

## 5.10. Faraday-Effekt

### SICHERHEITSHINWEIS:

- Bei diesem Versuch werden starke Magnetfelder verwendet. Diese können bei Herzschrittmachern zu Fehlfunktionen führen.

### Ziel

Untersuchung der durch ein Magnetfeld hervorgerufenen Drehung der Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch Glas und andere sog. faradayaktive Stoffe.

### Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

- Was ist der Faraday-Effekt? Wie kann er erklärt werden?
  - Was ist die verdetische Konstante?
  - Was ist Dispersion?
  - Was ist Polarisation? Welche Arten von Polarisation unterscheidet man?
- Was ist ein Elektromagnet?
  - Was ist bei der Messung des Magnetfelds zu beachten (Stichwort Hysterese)?
  - Wie hängen die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$ , die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  und der magnetische Fluss  $\Phi$  zusammen?
  - Was ist der Hall-Effekt?
  - Wozu dient in diesem Versuch die Hall-Sonde?
  - Wie funktioniert ein Glan-Thompson-Prisma?
  - Falls noch nicht bekannt, machen Sie sich vor dem Versuch mit dem Ablesen eines Nonius vertraut.

**Hinweis:** Im Magnetismus sind neben den SI-Einheiten wie Tesla und Weber auch andere Einheiten wie Gauss oder Oersted gebräuchlich.

## Zubehör

- wassergekühlter Elektromagnet
- Magnetfeldmessgerät (Teslameter) mit Hall-Sonde
- zwei Glasquader mit halbrunder Plexiglashalterung zur Positionierung zwischen den Polschuhen
- Terbium-Gallium-Granat-Zylinder (TGG) in Plastikfassungen (Länge 20 mm), ebenfalls mit halbrunder Plexiglashalterung
- Glasgefäß mit Olivenöl
- LED-Lichtquelle, umschaltbar zwischen rot ( $\lambda_r = 627(10)$  nm) und grün ( $\lambda_g = 521(14)$  nm)
- Polarisationsfilter (evtl. mit aufgesetztem Streifen aus Plastikfolie, die als  $\lambda/2$ -Plättchen wirkt)
- Polarisationsprisma

## Grundlagen

### Erklärung des Faraday-Effektes

Für eine umfassende Theorie des Faraday-Effektes ist eine quantenmechanische Betrachtung der Dispersion notwendig. Zum prinzipiellen Verständnis der wesentlichen Vorgänge zumindest in nichtmagnetischen Stoffen, kann aber auch eine klassische Argumentation herangezogen werden, die im Folgenden dargestellt werden soll:

Eine monochromatische linear polarisierte Welle, die ein transparentes Medium durchdringt, lässt sich mathematisch als Summe aus zwei gegenläufig zueinander zirkular polarisierten Wellen darstellen. Für jede dieser zirkular polarisierten Wellen bewirkt das mit ihr verbundene drehende  $\vec{E}$ -Feld (der Einfluss des  $\vec{B}$ -Feldes der Welle ist vernachlässigbar) eine kreisförmige Bewegung der elastisch gebundenen Elektronen des Mediums. Wirkt zusätzlich ein starkes, konstantes magnetisches Feld, das parallel zur einfallenden Welle und damit senkrecht zur Umlaufebene der Elektronen ist, so führt dies zu einer *zusätzlichen* Radialkraft (Lorentzkraft) auf die Elektronen, deren Richtung von der Drehrichtung des Lichts und der Richtung des konstanten  $\vec{B}$ -Feldes abhängt. Die gesamte Rückstellkraft (Lorentzkraft plus elastische Rückstellkraft) kann deshalb je nach Drehrichtung des Lichts zwei verschiedene Werte haben. Daraus folgen für ein bestimmtes Magnetfeld auch jeweils zwei Werte für das elektrische Dipolmoment, die Polarisation, die Dielektrizitätskonstante und letztlich zwei verschiedene Brechungsindizes  $n_{\circ}$  und  $n_{\ominus}$ . Von diesem Punkt an gleichen die Überlegungen denen bei der optischen Aktivität chiraler Moleküle (siehe Versuch zur Saccharimetrie in Abschnitt 4.11 auf Seite 437).

