

# C11 – Polarisation

## Physikpraktikum

---

Tobias Krähling  
eMail: <Tobias.Kraehling@SemiByte.de>  
Homepage: <www.SemiByte.de>

25.04.2008  
Version: 1.2

<b>Stichworte:</b> Doppelbrechung; optische Achse; Kristallhauptschnitt; ordentlicher und außerordentlicher Strahl; Gangunterschied; $\lambda/4$ -Plättchen; positiv und negativ einachsige Kristalle; linear, zirkular und elliptisch polarisiertes Licht; optische Aktivität; Halbschattenprinzip; Saccharimetrie; Strahlungsleistung
<b>Literatur:</b> [Dem06], [GKV86], [Kuc94], [Lin93], [Tip98], [Mey06], [Wal94], [Hau92]

## 1. Versuchsaufgaben

1. Schematische Skizze des Versuchsaufbaus.
2. Abschätzung der Bandbreite des Grünfilters.
3. Messung der Strahlungsleistung als Funktion des Drehwinkels eines Polarisationsfilters (Analysator)
  - a) für linear polarisiertes Licht;
  - b) für zirkular polarisiertes Licht;
  - c) für elliptisch polarisiertes Licht.
4. Saccharimetrie:
  - a) Messung des Halbschattenwinkels des verwendeten Polarimeters.
  - b) Bestimmung des Drehvermögens von Zucker.
  - c) Bestimmung der Konzentration einer Zuckerlösung.

## 2. Grundlagen

Interferenz- und Beugungserscheinungen lassen sich durch die Wellennatur von elektromagnetischer Strahlung erklären. Die Polarisation zeigt zusätzlich, daß es sich um *transversale* Wellen handelt, d. h. die Schwingungsrichtung steht senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung. Dabei wurde die Schwingungsrichtung der elektrischen Feldstärke  $E$  willkürlich als Polarisationsrichtung festgelegt worden, senkrecht auf Ausbreitungsrichtung und  $E$ -Feld schwingt die magnetische Feldstärke  $H$ . Für Interferenzerscheinungen von zwei Wellenzügen mit gleicher Frequenz ist daher nicht nur die Phasendifferenz zwischen diesen, sondern auch die Polarisationsrichtung entscheidend. Zwei Wellen, deren Polarisationsrichtung senkrecht zueinander stehen, können nicht miteinander interferieren.

Atome einer Lichtquelle emittieren elektromagnetische Strahlung in allen möglichen Schwingungsrichtungen – da die einzelnen Atome nicht in einer festen gekoppelten Schwingungsbeziehung zueinander stehen – und ist daher unpolarisiert. Dies wird auch als *natürliches Licht* bezeichnet. Mit geeigneten Polarisatoren ist es möglich, Licht mit nur einer Schwingungsrichtung zu erzeugen. Dies wird *Polarisation* genannt. Je nach Art der zeitlichen Schwingungsrichtung an einem festen Raumpunkt unterscheidet man die Polarisationsformen:

**linear polarisiert:** Nach der Polarisation hat das Licht nur eine feste Schwingungsrichtung. Diese Form kann beispielsweise durch Reflexion unter dem Brewster-Winkel

$$\tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

erzeugt werden.

**zirkulär polarisiert:** An einem festen Raumpunkt rotiert die Schwingungsrichtung auf einer Kreisbahn. Dies kann u. a. durch ein  $\lambda/4$ -Plättchen erreicht werden, dessen optische Achse um  $45^\circ$  gegen die Polarisationsrichtung  $\vec{E}$  der einfallenden, linear polarisierten Welle verschoben ist.

**elliptisch polarisiert:** Die Schwingungsrichtung beschreibt eine elliptische Bahn, dies kann ebenfalls über ein  $\lambda/4$ -Plättchen mit einfallendem linear polarisierten Licht erzeugt werden, wobei die optische Achse gerade nicht um  $45^\circ$  gegen die Polarisationsrichtung gedreht ist.

Wie oben angeführt ist sowohl das Sonnenlicht als auch das Glühlampenlicht unpolarisiert. Erreicht das Sonnenlicht die Erdatmosphäre, so wird es von den dort vorhandenen Atomen und Molekülen ggf. durch Stoßprozesse gestreut, wobei dieses Streulicht anschließend polarisiert ist (dies wird u.a. in der Photographie ausgenutzt).

Beim Eintritt von Licht in ein Medium muß zwischen *optisch isotrop* und *optisch anisotrop* unterschieden werden. In isotropen Medien ist die Lichtgeschwindigkeit in *allen* Raumrichtungen gleich – dies trifft u. a. auf Gläser, Flüssigkeiten und bestimmte reguläre Kristalle zu. Bei optisch anisotropen Medien, insbesondere Kristalle wie Kalkspat, wird das Licht in zwei aufeinander senkrecht (linear) polarisierte Strahlen aufgespalten. Der sogenannte *ordentliche* Strahl gehorcht dem SNELLIUSSchen Brechungsgesetz, seine Geschwindigkeit im Kristall ist wie in einem isotropen Medium von der Richtung unabhängig. Der *außerordentliche* Strahl hingegen gehorcht diesem Gesetz nicht – seine Geschwindigkeit und somit seine Brechzahl hängt vom Einfallswinkel ab, beim senkrechten Einfall wird er abgelenkt. Nur längs der *optischen Achse* des Mediums ist die Geschwindigkeit beider Strahlen gleich groß. Diese optische Achse wird durch eine kristallographische Hauptachse festgelegt, der Kristallhauptschnitt eines doppelbrechenden Kristalls ist jede Ebene, die die kristallographische Achse enthält. Als *Dichroismus* wird dabei der Effekt bezeichnet, daß in Abhängigkeit von der Blickrichtung der Kristall in zwei verschiedenen Farben erscheint (bei mehrfarbigkeit wird dies als *Pleochroismus* bezeichnet), ursächlich hierfür ist das unterschiedliche Absorptionsverhalten bezüglich des ordentlichen und außerordentlichen Strahls. Durch das starke Absorptionsverhalten von Kalkspat für ultraviolettes Licht ist dieser nicht für die Polarisation von UV-Licht geeignet. Wird eine aus dem Kristall geschnittene planparallele Platte, dessen optische Achse in der Plattenebene geschnitten ist, so in den Strahlengang einer linear polarisierten Welle gebracht (Ausbreitungsrichtung in z-Richtung, Abb. 1), daß die optische Achse um  $45^\circ$  gegen die Polarisationsrichtung  $E$  der einfallenden Welle geneigt, so erfahren die beiden senkrecht zueinander polarisierten Anteile der Welle unterschiedliche Brechungsindizes. Nach dem Durchlauf durch die Platte mit Dicke  $d$  haben sie daher eine relative Phasenverschiebung von

