerschlitten falsch oder für eine andere Temperatur geeicht sein und daher immer eine zu große / zu kleine Strecke anzeigen.

3.4 Dopplereffekt bei Lichtwellen

Der Dopplereffekt bei Lichtwellen ist das Analogon für den allgemein bekannten akustischen Dopplereffekt, welcher zum Beispiel beim vorbeifahrenden Krankenwagen zu hören ist. Allgemein lässt sich der Dopplereffekt für jede Art von Wellen formulieren und beschreibt die geschwindigkeitsabhängige Wahrnehmung der Frequenz eines bewegten Oszillators oder Empfängers. Für den Fall von Lichtwellen gilt für die Empfängerfrequenz

$$f_E = f_S \sqrt{\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}}, \quad (3.9)$$

wobei das obere Vorzeichen für eine Annäherung und das untere für ein Entfernen gilt. Im Versuch wird ein Spiegel des Interferometers durch einen Motor in Bewegung versetzt und über die so entstandene Frequenzdifferenz und die in 3.3 bestimmte Wellenlänge die Geschwindigkeit des Spiegels bestimmt werden. Wichtig hierbei ist, dass der Spiegel auf dem Hinweg des Lichtes als Empfänger fungiert und auf dem Rückweg als Sender, weshalb beide Vorzeichenkombinationen Anwendung finden. Für die Frequenzdifferenz gilt

$$\begin{aligned} \Delta f_1 = |f_E - f_S| &= f_S \left| \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 \right| \\ &= f_S \left| \frac{1 + \frac{v}{c} - \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right| \end{aligned}$$

Analog folgt für den Frequenzunterschied beim zweiten Prozess

$$\Delta f_2 = f_S \left| \frac{1 - \frac{v}{c} + \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right|$$

Somit wird der gesamte Frequenzunterschied zu

$$\Delta f = f_S \cdot 2 \frac{\frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \quad (3.10)$$

Da die Geschwindigkeit des Spiegels deutlich kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit, kann der Nenner zu eins genähert werden und es folgt

$$\Delta f = f_S \cdot 2 \frac{v}{c} \quad (3.11)$$

Da der Hin- und Rückweg über die selbe Strecke geht, und beide Lichtwellen die gleiche Amplitude haben, kommt es zur Schwebung. Für die Überlagerung des elektrischen Feldes der Wellen gilt

$$E(t) = E_0 \cdot \cos(2\pi t \cdot f_S) + E_0 \cdot \cos(2\pi t \cdot (f_S + \Delta f)) \quad (3.12)$$

$$= 2E_0 \cdot \cos(\pi \cdot t \cdot \Delta f) \cdot \cos\left(2\pi t \cdot \left(f_S + \frac{\Delta f}{2}\right)\right). \quad (3.13)$$

Dabei beschreibt der vordere Cosinusteil die Einhüllende und der hintere Cosinusterm den eingehüllten, schnell oszillierenden Teil. Ausgehend von der Eingehüllten folgt für die Intensität

$$I(t) \propto |E(t)|^2 \propto \cos^2(\pi \cdot t \cdot \Delta f) = 1 + \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot \Delta f). \quad (3.14)$$

Daher steht die Intensität in direktem Zusammenhang mit der Frequenzdifferenz und dadurch mit der Spiegelgeschwindigkeit. Für die Intensitätsmaxima gilt

$$m \cdot 2\pi \stackrel{!}{=} 2\pi \cdot \Delta f \quad (3.15)$$

$$\implies \Delta f = \frac{m}{t} \quad (3.16)$$

und mit Hilfe von Gleichung 3.11 folgt die Spiegelgeschwindigkeit

$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{2f_S} = \frac{m \cdot c}{2 \cdot t \cdot f_S} = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot t} \quad (3.17)$$

In diesem Versuch wird daher die Zeit für zehn Maxima gemessen. Mit der in 3.3 bestimmten Wellenlänge, kann dann v berechnet werden. Es wurde jeweils die Zeit für 10 Maxima gemessen. Die Messwerte sind über die Zeitmesswerte gemittelt, ergibt sich folgende

