



Universität Freiburg

Versuchsanleitung
Fortgeschrittenen
Praktikum
Teil I

Faraday- und Pockelseffekt



Faraday- und Pockelseffekt

INSTITUT FÜR MATHEMATIK UND PHYSIK
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT
FREIBURG IM BREISGAU

26. JUNI 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsanleitung	1
1.1	Einführung	1
2	Theorie	2
2.1	Pockelseffekt	2
2.1.1	Berechnung des linearen elektrooptischen Koeffizienten für eine ADP-Pockelszelle in 45°-Y-Cut	2
2.2	Faradayeffekt	3
3	Versuchsbeschreibung und Aufgabenstellung	4
3.1	Pockelseffekt	4
3.1.1	1. Sägezahnmethode	4
3.1.2	2. Modulierte Gleichspannung	4
3.2	Faradayeffekt	5
3.3	Hinweise zur Durchführung	6
3.3.1	Pockelseffekt	6
3.3.2	Faradayeffekt	6
4	Versuchsaufbau	7
5	Geräteliste für den Versuch	9
	Quellenverzeichnis	11

1 Versuchsanleitung

1.1 Einführung

Zur Intensitätsmodulation von Laserstrahlen können unter anderem der lineare elektrooptische Effekt (Pockelseffekt) und der lineare magnetooptische Effekt (Faradayeffekt) verwendet werden. Im Falle des elektrooptischen Effektes sind Modulationsfrequenzen bis in den GHz-Bereich möglich.

Pockelseffekt

Es gibt Kristalle und Flüssigkeiten (LCD), bei denen sich durch Anlegen eines elektrischen Feldes, die Brechungsindizes richtungsabhängig als Funktion der angelegten Feldstärke ändern.

Diesen Effekt nennt man den elektrooptischen Effekt. Beim Pockelseffekt (linearer elektrooptischer Effekt) zeigt die Phasenverschiebung zwischen zwei bestimmten Polarisationskomponenten des hindurchtretenden Lichtes eine lineare Abhängigkeit von der angelegten Spannung.

Im vorliegenden Versuch wird eine kommerzielle Pockelszelle mit vier ADP-Kristallen (ADP = Ammoniumdihydrogenphosphat, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) verwendet. ADP-Kristalle gehören zum tetragonalen Kristallsystem ohne Symmetriezentrum (Symmetriegruppe $\bar{4}2m$) und zeigt daher einen linearen elektrooptischen Effekt. Die Kristalle sind unter 45° zur optischen Achse (45° Y-Cut) geschnitten (siehe Abb. 1).

Faradayeffekt

Beim magnetooptischen Effekt wird die Polarisationsebene des verwendeten linear polarisierten Lichtes unter Einfluss eines Magnetfeldes bei Propagation im Medium gedreht. Der Effekt wird als Faradayeffekt bezeichnet. Im Versuch wird Schwerflintglas als Medium verwendet.

Vorkenntnisse

- Polarisationszustände des Lichtes
- Doppelbrechung in Kristallen
- Theorie Piezo- und Pockelseffekt
- Theorie Faradayeffekt
- Magnetfeld einer Spule
- Nachweismethoden für polarisiertes Licht

2 Theorie

2.1 Pockelseffekt

Die Grundlagen der Doppelbrechung und des elektrooptischen Effekts werden in der Staatsexamensarbeit von B. Herrmann [1] behandelt. An dieser Stelle wird nur die Berechnung des elektrooptischen Koeffizienten für den vorliegenden Kristall in 45°-Y-Cut vorgenommen.

2.1.1 Berechnung des linearen elektrooptischen Koeffizienten für eine ADP-Pockelszelle in 45°-Y-Cut

Das Indexellipsoid für einen ADP-Kristall bei einem angelegten elektrischen Feld ist bis zur ersten Ordnung:

$$\frac{x_1^2}{n_1^2} + 2r_{41}x_2E_1x_3 + \frac{x_2^2}{n_1^2} + 2r_{41}x_1E_2x_3 + \frac{x_3^2}{n_3^2} + 2r_{63}x_1x_2E_3 = 1 \quad (1)$$

Die optische Achse im feldfreien Fall ist hier die x_3 -Achse.