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} d(n_x - n_y) \quad (2)$$

Von einem  $\lambda/4$ -Plättchen spricht man dann, wenn die Dicke gerade so gewählt wird, daß  $d(n_y - n_x) = \lambda_0/4$  (also  $\Delta\varphi = \pi/2$ ) – von einem  $\lambda/2$ -Plättchen, wenn  $d(n_y - n_x) = \lambda_0/2$  ( $\Delta\varphi = \pi$ ).

Das *Nicol'sche Prisma*, zur Erzeugung von linear polarisiertem Licht, wird aus einem doppelbrechenden negativ optisch einachsigen Rhomboederkristall hergestellt, der entlang der diagonalen Fläche schräg zur optischen Achse aufgeschnitten und mit einem Kleber wieder zusammengefügt wird (siehe Abb. 2) [Dem06, S. 248]. Damit der ordentliche Strahl an der

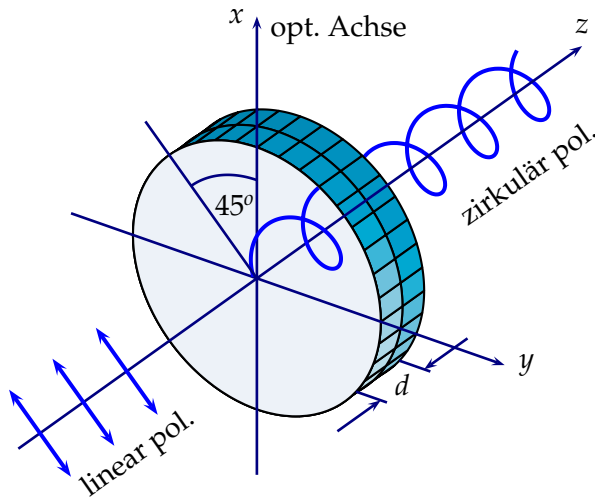


Abbildung 1: λ/4-Plättchen

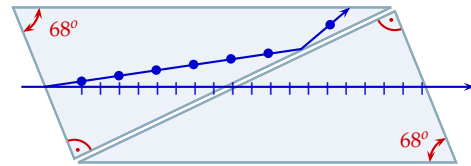


Abbildung 2: Nicol'sches Prisma

Klebefläche totalreflektiert wird (um an den Rändern adsorbiert zu werden) und der außerordentliche Strahl hindurchgelassen wird (als polarisierter Nutzstrahl), muß als Kleber ein Material verwendet werden, der dies realisiert und ist abhängig von dem Brechwert des Klebers. Diese Eigenschaft erfüllt – neben der Transmissionseigenschaft – sowohl Kanadabalsam als auch Leinöl.

Wird zirkular polarisiertes Licht durch ein λ/4-Plättchen geleitet, so wird dies durch die Schwingungsdrehung zu linear polarisiertem Licht, durchgeleitetes unpolarisiertes Licht bleibt weiterhin unpolarisiert. Mit einem Polarisationsanalysator läßt sich anschließend überprüfen, ob das auf diesen eintreffende Licht linear polarisiert ist.

### 2.1 Laurent'sche Platte

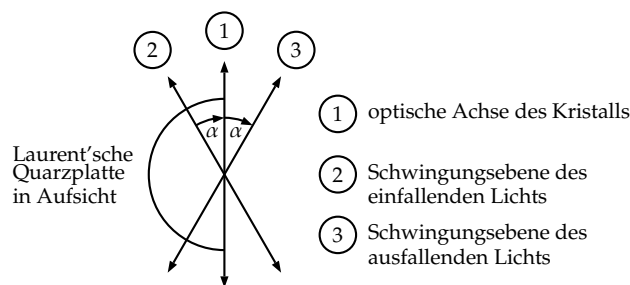


Abbildung 3: Laurent'sche Platte

Die Laurent'sche Platte ist eine λ/2-Plättchen und wirkt daher wie ein Polarisationsdreher. Fällt die durchsetzende Welle unter einem Winkel φ ein, so läßt sich der E-Vektor in die Komponenten  $E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi$  und  $E_{\perp} = E_0 \sin \varphi$  parallel bzw. senkrecht zur optischen Achse zerlegen, die in der Eintrittsfläche in Phase sind. Nach Durchlauf des λ/2-Plättchens haben sie eine Phasendifferenz  $\Delta\varphi = \pi$  ( $d$  ist nach Gl. (2) so gewählt). Mit  $z = d$  und  $E = E_0 \exp \{i(\omega t - kz)\}$  sowie  $(k_{\perp} - k_{\parallel})d = \pi$  erhält man:

$$E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi e^{ik_{\parallel}d} e^{i\omega t} \quad \text{und} \quad E_{\perp} = E_0 \sin \varphi e^{ik_{\perp}d} e^{i\omega t} = -E_0 \sin \varphi e^{ik_{\parallel}d} e^{i\omega t} \quad \text{da} \quad k_{\perp} = \frac{\pi}{d} + k_{\parallel},$$

sodaß sich der E-Vektor um den Winkel  $\Delta\alpha = 2\varphi$  gedreht hat. D. h. fällt der Strahl unter einem Winkel φ zur optischen Achse ein, so fällt er unter -φ zur optischen Achse aus.