Tabelle 3.3: Messergebnisse zu Aufgabe 2.3

t in s
22,20
16,90
16,90
12,89
14,12
14,45
12,63
11,91
11,59
13,20
16,28
13,00

Motorgeschwindigkeit

$$v = 2,42 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.18)$$

Außerdem kann die Spiegelgeschwindigkeit über die in der Zeit zurückgelegte Strecke bestimmt werden. Hier sind die Messwerte folgende. Hier gilt der allgemein bekannte Zusammenhang für gleichförmige unbeschleunigte Bewegung mit

$$v = \frac{\Delta x}{t} = 2,07 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.19)$$

Die beiden Werte für die Spiegelgeschwindigkeit liegen in der gleichen Größenordnung und weichen nicht stark voneinander ab. Eine mögliche Fehlerquelle für die Abweichung beider Werte voneinander, ist die grobe Skala an der Mikrometerschraube. Für 10 Maxima hat sich der Schlitten nur um ca. $3 \mu\text{m}$ bewegt, wobei die Ungenauigkeit hier ca. $0,5 \mu\text{m}$ betrug. Außerdem wurden beide Messungen, die der Streckenänderung und der Zeitdifferenz, von Hand/Auge von zwei unterschiedlichen Personen durchgeführt. Die unterschiedlichen Reaktionszeiten spielen hier ebenfalls mit rein. Außerdem war die Geschwindigkeit des Motors nicht konstant und erreichte stellenweise hohe Geschwindigkeiten, bei der es nicht möglich war, zum exakt richtigen Zeitpunkt die Streckenänderung abzulesen.

Tabelle 3.4: Messergebnisse zu Aufgabe 2.3

Δx in μ m	t in s
5,5	22,20
3,5	16,90
3,0	16,90
2,5	12,89
3,0	14,12
3,0	14,45
2,5	12,63
2,5	11,91
2,5	11,59
3,0	13,20
3,0	16,28
2,5	13,00

3.5 A3.4 - Dopplereffekt bei Schallwellen

Der akustische Dopplereffekt wird mit einer Stimmgabel hörbar gemacht. Dabei wird diese angeschlagen und auf den Experimentator hin beziehungsweise wegbewegt. Entsprechend ist ein höherer/niedrigerer Ton zu hören. Außerdem wird die Stimmgabel auf eine Wand zubewegt. Dabei fungiert die Wand als Spiegel, die reflektierten Schallwellen haben eine andere Frequenz als die ursprünglich ausgesandten; es kommt zur Schwebung, welche auch im Versuch hörbar war.

4. Faraday-Effekt und Pockels-Effekt

Wird ein Magnetfeld in Ausbreitungsrichtung zu linear polarisiertem Licht durch ein transparentes Medium angelegt, so dreht sich die Polarisationssebene. Dieser Effekt heißt **Faraday-Effekt**. Um ihn zu verstehen, ist die Erkenntnis wichtig, dass eine linear polarisierte Welle als Überlagerung von zwei zirkular polarisierten Wellen mit entgegengesetztem Umlaufsinn interpretiert werden kann. Da die meisten Materialien unterschiedliche Brechungsindizes für links bzw. rechts zirkular polarisierte Wellen in dieser Konstellation haben, ändert sich die Polarisationssebene. Ein nützlicher Fakt hierbei ist, dass es keinen Unterschied macht, ob das Magnetfeld parallel oder antiparallel ausgerichtet ist. So kann die Messung zweimal mit unterschiedlichen Magnetfeldrichtungen gemacht werden, um bessere Messwerte zu erhalten. Für den Drehwinkel gilt dabei

$$\delta = V \cdot l_0 \cdot B \quad (4.1)$$

Wobei V die Verdet'sche Konstante ist, l_0 die Länge des durchsichtigen Mediums und B die magnetische Flussdichte.

