

Komplexe Brechzahl (Ellipsometrie)

1. Hintergrund und Zielsetzung des Versuchs

Ziel dieses Versuches ist die exakte Bestimmung der komplexen Brechzahl n für verschiedene Metalle, Halbmetalle sowie einiger Isolatoren. Die komplexe Brechzahl, die in der Literatur häufig auch als komplexer Brechungsindex bezeichnet wird, ist eine material- und wellenlängenabhängige (Dispersion) Größe, die sich aus dem reellen Brechungsindex n' und dem Absorptionsindex κ wie folgt zusammensetzt $n = n' + i\kappa$. Bei allen durchsichtigen Medien wie zum Beispiel Glas, Wasser, Luft usw. ist κ klein gegen n' (sonst wären sie nicht durchsichtig) und man kann für diesen Fall $n = n'$ als gültig voraussetzen. Aus diesem Grund erscheint in der Optik, wo zumeist mit Stoffen geringer Absorption (Prismen, Linsen usw.) gearbeitet wird in vielen Gleichungen auch n' anstatt n . Betrachtet man allerdings die Reflexion von Strahlung an Festkörpergrenzflächen mit nicht zu vernachlässigender Absorption, so muss auch der Absorptionsindex κ , der eng mit dem Absorptionskoeffizienten μ (siehe Beersches Absorptionsgesetz) des Festkörpers verknüpft ist, betrachtet werden. Der Absorptionsindex enthält eine Vielzahl wichtiger Informationen über die Festkörperstruktur und dessen Eigenschaften und ist daher im Bereich der Materialwissenschaften sowie der Industrie von großer Bedeutung.

Für die Bestimmung der optischen Konstanten n' und κ wird in diesem Praktikumsversuch die von D.G. Avery [Proc. Phys. Soc. 65B, 425 (1952)] entwickelte R_p/R_s -Methode herangezogen. Diese beruht ganz allgemein auf der Tatsache, dass parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht bei nicht senkrechter Inzidenz unterschiedliche Reflektivitäten R_p und R_s aufweist. Über die Fresnelschen Formeln besteht ein analytischer Zusammenhang zwischen den gemessenen Reflektivitäten und den Werten n' und κ , die hierüber berechenbar sind. Für jedes Paar optischer Konstanten ist es notwendig, bei mindestens zwei verschiedenen Einfallswinkeln Reflektionsmessungen bei einer festen Wellenlänge λ vorzunehmen. Experimentelle Befunde zeigen, dass bei Metallen, wo ellipsometrische Methoden aufgrund der großen Werte von n' und κ generell mit einem großen Fehler behaftet sind, dieses Verfahren die genauesten Ergebnisse zu liefern vermag.

Zur experimentellen Bestimmung der komplexen Brechzahl n steht Ihnen ein modular aufgebauter optischer Messplatz zur Verfügung, der in seiner ursprünglichen Form an den Universitäten Köln und Konstanz zur Bestimmung der komplexen optischen Konstanten von Metallen und Halbleitern zur Materialcharakterisierung eingesetzt wurde. Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus einem Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 670 nm, einer Photodiode, die als Detektor dient, zwei Rotationstischen, einer speziellen Probenhalterung mit Justiereinheit (bestehend aus einem Lineartisch und zwei Goniometern), sowie verschiedenen Linsen und Polarisatoren (siehe hierzu Abbildung 1 und 2). Die einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus sind über spezielle Adapter sowie eine optische Bank auf einer Aluminium-Rasterplatte montiert und durch eine Abschirmung bestehend aus Aluminium-Profilen und schwarzer Pappe vor Streustrahlung geschützt. Zur Auswertung der Messdaten steht Ihnen ein PC mit dem Auswerteprogramm RPRS zur Verfügung.