## 2.2 Optisch aktive flüssige Verbindungen

Neben Kristallen vermögen einige flüssige chemische Verbindungen die Polarisationssebene von linear polarisiertem Licht zu drehen. Bei stereoisomeren Molekülen (Verbindungen gleicher Konstitution, jedoch unterschiedlicher Anordnung der Atome im Raum), wo keine Kongruenz von Objekt und Spiegelbild vorliegt, werden *chiral* genannt. Stereoisomere, deren Moleküle chiral sind und sich wie Objekt und Spiegelbild verhalten, werden Enantiomere genannt und sind optisch aktiv. Zwei Enantiomere drehen die Polarisationsseben um den gleichen Winkel, jedoch in unterschiedlicher Richtung – alle anderen physikalischen und chemischen Eigenschaften bleiben gleich. In der Nomenklatur werden rechtsdrehende Enantiomere durch ein (+), linksdrehende durch ein (–) gekennzeichnet. Zu den optisch aktiven Substanzen zählen u. a. die meisten Zucker (Saccharide), Milchsäure, Terpene (Bestandteil von ätherischen Ölen). Mischungen aus gleichen Anteilen beider Enantiomere (links- und rechtsdrehender Strukturisomere) werden Racemform oder Racemat genannt. Die Saccharimetrie ist ein Verfahren, um chemische Konzentrationen von optisch aktiven Substanzen über diese Polarisationsdrehung zu bestimmen. Dabei ist die Drehung  $\alpha$  proportional zur Konzentration  $c$  und der Lichtweglänge  $l$ , normiert mit einer Stoffkonstanten  $\alpha_0$ :

$$\alpha = \alpha_0 c l \quad \text{mit} \quad [c] = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}; \quad [\alpha_0] = \frac{\text{°cm}^2}{\text{g}} \quad (3)$$

### 2.2.1 Chiralität am Beispiel von $\alpha$ -Pinen

Abschließend soll zum Begriff der Chiralität ein Beispiel angebracht werden. Das  $\alpha$ -Pinen ist ein bicyclisches Monoterpen und Hauptbestandteil, neben  $\beta$ -Pinen, von Terpentinöl und kommt in Pinusarten (Kiefern) vor. Die beiden Enantiomere sind

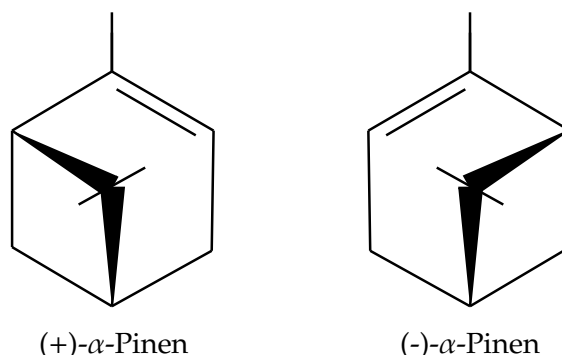


Abbildung 4: Enantiomere des  $\alpha$ -Pinen

Man erkennt, das Objekt und Spiegelbild allein durch Drehung um die Raumachsen nicht kongruent übereinandergelegt werden können – es handelt sich um optisch aktive Enantiomere<sup>1</sup>.

## 3. Versuchsbeschreibung

### 3.1 Aufgabe 2

Dieser Teil wird ohne Polarisationsfilter durchgeführt.

1. Bestimmung der Lichtintensität jeweils mit ( $I_{GF}$ ) und ohne ( $I_0$ ) zwischengeschalteten Grünfilter mittels der Selenphotozelle;

<sup>1</sup>Pinen wurde als Beispiel gewählt, da es im Gegensatz zu Zuckern ein einfaches Molekül ist.

2. Die Bandbreite  $B$  des Grünfilters kann über die Beziehung

$$B = \Delta\lambda \frac{I_{GF}}{I_0} \quad (4)$$

bestimmt werden,  $\Delta\lambda$  ist der Empfindlichkeitsbereich der Photozelle;

### 3.2 Aufgabe 3

- Versuchsaufbau ist wie in Aufgabe 1 skizziert. Als Lichtquelle wird eine Niedervoltlampe verwendet, zwischen Polarisator und Analysator ist eine Irisblende eingefügt.
- Der Photostrom von der Photozelle für die Strahlungsmessung wird mittels einem Vielfachmeßinstrument bestimmt.
- Vor der Meßwertaufnahme ist zu prüfen, daß keine Untergrundstrahlung von der Photozelle registriert wird (durch Unterbrechung des Lichtstrahls).
- Photostrom ist über die Irisblendenöffnung so einzustellen, daß bei maximalen Durchlaß von Analysator und Polarisator der empfindlichste Meßbereich des Vielfachmeßinstrument voll ausgenutzt wird (Raumbeleuchtung ausschalten!).
- Der Grünfilter wird verwendet, da der Brechwert  $n$  von der Wellenlänge abhängt – um diesen Effekt hier zu minimieren, wird eine sehr schmalbandiges Strahlungsspektrum verwendet.

#### 3.2.1 Aufgabe 3a)

1. Verwendung nur des Polarisators.
2. Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Winkelstellung des Analysators aufnehmen. Einteilung:  $10^\circ$  für  $0^\circ - 90^\circ$ ,  $30^\circ$  für  $90^\circ - 360^\circ$ .
3. Meßpunkte in ein rechtwinkliges Koordinatensystem eintragen.

#### 3.2.2 Aufgabe 3b)

1. Polarisator und Analysator in gekreuzte Stellung zueinander bringen.
2. zwischen beiden das  $\lambda/4$ -Plättchen stellen.
3. Plättchen solange drehen, bis Photostrom minimal wird.
4. Analysator drehen, bis Photostrom maximal wird und Photostrom notieren
5.  $\lambda/4$ -Plättchen um  $45^\circ$  drehen und Photostrom notieren
6. In dieser Konstellation Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Winkelstellung des Analysators aufnehmen und in das Diagramm aus 3a) eintragen.
7. Grünfilter entfernen und auf weißer Papierfläche hinter dem Analysator den Farbwechsel bei Drehung des Analysators beobachten und erklären.

#### 3.2.3 Aufgabe 3c)

1. Für einen dazwischenliegenden Drehwinkel des  $\lambda/4$ -Plättchens (aus Aufgabe 3b) erhält man elliptisch polarisiertes Licht.
2. Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Winkelstellung des Analysators aufnehmen und in das Diagramm aus 3a) eintragen.