Der wesentliche Unterschied zwischen dem durch ein Magnetfeld hervorgerufenen Faraday-Effekt und der optischen Aktivität chiraler Moleküle ist, dass der Drehwinkel beim

Faraday-Effekt von der Richtung relativ zum Magnetfeld abhängt. Dies ermöglicht die Konstruktion besonderer Bauelemente, wie dem „optischen Isolator“<sup>1</sup>, der Licht nur in einer Richtung durchlässt, also quasi wie eine Diode für Licht wirkt. Derartige Bauelemente stehen scheinbar im Widerspruch zum Satz von der Umkehrbarkeit des Lichtweges. Allerdings hat schon H. v. Helmholtz gezeigt, dass dieser Satz eben gerade nur in Abwesenheit von Magnetfeldern gilt. Im Alltag fällt das normalerweise nicht auf, da u. a. die Magnetfelder meist zu klein sind.

### Bestimmung der Verdet-Konstante und der Dispersion

Der Drehwinkel<sup>2</sup> der Schwingungsebene ist für Licht, das sich in Magnetfeldrichtung ausbreitet, gegeben durch

$$\alpha = V \cdot d \cdot B \quad (5.10.1)$$

mit

$$\begin{aligned} V &= \text{verdetsche Konstante,} \\ d &= \text{Länge des Lichtwegs im Medium,} \\ B &= \text{magnetische Flussdichte.} \end{aligned}$$

Die verdetsche Konstante selbst hängt u. a. von der Dispersion  $dn/d\lambda$  des Materials ab und lässt sich berechnen nach

$$V = \frac{-e}{m} \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot c} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (5.10.2)$$

<sup>1</sup>Auch als „rayleighsche Lichtfalle“ bekannt. Dieses Bauteil besteht aus zwei Polarisationsfiltern, deren Durchlassrichtungen um 45° gegeneinander verdreht sind und einem dazwischen liegenden faradayaktiven Material, das in einem Magnetfeld liegt, so dass eine Drehung der Schwingungsebene des Lichts beim einmaligen Durchgang um genau 45° bewirkt wird. Je nachdem, von welcher Richtung die Anordnung beleuchtet wird, kann das Licht die Anordnung passieren oder nicht, da die Richtung der Drehung ja davon abhängt, ob sich der Lichtstrahl parallel oder antiparallel zu den Magnetfeldlinien ausbreitet. Man kann mit einem solchen „optischen Ventil“ beispielsweise verhindern, dass Licht aus einem Versuchsaufbau wieder zurück in einen Laser reflektiert wird. So können unerwünschte Rückwirkungen auf die Stabilität der Laserfunktion vermieden werden.

Eine interessante und praktische Anwendung im Alltag wäre sicher ein Türspion, der tatsächlich ausschließlich den Blick nach draußen ermöglicht, ohne irgend einen Einblick in die Wohnung zu gewähren. Leider sind derartige Isolatoren aber (noch?) relativ teuer.

<sup>2</sup>Hinweis zur Vorzeichenkonvention für den Drehwinkel und die verdetsche Konstante:

Das Vorzeichen wird in der Literatur üblicherweise wie folgt festgelegt: „Läuft das Licht in der Feldrichtung, so folgt seine Schwingungsebene bei positiver Verdet-Konstante einer Rechtsschraubung.“ [GGG78] S. 572.

Zum Vergleich hier die Konvention bei der optischen Aktivität (siehe auch Versuch zur Saccharimetrie in Abschnitt ?? auf Seite ??). Dort gilt üblicherweise: „Das Vorzeichen der spezifischen Drehung bzw. des optischen Drehvermögens einer Substanz gilt konventionell als positiv und die Substanz als ‘rechtsdrehend’, wenn sich die Schwingungsrichtung für einen Beobachter, der dem Lichtstrahl entgegenblickt, im Uhrzeigersinn dreht.“ [GGG78] S. 519.

Die beiden Konventionen sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da beim Faraday-Effekt zusätzlich die Feldrichtung eine Rolle spielt, die bei der Saccharimetrie nicht auftritt. Es ist zunächst willkürlich, ob man den Lichtstrahl in Feldrichtung oder entgegen der Feldrichtung laufen lässt, also gibt es keine „konsistente“ Festlegung des Vorzeichens.

mit

$$\begin{aligned}
 -e &= \text{Elektronenladung,} \\
 m &= \text{Elektronenmasse,} \\
 \lambda &= \text{Wellenlänge des Lichts,} \\
 c &= \text{Lichtgeschwindigkeit,} \\
 dn/d\lambda &= \text{Dispersion.}
 \end{aligned}$$

TGG Verdet Constant vs Wavelength

(Barnes and Petway 1992)

