

Laborversuch

# O6 – Polarisation

11.10.2018

Windisch

---

Versuchsleiter:	Burkhardt Simon
Assistent:	Müller Dominik
Dozent:	Prof. Dr. Minamisawa Renato

Grundlagenlabor 3 – EIT – HS2018

## Inhalt

1.	Arbeitsgrundlagen .....	3
1.1	Theoretische Grundlagen zur Polarisation.....	3
1.2	Polarisationsarten .....	5
1.3	Theoretische Aufgabe –Dicke der Viertelwellenplatte .....	6
2.	Durchführung .....	8
2.1	Versuchsanordnung.....	8
2.2	Messvorgang .....	9
2.3	Proben Versuchsobjekt .....	9
2.4	Messungen .....	9
3.	Auswertung .....	10
3.1	Durchlasskennlinie des Polarisator-/Analysatorpaars.....	10
3.2	Zwischenschaltung einer Halbellenplatte bei verschiedenen Winkeln.....	11
3.3	Zwischenschaltung einer Viertelwellenplatte bei verschiedenen Winkeln .....	13
3.4	Polarisation eines grünen Lasers mit Viertelwellenplatte bei 45° .....	15
4.	Fehlerrechnung .....	16
4.1	Fehlerquellen.....	16
4.2	Berechnung des Fehlers .....	17
4.2.1	Systematische Fehler.....	17
4.2.2	Statistische Fehler .....	17
4.2.3	Berechnung des gesamten Fehlers .....	18
4.3	Bemerkung zur Genauigkeit der Messung mit dem grünen Laser.....	18
5.	Resultate und Diskussion .....	18
5.1	Durchlasskennlinie des Polarisator-/Analysatorpaars.....	18
5.2	Zwischenschaltung einer Halbwellenplatte .....	19
5.3	Zwischenschalten einer Viertelwellenplatte .....	19
5.4	Viertelwellenplatte mit grünem Laser.....	19
6.	Quellen .....	20
7.	Anhang.....	21

## 1. Arbeitsgrundlagen

### 1.1 Theoretische Grundlagen zur Polarisation

Bei diesem Versuch werden die Polarisationseigenschaften von elektromagnetischen Wellen näher untersucht. Durch Experimente mit Licht sollen diese Eigenschaften nachgewiesen und bestätigt werden.

In der Natur kommen polarisierte Strahlungen nur selten vor. Die im Alltag verwendeten Lichtquellen senden nicht-polarisiertes Licht aus. Die Polarisation kann jedoch künstlich mit Polarisationsfiltern hervorgerufen werden. Um die Polarisation verstehen zu können, muss das Licht als Welle betrachtet werden. Bei dieser Betrachtungsweise ist das Licht eine Transversalwelle die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt.

Idealerweise breitet sich diese Transversalwelle mit Lichtgeschwindigkeit entlang der z-Achse aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist jedoch materialabhängig. Dafür werden folgende zwei Materialkonstanten definiert:

$$\begin{aligned} &\text{Magnetische Permeabilitätszahl } \mu_r \\ &\text{Elektrische Permittivitätszahl } \epsilon_r \end{aligned}$$

Beides sind Faktoren für die beiden Naturkonstanten: Elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$  und Magnetische Feldkonstante  $\mu_0$ . Aus den beiden Angaben lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in einem Medium berechnen.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (1.1)$$

Des Weiteren kann ein materialabhängiger Wellenwiderstand definiert werden.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (1.2)$$

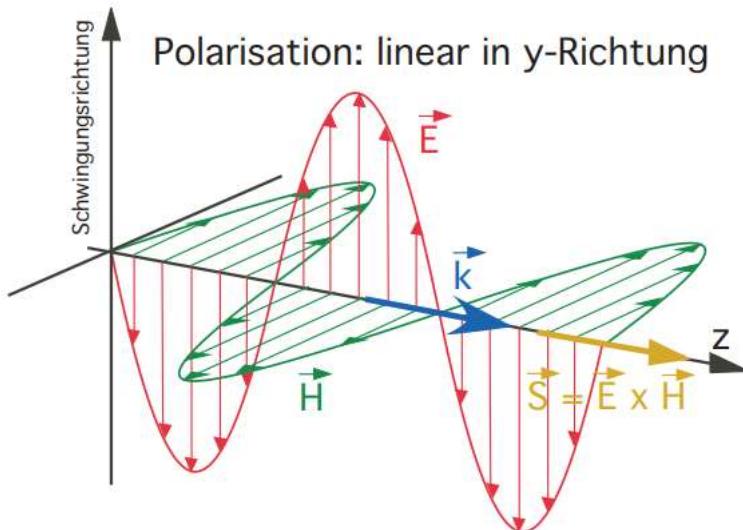


Abbildung 1: elektrische und magnetische Komponente einer Lichtwelle [1]

In der Abbildung 1 sind die beiden Teilwellen einer elektromagnetischen Welle veranschaulicht. Die Pfeile, die die Schwingung symbolisieren, können als Vektoren betrachtet werden. Addiert man die elektrischen und magnetischen Feldvektoren, so erhält man die gesamte elektromagnetische Schwingung (hier: mit  $45^\circ$  Winkel zu den x- und y-Achsen). Zudem ist in der Abbildung der Poyntingvektor  $S$  (auch Energiestromdichte) entlang der z-Achse eingezeichnet. Diese berechnet sich aus dem Kreuzprodukt der B- und E-Feldvektoren.