### 3.3 Aufgabe 4

1. durch Drehen des Analysators (inkl. Laurent'sche Platte) nacheinander jeweils eine der beiden Gesichtsfeldhälften auf „dunkel“ einstellen und durch die Differenz der beiden Stellen den Winkel  $\varphi$  bestimmen;
2. Zwischen beiden „Dunkelstellungen“ gibt es eine Stellung gleicher Helligkeit, die im folgenden zur Festlegung des Analysatorwinkels dient.

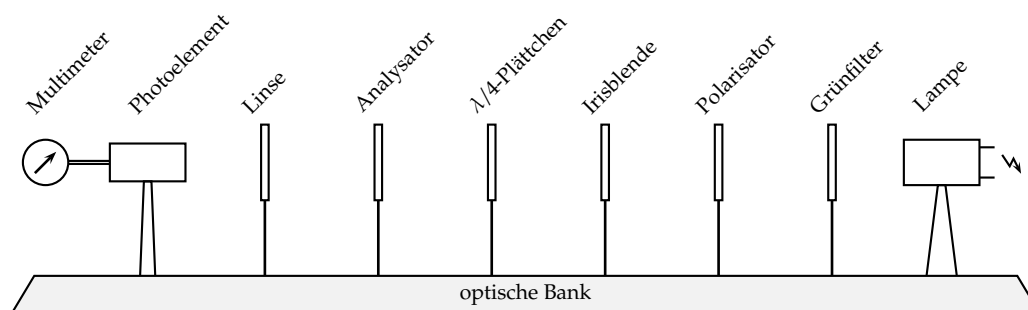
**Aufgabe 4a)** Drehwinkel für destilliertes Wasser bestimmen

**Aufgabe 4b)** Drehwinkel und spezifische Drehung für Normallösung bestimmen

**Aufgabe 4c)** Drehwinkel und Konzentration für unbekannte Zuckerlösung bestimmen

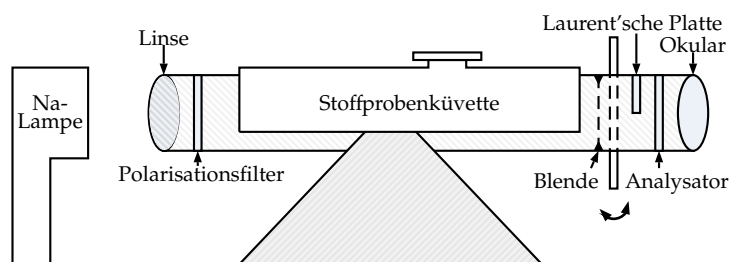
## 4. Versuchsaufbau

### 4.1 Aufgabe 2 und 3



**Abbildung 5:** Versuchsaufbau zu Aufgabe 2 und 3

### 4.2 Aufgabe 4



**Abbildung 6:** Versuchsaufbau zu Aufgabe 4

## 5. Meßwerte

### 5.1 Aufgabe 2

$i$	$I_0 / \mu\text{A}$	$I_{GF} / \mu\text{A}$	$B / \text{nm}$	Meßbereich
1	9,6	0,75	23,44	$10 \mu\text{A}$
2	27,5	2,75	30,00	$30 \mu\text{A}$
3	27,5	2,75	30,00	$30 \mu\text{A}$
4	27,25	2,75	30,28	$30 \mu\text{A}$
5	9,55	0,85	26,70	$10 \mu\text{A}$

$i$  : laufende Nummer  
 $I_0$  : Strom ohne Filter  
 $I_{GF}$  : Strom mit Filter  
 $B$  : Bandbreite (berechnet)

Tabelle 1: Meßwerte Aufgabe 2

### 5.2 Aufgabe 3

$i$	$\varphi / ^\circ$	$I / \mu\text{A}$	$I_R / \mu\text{A}$	$i$	$\varphi / ^\circ$	$I / \mu\text{A}$	$I_R / \mu\text{A}$
1	0	9,3	9,3	11	120	3,1	2,33
2	10	8,75	9,02	12	150	7,65	6,98
3	20	7,9	8,21	13	180	9,25	9,30
4	30	6,5	6,98	14	210	6,5	6,98
5	40	4,95	5,46	15	240	1,95	2,33
6	50	3,45	3,84	16	270	0,1	0,00
7	60	2,0	2,33	17	300	3,1	2,33
8	70	0,9	1,09	18	330	7,7	6,98
9	80	0,25	0,28	19	360	9,25	9,30
10	90	0,1	0				

$i$  : laufende Nummer  
 $\varphi$  : Winkel Analysator  
 $I$  : gemessener Strom  
 $I_R$  : theoretischer Strom mit  
 $I_1 = I_0$

Tabelle 2: Meßwerte Aufgabe 3a

$i$	$\varphi / ^\circ$	$I / \mu\text{A}$	$I_R / \mu\text{A}$	$i$	$\varphi / ^\circ$	$I / \mu\text{A}$	$I_R / \mu\text{A}$
1	0	4,5	4,5	11	120	3,7	4,5
2	10	4,65	4,5	12	150	4,1	4,5
3	20	4,7	4,5	13	180	4,55	4,5
4	30	4,7	4,5	14	210	4,7	4,5
5	40	4,65	4,5	15	240	4,35	4,5
6	50	4,5	4,5	16	270	3,9	4,5
7	60	4,3	4,5	17	300	3,7	4,5
8	70	4,15	4,5	18	330	4,1	4,5
9	80	4,0	4,5	19	360	4,6	4,5
10	90	3,0	4,5				

$I_{max} = 8,45 \mu\text{A}$      $\alpha_{\text{Pola}} = 270^\circ$   
 $I_{min} = 3,9 \mu\text{A}$      $\alpha_{\text{Ana}} = 90,5^\circ$   
 $\alpha_{\lambda/4} = 358^\circ$

$i$  : laufende Nummer  
 $\varphi$  : Winkel Analysator  
 $I$  : gemessener Strom  
 $I_R$  : theoretischer Strom mit  
 $I_1 = I_0$