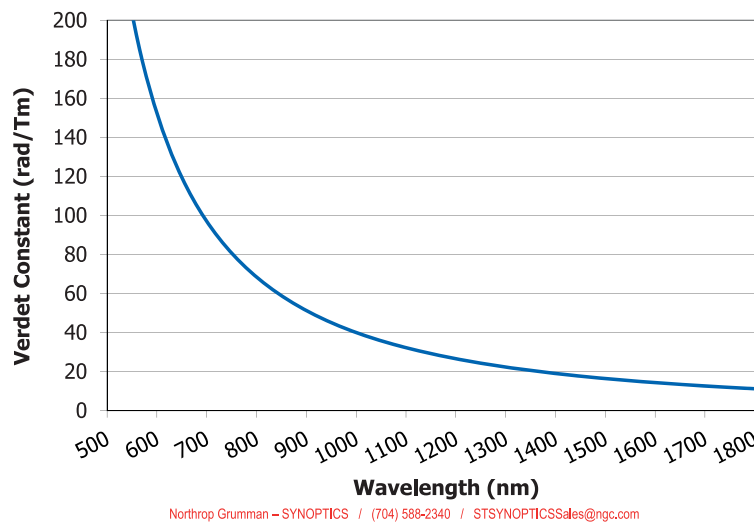


Abbildung 5.10.1.: Wellenlängenabhängigkeit der Verdet-Konstante von TGG [Barnes und Petway 1992].

## Glan-Thompson-Prisma

Ein besonders hochwertiger Polarisator aus verkitteten Kalkspatkeilen ist das Glan-Thompson-Polarisationsprisma. Eine Variante davon ist unter der Bezeichnung Glan-Laser-Prisma im Handel. Dabei ersetzt ein Luftspalt die Kittschicht, um das Prisma für höhere Lichtintensitäten einsetzbar zu machen, da der Kitt bei zu starker Beleuchtung erhitzt und beschädigt würde. Diese Variante funktioniert dafür nur für einen kleineren Einfallswinkelbereich.

<sup>3</sup>Gegenüber dem älteren nicolschen Prisma bietet das Glan-Thompson-Prisma mehrere Vorteile: Ein- und Austrittsflächen, die senkrecht zum durchgehenden Strahl liegen, so dass der durchgehende Strahl *nicht* parallel verschoben wird, eine kürzere Baulänge, ein großes Gesichtsfeld (bis 30°) und eine über den ganzen Querschnitt gleichmäßige Polarisation.

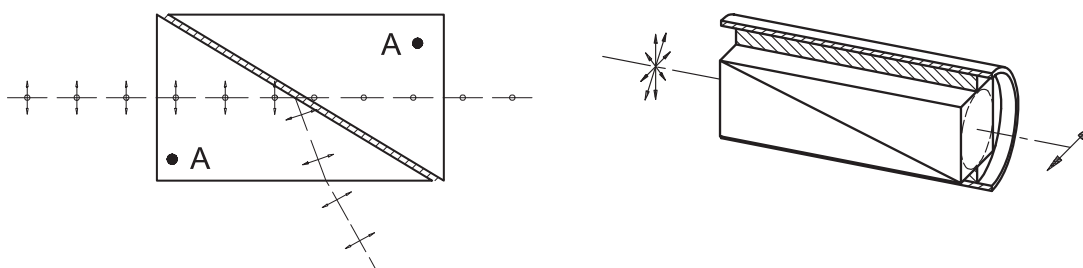


Abbildung 5.10.2.: Aufbau und Funktionsweise eines Glan-Thompson-Polarisationsprismas nach [KG02]:

Es besteht aus einem Kalkspatkristall, der in zwei Keile zerschnitten und (z. B. mit Kanadabalsam) wieder zusammgekittet wurde. Mit A ist im Bild die Richtung der optischen Achse bezeichnet, die hier senkrecht zur Zeichenebene verläuft, was durch die Punkte angedeutet werden soll. Die Pfeile geben die jeweiligen Polarisationsrichtungen an. Letztlich passiert der sog. *außerordentliche* Strahl das Prisma ohne Richtungsänderung, während der sog. *ordentliche* Strahl an der Kittfläche totalreflektiert wird und durch eine Seitenfläche austritt (bzw. je nach Bauform an ihr absorbiert wird).<sup>3</sup>

## Versuchsdurchführung

Hinweise:

- Schalten Sie den Elektromagnet *nur dann* ein, wenn die Wasserkühlung in Betrieb ist.
- Um Beschädigungen der Magnetspulen durch allzu hohe Induktionsspannungen zu vermeiden, darf der Strom durch den Elektromagneten *nur langsam* erhöht oder verringert werden (innerhalb von einigen Sekunden, um Induktionsspannungsspitzen zu vermeiden). Auf keinen Fall darf der Strom abrupt ein- oder ausgeschaltet werden. Achten Sie deshalb beim Einschalten darauf, dass der Stromregler ganz nach links gedreht ist.
- Messen Sie den Betrag der magnetischen Flussdichte mit der Hall-Sonde *unmittelbar vor oder nach* der Messung des Drehwinkels, ohne den Strom zwischendurch zu verändern. Die Hysterese des Eisenkerns würde sonst die Messwerte verfälschen.
- Notieren bzw. skizzieren Sie auf Ihrem Messprotokoll die Anordnung der Winkelskala am Analysator, um später das Vorzeichen der Drehung und damit der Verdet-Konstante bestimmen zu können.