Bei Anlegen des elektrischen Feldes entlang der x_1 -Achse wird (1) zu:

$$\frac{x_1^2}{n_1^2} + 2r_{41}x_2E_1x_3 + \frac{x_2^2}{n_1^2} + \frac{x_3^2}{n_3^2} = 1 \quad (2)$$

Y-Cut: Koordinatenwechsel durch Drehung um 45° um die x_1 -Achse:

$$x_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x'_2 + x'_3) \quad x_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x'_2 - x'_3)$$

$$\frac{x_1^2}{n_1^2} + r_{41}(x_2'^2 - x_3'^2)E_1 + \frac{(x'_2 + x'_3)^2}{2n_1^2} + \frac{(x'_2 - x'_3)^2}{2n_3^2} = 1 \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow \frac{x_1^2}{n_1^2} + \frac{x_2'^2}{2} \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right) + \frac{x_3'^2}{2} \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right) + x'_2x'_3 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_3^2} \right) + r_{41}E_1(x_2'^2 - x_3'^2) = 1$$

$$\text{mit } \frac{1}{n_x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{x_1^2}{n_1^2} + \frac{x_2'^2}{n_x^2} + \frac{x_3'^2}{n_x^2} + x'_2x'_3 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_3^2} \right) + r_{41}E_1(x_2'^2 - x_3'^2) = 1$$

$$\Leftrightarrow \frac{x_1^2}{n_1^2} + \frac{x_2'^2}{n_x^2} (1 + r_{41}E_1n_x^2) + \frac{x_3'^2}{n_x^2} (1 - r_{41}E_1n_x^2) + x'_2x'_3 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_3^2} \right) = 1 \quad (4)$$

Für den Brechungsindex der jeweiligen Polarisationskomponenten bei Lichteinfall entlang der $x'_2(x'_3)$ -Richtung, polarisiert entlang der Winkelhalbierenden zu $x_1, x'_3(x'_2)$, gilt dann

$$\begin{aligned} n_{x'_2} &= \frac{n_x}{\sqrt{1 + r_{41}E_1n_x^2}} \approx n_x + \frac{1}{2}r_{41}E_1n_x^3 \\ \left(n_{x'_3} &= \frac{n_x}{\sqrt{1 - r_{41}E_1n_x^2}} \approx n_x - \frac{1}{2}r_{41}E_1n_x^3 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Die Phasenverschiebung ist dann nach einem Kristall der Länge l

$$\omega t = \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 - n_{x'_2})l \quad (6)$$

Durch den Winkel des k -Vektors zur optischen Achse (x_3) von 45° ändert sich die Ausbreitungsrichtung des außerordentlichen Strahles gegenüber der des ordentlichen, so dass beide Strahlen auseinander laufen. Um dies zu kompensieren, wird ein zweiter, um 180° um die Ausbreitungsrichtung gedreht, Kristall

verwendet. Die beiden Strahlen fallen wieder zusammen. Die Phasenverschiebung beträgt dann

$$\omega t = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot (n_1 - n_{x_2})l \quad . \quad (7)$$

Weiterhin ist die natürliche Doppelbrechung $n_1 - n_x$ vorhanden. Sie kann durch ein weiteres um 90° gedrehtes Kristallpaar kompensiert werden. Damit der Pockelseffekt beider Kristallsätze sich nicht kompensiert, wird das elektrische Feld für das zweite paar invertiert $E_1 = -E_1$. Die Phasenverschiebung beträgt dann

$$\omega t = \frac{4\pi}{\lambda} r_{41} E_1 n_x^3 l \quad . \quad (8)$$

Für den elektrooptischen Koeffizienten gilt dann für eine Phasenverschiebung von π und $E = \frac{U}{d}$:

$$r_{41} = \frac{\lambda d}{4lU_{\lambda/2}} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right)}^3 \quad (9)$$