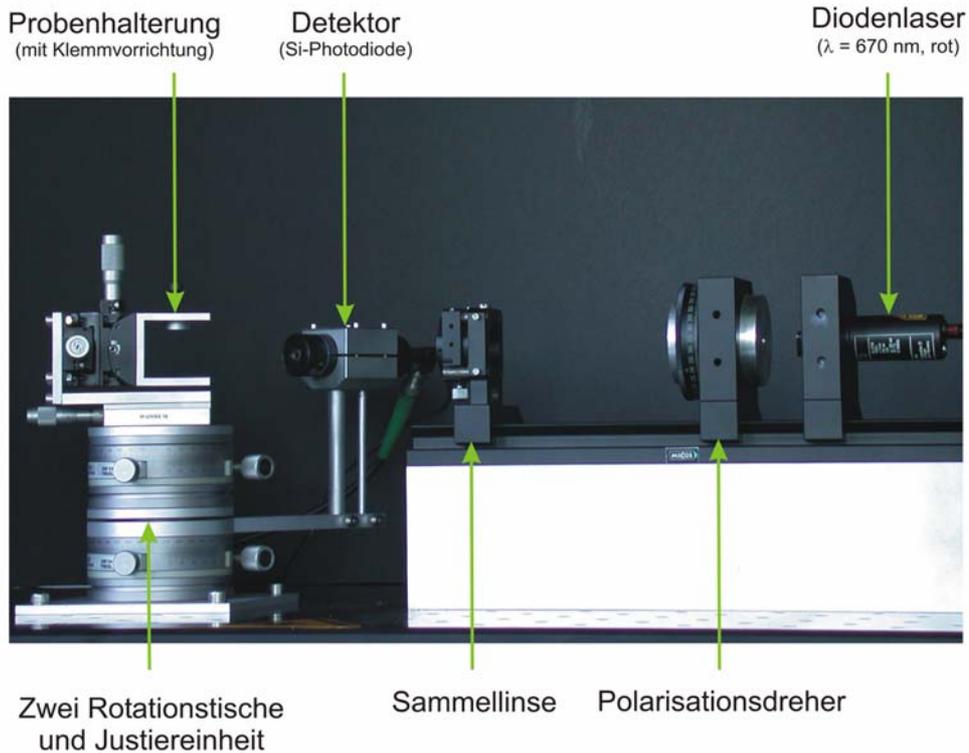


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der optischen Konstanten n' und κ mit allen wesentlichen Komponenten.

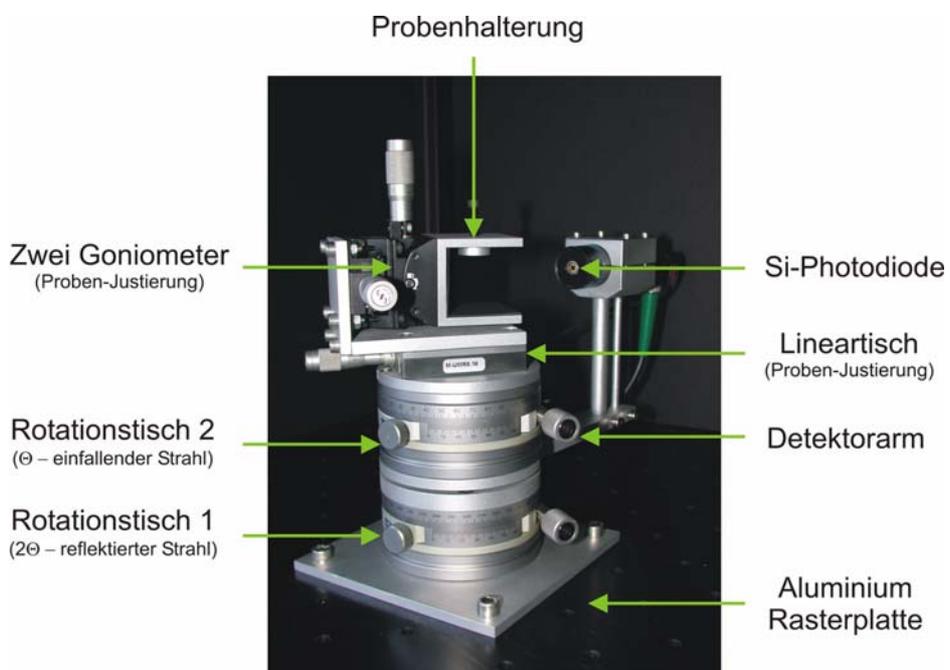


Abbildung 2: Probenhalterung mit Justiereinheit (bestehend aus zwei Goniometern und einem Lineartisch), sowie zwei Rotationstische zur Einstellung/Bestimmung des Einfalls/Ausfallswinkels.