Tabelle 3: Meßwerte Aufgabe 3b

$i$	$\varphi/^\circ$	$I/\mu\text{A}$	$i$	$\varphi/^\circ$	$I/\mu\text{A}$
1	0	3,8	11	120	5,7
2	10	3,3	12	150	5,2
3	20	2,9	13	180	3,75
4	30	2,7	14	210	2,7
5	40	2,7	15	240	3,2
6	50	2,9	16	270	4,65
7	60	3,15	17	300	4,6
8	70	3,65	18	330	5,2
9	80	4,1	19	360	3,8
10	90	4,6			

$\alpha_{\lambda/4} = 30^\circ$

$i$  : laufende Nummer  
 $\varphi$  : Winkel Analysator  
 $I$  : gemessener Strom

Tabelle 4: Meßwerte Aufgabe 3c

### 5.3 Aufgabe 4

$i$	$\varphi_1/^\circ$	$\varphi_2/^\circ$	$\varphi/^\circ$
1	+5,8	-4,1	—
2	+5,4	-5,0	0,2
3	+5,2	-4,2	0,5
4	+5,8	-4,1	0,9
5	+5,8	-4,4	0,7
6	+5,7	-4,7	0,5
7	+40,3	+29,9	35,1
8	+40,7	+30,2	35,5
9	+39,9	+30,4	35,2
10	+40,6	+30,4	35,5
11	+40,3	+30,5	35,4
12	+30,4	+21,6	26,0
13	+30,5	+21,4	26,0
14	+30,7	+21,9	26,3
15	+30,6	+21,9	26,3
16	+30,8	+20,7	25,8

$i_1$  : in Luft  
 $i_2 - i_6$  : Wasser  
 $i_7 - i_{11}$  : Zuckernormallösung  
 $i_{12} - i_{16}$  : unbekannte Zuckerlösung

H<sub>2</sub>O-Küvette  $l = 200,0\text{ mm}$   
Zuckerlösung  $l = 200,0\text{ mm}, c = 26,0\text{ g}/100\text{ ml}$   
unbekannte Zuckerlösung  $l = 190,1\text{ mm}$

$i$  : laufende Nummer  
 $\varphi_1$  : Dunkelstellung 1  
 $\varphi_2$  : Dunkelstellung 2  
 $\varphi$  : Drehwinkel (berechnet)

Tabelle 5: Meßwerte Aufgabe 4

## 6. Auswertung

### 6.1 Aufgabe 2

Bei dieser Aufgabe sollte die Bandbreite des Grünfilters abgeschätzt werden. Nach der Versuchsanleitung ist die Photozelle im Bereich 400 nm – 700 nm empfindlich, d.h.  $\Delta\lambda = 700\text{ nm} - 400\text{ nm} = 300\text{ nm}$ . Die mit Gl. (4) bestimmte Bandbreite ist bereits in Tabelle 1 für jede Messung eingetragen. Die Messungen wurden für zwei verschiedene Meßbereiche durchgeführt, jeweils so eingestellt, das  $I_0$  möglichst den Meßbereich des Vielfachinstruments ausschöpft (über die Irisblendenöffnung).



Im Mittel erhält man für die Bandbreite:

$$\begin{aligned} \text{Meßbereich } 10 \mu\text{A: } i_1, i_5: \quad \bar{B}_{10 \mu\text{A}} &= 25,07 \text{ nm} \\ \text{Meßbereich } 30 \mu\text{A: } i_2 - i_4: \quad \bar{B}_{30 \mu\text{A}} &= 30,09 \text{ nm} \end{aligned}$$

### 6.1.1 Fehlerabschätzung

Für den Meßbereich  $10 \mu\text{A}$  beträgt die Skalenteilung  $0,1 \mu\text{A}$  und es ist möglich, den Wert auf  $0,05 \mu\text{A}$  abzuschätzen – beim Meßbereich  $30 \mu\text{A}$  ist die Skalenteilung  $0,5 \mu\text{A}$  mit der Abschätzungsmöglichkeit auf  $0,25 \mu\text{A}$ .

$$\Rightarrow \Delta I_{10 \mu\text{A}} = \pm 0,05 \mu\text{A} \quad ; \quad \Delta I_{30 \mu\text{A}} = \pm 0,25 \mu\text{A}$$

Da nur wenige Meßwerte aufgenommen wurden, wird der Maximalfehler des Funktionswertes von Gl. (4) für die Abschätzung des Fehlers bestimmt, die Bestimmung des mittleren Fehlers (Gauß'sche Fehlerfortpflanzung) sowie Standardabweichungen sind aufgrund der geringen Datenlage nicht sinnvoll einsetzbar.

Der Maximalfehler  $\Delta F$  einer berechneten Größe  $F$  läßt sich mit den Fehlergrenzen  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots$  der einzelnen Meßgrößen bestimmen über:

$$\Delta F = \pm \left[ \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta \bar{x}_1 \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta \bar{x}_2 \right| + \dots \right]$$

Mit Gl. (4) erhält man mit den Meßwerten:

$$\begin{aligned} \Delta B &= \pm B \left[ \left| \frac{\Delta I}{I_0} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I_{GF}} \right| \right] \\ \Delta B|_{10 \mu\text{A}} &= \pm 2 \text{ nm} \\ \Delta B|_{30 \mu\text{A}} &= \pm 3 \text{ nm} \end{aligned}$$

Damit erhält man:

$$\begin{aligned} B_{10 \mu\text{A}} &= 25 \text{ nm} + 2 \text{ nm} = 25 \text{ nm} (1 \pm 7 \%) \\ B_{30 \mu\text{A}} &= 30 \text{ nm} + 3 \text{ nm} = 30 \text{ nm} (1 \pm 10 \%) \end{aligned}$$

### 6.1.2 Bewertung

Man sieht, daß die Meßwerte bei dem kleinsten Meßbereich einen kleineren Fehler aufweisen – obwohl die Beleuchtungsstärke wesentlich kleiner war. Durch größere Meßreihen könnte die Fehlerschranke wahrscheinlich verkleinert werden. Mit den erhaltenen Werten kann die Bandbreite des Grünfilters auf  $B = 27 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$  abgeschätzt werden.