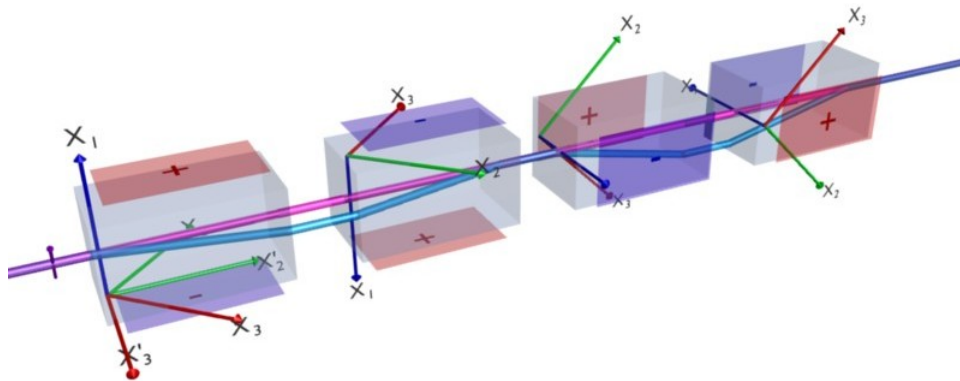


Abbildung 1: Ausrichtung der Kristalle einer ADP-Pockelszelle

Die im Praktikum verwendete Pockelszelle besteht aus vier Kristallen (*Warum vier?*) mit einer Kantenlänge von $d \approx 2,4 \text{ mm}$, und der Länge $l \approx 20 \text{ mm}$.

$$r_{41} = 23,4 \text{ pm/V @ } 21^\circ \text{C [5]}^*$$

$$n_1 = 1,522 \text{ [5]}$$

$$n_3 = 1,477 \text{ [5]}$$

Laserwellenlänge: $632,8 \text{ nm}$

* Man beachte auch die Temperaturabhängigkeit des elektrooptischen Koeffizienten, zu finden in der Dissertation von V. Wirth [6]. Der Einfluss des Piezoeffekts ist im Falle der ADP-Kristalle klein [6].

2.2 Faradayeffekt

Die theoretischen Grundlagen zum Faradayeffekt sind in der Staatsexamensarbeit von B. Herrmann [1] zu finden.

3 Versuchsbeschreibung und Aufgabenstellung

3.1 Pockelseffekt

Zu Beginn des Versuchs ist die Justierung der Optiken zu überprüfen. Der an Optiken (Polarisatoren, Pockelszelle) reflektierte Anteil des Laserstrahls sollte in den Strahlengang des Lasers zurückreflektiert werden. Gegebenenfalls sind die Polarisatoren (die Pockelszelle ist fixiert) etwas zu verstellen.

Der zweite Polarisator (Analysator) sollte auf richtige Einstellung überprüft werden. Hierzu kann der Analysator bei Sägezähneinstellung (siehe unten) verdreht werden und das Signal beobachtet werden. Wenn das Signal der Photodiode maximale Amplitude zeigt, ist der Analysator ideal eingestellt (minimierter Messfehler).

Der Versuch zum Pockelseffekt besteht aus zwei Aufgabenteilen, die gewünschte Messmethode wird am Schalterkästchen eingestellt.

3.1.1 1. Sägezahnmethode

Hier wird der Schalter auf die Stellung **Sägezahn** gestellt. An die Pockelszelle wird dann ein Sägezahn mit Spannung von 0 V bis 500 V bei ca. 30 Hz Sägezahnfrequenz angelegt.

Am Oszilloskop kann gleichzeitig das Sägezahnsignal (durch einen vorgeschalteten Widerstand gedrosselt um ca. Faktor 100) und das verstärkte Signal von der Photodiode angezeigt werden. Die Oszilloskopanzeige kann vom PC ausgelesen werden und die Halbwellenspannung direkt abgelesen werden (Fehler abschätzen!). Alternativ kann die Halbwellenspannung auch am Oszilloskop bestimmt werden aus dem Verhältnis des horizontalen Abstandes von Minimum und Maximum zur gesamten Sägezahnbreite, multipliziert mit der maximalen Spannung.

Es ist darauf zu achten, dass das Oszilloskop bei dieser Methode auf DC-Kopplung eingestellt ist.

3.1.2 2. Modulierte Gleichspannung

Bei Schalterstellung **500 V** wird an die Pockelszelle eine Sinusspannung (Amplitude ca. 40 V_{pp}) angelegt, der eine Gleichspannung (0 V-300 V, pos. oder neg. per Schalter wählbar) überlagert werden kann (beziehungsweise wird so die angelegte Gleichspannung moduliert).