2. Vorkenntnisse

Wechselwirkung von Licht mit Materie, Absorption, Beersches Absorptionsgesetz, Beugung, Interferenz, komplexe Brechzahl, Dispersion, Snelliussches Brechungsgesetz, Fresnelsche Formeln, Rp/R_s-Methode, Polarisationsarten, Polarisationsfilter, der Brewsterwinkel, Funktionsweise und Eigenschaften von Halbleiterlasern und Photodioden.

3. Versuchsaufbau

3.1 Verwendete Geräte

Als Lichtquelle dient in diesem Versuch ein Diodenlaser (DS 670) der Klasse II mit einer Wellenlänge von $670 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, einer Ausgangsleistung kleiner 1 mW , einem kreisförmigen Strahldurchmesser von 3 mm und einer Divergenz kleiner $0,5 \text{ mrad}$. Ein Folien-Polarisationsdreher ermöglicht eine beliebig einstellbare Richtung der Polarisationsebene mit einer Genauigkeit von etwa $0,5^\circ$ bei nahezu gleich bleibender Intensität. Eine Sammellinse mit einer Brennweiten von 100 mm dient der Fokussierung des Laserstrahls auf die Probenoberfläche, um definierte Winkelverhältnisse für einfallendes und reflektiertes Licht zu gewährleisten. Über Sammellinsen mit einer größeren Brennweite (150 mm , 200 mm und 250 mm) kann der Laserstrahl bei Bedarf auch auf den Detektor fokussiert werden. Die Proben lassen sich in einem spezielle Probenhalter montieren, der über zwei Goniometer (Verstellbereich $\pm 5^\circ$) und einen Lineartisch (maximaler Verstellweg 16 mm) mit dem oberen der beiden Rotationstische verbunden ist (siehe Abbildung 2). Die beiden Goniometer sowie der Lineartisch werden zur Ausrichtung der Proben im Strahl benötigt. Über den oberen Rotationstische lässt sich der Einfallswinkel der linear polarisierten Strahlung mit einer Einstellempfindlichkeit von etwa 0.02° verfahren. Der Winkel des reflektierten Strahls wird mit einem äquivalenten zweiten Rotationstisch gemessen, der sich unterhalb des ersten befindet. Beide sind entkoppelt voneinander auf der Aluminiumrasterplatte montiert. Zur Messung der reflektierten Intensität wird eine Silizium-Photodiode mit Messverstärker (dieser ist im Gehäuse integriert) eingesetzt. Bei sehr gut reflektierenden Proben sind Ausgangssignale bis etwa 1.5 V mit einem Digitalmultimeter (Auflösung minimal 0.01 mV) messbar. Da die Si- Photodiode eine hohe Empfindlichkeit über einen weiten Bereich des sichtbaren Spektrums aufweist, kann bei Bedarf mit einem Rotfilter gearbeitet werden. Während dieser Streulicht von Glühlampen lediglich um 50% abgeschwächt, reduziert sich der Einfluss von Leuchtstofflampen auf ca. 10% . Zur Auswertung des Messdaten steht ihnen ein Computer mit MS Windows XP Professional Betriebssystem, MS Office 2003 und Internetzugang zur Verfügung. Als Auswerteprogramm wird der Algorithmus von B. Hillebrands, Version 1993, empfohlen. Dieses Programm (RPRS) ist bereist auf dem Rechner installiert und über eine Dos-Box ausführbar. Es können aber auch die beigegefügte Auswertediagramme für $75^\circ/60^\circ$, $76^\circ/60^\circ$ und $80^\circ/60^\circ$ -Winkelkombinationen verwendet werden. Sinnvoll ist die Kombination aus beiden Möglichkeiten.

