

# 0 8 Brechung und Totalreflexion

## 1. Aufgabenstellung

- 1.1 Bestimmen Sie den Brechungsindex  $n$  vorgegebener Modellkörper für die Wellenlänge 632.8 nm eines He-Ne-Lasers gegen Luft  $n_2 \approx 1$  anhand der Messung von Einfallswinkel und Ausfallswinkel sowie durch die Bestimmung des Grenzwinkels der Totalreflexion.
- 1.2 Bestimmen Sie den Brechungsindex  $n_D$  und die ABBE'sche Zahl  $\nu$  vorgegebener transparenter Flüssigkeiten und Festkörper mit Hilfe des ABBE-Refraktometers.

## 2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

HUYGENS-FRESNEL'sches Prinzip, Brechungsindex, Totalreflexion, Dispersion, ABBE'sche Zahl, ABBE-Refraktometer

Literatur:

- |                    |  |
|--------------------|--|
| A. Recknagel       | Physik · Optik, 7. Auflage, Kap. 1,<br>Technik Verlag 1977   |
| W. Ilberg          | Physikalisches Praktikum, Kap. 3.1,<br>Teubner Verlag 1984   |
| Bergmann - Schäfer | Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. III, Optik,<br>6. Auflage, Kap. I.5, I.6,<br>W. de Gruyter 1974 |

Trifft ein Lichtstrahl auf eine ebene Grenzfläche zweier isotroper Medien ändert sich die Ausbreitungsrichtung, er wird gebrochen und teilweise reflektiert. Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Geschwindigkeit in den entsprechenden Medien heißt Brechungsindex  $n_{1/2} = c_0 / c_{1/2}$ . Einfallender ( $\varphi$ ), gebrochener ( $\varphi'$ ) und reflektierter Strahl ( $\varphi''$ ) liegen in einer Ebene senkrecht zur Grenzfläche (Abb. 1) und es gelten Brechungs- und Reflexionsgesetz

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi'} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{und} \quad \varphi = \varphi'' \quad . \quad (1)$$

Beim Übergang aus einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium  $n_1 > n_2$  ist der Brechungswinkel  $\varphi'$  stets größer als der Einfallswinkel  $\varphi$  und erreicht  $90^\circ$  für

$$\varphi = \varphi_g = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad . \quad (2)$$

Für  $\varphi > \varphi_g$  wird der Lichtstrahl vollständig reflektiert, es tritt Totalreflexion ein. Optische Geräte zur Bestimmung des Brechungsindex anhand der Messung von  $\varphi_g$ , des Grenzwinkels der Totalreflexion gemäß Gl. (2), werden als Refraktometer bezeichnet.

Die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium, außer im Vakuum, und damit der Brechungsindex ist auch eine Funktion der Wellenlänge des Lichtes. Diese Erscheinung wird als Dispersion bezeichnet. Als Maß wird üblicherweise für im sichtbaren Spektralbereich transparente Medien die mittlere Dispersion  $n_F - n_C$  als Differenz der

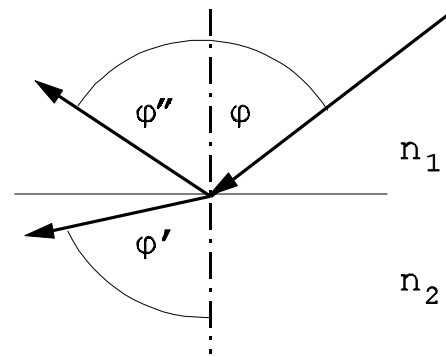


Abb. 1 : Ebene Grenzfläche zweier Medien mit  $n_1 > n_2$

Brechungsindizes für die Wasserstofflinien  $H_\alpha$  und  $H_\beta$  ( $\lambda_{H_\alpha} = 656.3 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{H_\beta} = 468.1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{H_\beta}$  und  $\lambda_{H_\alpha}$  sind die entsprechenden FRAUNHOFER'schen Bezeichnungen) bzw. die ABBE'sche Zahl  $\nu$ ,

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (3)$$

bezogen auf die mittlere Wellenlänge des Natriumdubletts  $\lambda_D = 589.3 \text{ nm}$ , angegeben.

## 2.1 Demonstrationsversuch

Für ein anschauliches Experiment der Brechung gegen Luft sind Modellkörper mit einer halbkreisförmigen Grundfläche besonders geeignet. Bei genauer Justage ist gewährleistet, dass über die gekrümmte Begrenzungsfläche ein- bzw. ausfallende Strahlen die Grenzfläche lotrecht und damit ohne zusätzliche Brechung passieren (Abb. 2).

