

# O 11a „Polarisation und optische Aktivität“

Toshiki Ishii (Matrikel 3266690)

10.06.2013

Studiengang Chemie (Bachelor of Science)

## Aufgabenstellung

1. Bestimmung des spezifischen Drehvermögens und der Konzentration dreier Lösungen eines Zuckers mithilfe eines Kreispolariometers mit Halbschatten-Einrichtung.
2. Bestimmung der Abhängigkeit des Drehwinkels von der Wellenlänge mithilfe der am stärksten drehenden Probe aus 1.  
Grafische Bestimmung des Exponenten im Zusammenhang  $\alpha \propto \lambda^n$ .
3. Messung der Intensität eines linear polarisierten Laserstrahls in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Polarisators (Messung mit  $\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplatte bei  $0^\circ$ ;  $30^\circ$ ;  $45^\circ$ ).  
Grafische Darstellung und Auswertung von  $I(\alpha)$  (Gesetz von MALUS).  
Diskussion der Ergebnisse unter physikalischen Gesichtspunkten.

## Zubehör

- Polariometer mit Leuchtdiode ( $\lambda_{max} = 590 \text{ nm}$ )
- Küvetten mit Zuckerlösungen
- Polariometer mit Halogenlampe
- Metallinterferenzfilter
- Diodenlaser
- Polarisatoren
- $\frac{\lambda}{4}$ -Folie
- Labornetzgerät
- Fotodiode
- Digitalmultimeter

## Grundlagen

### Licht als elektromagnetische Welle

Die Beschreibung des Lichts als Welle ist insbesondere dann zweckmäßig, wenn Phänomene wie Brechung, Beugung, Interferenz und Polarisierung untersucht werden sollen.

Licht wird als Überlagerung eines periodischen elektrischen und eines periodischen magnetischen Feldes beschrieben. Elektrisches und magnetisches Feld sind dabei phasengleich und stehen sowohl aufeinander als auch auf der Ausbreitungsrichtung orthogonal.

### Polarisiertes Licht

Bei polarisiertem Licht handelt es sich um Lichtwellen, bei denen das elektrische (und damit auch das magnetische) Feld in einer bestimmten Richtung schwingt.

Bei linear polarisiertem Licht schwingt der Vektor des elektrischen Feldes nur in einer Ebene.

Elliptisch polarisiertes Licht hat elektrische Feldvektoren in beiden auf der Ausbreitungsrichtung orthogonal stehenden Dimensionen. Beide Komponenten haben definierte Phase und Amplitude.

Zirkulär polarisiertes Licht ist ein Sonderfall des elliptisch polarisierten Lichts. Die Amplitude beider Komponenten ist gleich und die Phasenverschiebung beträgt  $90^\circ$ .

### Erzeugung von polarisiertem Licht

- Anisotrope Stoffe (Kristalle, die in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche Symmetrie aufweisen) zeigen Doppelbrechung. Bei diesen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit von der Ausbreitungsrichtung und der Polarisierungsebene abhängig. Fällt nicht-polarisiertes Licht auf den Kristall, so wird es in zwei Komponenten – einen ordentlichen Strahl (elektrisches Feld senkrecht zur optischen Achse des Kristalls) und einen außerordentlichen Strahl (elektrisches Feld parallel zur optischen Achse des Kristalls) – aufgespalten, die zueinander orthogonale Polarisierungen aufweisen.
- Die Intensität von reflektiertem Licht ist nach den FRESNELSchen Formeln abhängig vom Einfallswinkel und der Lage der Polarisierungsebene des einfallenden Lichtes bezüglich der Oberflächennormalen. Beim BREWSTER-Winkel (Polarisationswinkel) wird nur noch Licht, dessen Polarisierungsebene senkrecht auf der Einfallsebene steht, reflektiert. Sowohl reflektiertes als auch gebrochenes Licht sind damit linear polarisiert.