Der Faraday-Effekt findet in optischen Isolatoren Anwendung. Dabei soll Licht mit einer bestimmten Polarisationsrichtung durchgelassen werden, in die umgekehrte Richtung allerdings Licht mit beliebiger Polarisation abgelenkt oder absorbiert werden. Daher werden optische Isolatoren oft auch als Optische Dioden bezeichnet.

Der **Pockels-Effekt** beschreibt den Einfluss, welchen elektrische Felder auf das Polarisationsverhalten eines Materials haben. Wird eine Spannung bei bestimmten Kristallen angelegt, so können diese Kristalle doppelbrechend werden. Dies geschieht durch Verschiebung der Ionen im Kristallgitter durch das elektrische Feld, was die optischen Eigenschaften des Kristalls ändert. Für die Änderung des Brechungsindex entlang der entsprechende Achsen gilt

$$\Delta n = \frac{1}{2} \cdot n_0^3 \cdot r \cdot E. \quad (4.2)$$

Dabei beschreibt n_0 den unmodifizierten Brechungsindex des Materials, r den effektiven elektro-optischen Tensor und E die elektrische Feldstärke.

Im Versuch wird das E-Feld so gelegt, dass die beiden optischen Achsen jeweils 45° gegen die Polarisationsrichtung gedreht sind. Beim Einfall von linear polarisiertem Licht entstehen so zwei linear polarisierte Wellen mit gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit. Daher treten beide Wellen phasenverschoben aus dem Kristall aus. Für diese Phasenverschiebung gilt

$$\phi = 2\pi \cdot r \cdot n_0^3 \frac{U}{\lambda_0}, \quad (4.3)$$

wobei U die angelegte Spannung ist und λ_0 die Wellenlänge des Lichtes im Vakuum.

Für eine Phasenverschiebung von π folgt dann für die Spannung, welche Halbwellenspannung genannt wird

$$U_{\text{HW}} = \frac{\lambda_0}{2 \cdot r \cdot n_0^3}. \quad (4.4)$$

4.1 Intensitätsmodulierung mit dem Faraday-Effekt

In diesem Versuch wird durch eine Spule ein Strom geschickt, welche ein verstärktes Audio-Signal ist. Das so entstanden Magnetfeld beinhaltet also die Audio-Information. Da der Drehwinkel proportional zur magnetischen Flussdichte ist, kann die Information aus dem Audio-Signal auf das Laserlicht übertragen werden. Das somit modulierte Licht wird dann mit einer Photodiode wieder in Strom umgewandelt und an einen Lautsprecher übertragen. Dieses Verhalten konnte beobachtet werden. Jedoch ist anzumerken, dass für hohe Frequenzen das Signal unscharf wird. Grund dafür könnte die technisch begrenzte Abtastrate der Photodiode sein. Außerdem kann die Information im Audio-Signal für hohe Frequenzen nicht mehr exakt in ein Magnetfeld überführt werden, da, aufgrund der Trägheit der Elektronen, sich das Magnetfeld der Spule nicht schnell genug auf- und abbauen kann.

4.2 Bestimmung der Verdet'schen Konstante für Bleisilikatglas

In diesem Teil wird die Spule mit einem konstanten Strom I betrieben. Das Magnetfeld ist dann

$$B = \mu_0 \mu \frac{N}{l} \cdot I,$$

mit den Permeabilitätszahlen μ und μ_0 , der Windungszahl N und der Länge l der Spule. Wird nun der Drehwinkel δ gemessen, so kann mit 4.1 die Verdet'sche Konstante bestimmt werden. Es folgt

$$V = \frac{\delta}{\mu_0 \mu N I} \quad (4.5)$$

Da es egal ist, ob das Magnetfeld parallel oder antiparallel ausgerichtet ist, werden beide Richtungen verwendet um mehr Messwerte zu erhalten. Zu beachten ist, dass der Strom keine 3A überschreitet, da ansonsten die Erwärmung der Spule einen große Abweichung hervorrufen würde. Die Messwerte sind

