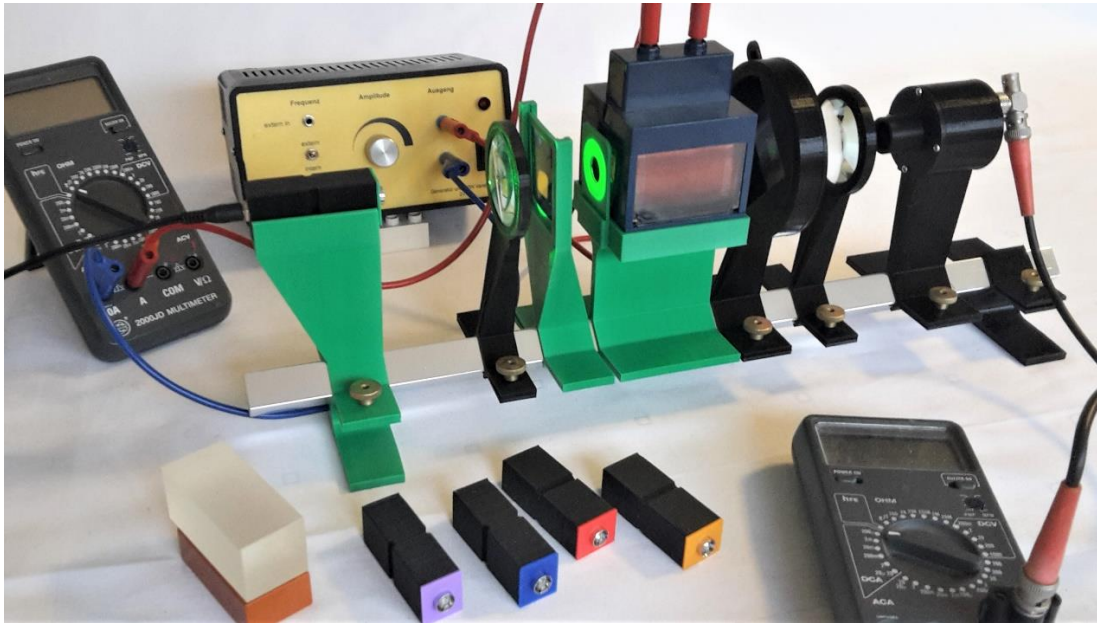


Atomphysik-Schülerexperiment und Demoversuch

Optische Bestimmung der spezifischen Elektronenladung e/m
mittels magnetfeldinduzierter Doppelbrechung (Faraday Rotation)



Dieser Atomphysik-Versuch für den Physikunterricht zur "Faraday Rotation" gestattet die optische Messung der spezifischen Elektronenladung e/m über magnetfeldinduzierte Doppelbrechung.

Er enthält alle optischen Elemente wie LED-Lichtquellen, Linsen, Polarisatoren, Detektor sowie Spule, Glaskörper und das Steuergerät (Generator mit Verstärker und AUX-Eingang). Aus der Schul-Sammlung sind zusätzlich nur zwei Multimeter und ein Standardoszilloskop (oder ein drittes Multimeter) nötig.

Faraday Rotation

Unter Faraday Rotation versteht man die Drehung der Polarisationssebene von linear polarisiertem Licht hervorgerufen durch eine magnetfeld-induzierte Doppelbrechung.

Physikalischer Hintergrund:

Das Licht wechselwirkt im Glaskörper, der zum Großteil aus SiO_2 besteht, mit dessen Elektronen. Jedoch können nur einige der schwächer gebundenen Valenzelektronen der Lichtfrequenz, die im Frequenzbereich von einigen Hundert Terahertz (10^{15} Hz) liegt, folgen und mitschwingen. Das sind die sogenannten Dispersionselektronen, die die optischen Eigenschaften des Materials bestimmen. Diese so bewegten Ladungsträger sind im Axialfeld in der Spule der Lorentzkraft ausgesetzt. Der Zeeman-Effekt führt zur Aufspaltung der Energieniveaus der optischen Übergänge. Die optischen Übergänge (Absorptionslinien), die im Glas im UV (und im IR) liegen, erzeugen die bekannte

Dispersion (Wellenlängenabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit). Im sichtbaren Spektralbereich, also recht weitab von den UV-Absorptionslinien, unterscheiden sich dadurch immer noch die Dispersionskurven für links- und für rechtszirkular polarisiertes Licht. Bei linear polarisiertem Licht (darstellbar als Summe von rechts- und linkszirkular polarisiertem Licht) führt das zur Drehung der Polarisationssebene. Man spricht dabei auch von magnetfeldinduzierter Doppelbrechung.