Der BREWSTER-Winkel ist derjenige Winkel, bei dem reflektierter Strahl (Winkel  $\alpha$ ) und gebrochener Strahl (Winkel  $\beta$ ) senkrecht aufeinander stehen, also

$$\alpha + \beta = 90^\circ$$

Einsetzen in das SNELLIUSSche Brechungsgesetz

$$n_2 \cdot \sin \beta = n_1 \cdot \sin \alpha$$

liefert:

$$\begin{aligned} n_2 \cdot \sin(90^\circ - \alpha) &= n_1 \cdot \sin \alpha \\ \tan \alpha &= \frac{n_2}{n_1} \end{aligned}$$

- Nach dem gleichen Mechanismus wie bei der Polarisierung durch Reflexion wird Licht bei der Streuung polarisiert: Moleküle werden durch einfallendes Licht zur Schwingung angeregt und verhalten sich dabei wie HERTZsche Dipole. Licht, das um  $90^\circ$  gestreut wird, ist deshalb linear polarisiert.
- Wenn eine elektromagnetische Strahlung auf eine Anordnung feiner paralleler Drähte trifft, so kann diejenige Komponente, deren elektrisches Feld parallel zur Länge der Drähte ist, einen Stromfluss im Leiter anregen und auf diese Weise absorbiert werden. Erhalten bleibt die Komponente, deren elektrisches Feld senkrecht auf der Leiterlänge steht.

### $\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplatte

Eine  $\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplatte ist ein Bauteil, das eine der beiden senkrechten Komponenten des einfallenden Lichts gegenüber der anderen um ein Viertel ihrer Wellenlänge verzögert. Dies gelingt über einen anisotropen Kristall, in dem die beiden Komponenten unterschiedliche Lichtgeschwindigkeiten (Brechzahlen  $n_e$  und  $n_o$ ) aufweisen. Allgemein gilt für die Verzögerung des außerordentlichen Strahls gegenüber dem ordentlichen

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{d}{\lambda} \cdot (n_e - n_o),$$

wobei für  $\frac{\lambda}{4}$ -Platten  $\Delta\varphi = k \cdot 360^\circ \pm 90^\circ$  mit  $k \in \mathbb{Z}$  gelten muss.

### Optische Aktivität und Rotationsdispersion

Als optische Aktivität eines chiralen Stoffes (Stoff, dessen Moleküle nicht spiegelsymmetrisch sind) bezeichnet man die Eigenschaft, die Ebene des polarisierten Lichts (Ebene des elektrischen Feldvektors) zu drehen. Der Drehwinkel  $\alpha$  ist dabei zur Konzentration (Stoffmengenkonzentration  $c$  oder auch Massenkonzentration  $\beta$ ) und der Dicke der Küvette proportional:

$$\alpha \propto c \cdot d$$

Der Drehwinkel ist weiterhin von der Wellenlänge des Lichtes und der Temperatur der Probe abhängig. Die Abhängigkeit hier ist jedoch komplizierter. In der Regel wird deshalb bei 589 nm (Na-D-Linie) und  $20^\circ\text{C}$  gemessen.

### Aufbau und Wirkungsweise eines Polarimeters

Ein einfaches Polarimeter besteht aus einer Lichtquelle und zwei Polarisationsfiltern (NICOLSche Prismen). Das Licht der Lichtquelle wird vom ersten Filter (Polarisator) linear polarisiert, durchläuft dann die Probe und schließlich den zweiten Filter (Analysator). Zur Bestimmung des Nullwertes wird mit einer optisch nicht aktiven Probe zunächst der Analysator so gedreht, dass vollständige Auslöschung erfolgt. Bei Messung der optisch aktiven Probe wird der Analysator um den Winkel  $\alpha$  gedreht, sodass vollständige Auslöschung erfolgt.  $\alpha$  ist der Drehwinkel der Probe.

Halbschattenpolarimeter besitzen zusätzlich ein Hilfsprisma. Dieses dreht die Ebene des polarisierten Lichts, das auf einer Seite des Okulars betrachtet wird, bereits vor Durchlaufen der Probe um einen bekannten Winkel. Bei Messung der Probe wird dann das Polarimeter nicht mehr so eingestellt, dass vollständige Auslöschung beobachtet wird, sondern so, dass die Helligkeit auf beiden Seiten des Okulars identisch ist (Halbschatten).

## Gesetz von Malus

Das Gesetz von MALUS

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$$

beschreibt die Wechselwirkung linear polarisierten Lichts mit einem Polarisationsfilter. Dabei ist  $I_0$  die Intensität des eingestrahlten Lichts,  $I(\alpha)$  die Intensität des transmittierten Lichts und  $\alpha$  der Winkel zwischen Polarisationssebene des Lichts und des Filters.