Das Oszilloskop stellt man hier auf AC-Kopplung, damit man nur die Modulation beobachtet.

Bei richtig gewählter Gleichspannung zeigt das Photodiodensignal die doppelte Frequenz der angelegten Sinusmodulation (*Warum?*). Durch Bestimmung der Gleichspannungen bei denen dieses Phänomen auftritt, soll die Halbwellenspannung $U_{\lambda/2}$ ermittelt werden.

Zur Fehlerabschätzung und Bestimmung der tatsächlichen Sägezahnspannung in Teil 1. ist der Einfluss des vorgeschalteten Spannungsteilers (orangefarbenes Kästchen) zu ermitteln. Hierzu kann das Sinussignal **ohne (!)** zusätzliche Gleichspannung direkt ans Oszilloskop angeschlossen werden. Durch Vergleich der Sinusamplitude ohne und mit Spannungsteiler erhält man den Dämpfungsfaktor. Aus den ermittelten Werten von $U_{\lambda/2}$ soll der elektrooptische Koeffizient r_{41} (oder z_{41}) von ADP unter Verwendung von Gleichung (9) bestimmt werden.

Frage: Wie hängen Polarisation und Phasenverschiebung zusammen?

3.2 Faradayeffekt

Für den auf der Spulenachse befindlichen Schwerflint-Stab soll die Verdet-Konstante bestimmt werden. Man messe dazu die Drehung der Polarisationsebene des Lichts einer Na-Dampflampe in Abhängigkeit des Spulenstroms (Messbereich -5 A bis +5 A durch Umpolung).

Zur Bestimmung der Konstante werden die Messdaten graphisch aufgetragen. Man berechne das Magnetfeld auf der Achse der Spule als Funktion der Achsenkoordinaten und der Stromstärke (endliche Länge und Dicke der Spule!) und ermittle $\int H \, dl$.

Wie groß ist der Fehler, wenn man das Feld nach $H = \frac{N \cdot I}{l}$ berechnet?

Man vergleiche die experimentell bestimmte Verdet-Konstante mit der vom Hersteller angegebenen Konstante für Schwerflint von $0,05 \frac{\text{Min}}{\text{Oe cm}}$ (Herstellerangabe! Kein Literaturwert!).

Man bestimme experimentell den Winkel 2ε zwischen den beiden Polarisationsrichtungen des Halbschattenpolarimeters.

3.3 Hinweise zur Durchführung

3.3.1 Pockelseffekt

ACHTUNG! Nicht direkt oder indirekt in den Laserstrahl sehen. Bei Justage an Optiken im Strahlengang Laserschutzbrillen tragen. Man beachte, dass die vorliegenden Brillen Justagebrillen sind, keine vollwertigen Laserschutzbrillen.

Der Laser ist gleich zu Beginn einzuschalten.

An die Pockelszelle darf dauerhaft maximal eine Spannung von 300 V angelegt werden (Durch Spannungsquelle begrenzt).

In der Pockelszelle befinden sich vier gleich große ADP-Kristalle. Die Anordnung der Kristalle ist in Abbildung 1 gezeigt.

Technische Daten ADP-Pockelszelle

Anzahl Kristalle:	4		
Kristallschnitt:	45 °-Y-Cut		
Wellenlänge:	λ	=	632,8 nm
Kristalldicke:	d	=	2,4 mm
Kristalllänge (1 Kristall):	l	=	20 mm
Brechungsindex x/y-Richtung [5]:	n_1	=	1,522
Brechungsindex z-Richtung [5]:	n_3	=	1,477
Elektrooptischer Koeffizient [5]:	r_{41}	=	23,4 pm/V @ 21°C (siehe auch [6]!)

3.3.2 Faradayeffekt

Die Wasserkühlung der Spule ist gleich zu Beginn des Versuchs anzuschalten, um stabile Messbedingungen zu gewährleisten. Hierzu sind die beiden schwarzen Haupthähne (Vor- und Rücklauf) zu öffnen, anschließend das Kühlgerät einschalten und die beiden grünen Wasserhähne an der Wand hinter dem Versuchsaufbau öffnen.

Ebenso sollte die Na-Dampfampe einige Minuten vor Messbeginn eingeschaltet werden und erst nach der letzten Messung (2 ϵ -Messung nicht vergessen!) wieder ausgeschaltet werden.