1. Wählen Sie eine Wellenlänge.
2. Messen Sie für beide Glasquader, den Terbium-Gallium-Granat-Zylinder und das Gläschen mit Olivenöl jeweils die Drehung der Schwingungsebene des Lichts als Funktion der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  (jeweils mindestens zehn Messpunkte).

3. Wiederholen Sie die Messung für eines der Objekte mit der anderen Wellenlänge.

### Auswertung

1. Berechnen Sie eine Ausgleichsgerade für die Messwerte des Drehwinkels der Schwingungsebene als Funktion der magnetischen Flussdichte und daraus wiederum unter Verwendung von Gleichung (5.10.1) den Wert der Verdet-Konstante für alle untersuchten Stoffe.
2. Berechnen Sie unter Verwendung von Gleichung (5.10.2) die Dispersion  $\frac{dn}{d\lambda}$  für alle untersuchten Stoffe.

## Ergänzende Informationen

### Historisches

Michael Faraday hat bereits im Jahr 1846 den später nach ihm benannten Effekt gefunden. Er beobachtete in durchsichtigen isotropen Medien eine künstliche zirkulare Doppelbrechung, die durch ein Magnetfeld hervorgerufen wurde, dessen Feldlinien parallel zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes verliefen.

### Terbium-Gallium-Granat

Terbium-Gallium-Granat (TGG) ist ein Kristall mit einer betragsmäßig besonders hohen Verdet-Konstante. Diese hat einen Wert von  $-134 \frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}}$  bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 632 \text{ nm}$ . [Cor11]

### Kanadabalsam

Naturprodukt aus der Balsamtanne (auch Hemlockstanne oder Schierlingstanne, botanisch *Abies balsamea*). Dieser Baum ist heimisch in den nördlichen Staaten der USA und in Kanada. Die Gewinnung des Kanadabalsams erfolgt vor allem in der kanadischen Provinz Québec. Bisweilen wird Kanadabalsam auch gewonnen aus *Abies fraseri* oder *Tsuga canadensis*. Balsame sind Mischungen von ätherischem Öl mit Harz („Oleoresine“), die bei den Nadelbäumen auch Terpentine genannt werden. Kanadabalsam ist eine sehr dickflüssige, zähe, sehr klebrige, in frischem Zustand farblose bis leicht gelbliche Flüssigkeit, die bei längerem Stehen dunkler gelb bis grüngelblich wird. Kanadabalsam ist klar, durchsichtig und bisweilen fluoreszierend. Sein Geruch ist angenehm balsamisch-frisch, coniferenartig; der Geschmack etwas bitter und würzig. Der Kanadabalsam ist sehr leicht löslich in organischen Lösungsmitteln wie Benzol, Xylol, Toluol, Chloroform und Schwefelkohlenstoff, während die Löslichkeit in absolutem Äthanol und in Äthanol 90 % unvollständig ist. Fast vollständig erfolgt die Lösung in Äther und Terpentinöl; mit Wasser dagegen mischt sich der Balsam praktisch nicht.

Dichte:  $\rho \approx 0.994 \text{ g/cm}^3$ , Brechungsindex:  $n \approx 1.5225$ .

## Literaturhinweise

Zum Beispiel [GGG78].

## Literaturverzeichnis

- [Cor11] CORPORATION, NORTHROP GRUMMAN: *Terbium gallium garnet - tgg*, [www.northropgrumman.com/BusinessVentures/SYNOPTICS/Products/SpecialtyCrystals/Documents/pageDocs/TGG.pdf](http://www.northropgrumman.com/BusinessVentures/SYNOPTICS/Products/SpecialtyCrystals/Documents/pageDocs/TGG.pdf), 2011.
- [GGG78] GOBRECHT, HEINRICH, JENS H. GOBRECHT und KLAUS H. GOBRECHT (Herausgeber): *Bergmann-Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band III: Optik. Walter de Gruyter, Berlin, 7. Auflage, 1978.
- [KG02] KG, LINOS PHOTONICS GMBH & Co.: *Katalog Polarisationsprismen*, 2002.