## Fresnelsche Formeln

Die FRESNELSchen Formeln beschreiben die Anteile des an einer Grenzschicht reflektierten und transmittierten Lichts. Danach gilt

	$E$ -Feld senkrecht zur Einfallsebene	$E$ -Feld parallel zur Einfallsebene
Reflexionsgrad $R = \frac{I_r}{I_0}$	$\left( \frac{n_1 \cdot \cos \alpha - \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot n_2 \cdot \cos \beta}{n_1 \cdot \cos \alpha + \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot n_2 \cdot \cos \beta} \right)^2$	$\left( \frac{\frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot n_2 \cdot \cos \alpha - n_1 \cdot \cos \beta}{\frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot n_2 \cdot \cos \alpha + n_1 \cdot \cos \beta} \right)^2$
Transmissionsgrad $T = \frac{I_t}{I_0}$	$\left( \frac{2n_1 \cdot \cos \alpha}{n_1 \cdot \cos \alpha + \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot n_2 \cdot \cos \beta} \right)^2$	$\left( \frac{2n_1 \cdot \cos \alpha}{\frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot n_2 \cdot \cos \alpha + n_1 \cdot \cos \beta} \right)^2$

mit den Brechzahlen  $n_k$ , den magnetischen Permeabilitäten  $\mu_k$ , dem Einfalls- und Reflexionswinkel  $\alpha$  sowie dem Brechungswinkel  $\beta$ .

## Weber-Fechnersches Gesetz

Das WEBER-FECHNER-Gesetz besagt, dass die vom Menschen empfundene Stärke eines Reizes proportional zum Logarithmus der entsprechenden physikalischen Größe ist.

Bezogen auf Licht bedeutet dies, dass die wahrgenommene Helligkeit proportional zum Logarithmus der Intensität des ins Auge fallenden Lichts ist. Helligkeitsabstufungen lassen sich deshalb bei geringer Intensität besser erkennen als bei hoher Intensität.

## Messwerte

### Messwerte – Teil 1

$\alpha_1$  wurde von Toshiki Ishii,  $\alpha_2$  von Sebastian Blanke aufgenommen; für beide Messungen wurde dasselbe Polarimeter verwendet.  $\alpha_3$  wurde mit einem anderen (baugleichen) Polarimeter gemessen.

	$\frac{\alpha_1}{\circ}$	$\frac{\alpha_2}{\circ}$	$\frac{\alpha_3}{\circ}$		$\frac{\alpha_1}{\circ}$	$\frac{\alpha_2}{\circ}$	$\frac{\alpha_3}{\circ}$
Nullwert	0,40	0,45	0,25	Probe C I	8,10	8,10	7,70
	0,40	0,50	0,25		8,15	8,10	7,80
	0,45	0,40	0,25		8,10	8,10	7,70
	0,55	0,45	0,25		8,10	8,10	7,75
Probe C N	11,85	11,70	11,20	Probe C II	21,30	21,45	20,75
	11,90	11,75	11,30		21,15	21,40	20,75
	11,80	11,90	11,40		21,20	21,35	20,80
			11,45		21,45	21,35	20,85
			Probe C III	15,40	15,25	14,85	
				15,40	15,30	14,90	
				15,30	15,30	14,85	
				15,40	15,30	14,90	