Zudem kann man die elektromagnetische Welle als Superposition der beiden harmonischen Teilwellen verfassen. Die Vektoren des B-Feldes und das E-Feldes ergeben die gesamte Welle.

$$\vec{E}(z,t) = \begin{pmatrix} \hat{E}_x \cdot \cos(k \cdot z - \omega t - \delta_x) \\ \hat{E}_y \cdot \cos(k \cdot z - \omega t - \delta_y) \end{pmatrix} = \operatorname{Re} \begin{pmatrix} \hat{E}_x \cdot e^{i(k \cdot z - \omega t - \delta_x)} \\ \hat{E}_y \cdot e^{i(k \cdot z - \omega t - \delta_y)} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

In der Formel 1.3 erkennt man, dass für beide Teilschwingungen eine Phase  $\delta$  dazugerechnet wird. Dieser Winkel beschreibt eine Phasenverschiebung, die durch das durchflossene Medium hervorgerufen wird.  $\delta$  ist sowohl vom Material, als auch von der dicke desselbigen abhängig.

Im Idealfall werden beide Teilwellen gar nicht (oder gleich stark) verzögert. Dann ist der gesamte Winkel der Phasen ( $\phi = \delta_x - \delta_y$ ) gleich 0 oder  $k * \pi$ . Es entsteht also eine neue Welle  $E$ , die nur in einer fest definierten Ebene schwingt. Man nennt diese linear polarisiert.

Die Gleichung 1.3 vereinfacht sich nun zu:

$$\vec{E}(z,t) = \begin{pmatrix} \hat{E}_x \\ \hat{E}_y \end{pmatrix} * \cos(k * z - \omega t) \quad (1.4)$$

[1] H.L. "O 6-0 Polarisation," O 6-0.pdf, 01. Juli 2014, S. 1

## 1.2 Polarisationsarten

Je nach Dicke und Brechungsindex des Übertragungsmediums, variiert der Grad der Polarisation. Die resultierende Welle, die aus der Überlagerung des B- und des E-Feldes entsteht, hat dann unterschiedliche Eigenschaften.

Für die Aneignung des Verständnisses der Polarisation, sind Visualisierungstools in Python zur Verfügung gestellt worden. Diese basieren jedoch auf der alten Python 2 Version und verwenden Libraries, die heute andere Features beinhalten. Aus diesem Grund, sind im folgenden Abschnitt, Bilder aus einem früheren Laborbericht von Dominik Sommer aus dem Jahr 2010 abgebildet. [2]

Die folgenden Darstellungen visualisieren unterschiedliche Polarisationsarten. Die resultierende elektromagnetische Welle ist **Pink**.

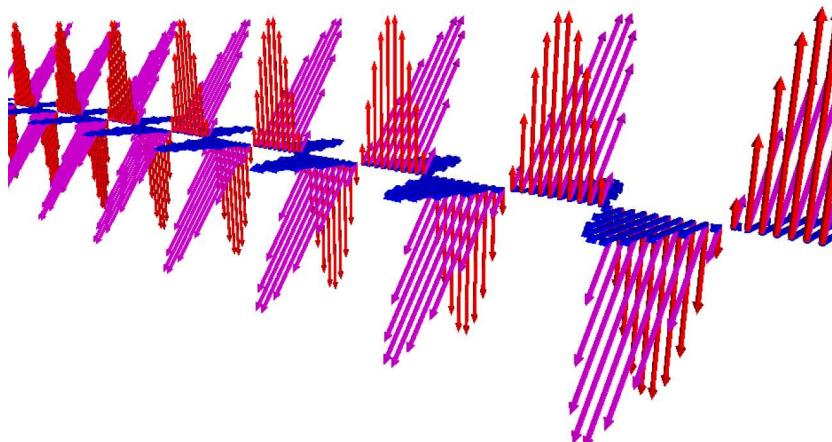


Abbildung 2: Lineare Polarisation

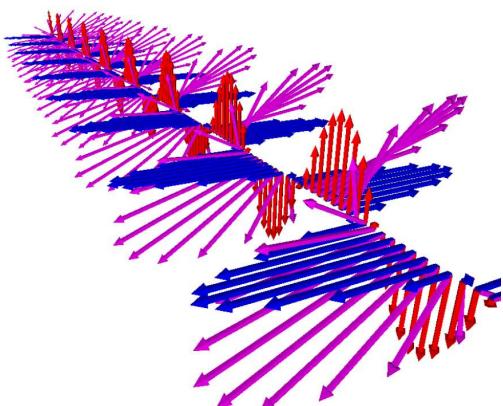


Abbildung 3: Elliptische Polarisation

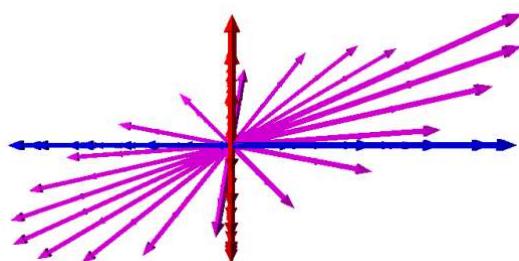


Abbildung 4: Elliptische Polarisation (Frontalansicht)

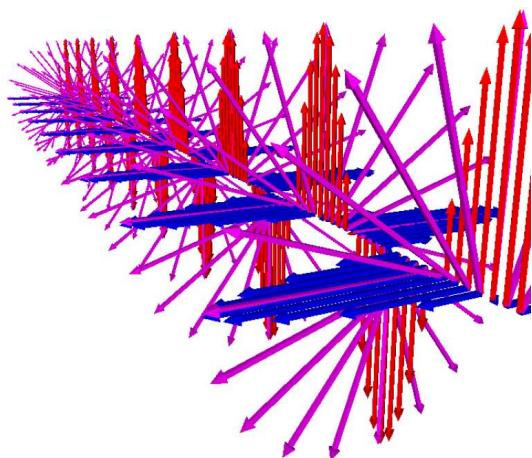


Abbildung 5: Zirkulare Polarisation

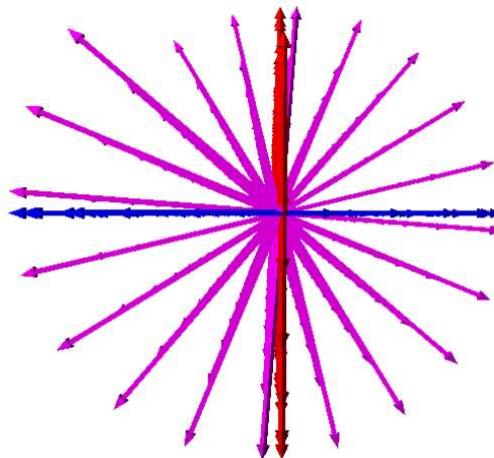


Abbildung 6: Zirkulare Polarisation (Frontalansicht)