Im Versuch werden diese magnetfeldinduzierten Drehwinkel der Polarisationssebene in Abhängigkeit von fünf verschiedenen LED-Lichtwellenlängen und zusätzlich jeweils in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke gemessen. Das liefert die sogenannten Verdet-Konstanten, aus denen sich die spezifische Elektronenladung (e/m) der Dispersionselektronen ergibt.

Zur exakteren Messung der kleinen Drehwinkel wird das Magnetfeld bei der Messung moduliert.

Zusätzlich zum Schülerversuch kann ein Demonstrationsversuch aufgebaut werden, der die Informationsübertragung (z.B. Musik) mittels Laserstrahl durch Polarisationsmodulation zeigt.

Relevante Formeln

Für den Drehwinkel der Polarisationssebene (Faraday-Rotations Winkel) gilt

$$\theta(\lambda, B) = V(\lambda) * L * B \quad .$$

Wobei V die sogenannte Verdet-Konstante, L die Länge des Glasblocks, und B die magnetische Flussdichte sind. Sind die Größen $V(\lambda)$ aus den Messungen (aus den Anstiegen der verschiedenen Darstellungen V über B) ermittelt worden, ergibt sich die spezifische Elektronenladung e/m sofort aus

$$V = -\frac{1}{2} \frac{e}{m_e c} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad .$$

Die Funktionen $n = n(\lambda)$ und $dn/d\lambda$ finden sich für die verschiedenen Glassorten auf der WebSite: <http://refractiveindex.info/> .

Lerninhalte

- Elektronen bestimmen die optischen Eigenschaften von Materie
- Dichte der Dispersionselektronen, spezifische Elektronenladung
- Spektren von Lumineszenzdioden (LED – light emitting diodes)
- Dielektrische Funktion eines transparenten Mediums
- normale und anormale Dispersion, Oszillatormodell, Sellmeier-Gleichung
- Verlauf des axialen magnetischen Feldes in einer **kurzen** Spule
- Zeeman-Effekt im Axialfeld
- Linear und zirkular polarisiertes Licht, Malus Gesetz
- Magnetfeldinduzierte Doppelbrechung, Kontrast, Polarisationsgrad
- Umgang mit Multimeter, Oszilloskop
- Anwendung von Modulationsverfahren zur Messung kleiner Größen

Eine umfangreiche Versuchsanleitung mit Darstellung der theoretischen Grundlagen, eine Anleitung mit Hinweisen zur Versuchsdurchführung und eine Musterlösung gehören zum Versuch.

Einige Komponenten im Detail:

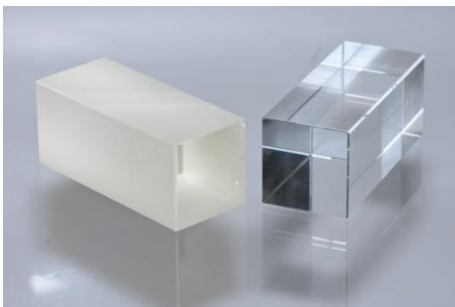
Steuergerät (Frequenzgenerator mit Verstärker und AUX-Eingang)



Mit dem Generator mit integriertem Verstärker wird das Magnetfeld in der Spule erzeugt und moduliert. Für die Modulation des Magnetfeldes stehen zwei Festfrequenzen zur Verfügung. Anstelle des internen Frequenzgenerators kann ein externes Signal über den AUX-Eingang zur Modulation des Magnetfeldes eingespeist werden. So können ein anderer Generator, ein MP3-Player oder ein Smartphone z.B. für die Musikübertragung über einen Lichtstrahl angeschlossen werden.

Magnetspule, Halter und Glasblöcke

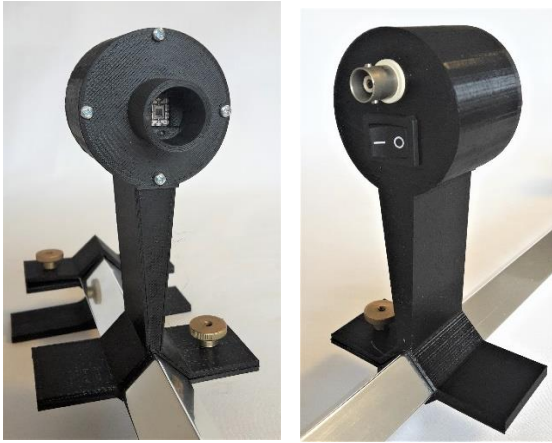
Magnetspule und Magnetspulenhalter sind auf den Übersichtsbildern zum Versuchsaufbau gut erkennbar. An den Magnetspulenhalter kann eine runde Festblende (15 mm) aufgesteckt werden, um den parallelen Lichtstrahl möglichst mittig durch den Glasblock zu führen. Der Verlauf des axialen Magnetfeldes in der Spule ist in der Musterlösung gegeben, kann aber auch mit einer Hallsonde ausgemessen werden.