### Messwerte – Teil 2

$\frac{\lambda}{\text{nm}}$	$\frac{\varphi_0}{\circ}$	$\frac{\varphi}{\circ}$	$\frac{\lambda}{\text{nm}}$	$\frac{\varphi_0}{\circ}$	$\frac{\varphi}{\circ}$	$\frac{\lambda}{\text{nm}}$	$\frac{\varphi_0}{\circ}$	$\frac{\varphi}{\circ}$	$\frac{\lambda}{\text{nm}}$	$\frac{\varphi_0}{\circ}$	$\frac{\varphi}{\circ}$
670	33,0	17,5	550	33,9	9,6	480	32,8	1,5	405	33,9	356,0
	33,3	17,5		33,9	9,6		32,5	1,9		33,7	355,8
	34,2	17,8		33,9	9,5		32,9	1,1		33,8	352,4
	33,4	197,2		33,9	9,5		32,6	1,2		34,8	1,3
	33,7	17,4		33,9				1,9		32,1	352,3
	34,0	17,3		491	33,7		3,7			1,2	32,0
	33,9	17,4	33,6		3,6		1,4	32,1		352,7	
	33,7		33,6		3,0	470	32,8	360,0		353,4	
	33,6		33,7		3,1		32,8	358,0		356,2	
	33,7				3,4		32,8	356,4		351,9	
	33,7				3,3		32,9	356,8		359,1	
	590	33,7	13,4		3,3			356,0		356,1	
33,8		13,5		3,5			356,4	359,7			
33,7		13,5		2,9		358,0	358,6				
33,9		13,5		2,6		356,7					
33,8				3,4		356,1					
33,8						357,3					
33,9					358,0						

### Messwerte – Teil 3

$\varphi/^\circ$	$I_{49^\circ}$ $\mu\text{A}$	$I_{34^\circ}$ $\mu\text{A}$	$I_{19^\circ}$ $\mu\text{A}$	$I_{4^\circ}$ $\mu\text{A}$	$I_{-26^\circ}$ $\mu\text{A}$	$I_{46^\circ}$ $\mu\text{A}$	$I_{56^\circ}$ $\mu\text{A}$	$I_{41^\circ}$ $\mu\text{A}$
-90	37,5	28,2	10,1	0,6	28,2	37,1	28,7	38,6
-85		31,2	13,4	1,5	25,9	38,2	31,7	38,7
-80	38,0	34,5	17,5	3,5	23,7	39,4	35,2	39,0
-75		37,7	22,4	6,6	22,2	40,6	38,8	39,3
-70	38,8	41,4	27,8	10,6	21,1	42,1	42,4	39,8
-65		45,1	33,5	15,6	20,7	43,4	46,3	40,2
-60	40,0	48,6	39,5	21,2	20,9	44,7	49,8	40,7
-55		51,7	45,5	27,5	21,4	45,6	53,2	40,9
-50	40,8	54,3	50,9	33,6	22,5	46,1	55,6	41,0
-45		56,3	56,2	40,5	24,0	46,5	57,6	41,1
-40	41,1	57,8	60,6	47,0	26,0	46,6	59,2	41,0
-35		58,6	64,6	53,0	28,2	46,4	59,9	40,9
-30	41,2	59,0	67,7	58,7	30,9	46,1	60,0	40,9
-25		59,1	70,6	64,1	34,0	45,9	60,1	40,8
-20	41,4	58,2	71,8	68,4	37,1	45,1	59,0	40,5
-15		56,8	72,1	72,0	40,0	44,1	57,3	40,2
-10	40,9	54,8	71,4	74,2	43,1	43,0	55,1	39,9
-5		52,3	69,9	75,5	45,9	41,9	52,6	39,4
0	40,1	49,4	67,1	75,7	48,7	40,5	49,8	39,1
5		46,4	64,1	75,4	51,4	39,3	46,7	39,0
10	39,7	43,1	59,9	73,2	53,4	38,1	43,2	38,6
15		39,6	55,1	70,0	54,8	36,8	39,3	38,2
20	38,8	36,0	49,8	66,1	55,9	35,4	35,5	37,8
25		32,6	44,1	61,1	56,6	34,3	32,2	37,5
30	38,1	29,3	38,1	55,7	56,7	33,4	28,9	37,3
35		26,3	32,5	49,6	56,2	32,5	25,7	37,0
40	37,4	23,7	26,8	43,3	55,0	31,8	23,2	36,8
45		21,7	21,6	36,7	53,5	31,4	21,0	36,7
50	36,7	19,9	16,7	30,1	51,4	31,1	19,5	36,6
55		18,9	12,7	23,7	49,0	31,1	18,6	36,6
60	36,5	18,4	9,4	18,1	46,3	31,4	18,2	36,6
65		18,7	7,1	12,8	43,6	32,0	18,6	36,9
70	36,8	19,6	5,7	8,7	40,6	32,8	19,4	37,3
75		21,1	5,3	4,9	37,7	34,0	21,2	37,6
80	37,3	23,1	5,9	2,4	34,5	35,1	23,3	38,0
85		25,5	7,6	1,0	31,7	36,3	25,9	38,3
90	37,9	28,3	10,1	0,8	28,8	37,5	29,0	38,8