### 1.3 Theoretische Aufgabe –Dicke der Viertelwellenplatte

Berechnen Sie die Dicke einer  $\lambda/4$ -Wellenplatte erster Ordnung ( $m=0$ ) aus den Brechungsindizes von Quarz: Ausserordentlicher Brechungsindex  $n_e = 1.55328$  (= Brechungsindex für die eine Hauptpolarisationsrichtung), ordentlicher Brechungsindex  $n_o = 1.54418$  (= Brechungsindex ...)

$n_e$	1.55328
$n_o$	1.54418
$\Delta\Phi = \lambda/4$	$\pi/2$
$\lambda$	632.8nm
$m$	0

Folgende Formeln fliessen in die Berechnung der Plattendicke mit ein. Formel 3.1 beschreibt die optische Wellenlängendifferenz für einen in x-Richtung polarisierten Strahl. Wenn man beide Richtungen betrachtet, folgt in 3.2 die Phasenverschiebung des gesamten Strahls in Abhängigkeit der Dicke. Dabei wiederholt sich die Phasenverschiebung alle  $m^*2\pi$ , was in 3.3 dargestellt ist. Durch Einfügen und Umstellen von 3.3 in 3.2 erhält man die Formel zur Berechnung der Dicke (3.4). [3]

$$OPD_x = n_x * d \quad (3.1)$$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} * (OPD_x - OPD_y) = \frac{2\pi}{\lambda} * \Delta n * d \quad (3.2)$$

$$\Delta\Phi = m\pi + \Delta\Phi = m\pi + \frac{\pi}{2} \quad (3.3)$$

$$d = \frac{\lambda}{2 * \Delta n} * \left(m + \frac{1}{2}\right) \quad (3.4)$$

Aus der vorherigen Formel errechnet sich die Dicke der  $\lambda/4$ -Platte folgendermassen:

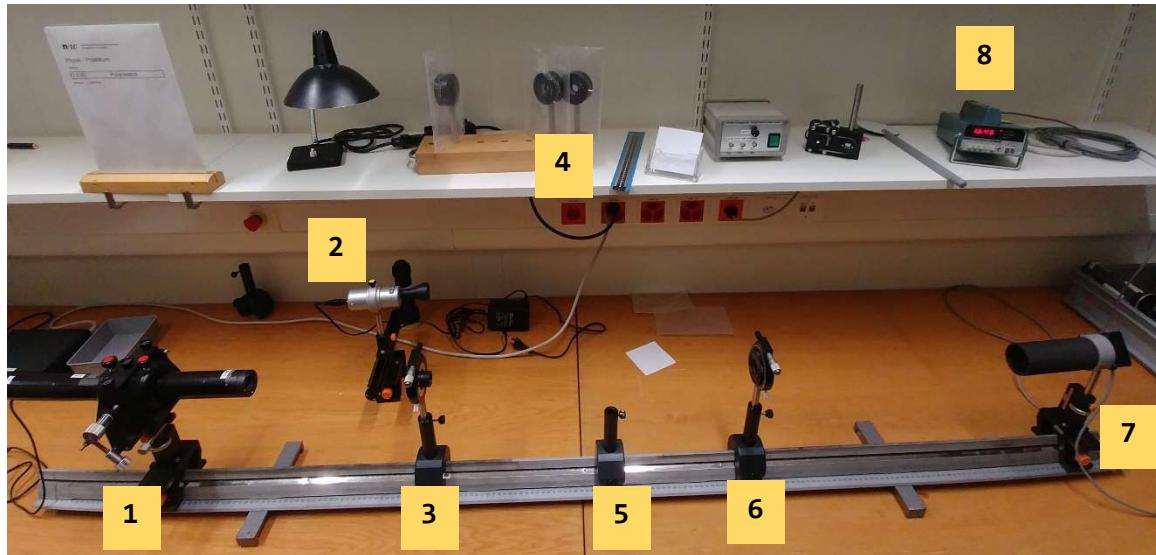
$$d = \frac{632.8 * 10^{-9}m}{2 * (1.55328 - 1.54418)} * \left(m + \frac{1}{2}\right) = 34.769 * \left(m + \frac{1}{2}\right) \mu m$$

In diesem Fall ist für eine Platte ersten Grades  $m=0$  einzusetzen.

$$\underline{d = 17.38 \mu m}$$

## 2. Durchführung

### 2.1 Versuchsanordnung



**Abbildung 7:** Der gesamte Versuchsaufbau, mit dem Laser (links), den 3 Filterpositionen (Mitte) und der Messsonde für die Beleuchtungsstärke (rechts). Oben rechts auf dem Tablar ist das Tektronix Messgerät zur Messsonde.

Die **Abbildung 7** zeigt den Versuchsaufbau während dem ersten Versuch zur Messung der Beleuchtungsstärke.

1	He-Ne-Laser $\lambda = 632.8\text{nm}$ 8.7mW (Rot)
2	NdYAG-Laser (diodengepumpt und frequenzverdoppelt) $\lambda = 532\text{nm}$ 1mW (Grün)
3	Polarisator (Glan-Thompson Prisma)
4	$\lambda/2$ - und $\lambda/4$ -Wellenplatte für 632.8nm
5	Halter für die $\lambda/2$ - und $\lambda/4$ -Wellenplatten
6	Analysator (Glan-Thompson Prisma)
7	Messsonde für die Beleuchtungsstärken Tektronix J4511
8	Tektronix digital Photometer J16

## 2.2 Messvorgang

Der Laser und das Messgerät sind eingeschaltet. Der Laser ist auf die Messsonde des Messgerätes ausgerichtet. Dazwischen sind auf der Schiene der Polarisator und der Analysator aufgestellt. Bei den Messungen mit den  $\lambda/2$ - und  $\lambda/4$ -Wellenplatten befindet sich diese zwischen dem Polarisator und dem Analysator.