Prinzipiell sind zwei passende Glasquader verfügbar: N-BK7 – Kronglas (alle Seiten poliert) oder SF10 (ZF4) – Schwerflintglas (nur zwei polierte Giebelflächen). ZF4 ist ein Bleiglas hoher Dichte, SF 10 ist ein bleifreies Glas (SF 10: $3,05 \text{ g/cm}^3$ und ZF4: $4,5 \text{ g/cm}^3$). SF10 und ZF 4 haben jedoch exakt dieselbe Dispersion und dieselbe chromatische Dispersion. Die exakten Zusammensetzungen der Gläser sind in der Standardlösung gegeben.

Fotodetektor

Es handelt sich um einen empfindlichen Si-Detektor mit integriertem Operationsverstärker. Zwischen 350 nm und 700 nm nimmt die spektrale Empfindlichkeit nahezu linear um den Faktor zwei zu. Die Grenzfrequenz liegt bei etwa 14 kHz. Der schwarze Zylinder schirmt das Streulicht aus der Umgebung so gut ab, dass das Experiment bei normalen Raumlicht gut durchführbar ist.

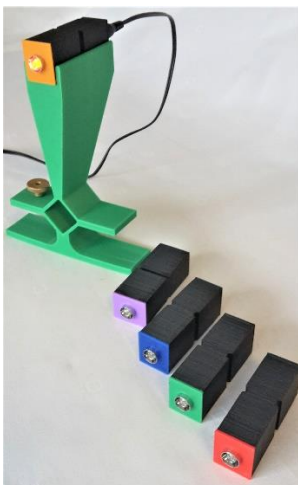


Der Detektor hat eine integrierte langlebige Batterie und einen Schalter. Zur Bestimmung der Verdet-Konstanten muss sowohl die Größe des ac-Signals (Modulation) als auch die Größe des dc-Signals (bedingt durch die 45°-Stellung des Analysators) gemessen werden. Das gelingt gut über ein T-Stück, um gleichzeitig (1) über ein Multimeter (dc-Modus) das dc-Signal und (2) über z.B. ein Oszilloskop oder ein zweites Multimeter (ac-Modus) das ac-Signal zu messen.

LED-Lichtquellen für das Schülerexperiment "Bestimmung der spezifischen Elektronenladung"

Für das Experiment stehen als Lichtquellen LED zur Verfügung. So können die Drehwinkel der Polarisationssebene als Funktion der Magnetfeldstärken und damit die Verdet-Konstanten bei fünf verschiedenen Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich ermittelt werden. Alle LEDs werden durch ein Steckernetzteil versorgt

Alle LEDs können auf denselben Halter aufgesteckt werden, so dass Farbwechsel schnell und ohne Neujustierung des Strahlengangs möglich sind, wichtig für den beschränkten Zeitfonds im Unterricht.



LEDs einsteckbar in denselben Halter für schnellen Farbwechsel ohne Neujustierung

Die unterschiedlichen Helligkeiten der verschiedenen LED und die spektral unterschiedlichen Empfindlichkeiten des Detektors beeinflussen sowohl das ac-Detektorsignal als auch das dc-Detektorsignal (45°-Analysatorposition) gleichermaßen. Da zur Ermittlung des Drehwinkels beide Signale durcheinander dividiert werden müssen, spielen beide Effekte keine Rolle mehr.

Experimenteller Aufbau für das Demonstrationsexperiment „Informationsübertragung“ mittels Polarisationsmodulation durch Faraday Rotation

Das Demonstrationsexperiment “Musikübertragung mittels Polarisationsmodulation eines Laserstrahls” funktioniert sehr gut z.B. im Hörsaal über Distanzen bis zu 5 Metern. Für dieses Experiment steht ein polarisationsstabiler Halbleiterlaser (635 nm, 1 mW) zur Verfügung.



Halbleiterlaser für das Demonstrationsexperiment

Im Experiment werden auf der Senderseite (linkes Bild unten) nur der Laser, die Magnetspule mit Glasblock im Halter, das Steuergerät als Verstärker (AUX-Eingang) und z.B. ein MP3-Player oder ein Smartphone benötigt. Auf der Empfängerseite (rechtes Bild) werden Bank ein Analysator (45° - Position), eine Linse und der Detektor platziert. Der Analysator wirkt als Diskriminator und wandelt die Polarisationsmodulation in eine Intensitätsmodulation um.