## Auswertung

### Auswertung – Teil 1

Da die drei Messreihen  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  nicht direkt vergleichbar sind, ist eine getrennte Auswertung sinnvoll. Mittelwertbildung innerhalb der Reihen liefert:

	$\frac{\alpha_1}{\circ}$	$\frac{\alpha_2}{\circ}$	$\frac{\alpha_3}{\circ}$
Nullwert	0,45	0,45	0,25
Probe C N	11,85	11,78	11,34
Probe C I	8,11	8,10	7,74
Probe C II	21,28	21,39	20,79
Probe C III	15,38	15,29	14,88

Nach Abzug des Nullwertes ergibt sich:

	$\frac{\alpha_1}{\circ}$	$\frac{\alpha_2}{\circ}$	$\frac{\alpha_3}{\circ}$
Probe C N	11,40	11,33	11,09
Probe C I	7,67	7,65	7,49
Probe C II	20,83	20,94	20,54
Probe C III	14,93	14,84	14,63

Die Probe C N ist mit  $\beta = 100 \text{ kg m}^{-3}$  angegeben, die Länge der Küvette mit 2,00 dm. Der spezifische Drehwert berechnet sich daraus nach

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{\beta \cdot d}$$

Damit ergeben sich Werte von

$[\alpha_1]$	$[\alpha_2]$	$[\alpha_3]$
$5,70^\circ \text{ L g}^{-1} \text{ dm}^{-1}$	$5,67^\circ \text{ L g}^{-1} \text{ dm}^{-1}$	$5,54^\circ \text{ L g}^{-1} \text{ dm}^{-1}$
$0,570^\circ \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$	$0,567^\circ \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$	$0,554^\circ \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$

Aus dem spezifischen Drehwert und den Drehwerten für die anderen Proben (oder alternativ nach dem Dreisatz) ergibt sich für die anderen Proben:

	$\frac{\beta_1}{\text{kg m}^{-3}}$	$\frac{\beta_2}{\text{kg m}^{-3}}$	$\frac{\beta_3}{\text{kg m}^{-3}}$	$\frac{\bar{\beta}}{\text{kg m}^{-3}}$
Probe C I	67,3	67,5	67,5	67,4
Probe C II	272	274	274	273
Probe C III	71,7	70,9	71,2	71,2

## Auswertung – Teil 2

Fitten einer Kurve der Form

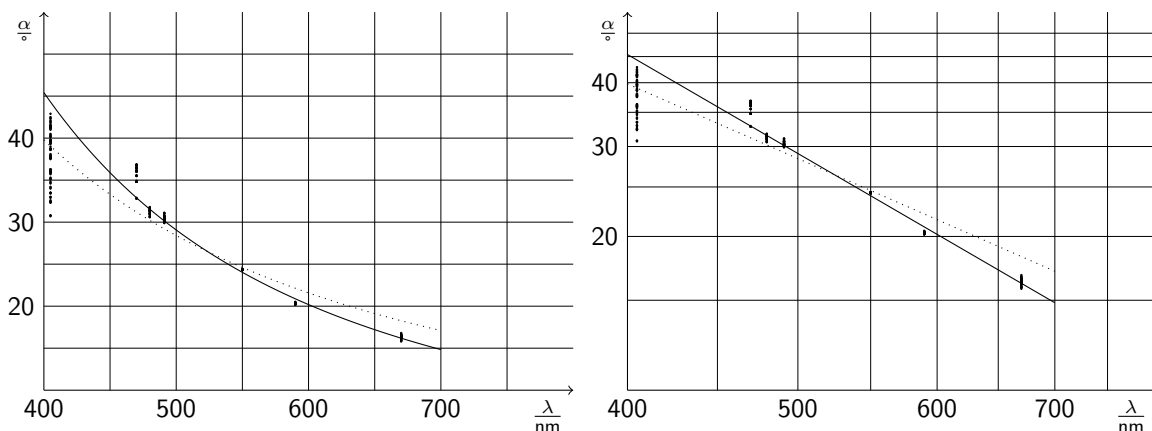
$$\frac{\alpha}{\circ} = k \cdot \left( \frac{\lambda}{\text{nm}} \right)^n$$

