

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>1</b>
2.1	Polarisation . . . . .	1
2.2	Doppelbrechung . . . . .	1
2.3	Indexellipsoid . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Pockels-Effekt - der lineare elektro-optische Effekt</b>	<b>3</b>
3.1	Grundlagen . . . . .	3
3.2	Die ADP-Pockelszelle . . . . .	3
3.3	Versuchsaufbau . . . . .	4
3.4	Versuchsdurchführung . . . . .	5
3.5	Auswertung . . . . .	6
3.5.1	Messung mit Sägezahnspannung . . . . .	7
3.5.2	Messung mit modulierter Gleichspannung . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Faraday-Effekt - der magneto - optische Effekt</b>	<b>9</b>
4.1	Grundlagen . . . . .	9
4.1.1	Allgemeines . . . . .	9
4.1.2	Magnetfeld der Spule . . . . .	9
4.2	Versuchsaufbau . . . . .	10
4.3	Versuchsdurchführung . . . . .	11
4.4	Auswertung . . . . .	11
4.4.1	Herstellerangabe in SI Einheiten . . . . .	13
4.4.2	$2\epsilon$ - Messung . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
5.1	Pockels-Effekt . . . . .	14
5.2	Faraday-Effekt . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>15</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Ausrichtung der Kristalle in einer ADP-Pockelszelle . . . . .	4
2	Versuchsaufbau des Pockels-Effekts . . . . .	5
3	Signal des Oszilloskops . . . . .	7
4	Versuchsaufbau Faraday Effekt[2] . . . . .	10
5	Winkeleinstellung des Polarimeters in Abhängigkeit des Stroms	12
6	-125,3V . . . . .	16
7	-122,2V . . . . .	16

# 1 Abstract

Im Versuch wurden mit dem Pockels- und Faradayeffekt der lineare elektrooptische Effekt, so wie der magnetooptische Effekt untersucht. Hierbei wurde der elektrooptische Koeffizient  $r_{14} = (25,7 \pm 6,28) \frac{\text{pm}}{\text{V}}$  der verwendeten Pockelszelle bestimmt. Beim Faraday Effekt konnte die Verdetkonstante von Schwerflint als  $V = (1,000 \pm 0,006) \frac{\circ}{\text{kA}}$  bestimmt werden.

# 2 Theorie

## 2.1 Polarisation

Die Polarisation einer Welle beschreibt deren Schwingungsrichtung. Dies ist nur für Transversalwellen möglich und ist in die folgenden drei Klassifizierungen eingeteilt:

- Lineare Polarisation: Ist das betrachtete Licht linear polarisiert, so ist die Schwingungsrichtung konstant und kann durch einen Winkel mit einer festgesetzten Ebene angegeben werden.
- Zirkulare Polarisation: Im Fall von zirkularer Polarisation bleibt der Betrag der Auslenkung konstant. Die Schwingungsrichtung ändert sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit auf der orthogonal zum Wellenvektor stehenden Ebene. Es gibt links- und rechtszirkular polarisierte Wellen.
- Elliptische Polarisation: Die elliptische Polarisation ist eine Mischform. Hier beschreibt die Auslenkung der Transversalwelle eine Ellipsenbahn.

## 2.2 Doppelbrechung

Die charakteristische Eigenschaft von doppelbrechenden Medien ist, dass der Brechungsindex für einfallendes Licht abhängig ist von dessen Polarisation und Ausbreitungsrichtung. Dieser Effekt tritt in anisotropen Medien auf, das heißt die Lichtfortpflanzung im Medium erfolgt nicht im gesamten Medium mit der gleichen Richtung und Geschwindigkeit (Isotropie), sondern ist von der Ausbreitungsrichtung der Welle abhängig.

Beim Auftreffen der Lichtwelle auf das optisch-anisotrope Medium wird sie in zwei senkrecht zueinander polarisierte Lichtbündel aufgespaltet. Für den so genannte ordentlichen Strahl kann das Snelliussche Brechungsgesetz angewendet werden, für den zweiten Teil, den außerordentlichen Strahl, gilt dieses Gesetz nicht mehr. Die optische Achse im Medium ist die Richtung, in der beide Strahlen die gleiche Richtung haben. Passiert es nun, dass ein Strahl parallel zur optischen Achse auf das Medium auftrifft, kommt es zu einem Phasenshift zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl, der

abhängig ist von der Breite des Mediums. Außerdem ändert sich die Richtung der Polarisation. Die Polarisationsrichtung wird um  $90^\circ$  gedreht, wenn der Gangunterschied  $\frac{\lambda}{2}$  beträgt.

### 2.3 Indexellipsoid

Mit Hilfe eines Indexellipsoiden ist es möglich, die Lichtbrechung in einem doppelbrechenden Kristall anschaulich zu beschreiben. Weil in anisotropen Medien die Richtung der dielektrischen Verschiebung und des elektrischen Feldes nicht immer gleich sind, betrachtet man die dielektrische Konstante jetzt als einen Tensor 2. Stufe.

$$\epsilon_{ij} = a_{ij} + r_{ijk}E + \dots \quad (1)$$

Hier ist der Parameter  $r_{ijk}$  der elektro-optische Koeffizient und ein Tensor 3. Stufe. Bei genauerer Betrachtung von Symmetrien und Systemeigenschaften lässt sich dieser allerdings noch vereinfachen.