3.2 Vorbereitende Messungen

Allgemeine Hinweise: Bevor der Diodenlaser in Betrieb genommen wird, sollte sicher gestellt werden, dass sich keine reflektierenden Gegenstände mit Ausnahme der Probe im Strahlengang des Lasers befinden (nicht in den Strahl blicken). Ferner wird empfohlen, den Laser während der gesamten Versuchsdurchführung eingeschaltet zu lassen, um Intensitätsunterschiede bei den einzelnen Messungen zu vermeiden. Zum Ausblenden des Strahls

befindet sich am Lasergehäuse eine schwarze Verschlussklappe, mit der sich die Austrittsöffnung bei Bedarf jederzeit verschließen lässt.

Justage des Detektorarms: Zunächst ist es notwendig die Nulllage des Detektorarms festzulegen. Hierzu fokussieren sie den Strahl auf die Si-Photodiode (ohne Polarisationsdreher und ohne Probe) und suchen durch Drehen des Rotationstisches 1 den Winkel der maximalen Intensität. Dieser Winkel entspricht nun der Nulllage und sollte bei allen weiteren Messungen entsprechend verwendet werden. (Fehlerbetrachtung!)

Justage der Proben im Strahl: Bei einem Probenwechsel wird es immer notwendig sein, die Oberfläche präzise im Strahl auszurichten. Im Folgenden wird kurz beschrieben, wie diese Ausrichtung durchzuführen ist. Da die Qualität aller Resultate, die sie später erhalten, entscheidend von dieser Justage abhängen wird, sollte diese mit besonderer Sorgfalt durchgeführt werden! Stellen sie den Rotationstisch 2 (Einfallswinkel θ) zunächst exakt auf Null Grad ein und montieren sie zunächst eine dünne Glasscheibe so auf dem Probenhalter, dass der Strahl bei geöffneter Verschlussklappe die Oberfläche nicht berührt (maximale Intensität am Detektor). Über den Lineartisch wird die Probe dann so weit in den Strahl gefahren, bis die Intensität auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes abgesunken ist. Diese Position, die wir mit $x_{1/2}$ bezeichnen, sollte festgehalten werden. Danach wird über das erste der beiden Goniometer (gesehen in Richtung der Probenhalterung) die Neigung der Oberfläche senkrecht zur Strahlrichtung geändert (Winkelbereich etwa von -3° bis $+3^\circ$). Stellen sie das Goniometer auf den Winkel φ_0 der maximalen Intensität ein und überprüfen sie erneut die Position $x_{1/2}$. Stimmen die beiden $x_{1/2}$ -Werte nicht überein muss dieser Schritt so lange wiederholt werden, bis dies der Fall ist. Danach sollte das erste Goniometer nicht mehr bewegt werden. Drehen sie nun Rotationstisch 1 um 90° . Verfahren sie das das zweite Goniometer so weit, bis der Laserstrahl komplett in sich zurück reflektiert wird. Die Oberfläche sollte danach im Strahl ausgerichtet sein. Diese Prozedur ist bei allen Probenwechseln zu wiederholen!

Winkelabhängigkeit der Intensität: Befestigen sie nun den Polarisationsdreher auf der optischen Bank und fahren sie die Glasscheibe aus dem Strahl. Ziel dieser Messung ist es, zu überprüfen, wie sich die Intensität des Laserstrahls bei Drehung der Polarisationsebene bzw. des Linearpolarisators ändert. Hierzu messen sie unter Variation der Winkeleinstellung am Polarisator die am Detektor abfallende Spannung mittels des Digitalmultimeters. Die Spannungswerte sollten innerhalb von 0.2%, zumindest aber von 0.5%, übereinstimmen. Diskutieren sie ihre Ergebnisse.

Parallele und senkrechte Polarisation: Für die Versuchsdurchführung ist es notwendig, die Winkeleinstellungen am Polarisationsdreher, bei denen die Strahlung parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist, möglichst genau zu kennen. Dieser Versuchsteil dient der Bestimmung dieser Winkelpositionen. Bei der 90° -Stellung des Polarisationsdrehers sollte die Laserstrahlung parallel zur Einfallsebene polarisiert sein. Um dies zu überprüfen, wird die Glasscheibe wieder in den Strahl auf die Position $x_{1/2}$, gefahren und der Winkel am Rotationstisch 2 auf den theoretischen Wert des Brewsterwinkels für Glas eingestellt (etwa 57°). Messen sie im Winkelbereich von etwa 70° bis 110° des Polarisationsdrehers die Intensität des reflektierten Strahls und verifizieren sie das Intensitätsminimum und somit die Lage der Polarisations Ebenen.