Nun wird der Polarisator auf einen festen Winkel ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ) fest eingestellt. Der Analysator wird jedes Mal in  $15^\circ$ -Schritten um  $360^\circ$  verstellt und die Intensität gemessen.

## 2.3 Proben Versuchsobjekt

Als Versuchsobjekt dienen die beiden Wellenplatten für  $\lambda = 632.8\text{nm}$ .

## 2.4 Messungen

Im Gesamten wurden 4 Messungen durchgeführt.

1. Bestimmung der Durchlasskennlinie des Polarisator-/Analysatorpaars
2. Mit  $\lambda/2$ - und  $\lambda/4$ -Wellenplatten für mehrere Polarisatorstellungen die Auslöschstellung des Analysators bestimmen
3. Messung der Intensität des grünen Lasers bei  $45^\circ$ -Polarisatorwinkel

### 3. Auswertung

#### 3.1 Durchlasskennlinie des Polarisator-/Analysatorpaars

Die Abbildung 8 zeigt die gemessenen Intensitäten bei unterschiedlichen Stellungen des Analysators. Die Messpunkte wurde mit einer quadrierten Kosinusfunktion gefittet.

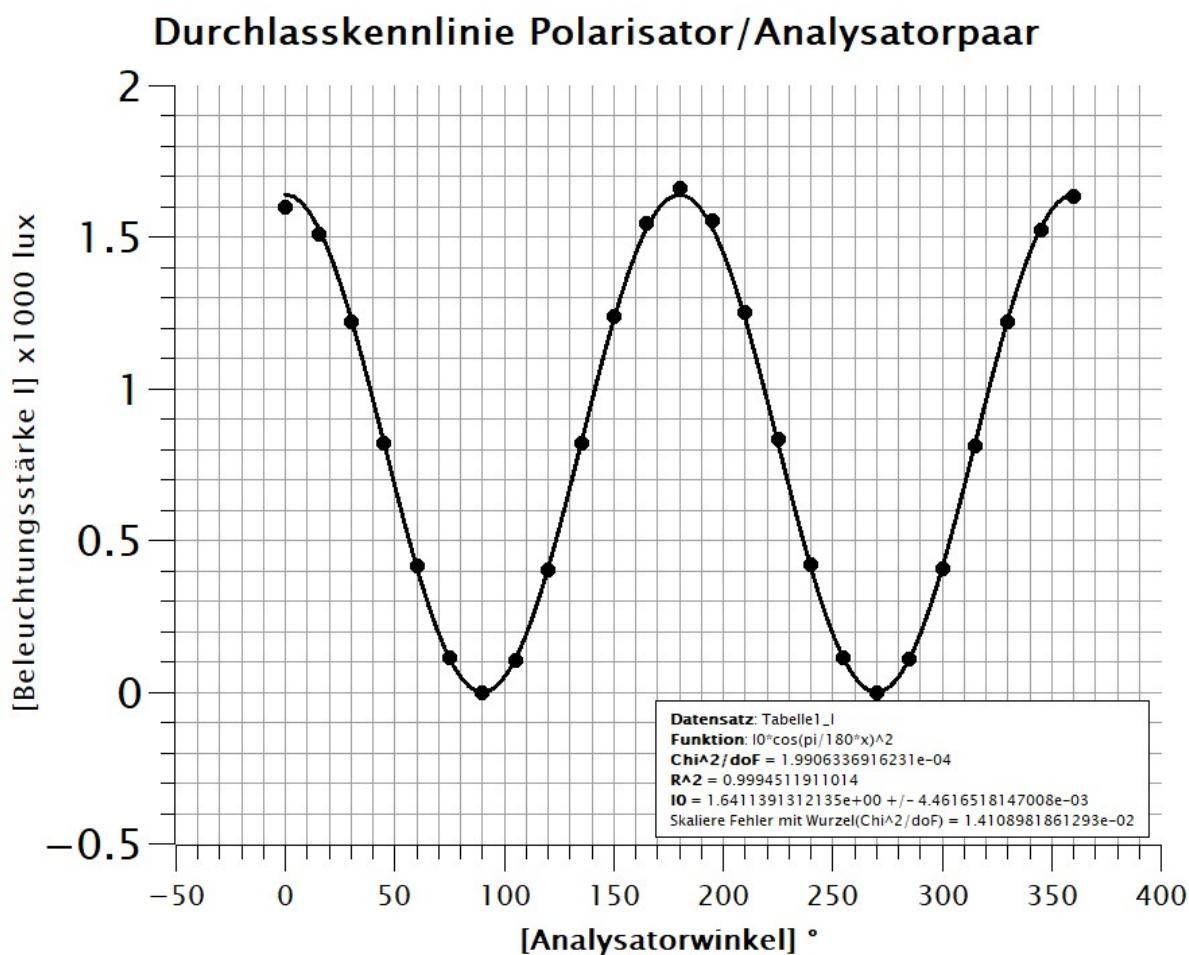


Abbildung 8: Durchlasskennlinie mit gefitteter Kurve

### 3.2 Zwischenschaltung einer Halbwellenplatte bei verschiedenen Winkeln

Die **Abbildung 9** zeigt die 4 Verläufe der Lichtintensität bei der Halbwellenplatte. Klar ersichtlich ist, dass der Intensitätsverlauf bei veränderter Stellung der Halbwellenplatte nur in der Phase verschoben wird. Die Intensität wird dadurch nicht verringert.