Der Indexellipsoid ist nun definiert durch ein dreiachsiges Koordinatensystem mit

$$\sum_{i,j=1}^3 \frac{1}{\epsilon_{ij}} x_i x_j = 1 \quad (2)$$

Bei der Verwendung von isotropen Materialien vereinfacht sich dies zu einer Kugel  $\sum \frac{x_i^2}{\epsilon}$ .

## 3 Pockels-Effekt - der lineare elektro-optische Effekt

### 3.1 Grundlagen

Durch Anlegen einer elektrischen Spannung kann in einem geeigneten Medium der Effekt der Doppelbrechung induziert werden. Hierbei ist die angelegte Spannung linear proportional zu der Differenz der Brechungsindizes von ordentlichem und außerordentlichem Strahl. Außerdem ist die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon = \frac{\delta D}{\delta E}$  abhängig von der Änderung des von Außen angelegten elektrischen Feldes und dementsprechend nicht konstant. Sie lässt sich darstellen über:

$$\epsilon = a + 2bE + 3cE^2 + \dots \quad (3)$$

hier sind die Vorfaktoren a,b,c,... Konstanten. Kann man die hinteren Terme vernachlässigen, so handelt es sich um den Pockels-Effekt <sup>1</sup>. Weil der Brechungsindex  $n = \sqrt{\epsilon}$  ist, ist auch die Lichtbrechung abhängig vom äußeren elektrischen Feld. Grund für die Verwendung von Kristallen ohne Symmetriezentrum im Pockelseffekt ist, dass bei einer Umpolung des elektrischen Feldes, das an einem Kristall mit Symmetriezentrum anliegt, keine neue physikalische Situation entsteht. Entsprechend kann es keine Vorzeichenabhängigkeit geben und die ungeraden Potenzen verschwinden. Der Grund für die Verwendung einer Wechselspannung während des Experiments ist der Piezoelektrische Effekt. Durch diesen kommt es beim Anlegen einer Spannung zu Verformungen des verwendeten Kristalls. Dank der Wechselspannung und der Trägheit des Kristalls wird dies vermieden.

### 3.2 Die ADP-Pockelszelle

In dem hier beschriebenen Experiment wird eine ADP-Pockelszelle (Adenosindiphosphat) mit 45°-Y-Cut verwendet. Sie wird durch Anlegen des elektrischen Feldes optisch zweiachsig, ist zuvor aber optisch einachsig. Der einfallende Lichtstrahl verläuft immer senkrecht zur optischen Achse und zum angelegten elektrischen Feld. Dabei ist die Polarisation des Lichtes um 45° gegenüber der Feldrichtung gedreht.

Die hier verwendete Zelle besteht aus vier hintereinandergereihten Kristallen. Das angelegte elektrische Feld ist vom der ersten zum zweiten und auch vom dritten zum vierten um 180° gedreht. Zwischen zweitem und dritten Kristall gibt es eine Drehung um 90°. Dadurch liegen in der Zelle zwei Kristalleinheiten vor, wodurch die natürliche Doppelbrechung kompensiert wird.

---

<sup>1</sup>Wird der lineare Term in der oben angegebenen Gleichung Null, so spricht man vom Kerr-Effekt, bei dem die Abhängigkeit quadratisch ist. Bei unserem Experiment ist dieser Anteil allerdings vernachlässigbar klein

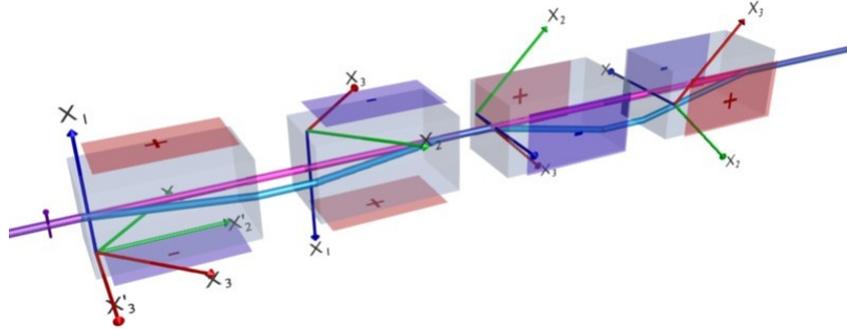


Abbildung 1: Ausrichtung der Kristalle in einer ADP-Pockelszelle

Wegen den anisotropischen Eigenschaften des verwendeten Materials haben die beiden Strahlen unterschiedliche Ausbreitungsrichtungen. Sie werden hinter der Zelle wieder zusammengeführt.

Kennt man die Symmetrien des verwendeten Aufbaus, kann man den elektrooptischen Koeffizienten bei einer Phasenverschiebung von  $\pi$  berechnen<sup>2</sup>.

$$r_{41} = \frac{\lambda d}{4U_{\frac{\lambda}{2}}} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right)}^3 \quad (4)$$

Hierbei sind  $\lambda$  die Wellenlänge des verwendeten Lichts,  $l$  und  $d$  Die Länge bzw. die Dicke der Pockelszelle,  $n_1$  und  $n_2$  ie Brechungsindizes in der x/y- bzw. der z-Richtung und  $U_{\frac{\lambda}{2}}$  ist die Halbwellenspannung.