## 6.2 Aufgabe 3

Hier sollte die Strahlungsleistung in Abhängigkeit des Analysatorwinkels für verschieden polarisiertes Licht durchgeführt werden.

Für linear polarisiertes Licht erhält man über das Gesetz von Malus die theoretischen Werte für die jeweiligen Drehwinkel des Analysators und sind in Tabelle 2 eingetragen. Tritt unpolarisiertes Licht durch einen Polarisator, so hat es anschließend nur noch 50% seiner Anfangsintensität (ohne Berücksichtigung von Absorptions- und Reflektionseffekten), da eine

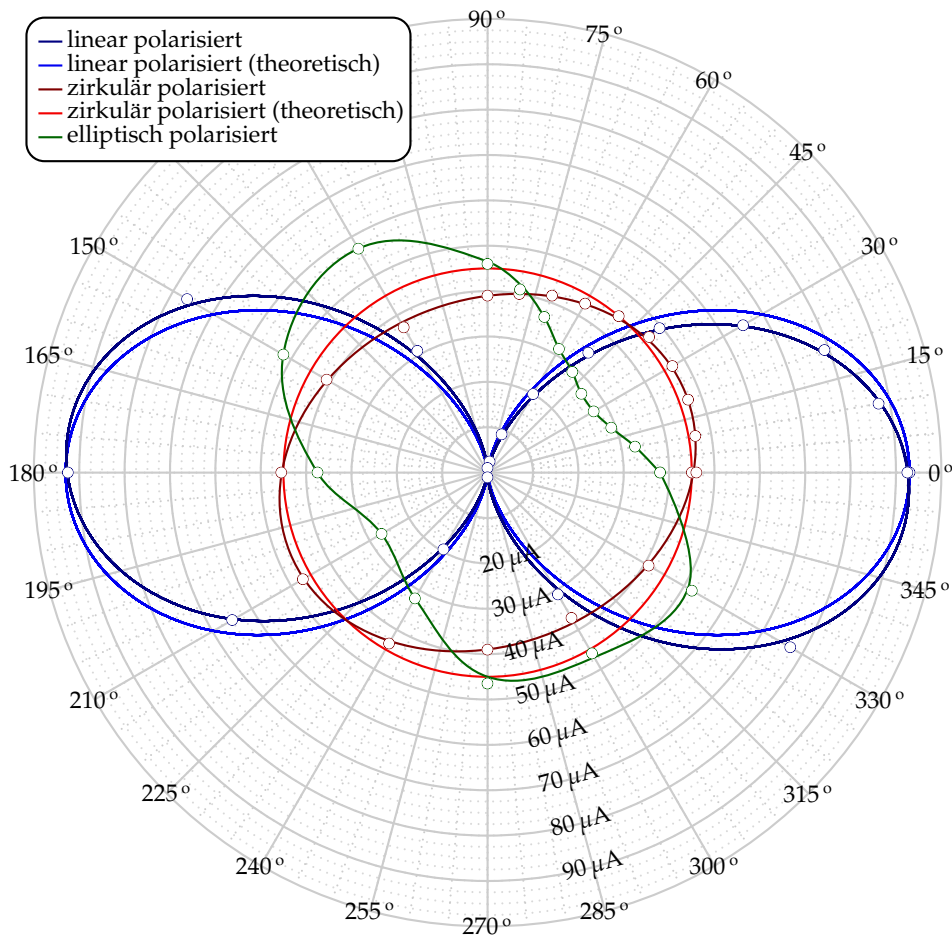


Abbildung 7:  $I(\varphi)$ -Polardiagramm

Komponente des Feldvektors verschwindet, d. h. es gilt  $I_1 = \frac{1}{2}I_0$ . Für die Intensität nach dem Analysator  $I_2$  gilt dann nach Malus:

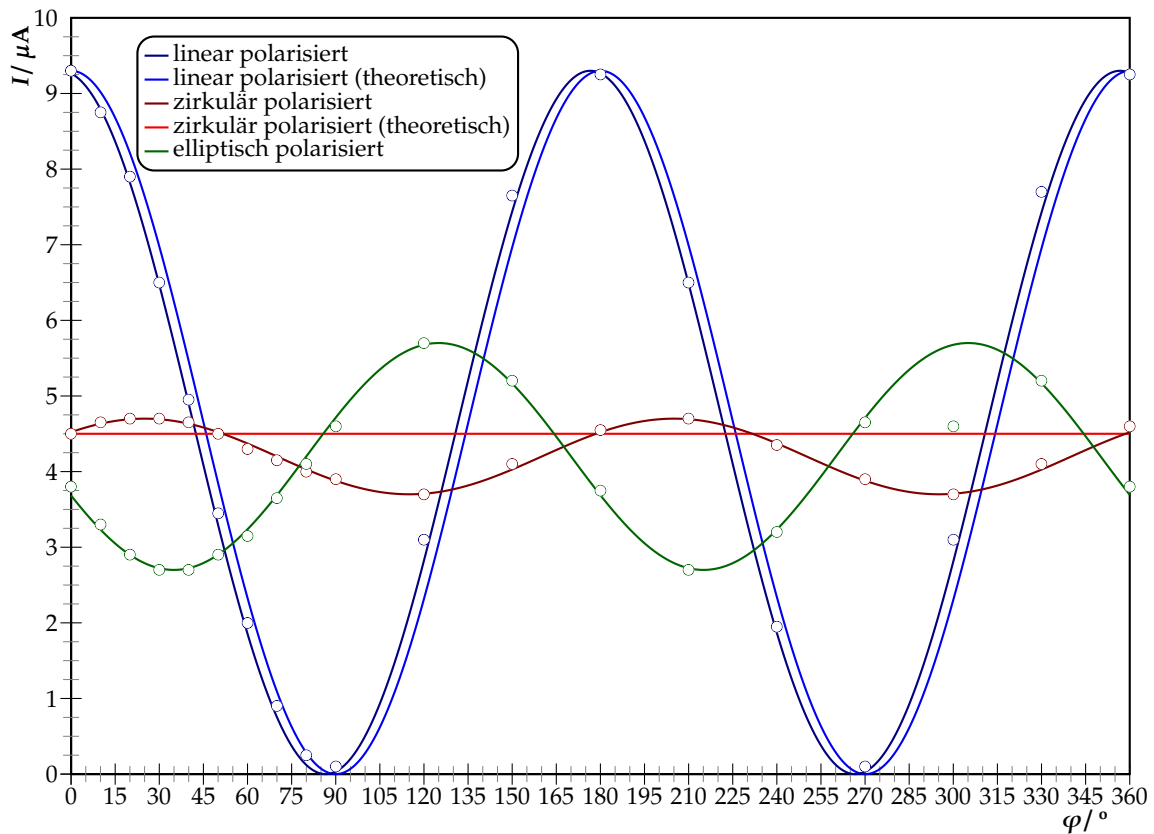
$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2}I_0 \cos^2 \varphi. \quad (5)$$