Tabelle 4.1: Messergebnisse zu Aufgabe 3.2

I in A	δ in $^\circ$
-3	4
-2	3
-1	1
1	1
2	2
3	3

Damit berechnet sich die Verdet'sche Konstante zu

Tabelle 4.2: Verdet Konstante für Messwerte aus 4.1

V in $\frac{^\circ}{\text{Tm}}$
1326
1492
994
994
994
994
994

Im Mittel ergibt sich die Verdet Konstante somit zu

$$\bar{V} = 1132 \frac{^\circ}{\text{Tm}} \quad (4.6)$$

Ein Literaturwert konnte nicht gefunden werden, womit kein Vergleich der Genauigkeit des Ergebnisses möglich ist. Es lässt sich jedoch sagen, dass aufgrund der sehr geringen Winkeländerungen die Messwerte sehr unpräzise sind.

4.3 Intensitätsmodulierung mit dem Pockels-Effekt

Wie in 4 bereits erklärt, gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Phasendifferenz ϕ der austretenden Welle. Nun kann hinter eine Pockelszelle ein Polarisationsfilter gebracht werden, der bei konstanter Spannung das Licht rausfiltert. Wird nun die Spannung des Audio-Signals zur Modulation verwendet, so ist die Intensität hinter dem Polarisationsfilter proportional zu eben diesem Audio-Signal. Das modulierte Licht wird dann ebenfalls mit einer Photo-Diode an einen Lautsprecher übertragen. Auch dieser Effekt lies sich deutlich erkennen im Versuch.

Außerdem war eine Hyperbelstruktur am Schirm zu sehen. Der Ursprung dieser liegt in der unterschiedlichen Intensität bzw. Gangunterschieden der Strahlen, welche unter unterschiedlichen Winkel in die Pockelszelle eintreffen.

4.4 Bestimmung der Konstante k beim Pockels-Effekt

Der Versuchsaufbau bleibt wie in Aufgabe 3.4. Jetzt wird die Hyperbelstruktur genauer untersucht, um die Pockels-Konstante zu bestimmen. Liegt ein Minimum vor, so besteht kein Gangunterschied zwischen den austretenden Wellen. Bei veränderter Spannung, steigt der Gangunterschied und es entstehen Minima und Maxima. Die Spannungsdifferenz zwischen Maxima und Minima ist die in 4 beschriebene Halbwellenspannung. Für die Pockels-Konstante folgt damit

$$\begin{aligned} \Delta n &= k \cdot E \\ \phi &= \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot k \cdot E \cdot s \\ &= \frac{2\pi k \cdot U}{\lambda_0 d} s \\ \implies U_{\text{HW}} &= \frac{\phi}{U} = \frac{2\pi k}{\lambda_0 d} s. \end{aligned}$$

Dabei ist ϕ die Phasenverschiebung zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl entlang der Strecke s . Damit ist die Pockels-Konstante

$$k = \frac{d \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot s \cdot U_{\text{HW}}} . \quad (4.7)$$

Hier zu bemerken ist die Ähnlichkeit zwischen Doppelbrechung bei mechanischer Spannung und elektrischer Spannung am Kristall. Diese ist jedoch nicht unbedingt verwunderlich, da es sich um einen piezoelektrischen Kristall handelt.

Aus der Messung der Halbwellenspannung ergeben sich folgende Messwerte

Tabelle 4.3: Halbwellenspannung

U_{HW} in V
1. Messung
687
1336
2. Messung
668
1332

Da sich die Spannung nur bis 1700 V hochdrehen lies, konnten nur zwei Messwerte aufgenommen werden. Um jedoch ein bisschen aussagekräftigeres Ergebnis zu erhalten, wurde die Messung wiederholt. Mit 4.7 kann nun die Pockels-Konstante berechnet und gemittelt werden. Gegeben waren $s = 20$ mm, $\lambda_0 = 632,8$ nm und $d = 2$ mm.