### 3.3 Versuchsaufbau

Während des hier beschriebenen Experiments wird ein Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 632,8\text{nm}$  verwendet. Mit Hilfe des anschließenden Polarisators gelangt nur linear polarisiertes Licht in die ADP-Pockelszelle. Hinter dieser befindet sich ein weiterer Polarisator, der als Analysator verwendet wird und im Vergleich zum ersten um  $90^\circ$  gedreht ist. Da es bei einer Spannung von  $U_{\frac{\lambda}{2}}$  ebenfalls zu einer Drehung um  $90^\circ$  kommt, erhält man wieder maximale Intensität. Mit einer darauffolgenden Photozelle wird die Intensität nun gemessen und direkt ans Oszilloskop weitergeleitet.

Durch den eingebauten Umschalter ist es möglich, zwischen einer Sägezahnspannung von  $0 - 500\text{V}$  bei einer Frequenz von  $f = 30\text{Hz}$  und einer Gleichspannung mit überlagerter Sinusspannung zu wechseln. Das Oszilloskop wird entweder mit der angelegten Sägezahnspannung oder intern getriggert.

<sup>2</sup>Eine ausführliche Herleitung der angegebenen Formel findet sich in der Versuchsanleitung auf Seite 3.

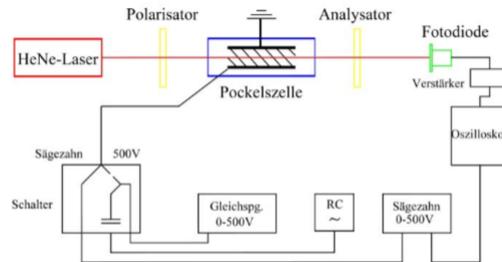


Abbildung 2: Versuchsaufbau des Pockels-Effekts

In der Versuchsanleitung finden sich folgende technische Daten für die hier verwendete Pockelszelle:

Kristalldicke	$d = 2,4\text{mm}$
Kristalllänge (einer)	$l = 20\text{mm}$
Brechungsindex x/y-Richtung	$n_1 = 1,500$
Brechungsindex z-Richtung	$n_2 = 1,477$
Elektrooptischer Koeffizient	$r_{41} = 23,4\text{pm/V}$

### 3.4 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuches wird der Strahlengang des Lasers so eingestellt, dass er durch Verdrehen der Polarisationsfilter zurückreflektiert wird. Anschließend wird der Analysator so eingestellt, dass bei einer angelegten Sägezahnspannung eine maximale Amplitude auf der Photodiode angezeigt wird. Hierbei ist auf die Sättigung der Photodiode zu achten. Um eine sinnvolle Messung zu erhalten ist wichtig, dass die Sättigung nicht erreicht wird, da sonst kein nützliches Signal messbar ist.

#### a Sägezahnmethode:

Bei der ersten Versuchsreihe wird eine Sägezahnspannung von  $0 - 500\text{V}$  bei  $f = 30\text{Hz}$  angelegt. Das Sägezahnsignal, das um einen Faktor um ca 100 gedrosselt wird<sup>3</sup>, und das verstärkte Signal der Photodiode werden auf dem Oszilloskop angezeigt. Dieses kann am Computer abgelesen werden. Die Intensität der Photodiode ist sinusförmig und mit Hilfe der Zeitdifferenz auf der horizontalen Achse ist es später möglich, sie in eine Spannungsdifferenz umzuwandeln. Entsprechend kann man mit Hilfe des Abstandes von Maximum und Minimum der Sinuskurve auf die Halbwellenspannung kommen (vgl. auch Auswertung).

<sup>3</sup>Genauereres dazu findet sich in der Auswertung

Am Oszilloskop kommt nur ein gedrosseltes Sägezahnsignal an, was an dem zwischengeschalteten Verteiler liegt. Dieser gibt den Großteil der Spannung an die Photodiode weiter und nur ein kleiner Teil wird an das Oszilloskop weitergeleitet. Das macht es nötig, diese Drosselung zu bestimmen.

**b Modulierte Gleichspannung:**

In der zweiten Versuchsreihe wird der Schalter von der Sägezahneinstellung auf eine Gleichspannung von 0 – 300V umgestellt. Diese wird von einer Sinusspannung (Amplitude ca  $40V_{pp}$ ) überlagert. Das Oszilloskop steht auf AC Kopplung. Für einen bestimmten Wert der Gleichspannung kommt es nun zur Frequenzverdopplung des Photodiodensignals verglichen mit dem Sinusgenerator. Erzeugt die Gleichspannung eine Phasendifferenz von  $\frac{\lambda}{2}$  ist das Signal der Photozelle maximal und die modulierte Sinusspannung entfernt sich einmal im positiven und einmal im negativen Sinusbogen von diesem Maximum. Während einer Periode der modulierten Gleichspannung fällt die detektierte Spannung also zweimal ab und damit verdoppelt sich die Frequenz. Analog geschieht dies bei einer Phasendifferenz von Null. Die gesuchte Halbwellenspannung  $U_{\lambda/2}$  ist nun die Addition der Beträge der zwei gemessenen Spannungen. Daraus kann dann wiederum der gesuchte elektrooptische Koeffizient bestimmt werden.