Im Diagramm (Abb. 7), das als Polardiagramm gezeichnet wurde, da diese Darstellung das Problem am besten widerspiegelt und die Symmetrien besonders deutlich erkennbar macht, zeigt aufgrund der Punktsymmetrie (mit Ursprung 0) die recht gute Meßmethode. Der Drehwinkel von ca.  $-3^\circ$  zwischen gemessener und theoretischer Kurve läßt sich dadurch erklären, daß das Intensitätsmaximum und die damit verbundene  $0^\circ$ -Einstellung nicht ganz gefunden wurde und etwas mehr in die negative Winkelrichtung eingestellt werden müßte.

Für die Herstellung von zirkulär polarisiertem Licht wurde dann ein  $\lambda/4$ -Plättchen eingefügt. Für die Intensität wurde erwartet, daß diese dann nur noch halb so groß ist – dies erhält man ebenfalls mit Malus und  $\varphi = 45^\circ$  (siehe Gl. (5)):

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi = I_1 \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{1}{2}I_1.$$

Aufgrund des zirkulär polarisiertem Lichts sollte die Intensitätsverteilung nach dem Analysator unabhängig vom Drehwinkel sein. Aus den Meßwerten erhält man mit  $I_{max} = 8,45 \mu A$  und  $I_{min} = 3,9 \mu A$  ein Intensitätsverhältnis von 0,46. Die Abweichung zum theoretischen Wert beträgt somit 0,04 bzw. 8%. Zu erklären ist dies durch die Reflektion und Absorption durch das zusätzlich eingebrachte  $\lambda/4$ -Plättchen, sowie der ungenügenden eingestellten Orientierung des  $\lambda/4$ -Plättchens. Die Intensitätsverteilung im Diagramm weicht leicht vom theoretischen

Abbildung 8:  $I(\varphi)$ -Diagramm

ab, erwartet wurde ein Kreis, bestimmt wurde jedoch eine Ellipse was verdeutlicht, dass kein vollständig zirkulär polarisiertes Licht vorliegt. Mit den beiden Ellipsenparametern  $a = 3,8 \mu\text{A}$  und  $b = 4,7 \mu\text{A}$  lässt sich der Fehler abschätzen über das Verhältnis der beiden, da dies bei einem Kreis mit  $a = b$  1 ergeben sollte, und man erhält einen Fehler von  $\sigma = 1 - a/b = 19\%$ .

Die erhaltene Figur beim elliptisch polarisiertem Licht zeigt den erwarteten Verlauf, die Drehung der Figur ist dadurch zu erklären, dass  $0^\circ$  des Analysatorwinkels nicht dem Intensitätsmaximum entspricht. Das Maximum liegt bei etwa  $-30^\circ$ , was in etwa dem eingestellten Winkel des  $\lambda/4$ -Plättchens entspricht.

Die Messungen zeigten insgesamt den erwarteten Verlauf, die Fehlerquellen für die beobachteten Abweichungen sind vielfältig. Neben den o. g. kommen noch die Meßfehler durch das Multimeter ( $> 0,5\%$ , entspricht einer Ablesegenauigkeit von  $0,05 \mu\text{A}$  auf den Meßbereich von  $10 \mu\text{A}$ ), Meßwertverfälschungen durch Reflektions- und Streulicht – zum Ablesen der Werte auf dem Multimeter wurde eine Taschenlampe verwendet und das Streulicht kann auf die Photozelle treffen – und Reflektions-, Brechungs- und Beugungsverluste der einzelnen optischen Geräte, die teilweise nicht ganz sauber waren. Zusätzlich kommt noch Dispersion durch die Bandbreite des Grünfilters hinzu, deren Auswirkung wird jedoch aufgrund der geringen Bandbreite als gering angesehen.

### 6.3 Aufgabe 4

In dieser Aufgabe sollte mittels Saccharimetrie die Konzentration von einer unbekanntem Zuckerlösung bestimmt werden. Die Messung  $i_1$  wurde in Luft durchgeführt und hat im Folgenden keine Bedeutung. Alle weiteren Messungen wurden je 5 mal durchgeführt, der Drehwinkel lässt sich dann über

$$\varphi = \frac{1}{2} (\varphi_1 + \varphi_2) \quad (6)$$

bestimmen und ist in Tabelle 5 eingetragen. Im Folgenden wurden zunächst Mittelwert, Standardabweichung und Vertrauensbereich des Mittelwerts bestimmt über die Beziehungen:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varphi_j \quad (7a) \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\varphi_j - \bar{\varphi})^2} \quad (7b) \quad \Delta\bar{\varphi} = \frac{t}{\sqrt{n}} \sigma \quad (7c)$$

mit  $t = 1,15$  [Kuc94, S. 599] und man erhält:

$$\begin{aligned} i_2 - i_6: & \quad \bar{\varphi}_1 = 0,6^\circ & \sigma = 0,3^\circ & \Delta\bar{\varphi}_1 = 0,2^\circ \\ i_7 - i_{11}: & \quad \bar{\varphi}_2 = 35,3^\circ & \sigma = 0,2^\circ & \Delta\bar{\varphi}_1 = 0,1^\circ \\ i_{12} - i_{16}: & \quad \bar{\varphi}_3 = 26,1^\circ & \sigma = 0,2^\circ & \Delta\bar{\varphi}_1 = 0,1^\circ \end{aligned}$$

Der Wasserwert von  $\varphi_1 = 0,6^\circ \pm 0,2^\circ$  ist dabei die Kalibrierung und muß bei den anderen beiden Messungen entsprechend abgezogen werden.