an alle Messwerte liefert kein überzeugendes Ergebnis (gepunktete Linie,  $n = -1,51 \pm 0,04$ ). Besser sieht die Fitkurve für den Wellenlängenbereich 480 nm... 670 nm (durchgezogene Linie) aus. Ihre Parameter sind:

$$k = (7,4 \pm 0,5) \cdot 10^6$$

$$n = -2,00 \pm 0,01$$

Die folgenden Diagramme zeigen die Fit-Kurven, das linke Diagramm in linearer, das rechte in doppelt-logarithmischer Darstellung:



Es erscheint unwahrscheinlich, dass alle Abweichungen von der Kurve durch Messfehler entstanden sind. Vielmehr ist anzunehmen, dass die Korrelation

$$\alpha = \frac{k}{\lambda^2}$$

für den gemessenen Zucker nicht im gesamten gemessenen Wellenlängenbereich gilt. Tatsächlich ist es so, dass sich das Vorzeichen des Drehwinkels in der Umgebung von Absorptionsmaxima umkehrt (COTTON-Effekt), sodass der Zusammenhang bei ausreichend hohen Energien (niedrige Wellenlängen) für jeden Stoff irgendwann zusammenbrechen muss. Die Ansätze davon sind vermutlich mit dem ungewöhnlich niedrigen Drehwinkel bei 405 nm bereits beobachtet worden.