### 3.5 Auswertung

Bevor mit der allgemeinen Auswertung begonnen wird, muss der Verstärkungsfaktor des Spannungsteilers berechnet werden. Dafür wurde die Sinusspannung einmal durch den Verteiler geschickt und einmal direkt ans Oszilloskop angeschlossen. Dadurch ist es möglich, die zwei verschiedenen Spannungen abzulesen. Dafür wurden die einzelnen Ergebnisse nochmal mit dem Programm OriginPro gezeichnet und ein Sinusfit darauf angewendet. Ablesen kann man dann die folgenden Werte:

$$U_0 = (9,14 \pm 0,05)V \quad U_{Vert} = (0,0907 \pm 0,0004)V \quad (5)$$

Damit erhält man

$$\kappa = \frac{U_0}{U_{Vert}} = 100,77 \quad (6)$$

mit einem Fehler von

$$s_{\kappa} = \kappa \sqrt{\left(\frac{s_{U_0}}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{s_{U_{Vert}}}{U_{Vert}}\right)^2} = 0,71 \quad (7)$$

Damit ergibt sich schließlich ein Verstärkungsfaktor von

$$\boxed{\kappa = 101 \pm 1} \quad (8)$$

Abbildung 3: Signal des Oszilloskops

### 3.5.1 Messung mit Sägezahnspannung

Nachdem die Pockelszelle an die Sägezahnspannung angeschlossen wurde, ist der erwartete sinusförmige Verlauf des Photodiodensignals auf dem Oszilloskop ablesbar. Außerdem ist die Spannungsrampe der Sägezahnspannung gut erkennbar. Das Oszilloskop kann mit Hilfe des Computers ausgelesen werden und im Nachhinein die Daten analysiert werden. In Bild 3 findet sich das erhaltene Signal auf dem Oszilloskop.

Die gesuchten Werte konnten nun an dem dargestellten Bild abgelesen werden. Der Fehler auf die abgelesenen Werte kann berechnet werden durch  $s_{\Delta x} = \sqrt{s_x^2 + s_x^2}$

$\Delta t_{S\ddot{a}ge}$ [ms]	$s_{\Delta t}$ [ms]	$\Delta U_{S\ddot{a}ge}$ [V]	$s_{\Delta U}$ [V]	$\Delta t_{\lambda/2}$ [ms]	$s_{\Delta t_{\lambda/2}}$
14,25	1,40	4,95	0,14	6,25	1,40

Tabelle 1: Sägezahnspannung

Jetzt kann die Spannung  $U_{\lambda/2}'$  berechnet werden durch

$$U_{\lambda/2}' = \frac{\Delta U_{S\ddot{a}ge}}{\Delta t_{S\ddot{a}ge}} \cdot \Delta t_{\lambda/2} = 2,17V \quad (9)$$

Der Fehler folgt mit Hilfe der folgenden Fortpflanzung

$$s_{U_{\lambda/2}'} = U_{\lambda/2}' \cdot \sqrt{\left(\frac{s_{t_{\lambda/2}}}{\Delta t_{\lambda/2}}\right)^2 + \left(\frac{s_{U_{S\ddot{a}ge}}}{\Delta U_{S\ddot{a}ge}}\right)^2 + \left(\frac{s_{\Delta t}}{\Delta t_{S\ddot{a}ge}}\right)^2} = 0,53 \quad (10)$$

Dieser Wert ist allerdings noch durch den bereits zuvor erwähnten Spannungsteiler gedrosselt. Deswegen muss nun noch der zuvor ermittelte Wert für den Verstärkungsfaktor  $\kappa$  dazumultipliziert werden. Es folgt eine Spannung von

$$U_{\lambda/2} = U_{\lambda/2}' \cdot \kappa = 219,28V \quad (11)$$

Mit einem Fehler von  $s_{U_{\lambda/2}} = 53,6$ .

Nun lässt sich mit Hilfe der berechneten Halbwellenspannung und Formel 4 der gesuchte elektrooptische Koeffizient  $r_{41}$  bestimmen.

$$r_{41} = (25,7 \pm 6,28) \frac{\text{pm}}{\text{V}} \quad (12)$$

### 3.5.2 Messung mit modulierter Gleichspannung

Im folgenden Versuchsteil wurde an die Pockelszelle eine Gleichspannung angelegt, die mit einer Sinusspannung moduliert wurde. Diese Spannung kann man am Oszilloskop mit der der Photozelle vergleichen. So ist es möglich, die Spannung zu finden, bei welcher die Frequenzverdopplung stattfindet. Sowohl für positive als auch für negative Spannungen war es möglich, die Stelle der Verdopplung zu finden. Hierfür wurden folgende Werte gefunden, der Fehler wurde abgeschätzt.

$$|U_+| = (122,2 \pm 0,5)V \quad |U_-| = (126,4 \pm 0,5)V \quad (13)$$

Damit folgt für die Halbwellenspannung

$$U_{\lambda/2} = |U_+| + |U_-| = (248,6 \pm 1,41)V. \quad (14)$$

Und damit folgt durch die gleiche Methode wie bereits zuvor der elektrooptischer Koeffizient

$$r_{41} = (22,7 \pm 0,73 \cdot 10^{-3}) \frac{\text{pm}}{\text{V}} \quad (15)$$

Beispielhafte Bilder für die Spannungswerte um die ermittelten Spannungen finden sich im Anhang.