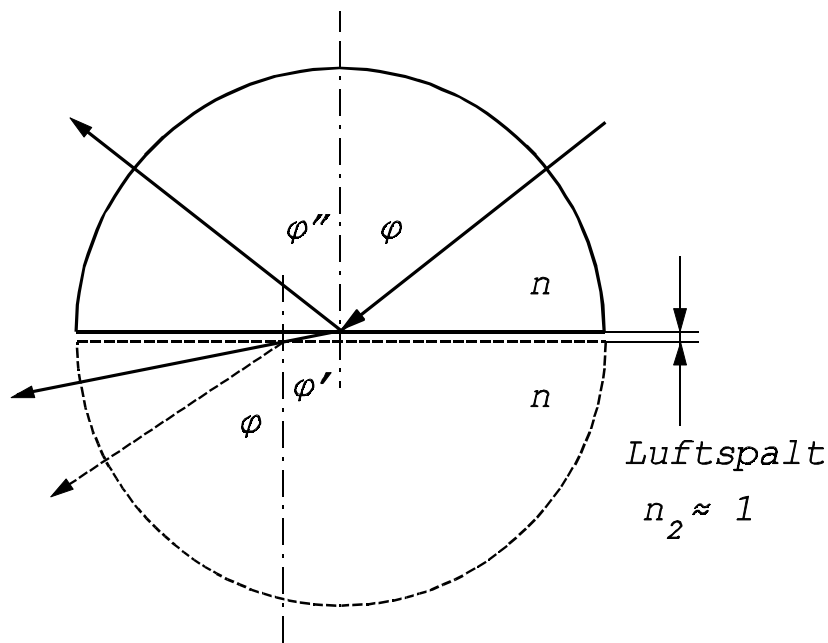


Abb. 2 : Strahlenverlauf durch den Modellkörper (Der Strahlenversatz ist zur Verdeutlichung stark überhöht dargestellt.)

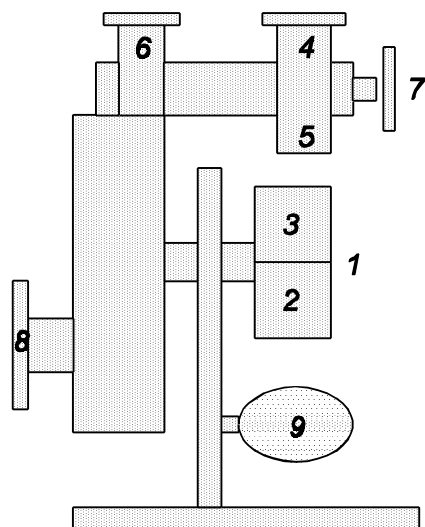
Bei der Ermittlung des Grenzwinkels erweist es sich als nachteilig, dass der gebrochene Strahl durch Oberflächenrauigkeiten entlang der ebenen Grenzfläche stark gestreut wird. Fügt man einen zweiten identischen Modellkörper in der in Abb.2 gezeigten Weise hinzu, so kann für den somit gebildeten kreisrunden Modellkörper mit minimalem Luftspalt ein geradliniger Strahlendurchgang für alle

$\varphi < \varphi_g$  beobachtet werden, der mit Überschreiten des Grenzwinkels abrupt abbricht.

Für die Untersuchung an Flüssigkeiten können Küvetten mit halbkreisförmiger Grundfläche eingesetzt werden, wobei der Mittelpunkt des Krümmungsradius mittig auf der inneren Küvettenwandfläche liegt.

## 2.2 ABBE-Refraktometer

Das ABBE-Refraktometer Abb. 3 dient in erster Linie zur Untersuchung von Flüssigkeiten. Ein Doppelprisma aus schwerem Flintglas (1) nimmt die Flüssigkeit in Form einer dünnen planparallelen Schicht zwischen Beleuchtungsprisma (2) und Messprisma (3) auf. Licht einer Fremdquelle mit kontinuierlichem Spektrum, gerichtet von einem Spiegel (9), tritt durch die



rauhe Oberfläche des Beleuchtungsprismas diffus in die Flüssigkeitsschicht ein und maximal unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion in das Messprisma über. Die austretenden Strahlen werden im Fokus des Beobachtungsfernrohrs (5) abgebildet. Schematisch ist der Strahlengang in Abb. 4 gezeigt. Das Doppelprisma ist starr mit einem Teilkreis mit Triebknopf (8) gekoppelt. Durch Drehung kann die Hell-Dunkel Grenze der Totalreflexion auf das Fadenkreuz des Fernrohrs eingestellt werden.

Abb. 3 : ABBE-Refraktometer

Der Teilkreis wird über ein Mikroskop (6) abgelesen und ist unmittelbar in Einheiten des Brechungsindex  $n_D$  kalibriert. Dem Fernrohr ist ein Farbkompensator (4) nachgeschaltet. Dieser besteht aus zwei Amici-Prismen, die mittels Trieb (7) gegensinnig verdreht werden können. Die Prismenkombination ist für die Na-D-Linie geradsichtig und weist bei Drehung eine veränderliche Dispersion auf, wodurch die Dispersion der untersuchten Flüssigkeitsschicht kompensiert wird und eine farblose Hell-Dunkel-Grenze für den Beobachter entsteht. Der Drehwinkel kann abgelesen werden und dient mittels Tabelle zur Berechnung der mittleren Dispersion  $n_F - n_C$ .