Über Gl. (3) kann nun die Stoffkonstante  $\alpha_0$  für Zucker bestimmt werden zu:

$$\varphi = \alpha_0 cl \quad \Rightarrow \quad \alpha_0 = \frac{\varphi}{cl} = \frac{\bar{\varphi}_2 - \bar{\varphi}_1}{cl} = 6,67 \frac{\text{°cm}^2}{\text{g}}$$

Die Fehlerabschätzung erfolgt wieder über den Maximalfehler des Funktionswertes (siehe Abschnitt 6.1.1) und man erhält:

$$\Delta\alpha_0 = \pm \left[ \left| \frac{\partial\alpha_0}{\partial\varphi_2} \right| \Delta\bar{\varphi}_2 + \left| \frac{\partial\alpha_0}{\partial\varphi_1} \right| \Delta\bar{\varphi}_1 + \left| \frac{\partial\alpha_0}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial\alpha_0}{\partial c} \right| \Delta c \right] = \pm 0,09 \frac{\text{°cm}^2}{\text{g}}$$

mit  $\Delta l = 0,1 \text{ mm}$  und  $\Delta c = 0,001 \text{ g/ml}$  (aus Angabegenauigkeit). Damit folgt für die Stoffkonstante  $\alpha_0$  von Wasser:

$$\alpha_0 = (6,67 \pm 0,09) \frac{\text{°cm}^2}{\text{g}} = 6,67 \frac{\text{°cm}^2}{\text{g}} \quad (1 \pm 1,4 \%)$$

Die Konzentration der unbekanntes Zuckerlösung kann dann mittels Gl. (3) bestimmt werden zu:

$$\varphi = \alpha_0 cl \quad \Rightarrow \quad c = \frac{\varphi}{\alpha_0 l} = \frac{\bar{\varphi}_3 - \bar{\varphi}_1}{\alpha_0 l} = 0,201 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Der Maximalfehler mit  $\Delta l = 0,1 \text{ mm}$ ,  $\Delta\alpha_0 = 0,09^\circ$ ,  $\Delta\bar{\varphi}_1 = 0,2^\circ$  und  $\Delta\bar{\varphi}_3 = 0,1^\circ$  beträgt dann

$$\Delta c = \pm 0,005 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Damit erhält man für die Zuckerkonzentration der Zuckerlösung:

$$c = (0,201 \pm 0,005) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,201 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad (1 \pm 2,5 \%)$$

### 6.3.1 Bewertung

Sowohl das spezifische Drehvermögen der Zuckernormallösung wie auch die Konzentration der unbekanntes Zuckerlösung konnten mit geringer Abweichung bestimmt werden. Die Werte können als korrekt angesehen werden, insbesondere, da die bestimmte spezifische Drehung mit dem Literaturwert von  $6,64 \text{ °cm}^2/\text{g}$  für Rohrzucker in [Kuc94, S.393] innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmt. Die spezifische Drehung konnte mit  $(6,67 \pm 0,09) \text{ °cm}^2/\text{g}$  bestimmt werden, die Konzentration der unbekanntes Lösung zu  $c = (0,201 \pm 0,005) \text{ g/cm}^3$ .

## 7. verwendete Geräte

- Experimentierplatz 11/3
- optische Bank
- Niederspannungslampe, Na-Dampf-Lampe mit Versorgungsgerät
- Grünfilter
- Polarisator, Analysator,  $\lambda/4$ -Plättchen (Skalenteilung jeweils  $1^\circ$ )
- Irisblende
- Linse
- Photozelle
- Vielfachinstrument
- Halbschattenpolarimeter
- 3 Probenröhrchen
- Taschenlampe

## Literatur

- [Dem06] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik*. Bd. 2: *Elektrizität und Optik*. 4. Auflage. Berlin – Heidelberg – New York : Springer, 2006. – ISBN 3–540–33794–6
- [GKV86] GERTHSEN, Christian ; KNESER, H.O. ; VOGEL, Helmut ; VOGEL, Prof. Dr. H. (Hrsg.): *Physik*. 15. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg – New York – Tokyo : Springer-Verlag Berlin, 1986. – ISBN 3–540–16155–4
- [Hau92] HAUPTMANN, Siegfried: *Einführung in die organische Chemie*. 4., durchgesehene Auflage. Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, 1992. – ISBN 3–342–00635–8
- [Kuc94] KUCHLING, Horst: *Taschenbuch der Physik*. 14. Auflage. Leipzig-Köln : Fachbuchverlag, 1994. – ISBN 3–343–00858–3
- [Lin93] LINDNER, Helmut: *Physik für Ingenieure*. 14. Auflage. Leipzig-Köln : Fachbuchverlag, 1993. – ISBN 3–343–00772–2
- [Mey06] MEYER, Dirk: *Physikalisches Praktikum für Studierende der Physik / Ruhr-Universität Bochum*. 4. Auflage. 2006. – Versuchsanleitungen
- [Tip98] TIPLER, Paul A. ; GERLICH, Dieter (Hrsg.) ; JERKE, Götz (Hrsg.): *Physik*. 2. korrigierter Nachdruck der 1. deutschen Auflage von 1994. Heidelberg - Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 1998. – ISBN 3–86025–122–8
- [Wal94] WALCHER, Wilhelm: *Praktikum der Physik*. 7. Auflage. Stuttgart : B.G. Teubner, 1994

### Liste der Versionen

Version	Datum	Bearbeiter	Bemerkung
0.9	15.09.2007	Krä	Versuchsvorbereitung
1.0	17.09.2007	Krä	Versuchsdurchführung
1.1	18.09.2007	Krä	Versuchsauswertung
1.2	25.04.2008	Krä	Korrektur