## 4 Faraday-Effekt - der magneto - optische Effekt

### 4.1 Grundlagen

#### 4.1.1 Allgemeines

Durchläuft linear polarisiertes Licht ein isotropes Medium, in dem ein Magnetfeld  $H$  parallel zur Ausbreitungsrichtung angelegt ist, ändert sich die Polarisationsrichtung des Lichts um einen Winkel  $\alpha$ . Dieser Effekt wird als Faradayeffekt bezeichnet.

Ihm liegt zugrunde, dass durch das Magnetfeld die Elektronen mit der Larmorfrequenz um die Achse des Magnetfeldes präzedieren. Das führt zu unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten für links oder rechtsdrehendes zirkular polarisiertes Licht.

Da eine linear polarisierte Welle in zwei um  $\pi/2$  phasenverschobene Wellen zerlegt werden kann, ändert sich durch die verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Phasenversatz der beiden Wellen nach durchlaufen eines Mediums der Dicke  $l$ .

Die Stärke dieses Effekts ist materialabhängig. Diese Abhängigkeit wird durch die Verdetkonstante  $V$  beschrieben.

Der Drehwinkel kann daher wie folgt berechnet werden.

$$\alpha = V \cdot l \cdot H \quad (16)$$

Gleichung 16 zeigt bereits, dass das Vorzeichen des Drehwinkel  $\alpha$  unabhängig von der Ausbreitungsrichtung des Lichts ist. Wird Licht daher reflektiert und durchläuft das Magnetfeld ein zweites mal, ist die Polarisationsrichtung verändert. Das kann zum verhindern von Rückreflexionen in Laserstrahlengängen verwendet werden.

#### 4.1.2 Magnetfeld der Spule

Mithilfe des Gesetzes von Biot-Savart, kann das Magnetfeld der Spule berechnet werden.

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_V I d\vec{l} \times \frac{\vec{r} - \vec{l}}{|\vec{r} - \vec{l}|^3} \quad (17)$$

Verwendet man die in der Anleitung gegebenen Informationen über die Spule, lässt sich das Integral lösen. Im folgenden ist  $\rho_1$  der Innendurchmesser,  $\rho_2$  der Außendurchmesser,  $N$  die Anzahl der Windungen und  $L$  die Länge der Spule. Unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie um die Spulenachse  $z$  ergibt sich

$$H(z) = \frac{NI}{2L(\rho_2 - \rho_1)} \left[ (L - z) \ln \left( \frac{\rho_2 + \sqrt{(L - z)^2 + \rho_2^2}}{\rho_1 + \sqrt{(L - z)^2 + \rho_1^2}} \right) + z \cdot \ln \left( \frac{\rho_2 + \sqrt{z^2 + \rho_2^2}}{\rho_1 + \sqrt{z^2 + \rho_1^2}} \right) \right] \quad (18)$$

Da die Feldstärke von der  $z$  Koordinate in der Spule abhängt, muss über  $H$  integriert werden

$$\alpha = V \cdot \int_{\frac{L-2}{2}}^{\frac{L+2}{2}} H(z) dz = 2556 \cdot V \cdot I \quad (19)$$

Würde man  $H$  als konstant annehmen und direkt mit

$$H = \frac{N}{l} I \quad (20)$$

berechnen, erhielte man folgende Gleichung:

$$\alpha = V \cdot N \cdot I = 3600 \cdot V \cdot I \quad (21)$$

Dies entspricht im Vergleich mit Gleichung 19 einer Abweichung von 35%

## 4.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 skizziert. Als Lichtquelle dient eine Natrium-Dampf Lampe. Ihr Licht wird mithilfe eines Polarisators linear polarisiert. Dieses Licht wird dann durch einen Schwerflint, der mittels einer Spule mit einem magnetischen Feld parallel zum Strahlengang durchsetzt werden kann. Der Spulenstrom kann hierbei zwischen -5 bis 5 A variiert werden.

Als Analysator dient ein Halbschattenpolarimeter, mithilfe dessen der Drehwinkel des linear polarisierten Lichtes gemessen werden kann.

Die Spule wird mit einer Wasserkühlung gekühlt.

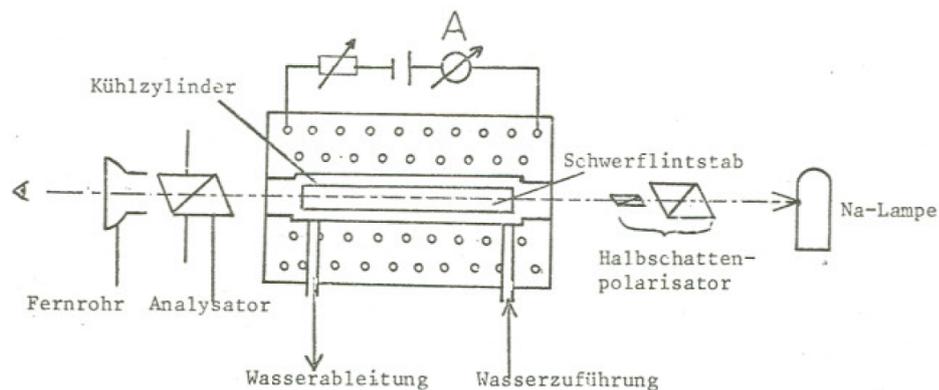


Abbildung 4: Versuchsaufbau Faraday Effekt [2]