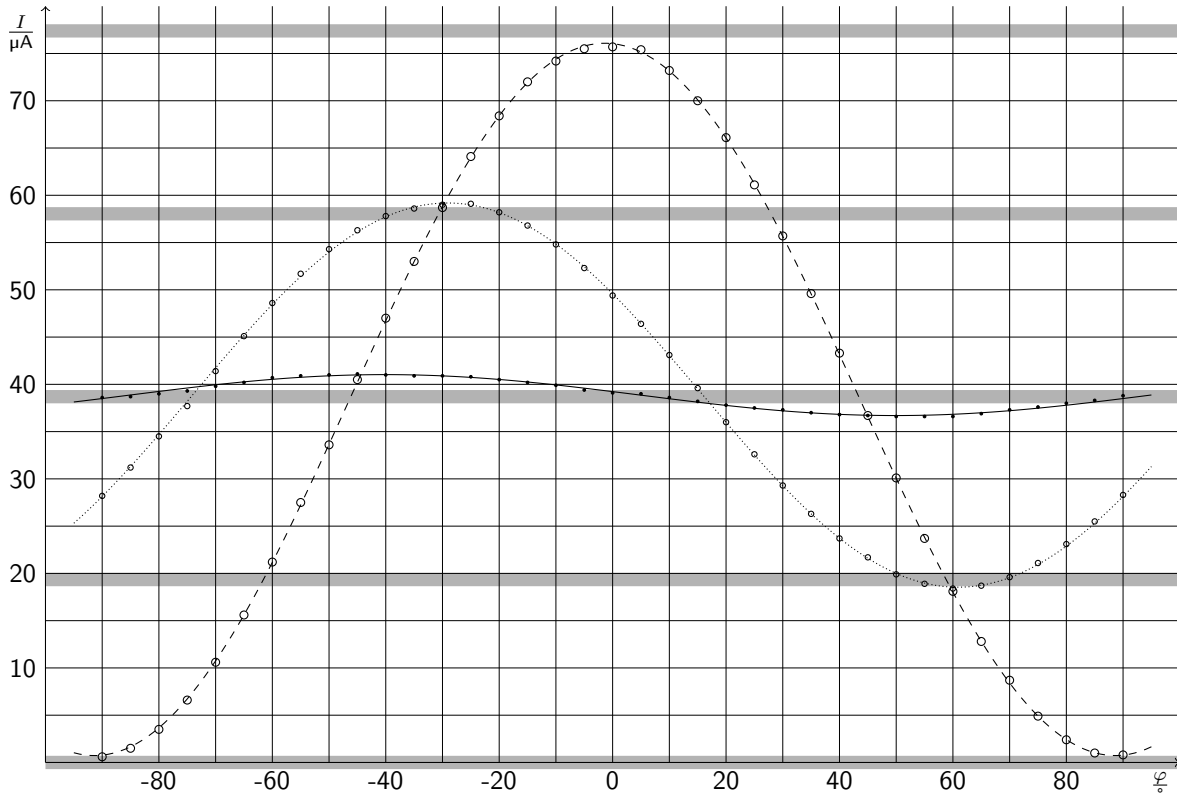


### Auswertung – Teil 3

An die Messdaten für die  $\frac{\lambda}{4}$ -Plattenwinkel  $4^\circ$  (große Kreise, gestrichelte Kurve),  $34^\circ$  (kleine Kreise, gepunktete Linie) und  $41^\circ$  (Punkte, durchgezogene Linie) wurden Kurven der Form

$$I(\varphi) = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \cos^2(\varphi + \varphi_0)$$

gefittet:



Die durchgezogene Linie ( $I_{41^\circ}$ ) hat die Fitparameter  $I_{\min} = (36,70 \pm 0,04)$  mA,  $I_{\max} - I_{\min} = (4,33 \pm 0,07)$  mA und  $\varphi_0 = (40,1 \pm 0,5)^\circ$ . Die Oszillation um den Mittelwert ist nur sehr schwach ausgeprägt. Es handelt sich um nahezu ideal zirkulär polarisiertes Licht mit einer kleinen Exzentrizität. Diese rührt aus einer nicht ganz idealen Einstellung des  $\frac{\lambda}{4}$ -Plattenwinkels  $\varphi_0$ , der im Idealfall  $45^\circ$  beträgt.

Die gestrichelte Linie ( $I_{4^\circ}$ ) hat die Fitparameter  $I_{\min} = (0,73 \pm 0,05)$  mA,  $I_{\max} - I_{\min} = (75,35 \pm 0,07)$  mA und  $\varphi_0 = (1,38 \pm 0,03)^\circ$ . Die Tatsache, dass die Intensität am Minimum der Kurve nahezu bei 0 mA liegt, zeigt, dass es sich um annähernd linear polarisiertes Licht handelt. Wie nach

$$I(\varphi) = \frac{I_0}{2} \cdot \left( 1 + \cos(2\theta) \cdot \cos(2\theta + 2\varphi) \right)$$

mit  $\theta = \varphi_0 \approx 0$

$$\frac{dI}{d\varphi} \approx -I_0 \cdot \sin(2\varphi) = 0$$

$$\varphi \approx 0$$

erwartet, liegen ein Maximum bei  $\approx 0^\circ$  und Minima bei  $\approx \pm 90^\circ$  vor. Die leichten Abweichungen rühren aus der Tatsache her, dass die optische Achse der  $\frac{\lambda}{4}$ -Platte leicht gegenüber der Polarisationsebene des Lasers verdreht war, sodass neben der linear polarisierten Komponente auch eine kleine zirkulär polarisierte Komponente gemessen wurde.

Die gepunktete Linie ( $I_{34^\circ}$ ) hat die Fitparameter  $I_{min} = (18,54 \pm 0,05)$  mA,  $I_{max} - I_{min} = (40,64 \pm 0,08)$  mA und  $\varphi_0 = (29,1 \pm 0,1)^\circ$ . Es handelt sich bei hier um elliptisch polarisiertes Licht, welches in etwa als 1:1-Mischung einer linear polarisierten und einer zirkulär polarisierten Komponente aufgefasst werden kann. Nach

$$I(\varphi) = \frac{I_0}{2} \cdot \left(1 + \cos(2\theta) \cdot \cos(2\theta + 2\varphi)\right)$$

$$\frac{dI}{d\varphi} = -I_0 \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(2\theta + 2\varphi) = 0$$

$$\frac{d^2I}{d\varphi^2} = -2I_0 \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(2\theta + 2\varphi)$$

wird ein Maximum bei  $\varphi \approx -30^\circ$  und ein Minimum bei  $\varphi \approx 60^\circ$  erwartet, die beide mit den experimentellen Daten bestätigt sind.