Tabelle 4.4: Pockels-Konstante für Halbwellenspannung aus 4.3

k in $10^{-11} \frac{\text{As}}{\text{kgm}}$
1,47
1,55
1,51
1,52

Die gemittelte Pockels-Konstante ist somit

$$\bar{k} = 1,51 \cdot 10^{-11} \frac{\text{As}}{\text{kgm}} \quad (4.8)$$

Auch hier lies sich kein Literaturwert finden. Das Ergebnis ist nicht unbedingt aussagekräftig, aufgrund der sehr geringen Anzahl an Messwerten. Außerdem ist, gerade bei Hochspannungsquellen, die Spannungsangabe recht grob, was eine weitere Fehlerquelle statistischer Natur ist. Zusätzlich ist das Schirmbild schwach zu erkennen gewesen und die Definition von Maxima/Minima geschah eher willkürlich.

5. Optische Aktivität

5.1 Optisches Drehvermögen einer Haushaltszuckerlösung bei verschiedenen Konzentrationen

In der letzten Aufgabe des Versuchs soll das optische Drehvermögen unterschiedlicher Zuckerlösungen untersucht werden. Dabei soll die Abhängigkeit sowohl vom Propagationsweg l des Lasers in der Lösung als auch von der Konzentration K analysiert werden.

Bereits in der vorherigen Aufgabe wurde deutlich, dass das Polarisationsverhalten eines Materials veränderbar ist und beeinflusst werden kann. Zuvor wurde dies durch die Überlagerung mit einem Magnetfeld erreicht. Es gibt allerdings auch Stoffe, die auch ohne äußere Einwirkungen ein solches Verhalten aufzeigen. Das ist unter dem Begriff der optischen Aktivität eines Materials zu verstehen.

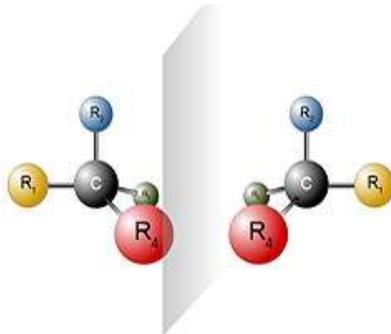


Abbildung 5.1: schematische Darstellung zweier chiraler Moleküle [ma]

Ursache dafür ist die sogenannte Chiralität gewisser Moleküle. Chiralität beschreibt dabei die Eigenschaft bestimmter Objekte oder Systeme, dass ihr Spiegelbild durch Drehung nicht mit dem Original zur Deckung gebracht werden kann (vergleiche Abbildung 5.1). Als gutes Beispiel sind hierfür die menschlichen Hände anzuführen. Im Falle des Versuchs sind es die Molekülstrukturen des Zuckers, die sich nicht in Übereinstimmung bringen lassen. Diese werden auch als Enantiomere bezeichnet.

Wenn nun linear polarisiertes Licht auf eine solche Lösung trifft, wird die Polarisationssebene bei jedem Auftreffen auf ein Molekül um einen gewissen Winkel gedreht. Da die Moleküle allerdings chiral zueinander sind, heben sich diese Verschiebungen im Mittel nicht mehr auf und das Licht weist nach dem Durchlaufen durch die Lösung eine messbare Verdrehung der Polarisationssebene auf. Mathematisch lässt sich dies durch den folgenden Ausdruck festhalten

$$\alpha = \gamma \cdot K \cdot l, \quad (5.1)$$

wobei K die Konzentration der Lösung, l den Propagationsweg durch die Substanz und γ das spezifische optische Drehvermögen beschreibt.