### 4.3 Versuchsdurchführung

Die Wasserkühlung und die Na-Lampe werden eingeschaltet. Nach kurzer Zeit können dann erste Messungen vorgenommen werden. Hierfür werden in Schritten von 0,25 A Ströme zwischen 0 und 5 A ausgewählt und die Polarisation mithilfe des Halbschattenpolarimeters bestimmt. Dabei wird darauf geachtet, dass die verschiedenen Plättchen im Polarimeter gleich hell sind. Da dies für mehrere Winkel der Fall ist, wird derjenige ausgewählt, bei dem in unmittelbarer Nähe die Intensitäten der beiden Plättchen auf ein Minimum herabsinken.

Um ein mehr verschiedene Ströme messen zu können, wird nach der Messreihe der Anschluss der Spule umgepolt und erneut gemessen.

Zusätzlich werden die Winkel bestimmt, bei denen bei ausgeschaltetem Spulenstrom die Plättchen des Polarimeters minimale Intensität zeigen.

### 4.4 Auswertung

Zur Bestimmung der Verdet-Konstanten wird von Messwerten, bei denen der gemessene Winkel nahe von  $180^\circ$  lag,  $180^\circ$  abgezogen. Somit wird der Winkel in negative Richtung berechnet.

Als Fehler auf die Winkelmessung wurde ein Ablesefehler von  $s_{abl} = 0,1^\circ$  geschätzt. Da der Winkel durch die subjektive Wahrnehmung der Intensitäten eingestellt wurde, wurde zusätzlich ein Einstellfehler von  $s_{ein} = 0,2^\circ$  geschätzt.

Abbildung 5 zeigt die Messwerte aller Messreihen. Der abgebildete Fehler in y-Richtung ist der Fehler auf die Winkelmessung, und ist gegeben als

$$s_o = \sqrt{s_{abl}^2 + s_{ein}^2} = 0,3^\circ \quad (22)$$

Ein linearer Fit ergibt folgende Fit Parameter

$y_0$	$s_{y_0}$	$a$	$s_a$	Kor. $R^2$
1,04	0,04	2,557	0,015	0,99853

Tabelle 2: Fit Parameter des Faraday Experiments

Da auf der x-Achse nicht die Magnetfeldstärke, sondern der Strom aufgetragen wurde, muss zur Bestimmung der Verdet-Konstante die Steigung in Gleichung 19 eingesetzt werden

$$V = \frac{1}{2556} \cdot \frac{\alpha}{I} = \frac{1}{2556} \cdot a = 1,000 \frac{\circ}{\text{kA}} \quad (23)$$

$$s_V = \frac{1}{2556} \cdot s_a = 0,006 \frac{\circ}{\text{kA}} \quad (24)$$

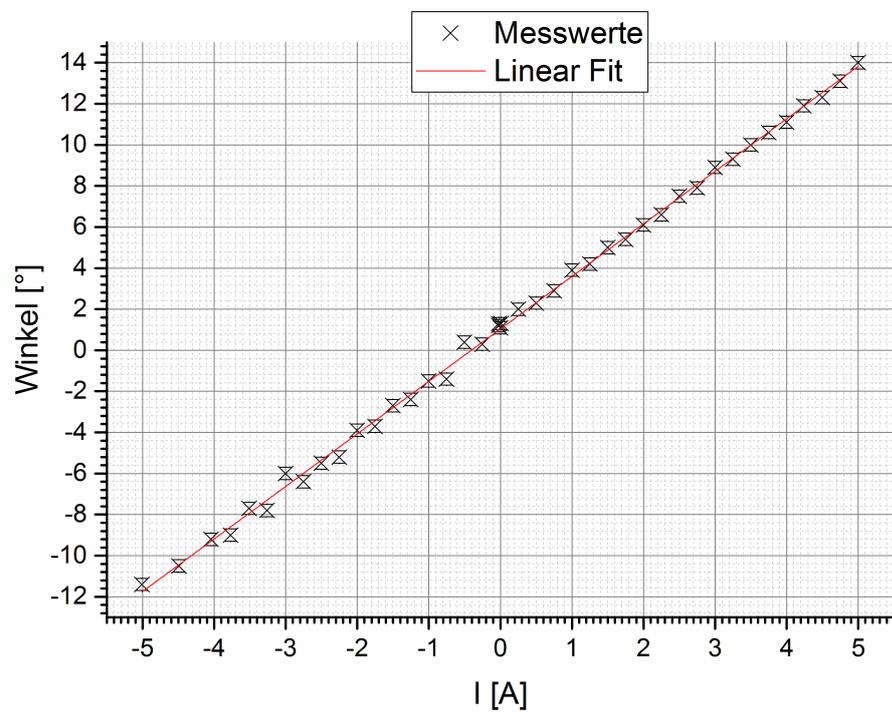


Abbildung 5: Winkeleinstellung des Polarimeters in Abhängigkeit des Stroms

Die Verdetkonstante konnte somit bestimmt werden als

$$V = (1,000 \pm 0,006) \frac{\circ}{\text{kA}} \quad (25)$$

#### 4.4.1 Herstellerangabe in SI Einheiten

Die Herstellerangabe für die Verdet-Konstante beträgt

$$V_{her} = 0,05 \frac{\text{min}}{\text{Oe cm}} \quad (26)$$

Da ein Grad 60 Winkelminuten entspricht ist, kann folgendermaßen in SI Einheiten umgerechnet werden:

Die Einheit Oersted (Oe) ist in SI Einheiten gegeben als

$$1 \text{ Oe} = \frac{1000 \text{ A}}{4\pi \text{ m}} \approx 79,577 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (27)$$

Damit ergibt sich

$$V_{her} = 0,05 \frac{\text{min}}{\text{Oe cm}} = 0,05 \frac{\circ}{60} \cdot \frac{1}{79,577 \frac{\text{A}}{\text{m}}} \cdot 10^2 \frac{1}{\text{m}} = 0,00105 \frac{\circ}{\text{A}} \quad (28)$$

Der Fehler auf diesen Wert beträgt die Hälfte der letzten gegebenen Stelle des ursprünglichen Wertes. Damit ist die Herstellerangabe

$$V_{her} = (1,05 \pm 0,10) \frac{\circ}{\text{kA}} \quad (29)$$

#### 4.4.2 $2\epsilon$ - Messung

Des Weiteren werden die Winkel an denen ein Plättchen des Halbschattenpolarimeters minimale Intensität anzeigt bestimmt. Diese liegen bei

$$\phi_r = 6,4^\circ \quad (30)$$

$$\phi_l = -5,9^\circ \quad (31)$$

Da dieses mal nicht Intensitäten verglichen werden ist der Einstellfehler größer und wurde auf  $s_{ein} = 0,4^\circ$  geschätzt.

Daraus resultiert mit gleichem Ablesefehler ein Fehler von

$$s_\alpha = s_\circ = \sqrt{s_{abl}^2 + s_{ein}^2} = 0,4^\circ \quad (32)$$

Der gesuchte Winkel  $2\epsilon$  ist die Differenz

$$2\epsilon = \phi_r - \phi_l = 12,3^\circ \quad (33)$$

$$s_{2\epsilon} = \sqrt{2} \cdot s_\alpha = 0,6^\circ \quad (34)$$

Somit ergibt diese Messung

$$2\epsilon = (12,3 \pm 0,6)^\circ \quad (35)$$

## 5 Diskussion

### 5.1 Pockels-Effekt

Für den elektrooptischen Koeffizienten der in diesem Aufbau verwendeten Pockelszelle wurden durch zwei verschiedene Messmethoden folgende Ergebnisse ermittelt:

Messreihe	$r_{41}$ in [pm/V]
Sägezahn	$(25,7 \pm 6,28)$
Modulierte Gleichspannung	$(22,7 \pm 0,73 \cdot 10^{-3})$
Herstellerangabe	23,4

In der Versuchsanleitung 1 ist der gesuchte Wert gegeben als

$$r_{41} = 23,4 \frac{\text{pm}}{\text{V}} @ 21^\circ \text{C}. \quad (36)$$

Vergleicht man die ermittelten Werte nun mit dem angegebenen Wert so sieht man, dass er einmal zu groß (Sägezahnmethode) und einmal zu klein (modulierte Gleichspannung) ermittelt wurde. Zu beachten ist hier aber, dass sich die Angabe in der Anleitung auf eine Temperatur von  $21^\circ$  bezieht, wodurch es in unserem Versuchsaufbau zu Abweichungen gekommen sein kann. Die Temperaturabhängigkeit wurde in der Auswertung außerdem nicht weiter berücksichtigt, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit eines möglichen Fehlers erhöht.

Eine wahrscheinlichere Fehlerquelle kann sein, dass der berechnete Verstärkungsfaktor nicht dem realen entspricht. Der Faktor ist in der Anleitung 1 zwar mit 100 gegeben, wodurch der ermittelte sehr nah dran liegt, jedoch wird auch in der Anleitung nur eine Schätzung angegeben und kein exakter Wert. Durch diese Ungenauigkeit kann es bei der Ergebnisermittlung zu Schwankungen kommen, weil der Faktor durch die Halbwellenspannung im Nenner für  $r_{41}$  direkt mit eingeht.

Auch der Piezoelektrische Effekt konnte eventuell nicht komplett eliminiert werden und verursacht einen Fehler des Ergebnisses.

Im zweiten Teil des Versuches wurde der elektrooptische Koeffizient mit Hilfe einer modulierten Gleichspannung ermittelt. Der hier gefundene Wert liegt deutlich näher am gegebenen Wert. Allerdings ist der Fehler deutlich kleiner als zuvor, was vermuten lässt, dass nicht alle Fehlerquellen einkalkuliert werden konnten und ein systematischer Fehler den Messwert verschiebt. Um genauere Werte für die Spannung zu bekommen, bei der es zur Frequenzverdopplung gekommen ist, wäre es von Vorteil gewesen die Messreihe mehrfach zu wiederholen.