$\delta$  ist der Winkel der Wellenplatte,  $\varphi$  ist der Winkel des Analysators in 15°-Schritten.

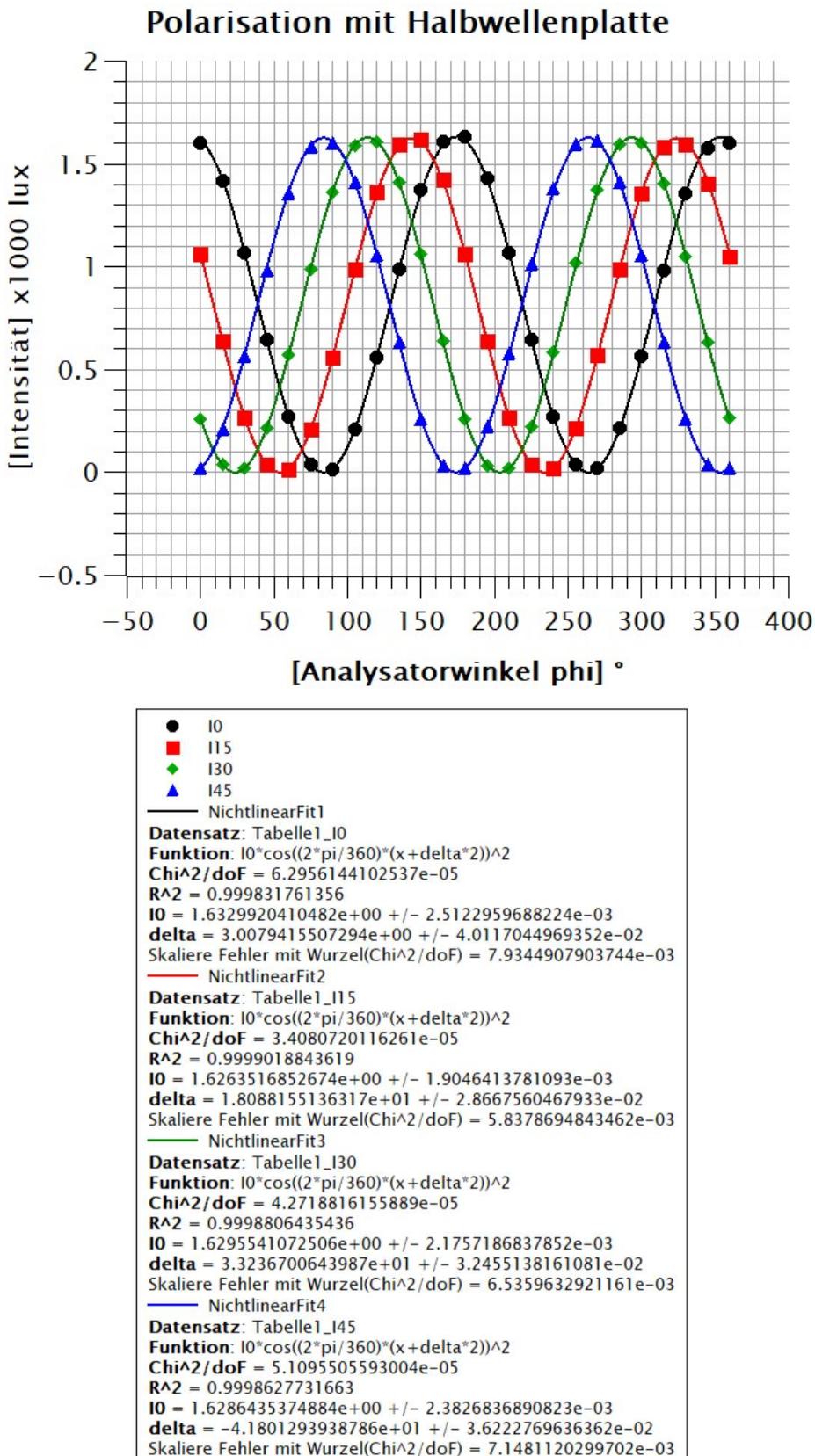


Abbildung 9: Messpunkte, Fitkurven und deren Parameter zu der Messung der Lichtintensität durch die  $\lambda/2$ -Wellenplatte, bei den Plattenstellungen 0°, 15°, 30° und 45°

### 3.3 Zwischenschaltung einer Viertelwellenplatte bei verschiedenen Winkeln

Die Abbildung 10Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die Intensitätsverläufe für die Verschiedenen Stellungen der Viertelwellenplatte. Hier beeinflusst die Plattenstellung auch die Polarisationsrichtung.

Die Fitfunktion ist eine Summe aus mehreren Harmonischen, die sowohl die Stellung der Wellenplatte als auch die Stellung des Analysators berücksichtigt.

$$I_{(\varphi)} = I_0 * \left( \cos\left(\frac{\pi}{180} * \delta\right)^2 * \cos\left(\frac{\pi}{180} * (\varphi - \delta)\right)^2 + \sin\left(\frac{\pi}{180} * \delta\right)^2 * \sin\left(\frac{\pi}{180} * (\varphi - \delta)\right)^2 \right)$$

I0\*(cos(pi/180\*delta)^2\*cos((x-delta)\*pi/180)^2+sin(pi/180\*delta)^2\*sin((x-delta)\*pi/180)^2)

$\delta$  ist der Winkel der Wellenplatte,  $\varphi$  ist der Winkel des Analysators in 15°-Schritten.