Reflexionsmessung: Stellen Sie den gewünschten Einfallswinkel am Rotationstisch 2 ein und messen sie die Position des reflektierten Strahls. Das reflektierte Licht sollte zentriert auf die quadratische Detektorfläche treffen. Nehmen Sie die Intensitätswerte bei den zuvor ermittelten Winkeleinstellungen des Polarisationsdrehers für parallel und senkrecht zur

Einfallsebene polarisiertes Licht auf. Ermitteln Sie den durch Streulicht bedingten Offset des Diodensignals durch Ausblenden des Strahls über die Verschlussklappe am Lasergehäuse.

Auswertung: Ermitteln Sie die Reflektionsverhältnisse R_p/R_s für parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht sowie für verschiedene Einfallswinkel unter Berücksichtigung des Offsets und eventueller Intensitätsunterschiede. Bestimmen Sie hieraus unter Verwendung der beigefügten Diagramme (diese erhalten sie vom Assistenten) und des Auswerteprogramms RPRS die optischen Konstanten n' und κ . Da die Auswirkung der einzelnen Messfehler für unterschiedliche Werte des Brechungsindex stark variiert, ist eine ausführliche und kritische Fehlerbetrachtung vorzunehmen.

4. Messprogramm

- 4.1 Nehmen Sie den Versuch wie in Kapitel 3 beschrieben in Betrieb.
- 4.2 Ermitteln Sie zunächst den Real- und Imaginärteil des komplexen Brechungsindex von Float-Glas, durch Reflexionsmessungen bei verschiedenen Winkeleinstellungen, um sich mit der Messmethode vertraut zu machen.
- 4.3 Bestimmen sie optischen Konstanten n' und k bei verschiedenen Winkeleinstellungen für folgend Materialien:

Metalle: Kupfer (Cu), Aluminium (Al), (Edelstahl und Messing optional!)

Halbleiter: Silizium (Si, einkristallin)

Isolatoren: Magnesiumoxid (MgO) und Lanthanaluminat (LaAlO₃)
- 4.4 Zur Auswertung der Daten steht ihnen ein PC mit dem Auswerteprogramm RPRS zur Verfügung. Verifizieren sie damit die Fresnelschen Formeln. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit entsprechenden Literaturwerten. Diskutieren sie anhand der gewonnenen Ergebnisse das unterschiedliche Verhalten von Metallen, Halbleitern und Isolatoren.

6. Literatur

- Allgemein:

1. W. Demtröder, *Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik*;
[91 UAP 6566]
2. E. Hecht, *Optik*; **[73 UGH 1730]**
3. W. Macke, *Lehrbuch der theoretischen Physik*; **[73 UAP 4564]**
4. G. Eder, *Elektrodynamik*; **[61 UEB 1198]**
5. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*; **[73 UGH 1081, 75 UGH 1081]**
6. R. W. Ditchburn, *Light*; **[73 UGH 1497]**
7. L. Bergmann und C. Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik*; **[73 UAP 1605]**
8. M. Born, *Optik*; **[73 UGH 1023]**
9. W. Greiner, *Theoretische Physik 3, Klassische Elektrodynamik*
[73 UAP 1760, 91 UAP 1760]

- Zu Ellipsometrie und komplexem Brechungsindex:

10. C. Weißmantel und C. Hamann, *Grundlagen der Festkörperphysik*;
[72 UIM 3971, 91 UIM 3971]
11. L. Levi, *Applied Optics - A guide to optical system design*;
[73 UGL 1497]
12. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*;
[83 UGR 1065]

- Zum Nachschlagen:

13. Chemical Rubber Company, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*;
[74 STM 1139, 82 STM 1139]
14. Landolt-Börnstein, *Numerical data and functional relationships in science and technology*; **[72 STM 1024, 73 STM 1024]**
15. A. J. Moses, *The Practising Scientist's Handbook*; **[72 STM 1545]**