Im Versuch soll die obige Formel experimentell verifiziert werden. Allerdings steht dazu lediglich ein Quader-förmiges Gefäß, dessen Abmessungen im Aufgabenblatt gegeben sind, zur Verfügung, sodass sich nur zwei unterschiedliche Laufwege realisieren lassen. Beginnend bei einer Konzentration von $0,33 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ wird ein Laserstrahl durch die beiden möglichen Wege durch die Lösung gesendet und dahinter der Drehwinkel aufgenommen. Danach wird die Konzentration durch Zugabe von Wasser schrittweise verringert und erneut gemessen. Da die Messung von zwei freien Parametern abhängt bietet es sich an, die Konzentration und den Propagationsweg zu einer Hilfsgröße $H = k \cdot l$ zusammenzufassen und darüber den Drehwinkel aufzutragen. Die exakte Ermittlung des Drehwinkels erfolgt erneut mit Hilfe eines Polarisators, der stets so gedreht wird, dass auf dem Schirm die minimale Intensität auftritt. Die Temperatur und die Wellenlänge des Lichts werden als konstant angenommen und haben damit keine Einfluss auf die Messung. Es konnten folgende Daten erhoben werden.

Tabelle 5.1: Messdaten zu Aufgabe 5

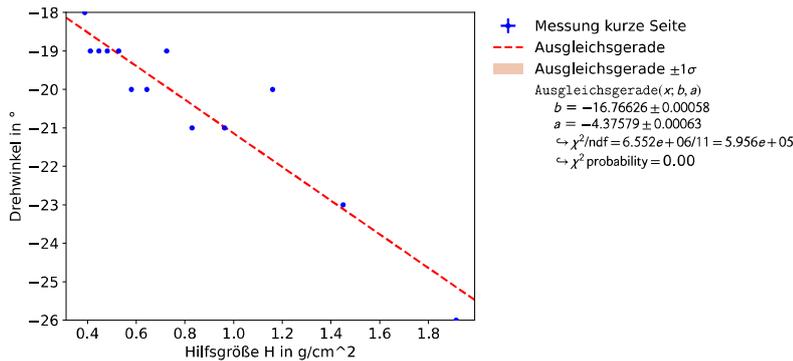
Länge in mm	Konzentration in g	Hilfsgröße H in	Drehwinkel
58	0,333	1,914	-26
198	0,333	6,534	133
58	0,250	1,450	-23
198	0,250	4,950	141
58	0,200	1,160	-20
198	0,200	3,960	145
58	0,166	0,963	-21
198	0,166	3,287	148
58	0,143	0,829	-21
198	0,143	2,831	150
58	0,125	0,725	-19
198	0,125	2,475	151
58	0,111	0,644	-20
198	0,111	2,198	153
58	0,100	0,58	-20
198	0,100	1,98	154
58	0,091	0,528	-19
198	0,091	1,802	155
58	0,083	0,481	-19
198	0,083	1,643	156
58	0,077	0,447	-19
198	0,077	1,524	156
58	0,071	0,411	-19
198	0,071	1,406	157
58	0,067	0,389	-18
198	0,067	1,327	157

Das Vorzeichen folgt dabei der gleichen Definition, die in den vorherigen Aufgaben eingeführt wurde. Dabei erwies sich die Messung als sehr schwierig, da der Polarisationsfilter mit nur einer sehr groben Winkel-Skala ausgestattet war und die Drehwinkel vor Allem gegen Ende der Messung so gering waren, dass die Veränderungen nicht mehr richtig wahrgenommen werden konnten. Das erklärt, weshalb sich die letzten Wertepaare in der Tabelle 5.1 kaum verändern. Zudem ist anzumerken, dass wenn die Konzentration bei eingeschaltetem Laser verändert wird, kurzzeitig ein krummer Laufweg in der Küvette auftritt. Dies ist auf die