Auch auftretende Defekte und Fehlfunktionen an der Pockelszelle können im Allgemeinen nicht ganz ausgeschlossen werden. Außerdem ist anzumerken, dass die Herstellerangaben nicht sehr spezifisch angegeben sind und es dadurch schwierig ist, auf ihre Exaktheit zu vertrauen.

## 5.2 Faraday-Effekt

Die gemessene Verdet-Konstante  $V$  für Schwerflint beträgt

$$V = (1,000 \pm 0,006) \frac{\circ}{\text{kA}} \quad (37)$$

Dieser Wert liegt innerhalb von einer Standardabweichung der Herstellerangabe, die

$$V_{her} = (1,05 \pm 0,10) \frac{\circ}{\text{kA}} \quad (38)$$

beträgt. Hierbei fällt auf, dass der experimentell bestimmte Wert mit einem relativen Fehler von 0,5% deutlich genauer ist als die Herstellerangabe, die mit einem relativen Fehler von 10% angegeben ist.

Der lineare Fit hat ein korrigiertes  $R^2$  von 0,99853, was zeigt, dass die Hypothese eines Linearen Zusammenhangs zwischen Stromstärke und Drehwinkel bestätigt ist.

Die  $2\epsilon$  Messung ergab einen Wert von

$$2\epsilon = (12,3 \pm 0,6)^\circ \quad (39)$$

Es zeigt sich, dass bei einem Strom von 0 A der Drehwinkel am Halbschattenpolarimeter nicht auf  $0^\circ$  steht. Dies ist vermutlich auf ein Offset der Winkelskala oder einen leicht verdrehten Polarisator vor dem Schwerflint zurückzuführen. Letzteres ist jedoch wahrscheinlicher.

## 6 Anhang

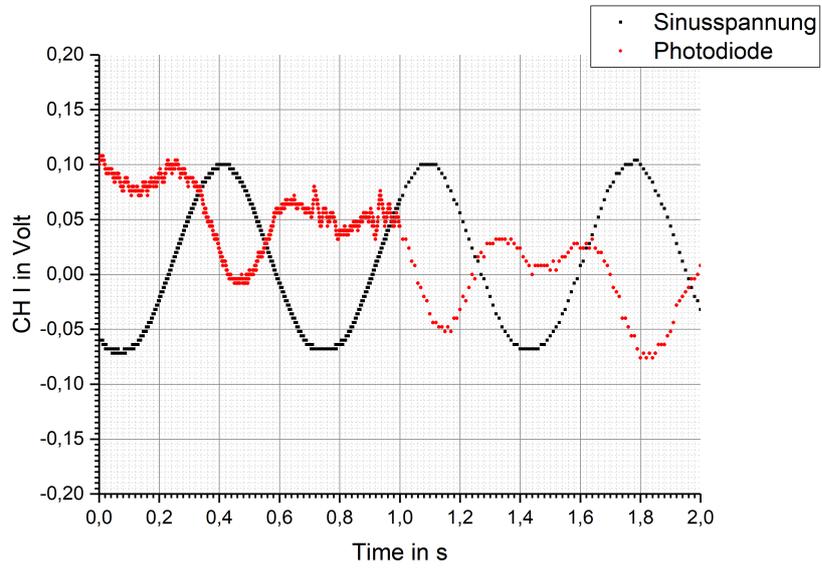


Abbildung 6: -125,3V

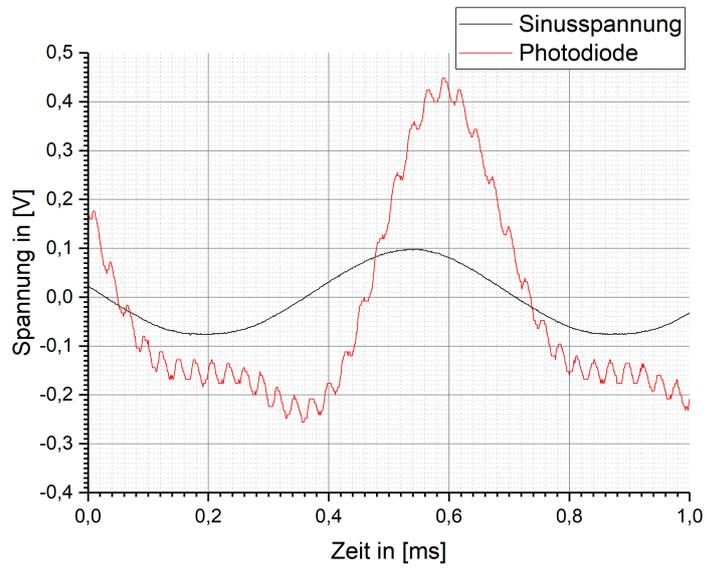


Abbildung 7: -122,2V

## Literatur

[1] [instructions]

Instruction paper published at <http://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/fp/Versuche/FP1/FP1-10-Faraday-Pockels/> 20.09.2017 13:51

[2] [exam paper]

Bernd Hermann: Elektrooptischer Effekt und Faraday Effekt  
<http://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/fp/Versuche/FP1/FP1-10-Faraday-Pockels/> 12.09.2017 13:51