Die Stromquelle begrenzt den Spulenstrom auf ca. 5 A. Bei Erreichen der maximalen Stromstärke wird die Strombegrenzung aktiviert (blinkende rote LED). Die Strombegrenzung wird durch Zurückdrehen des Potentiometers und anschließendes Drücken des kleinen roten Knopfes an der Stromquelle wieder aufgehoben.

Nach Versuchsende ist das Kühlgerät abzuschalten und alle Wasserhähne wieder zu schließen!

Technische Daten Schwerflint und Spule

Länge des Stabes:	l	=	150 mm
Länge der Spule:	L	=	175 mm
Innendurchmesser der Spule:	$2\rho_1$	=	20 mm
Innendurchmesser der Spule:	$2\rho_2$	=	150 mm
Gesamzahl der Windungen:	N	=	3600
Verdetkonstante:	V	=	0,05 $\frac{\text{Min}}{\text{Oe cm}}$

4 Versuchsaufbau

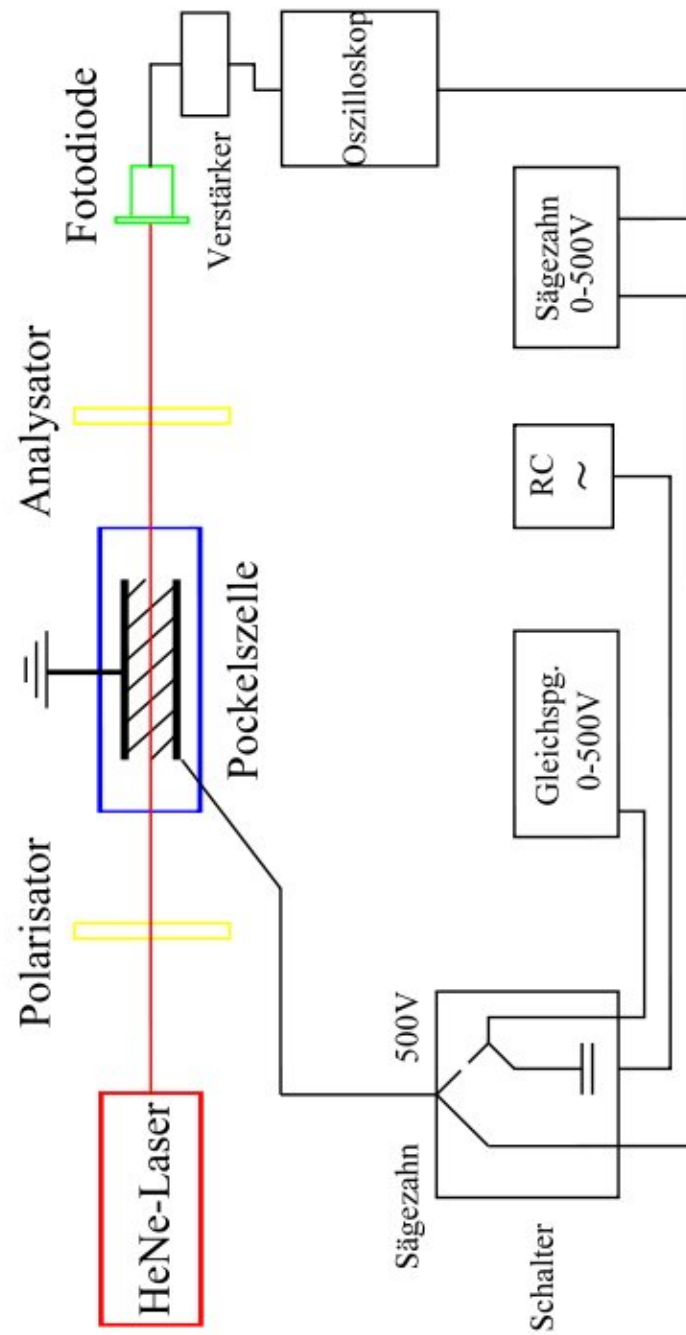


Abbildung 2: Blockbild Pockelseffekt

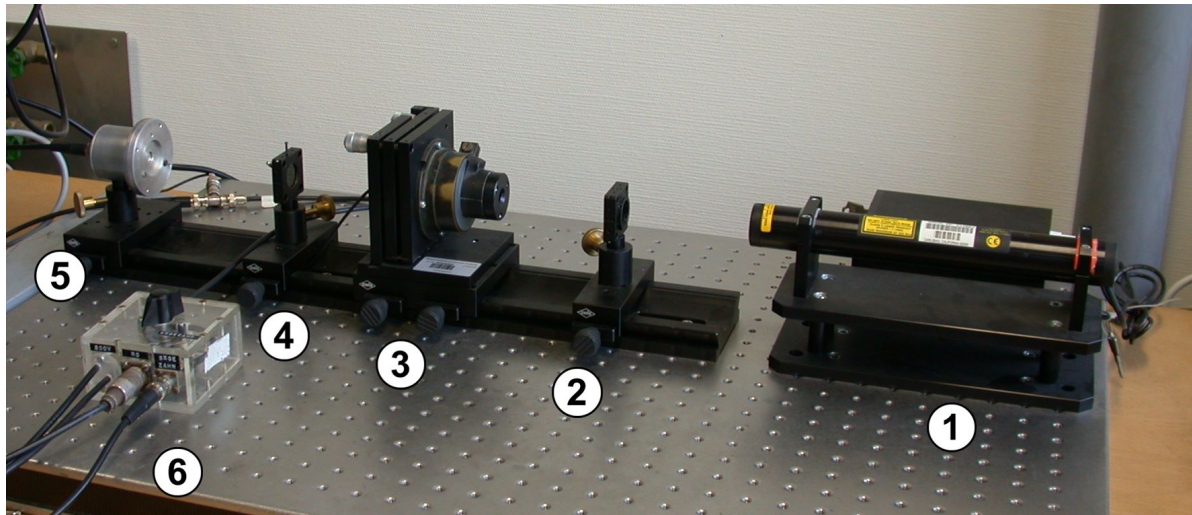


Abbildung 3: Versuchsaufbau zum Pockelseffekt: 1) He-Ne-Laser 2) Polarisator 3) Pockelszelle 4) Analysator 5) Photodiode 6) Schalter Sägezahn-/Sinusspannung