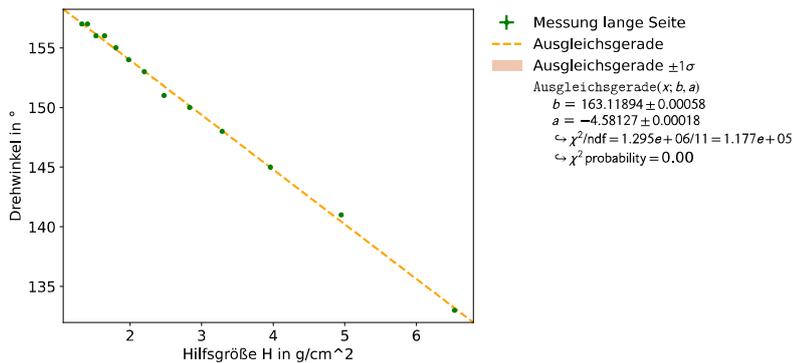
Diffusion zwischen Wasser und Zucker zurückzuführen, bei der erst nach einer gewissen Zeit eine Gleichverteilung zwischen Zucker- und Wassermolekülen eintritt.

Um aus diesen Daten nun Aussagen über das optische Drehvermögen der Zuckerlösung zu treffen, empfiehlt es sich, diese gegeneinander graphisch aufzutragen. Hierbei lässt die Formel 5.1 einen linearen Zusammenhang zwischen Drehwinkel und steigendem Propagationsweg oder steigender Konzentration erwarten, weshalb an den Daten bereits eine lineare Regressionsanalyse durch kafe2 durchgeführt wurde. Auf diese Weise ergeben sich folgende Schaubilder:

Abbildung 5.2: Drehvermögen der Zucker-Lösung



(a) Messung kurze Seite



(b) Messung lange Seite

Anhand dieser Darstellungen folgt sofort, dass die Zuckerlösung optisch rechts-drehend ist. Das folgt daraus, da beide Geraden eine negative Steigung aufweisen, was gemäß der obigen Definition optisch rechts-drehend bedeutet. Darüber hinaus ist ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen Drehwinkel und steigendem Propagationsweg oder steigender Konzentration zu vernehmen, wodurch sich die obigen Vermutungen bestätigen lassen. Mittels der linearen Regressionsanalyse durch kafe2 ergeben sich aus den Werten der Geradensteigungen die optischen Drehvermögen

$$\gamma_{\text{zucker, kurz}} = -437,57 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3 \text{m}} \quad \text{und} \quad \gamma_{\text{zucker, lang}} = -458,12 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3 \text{m}} . \quad (5.2)$$

Im Mittel ergibt sich damit der Wert

$$\gamma_{\text{zucker}} = -448,84 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3 \text{m}} \quad (5.3)$$

Dieses Ergebnis lässt sich allerdings nur bedingt überprüfen, da kein Literaturwert für die zu überprüfenden Werte angegeben ist. Nach eigener Recherche im Internet ist Zucker

tatsächlich optisch rechts-drehend und hat ein optische Drehvermögen von rund $-600 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3 \text{m}}$. Somit ist eine deutliche Abweichung zum Messwert festzustellen.

Diese Abweichung ist dabei vor Allem der unpräzisen Messung des Drehwinkels zuzuschreiben. Der verwendete Polarisationsfilter weist eine Skaleneinheit von lediglich einem Grad auf. Alleine deshalb ist von einem Messfehler von einer Halben Skaleneinheit auszugehen. Dieser macht sich besonders im Verlauf der Messung bemerkbar, da die Drehwinkel zunehmend kleiner wurden und die Veränderungen am Polarisator kaum wahrzunehmen waren. Darüber hinaus wurden jegliche Effekte und Materialeigenschaften der gläsernen Küvette auf den Laserstrahl vernachlässigt. Dieser wird beim Durchgang durch die Wände ebenso beeinflusst, was sich auf den Drehwinkel auswirkt. Allerdings bleibt dieser Durchlauf immer der Gleiche, weshalb es sich hierbei eher um einen systematischen Fehler handeln sollte. Zuletzt spielen sicherlich die obigen Vernachlässigungen der Temperatur und der Wellenlänge des Lasers eine Rolle, da die Teilchenbewegung der Zucker-Moleküle mit der Temperatur zunimmt, wodurch sich die Auftreff-Wahrscheinlichkeit des Laserstrahls auf ein Molekül und damit die Anzahl an Streuungen in der Lösung verändert.