## Polarisation mit Viertelwellenplatte

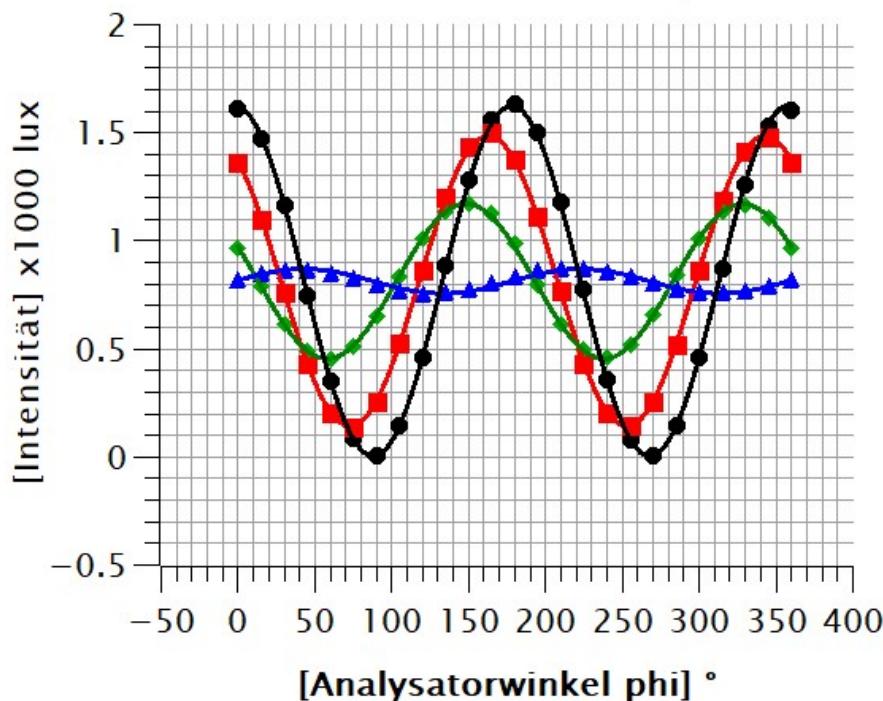


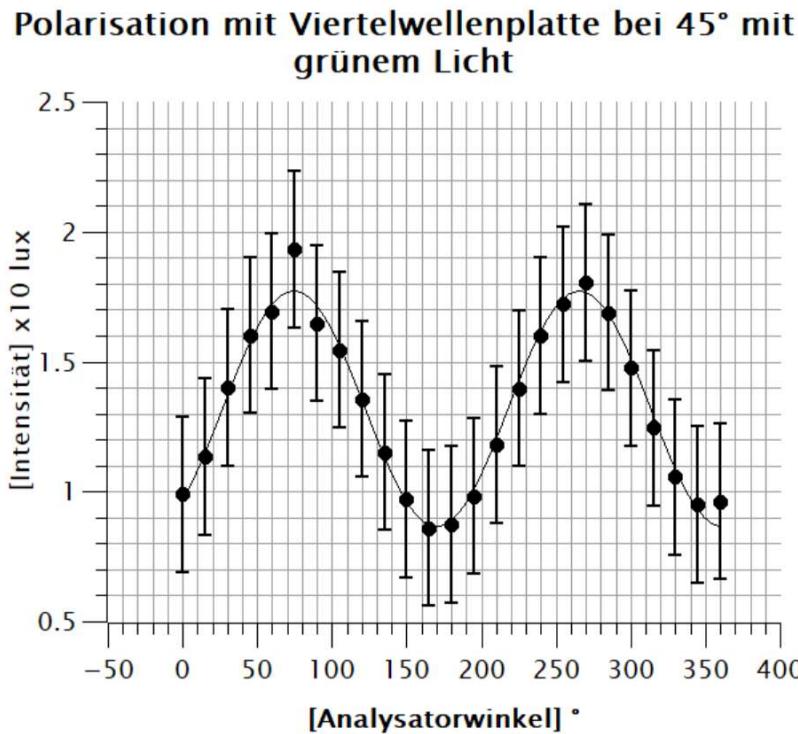
Abbildung 10: Messpunkte, Fitkurven und deren Parameter zu der Messung der Lichtintensität durch die  $\lambda/4$ -Wellenplatte, bei den Plattenstellungen 0°, 15°, 30° und 45°

### 3.4 Polarisation eines grünen Lasers mit Viertelwellenplatte bei 45°

Bei der Messung der Intensität des grünen Lichts traten erhebliche Probleme mit der Stabilität des Messwertes auf. Darum wird der absolute Fehler für alle Messungen bei  $0.3 * 10^1$  lux angesetzt.

Ausserdem ist die Viertelwellenplatte für eine Wellenlänge von  $\lambda = 632\text{nm}$  ausgelegt. Der verwendete Laser passt mit 532nm nicht zu der Wellenplatte. Die Abbildung 11 zeigt die Messdaten mit Fitkurve. Gefittet wurde mit folgender Funktion. Diese hat keine physikalische Relevanz.

$$I(\varphi) = I_{offset} + I_0 * \cos\left(\frac{\pi}{180} * (\varphi\omega + \delta)\right)^2$$



```

Datensatz: Tabelle1_2
Funktion: l0f+I0*(cos(pi/180*(x*w+delta))^2)
Chi^2/doF: 2.5122046280335e-03
R^2: 0.9795180310393
I0 = -9.0601828701086e-01 +/- 2.8858387942142e-02
l0f = 1.7732811901500e+00 +/- 1.7392301733356e-02
delta = 2.0097378167085e+01 +/- 1.7704518787735e+00
w = 9.4163802894613e-01 +/- 9.0106322770884e-03
Skaliere Fehler mit Wurzel(Chi^2/doF) = 5.0121897689867e-02
  
```

Abbildung 11: Messpunkte mit Fehlerbalken, Fitkurve und deren Parameter zu der Messung der Lichtintensität durch die  $\lambda/4$ -Wellenplatte, bei den Plattenstellung 45° mit grünem Licht

## 4. Fehlerrechnung

In diesem Teil werden die Fehlerquellen bewertet und die Fehlerrechnung durchgeführt. Bei der Fehlerrechnung wird nur die erste Messung im Kapitel 3.1 berechnet. Zu den anderen Messungen folgt eine schriftliche Bewertung der Ergebnisse. Die Ungenauigkeit der letzten, im Kapitel 3.4 behandelten Messung, wird in der Diskussion thematisiert.