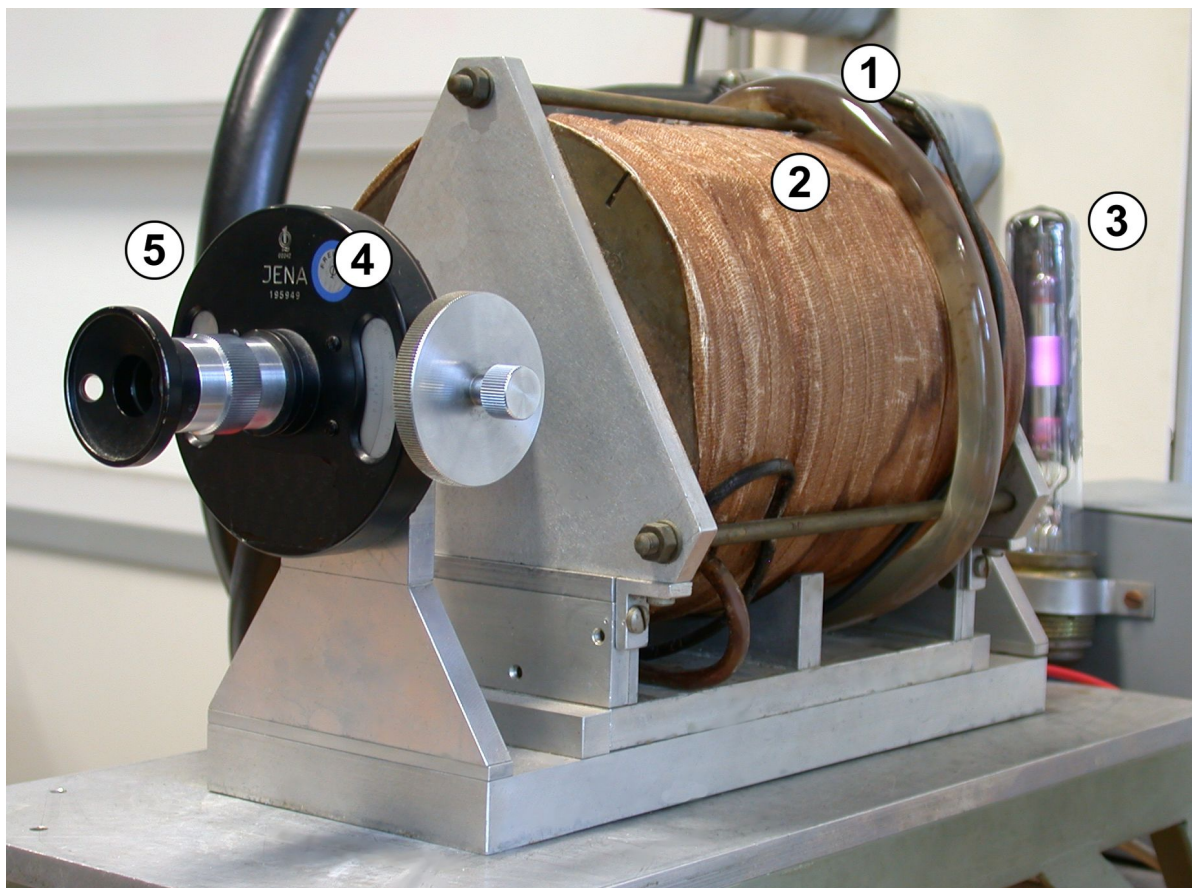


Abbildung 4: Versuchsaufbau zum Faradayeffekt: 1) Wasserkühlung 2) Spule mit Schwerflintstab 3) Na-Lampe 4) Analysator des Halbschattenpolarimeters 5) Okular