Es zeigt sich also, dass sich der Versuch eher zur groben Bestimmung des optischen Drehvermögens von Molekülen eignet. Nichtsdestotrotz konnte die optische Drehrichtung durch den Versuch eindeutig bestätigt werden.

5.2 Optisches Drehvermögen einer Sorbose-Lösung

Nach der Untersuchung von Haushaltszucker soll abschließend noch eine Sorbose-Lösung im Experiment begutachtet werden. Da die Sorbose-Lösung allerdings vergleichsweise teurer ist, wird die Konzentration nun nicht mehr verändert, sondern ausschließlich der gegebene Fall untersucht. Der Versuchsaufbau wird, nach dem Wechsel der Küvette, weiterverwendet und das Messverfahren bleibt identisch.

In diesem Fall lässt es die Messung also nur zu, zwei Werte für die unterschiedlich langen Seiten des Behälters aufzunehmen.

Tabelle 5.2: Messdaten der Sorbose-Lösung

Länge in mm	Konzentraion in g	Hilfsgröße H in	Drehwinkel
58	0,333	1,9314	-9
198	0,333	6,5934	5

Graphisch ergibt sich somit das folgende Diagramm

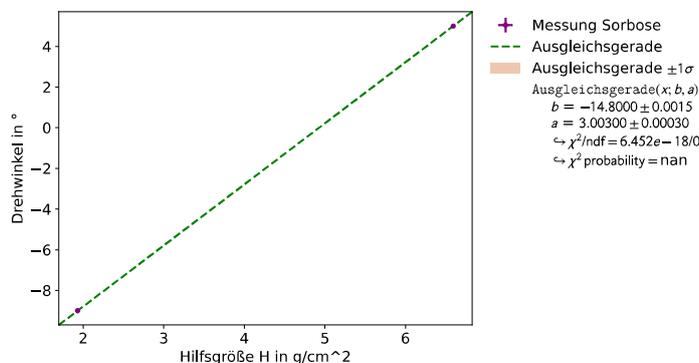


Abbildung 5.3: Messung Sorbose

Dieser Graph macht deutlich, dass die Sorbose-Lösung, im Gegenteil zum Zucker, optisch links-drehend ist, was in diesem Fall auf die eindeutig positive Steigung der Geraden zurückzuführen ist. Auch hier ist zu erkennen, dass der Drehwinkel mit steigendem Propagationsweg oder steigender Konzentration linear zunimmt. Diese Aussage ist allerdings vorsichtig zu betrachten, da es nur zwei Messpunkte gibt, anhand welcher der Plot erstellt wird. Nichtsdestoweniger ergibt sich mit Hilfe der Ausgleichsgerade von kafe2 ein optisches Drehvermögen von

$$\alpha_{\text{sorbose}} = 300,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3 \text{m}} . \quad (5.4)$$

Zu diesem Wert ist auch nach ausführlicher Recherche kein Vergleichswert zu finden, weshalb sich der Wert nicht überprüfen lässt. Somit folgt auch an dieser Stelle, unter den selbigen oben angeführten Unsicherheiten, das Ergebnis, dass der Versuch im Vordergrund zur Bestimmung der Drehrichtung und nur groben Abschätzung des optischen Drehvermögens dient.

Literaturverzeichnis

- [Dem18] Demtröder, W.: *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*. Springer DE, Berlin, 8. Auflage, 2018, ISBN 978-3-662-54846-2.
- [ma] az.de mt: *Chirale Chromatographie*. Stand 08.05.2022, Website, <https://mz-at.de/de/chromatographie/fluessigchromatographie/trenntechniken/chirale-chromatographie/> Auflage.
- [TA] Tobias Abzieher, Philipp Mogg: *Musterprotokoll-SS10*. Simonis, Website, gemeinfrei <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~simonis/praktikum/musterprotokolle/p2/laserb/laserb-2010-tobiasabzieher+philippmogg.pdf> Auflage.