### 4.1 Fehlerquellen

Der gesamte Fehler setzt sich aus systematischen Fehlern bei der Messung als auch aus statistischen Fehlern bei der Auswertung zusammen. Folgend werden zuerst die systematischen Fehler betrachtet.

Eine Fehlerquelle ist der Winkel des Analysators, der mit der Nonius-Skala auf  $5'$  genau eingestellt werden. Aus Zeitgründen wurden die Winkel des Analysators nur auf  $0.5^\circ$  genau eingestellt.

$$s_\phi = \pm 0.5^\circ$$

Eine weitere Fehlerquelle ist die Ungenauigkeit des J16 Messgerätes. Diese ist im Datenblatt mit  $\pm 1$  Digit und 5% Genauigkeit innerhalb der NBS Standards beziffert. [4]

$$s_{Im} = \pm (0.05 * 1.63 * 10^3) \text{ lux} + (0.001 * 10^3) \text{ lux} = \pm 82.5 \text{ lux}$$

Hinzu kommt der statistische Fehler aus der Analyse mit QTIplot. Dieser ist dem Kapitel 3.1 zu entnehmen und beträgt:

$$s_{Is} = \pm 4.46 \text{ lux}$$

Bei der Fehlerrechnung wurde der folgende Mittelwert aus dem Fit von Kapitel 3.1 verwendet.

$$I_0 = 1.641 * 10^3 \text{ lux}$$

## 4.2 Berechnung des Fehlers

Die Grundformel zur Berechnung der Lichtstärke aus der ersten Messung in Kapitel 3.1 ist unten aufgelistet. Die partiellen Ableitungen dieser Gleichung fliessen in die Fehlerrechnung ein.

$$I_{(\varphi)} = I_0 * \cos\left(\frac{\pi}{180} * \varphi\right)$$

$$I_0 = \frac{I_\varphi}{\cos\left(\frac{\pi}{180} * \varphi\right)}$$

### 4.2.1 Systematische Fehler

Der systematische Fehler setzt sich aus dem Ablesefehler des Winkels und der Ungenauigkeit des Messgerätes zusammen.

Dabei ist der Ablesefehler des Winkels:

$$\left(\frac{\partial I_0}{\partial \varphi}\Big|_{I_0} * s_\varphi\right)^2 = \frac{I_{0m} * \pi}{180} * \tan\left(\frac{\pi}{180} * \varphi\right) * \sec\left(\frac{\pi}{180} * \varphi\right) * s_\varphi = -5.882$$

Der Messfehler der Lichtstärke ist:

$$\left(\frac{\partial I_0}{\partial I}\Big|_{I_0} * s_{Im}\right)^2 = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{180} * \varphi_m\right)} = -88.3695$$

### 4.2.2 Statistische Fehler

Der statistische Fehler aus Kapitel 3.1 ist:

$$\left(\frac{\partial I_0}{\partial I}\Big|_{I_0} * s_{Is}\right)^2 = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{180} * \varphi_m\right)} = -4.7773$$

#### 4.2.3 Berechnung des gesamten Fehlers

Mit der folgenden Formel erhält man den Messfehler.

$$s_{I_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_0}{\partial \varphi}\Big|_{I_0} * s_\varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial I_0}{\partial I}\Big|_{I_0} * s_I\right)^2 + \left(\frac{\partial I_0}{\partial I}\Big|_{I_0} * s_{IS}\right)^2}$$

$$s_{I_0} = \sqrt{(-5.882)^2 + (-88.3695)^2 + (-4.7773)^2} = 88.6942$$

#### 4.3 Bemerkung zur Genauigkeit der Messung mit dem grünen Laser

Die Messwerte der im Kapitel 3.4 beschriebenen Messung weisen einen sehr hohen Fehler im Bereich von  $\pm 0.300 * 10^1$  lux auf.

### 5. Resultate und Diskussion

#### 5.1 Durchlasskennlinie des Polarisator-/Analysatorpaars

Mit der Messung in Kapitel 3.1 konnte die Intensität des roten Lasers festgestellt werden. Diese ist nach der Fehlerrechnung:

$$I_0 = (1.641 * 10^3 \pm 88.7) \text{ lux}$$

Ausserdem kann anhand der grafischen Darstellung das Verhalten von linearem Polarisator und Analysator aufgezeigt werden. Die Messung bestätigt die Theorie insofern, dass das linear polarisierte Licht mit der Kosinusfunktion geometrisch auf das Gitter des Analysators projiziert wird. Darum erscheint bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  die vollständige Auslöschung des Lichts.

## 5.2 Zwischenschaltung einer Halbwellenplatte

Die Messreihen dieses zweiten Versuchs zeigen, grundsätzlich dasselbe Bild wie die vorangehende Messung ohne Halbwellenplatte. Nur herrscht bei den Plattenstellungen  $\neq 0^\circ$  eine Phasenverschiebung um das doppelte des Winkels der Halbwellenplatte.

Die Polarisationsebene dreht sich immer doppelt so schnell wie der Stellwinkel der Halbwellenplatte.

Ausserdem sind bei der Messung im Vergleich zur vorherigen Messung dieselben Minimal- und Maximalwerte für die Intensität herausgekommen.

## 5.3 Zwischenschalten einer Viertelwellenplatte

Was beim Vergleich der Kurven sofort auffällt ist, dass sich die Amplituden im Verhältnis der Winkelstellung ändert. Dieser Effekt ist auf die Polarisationseigenschaft der Viertelwellenplatte zurückzuführen. Die Viertelwellenplatte dreht die Polarisationsebene nicht einfach, sondern bewirkt eine mit zunehmendem Stellwinkel grössere elliptische Polarisation. Bei der letzten Stellung von  $45^\circ$  (blau) variiert die Intensität nur noch in einem geringen Bereich. Hier ist die Polarisierung nahezu zirkular. Dieses Verhalten deckt sich grundsätzlich mit der Theorie.