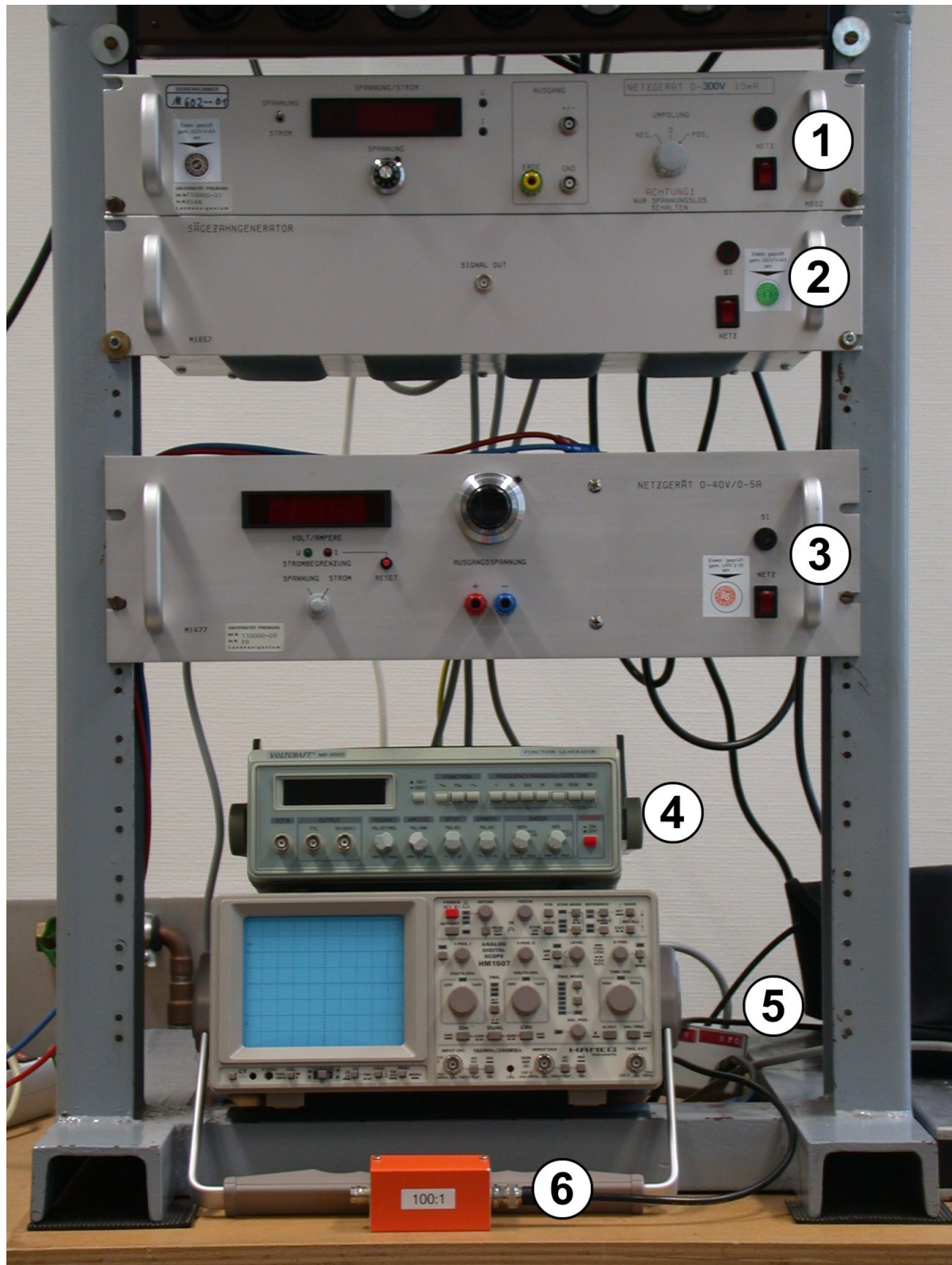


Abbildung 5: Rack: 1) Gleichspannungsnetzgerät 2) Sägezahngenerator 3) Gleichstromquelle (Faraday) 4) Frequenzgenerator 5) Diodenverstärker 6) Abschwächer

5 Geräteliste für den Versuch

- Funktionsgenerator: Voltcraft MX 2020
- Sägezahngenerator: Eigenbau (M 1657)
- Pockelszelle: Leysop EM 200 A
- Oszilloskop: Hameg HM 1507

Quellenverzeichnis

- [1] B. Herrmann: *Elektrooptischer und Faraday-Effekt*, Zulassungsarbeit (1977)
- [2] R. Goldstein: *Pockels Cell Primer*, Laser Focus Magazine (1968)
- [3] Bruce H. Billings: *The Electro-optical Effect in Uniaxial Crystals of the Type XH_2PO_4* , J. Opt. Soc. Am. **39**, 797 (1994)
- [4] I. P. Kaminow and E. H. Turner: *Electrooptic Light Modulators*, Appl. Optics **5**, 1612 (1966)
I. P. Kaminow and E. H. Turner: *Electrooptic Light Modulators*, Proc. IEEE **54**, 1374 (1966)
- [5] Mark J. Gunning et al., J. Opt. Soc. Am. B, **18**, 1092 (2001)
- [6] Volker Wirth, *Temperaturabhängige elektrooptische und elektrostriktive Untersuchungen an kristallen mit ferroischen Phasenumwandlungen*, Dissertation, p. 65f (1999)