Die im Diagramm dargestellten dicken grauen Linien sind äquidistant und sollen die Intensitätsverhältnisse verdeutlichen. Wie nach

$$I(\varphi) = \frac{I_0}{2} \cdot \left(1 + \cos(2\theta) \cdot \cos(2\theta + 2\varphi)\right)$$

$$I_{max} = \frac{I_0}{2} \cdot \left(1 + \cos(2\theta)\right)$$

$$I_{min} = \frac{I_0}{2} \cdot \left(1 - \cos(2\theta)\right)$$

$$I_{max} - I_{min} = I_0 \cdot \cos(2\theta)$$

$$I_{max} - I_{min} = I_0 \qquad \text{für } \theta = 0^\circ$$

$$I_{max} - I_{min} = \frac{I_0}{2} \qquad \text{für } \theta = 30^\circ$$

$$I_{max} - I_{min} = 0 \qquad \text{für } \theta = 45^\circ$$

erwartet, ist die Amplitude der Intensität für die  $\theta = 30^\circ$ -Kurve halb so groß wie die der  $\theta = 0^\circ$ -Kurve. Die  $\theta = 45^\circ$ -Kurve hat erwartungsgemäß eine sehr kleine Amplitude.

## Messunsicherheit

1. Die verwendeten Polarimeter nutzen Licht einer Leuchtdiode, die keine diskrete 589 nm-Linie erzeugt, sondern ein etwas breiteres Spektrum. Da der spezifische Drehwinkel von der Wellenlänge abhängig ist, kann auf diese Weise eine Verfälschung auftreten. Dies erklärt die offensichtliche Abweichung zwischen den Messungen der beiden Polarimeter.

Weiterhin konnte aufgrund von biologischen Limitationen die Intensität der Polarimeterbereiche nicht exakt gleich eingestellt werden. Erschwert wurde dies bei stark drehenden Proben zusätzlich durch leichte Abweichungen des Farbtons (daher wahrscheinlich auch die unterschiedlichen Ergebnisse abhängig vom Experimentator).

Letztlich kommt noch ein Ablesefehler im Drehwinkel hinzu, der jedoch verglichen mit den anderen Fehlern sehr gering ausfällt.

2. Die Genauigkeit des menschlichen Auges verhinderte eine genaue Einstellung der vollständigen Auslöschung. Insbesondere bei den blauen Linien fiel es schwer, bei der 405 nm-Linie gab es gar einen Bereich von  $\pm 3^\circ$  der als vollständig dunkel empfunden wurde. Am genauesten war die Einstellung bei den grünen Linien, was die etwa doppelt (vierfach) so hohe Empfindlichkeit des Auges für grünes Licht gegenüber rotem (blauem) widerspiegelt, die beispielsweise auch in Nachtsichtgeräten genutzt wird. Gegenüber dem Einstellungsfehler scheint die Ablesegenauigkeit des Winkels für alle Werte vernachlässigbar zu sein.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle besteht in Abweichungen der tatsächlich gefilterten Wellenlängen von den Nennwerten.

3. Die größte Unsicherheit lag hier in der Einstellung des Winkels zwischen der optischen Achse der  $\frac{\lambda}{4}$ -Folie und der Polarisationssebene des Laserstrahls. Damit verbunden sind die relativ großen Abweichungen insbesondere der  $45^\circ$ -Linie. Die Unsicherheit des Analysatorwinkels sowie die Ungenauigkeit des Digitalmultimeters sind wegen der hohen Anzahl an Messwerten für die Endauswertung (Kurvenanpassung) nur von sehr geringem Einfluss.

## Zusammenfassung

1. Der spezifische Drehwinkel des Zuckers beträgt

$$[\alpha] = 5,6^\circ \text{ L g}^{-1} \text{ dm}^{-1} = 0,56^\circ \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

Es könnte sich um Glucose ( $+0,527^\circ \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) oder Lactose ( $+0,52^\circ \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) handeln.

Die Konzentrationen der Zuckerlösungen sind

Probe	$\frac{\beta}{\text{kg m}^{-3}}$
C I	67,4
C II	273
C III	71,2

2. Für den Drehwinkel  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge gilt

$$\alpha \approx k \cdot \lambda^{-2} \quad \text{mit} \quad k \approx 7,4 \cdot 10^6 \text{ }^\circ \text{ nm}^2$$

im Wellenlängenbereich 480 nm... 670 nm.

3. Die nach dem Gesetz von MALUS erwarteten Kurvenverläufe wurden im Experiment beobachtet.