Störend ist jedoch der noch immer vorhandene «Ripple» bei der Plattenstellung von  $45^\circ$  (blau). Diese müsste laut der Theorie eine vollständig zirkulare Polarisation bewirken. Der sichtbare Fehler kann auf ungenau eingestellte Winkel aller drei optischen Elemente zurückgeführt werden.

## 5.4 Viertelwellenplatte mit grünem Laser

Dieses Experiment stellte sich bei der Durchführung schon als problematisch dar. Der grüne Laserstrahl konnte keine zeitlich konstante Lichtintensität abgeben. Die Intensität schwankte in Ruhestellung um einen Bereich von  $\pm 0.300 * 10^1$  lux. Dieser Toleranzbereich ist für das durchgeführte Experiment zu gross. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine tiefergehende Interpretation der Messdaten verzichtet.

Der Grund für die Instabilität könnte auf eine thermische Regelung im Laser selbst zurückzuführen sein.

## 6. Quellen

- [1] H. L. „O 6-0 Polarisation,“ Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Windisch, 2014.
- [2] D. Sommer, „Polarisation Versuch O-6,“ Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Windisch, 26. November 2010.
- [3] I. a. P. U. E. Institut of Optics, „Übungsblatt 3 Wellenoptik SS 2013,“ 2013. [Online]. Available: [http://www.optik.uni-erlangen.de/odem/vorlesung/ss13/uebung3\\_wellen\\_optik\\_SS2013\\_mit\\_Loesung.pdf](http://www.optik.uni-erlangen.de/odem/vorlesung/ss13/uebung3_wellen_optik_SS2013_mit_Loesung.pdf). [Zugriff am 15. November 2018].
- [4] „J16 | Tektronix Light & Color Meters | ATEC Rentals,“ 2018. [Online]. Available: [https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/tektronix-j16\\_datasheet.pdf](https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/tektronix-j16_datasheet.pdf). [Zugriff am 18. November 2018].

## 7. Anhang

Laser ROT (Polarisator-Analysator)		Laser ROT (zusätzlich $\lambda/2$ -Platte)					Laser ROT (zusätzlich $\lambda/4$ -Platte)					Laser GRÜN (zusätzlich $\lambda/4$ -Platte bei 45°)			
Winkel in ° *	Beleuchtungsstärk e x 1000 lux	Winkel der $\lambda/2$ -Platte **				Winkel in ° *	Winkel der $\lambda/4$ Platte **				Winkel in ° *	Winkel der $\lambda/4$ -Platte bei 45°			
		0	15	30	45		0	15	30	45		0	15	30	45
0	1.600	0	1.604	1.064	0.262	0.019	0	1.608	1.360	0.966	0.820	0	0.990		
15	1.509	15	1.417	0.639	0.040	0.211	15	1.471	1.098	0.789	0.846	15	1.135		
30	1.222	30	1.069	0.266	0.019	0.565	30	1.163	0.759	0.613	0.861	30	1.400		
45	0.823	45	0.648	0.038	0.216	0.982	45	0.749	0.430	0.493	0.864	45	1.602		
60	0.417	60	0.271	0.017	0.571	1.358	60	0.352	0.204	0.456	0.849	60	1.693		
75	0.115	75	0.041	0.211	0.986	1.581	75	0.083	0.140	0.512	0.824	75	1.932		
90	0.000	90	0.016	0.559	1.362	1.601	90	0.005	0.257	0.650	0.795	90	1.648		
105	0.105	105	0.208	0.987	1.592	1.412	105	0.143	0.524	0.832	0.770	105	1.546		
120	0.403	120	0.562	1.361	1.610	1.058	120	0.464	0.865	1.010	0.757	120	1.355		
135	0.819	135	0.990	1.595	1.414	0.632	135	0.882	1.200	1.136	0.758	135	1.152		
150	1.238	150	1.373	1.619	1.060	0.259	150	1.281	1.432	1.174	0.775	150	0.970		
165	1.545	165	1.610	1.422	0.639	0.035	165	1.560	1.498	1.126	0.805	165	0.860		
180	1.662	180	1.630	1.065	0.259	0.021	180	1.636	1.380	0.986	0.832	180	0.874		
195	1.556	195	1.433	0.642	0.035	0.224	195	1.498	1.110	0.795	0.860	195	0.982		
210	1.253	210	1.071	0.265	0.021	0.581	210	1.178	0.768	0.616	0.874	210	1.180		
225	0.836	225	0.644	0.038	0.225	1.012	225	0.772	0.434	0.495	0.874	225	1.396		
240	0.421	240	0.271	0.020	0.583	1.379	240	0.357	0.206	0.459	0.859	240	1.599		
255	0.114	255	0.037	0.219	1.017	1.596	255	0.080	0.142	0.518	0.832	255	1.721		
270	0.000	270	0.019	0.570	1.375	1.614	270	0.005	0.255	0.656	0.802	270	1.804		
285	0.108	285	0.215	0.991	1.594	1.414	285	0.145	0.522	0.838	0.775	285	1.689		
300	0.407	300	0.567	1.357	1.604	1.059	300	0.462	0.865	1.011	0.760	300	1.476		
315	0.813	315	0.985	1.583	1.404	0.633	315	0.873	1.188	1.132	0.758	315	1.246		
330	1.222	330	1.355	1.598	1.048	0.261	330	1.260	1.416	1.164	0.770	330	1.055		
345	1.525	345	1.577	1.403	0.634	0.039	345	1.531	1.479	1.102	0.793	345	0.950		
360	1.637	360	1.602	1.050	0.264	0.018	360	1.607	1.361	0.965	0.820	360	0.962		
						Beleuchtungsstärke x 1000 lux					Beleuchtungsstärke x 1000 lux				

\*Genauigkeit: 5" / \*\*Genauigkeit: 1°