Weitere Literatur

Zum Pockelseffekt

- [7] J. F. Nye: *Physical Properties of Crystals*, S. 110-124, 235-259, 276-288, 305-309
- [8] A. Yariv: *Quantum Electronics*, S. 296-315
- [9] B. Zwicker and P. Scherrer, Helv. Phys. Acta **17**, 346 (1944)
- [10] Kleen and Müller: *Laser*
- [11] T. R. Sliker and S. R. Burlage, J. Appl. Phys. **34**, 1837 (1963)
- [12] J. H. Ott and T. R. Sliker: *Linear Electro-optic Effects in KH_2PO_4 and its Isomorphes*, J. Soc. Am. **54**, 1442 (1964).
- [13] F. Hoff and B. Stadnik, Electronics Letters, **2**, 293 (1966)

Zum Faradayeffekt

- [14] Müller-Pouillet: *Lehrbuch der Physik*, Bd. II, 2 II Seite 2119 ff, 2136 ff
- [15] *Handbuch der Experimentalphysik*, Bd. XVI, Seite 58 ff und Seite 80 ff
- [16] Becker and Sauter: *Theorie der Elektrizität*, Bd. III, Seite 180 ff
- [17] Walcher: *Praktikum der Physik*, Seite 202 ff
- [18] Flügge: *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Bd. III, Seite 248 ff