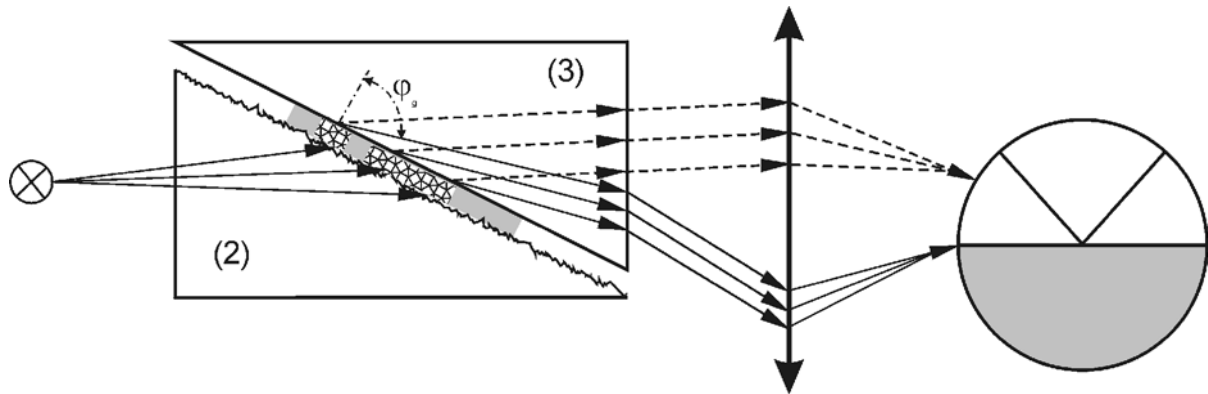


Abb. 4 : Strahlengang im ABBE-Refraktometer

Mit dem ABBE-Refraktometer können ebenfalls kleine Festkörperproben untersucht werden. Dabei wird eine ebene Probenfläche mit einigen Tropfen Monobromnaphthalin ( $n_D = 1.657$ ) als optischem Kontaktvermittler auf das Messprisma aufgesetzt. Eine höher brechende dünne Zwischenschicht beeinflusst die Messung nicht.

### 3. Versuchsdurchführung

**Arbeitsschutzhinweis für Experimente mit Laser-Lichtquellen :**

1. **Blicken Sie niemals direkt in den Laserstrahl.**
2. **Hantieren Sie nicht mit stark reflektierenden Gegenständen, wie Uhren, Ringen etc., in Strahlnähe zur Vermeidung unkontrollierter abgelenkter Strahlen.**

Die Ihnen gestellte experimentelle Aufgabe umfaßt zwei Teilversuche,

- die Untersuchung der Brechung an großen Modellkörpern mit halbkreisförmiger Grundfläche mit einer Laserlichtquelle,
- Messungen an Flüssigkeiten und Gläsern mit dem ABBE-Refraktometer.

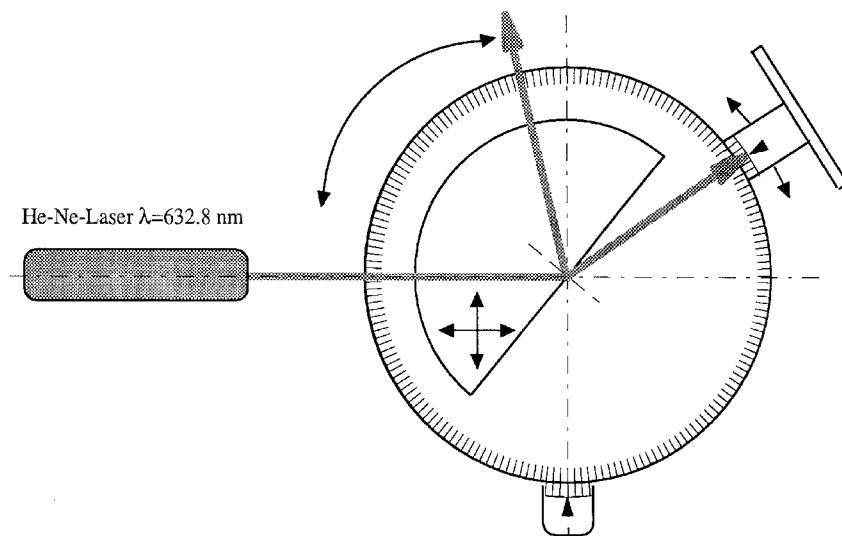


Abb. 5 : Versuchsaufbau

### 3.1 Versuchsaufbau des Demonstrationsversuches

Der Laser und der Proben­tisch sind mittels Reiter auf einer optischen Bank montiert. Der Proben­tisch nimmt den untersuchten Modellkörper auf, ist drehbar gelagert und mit einer Skalenteilung versehen, so dass der aktuelle Drehwinkel mittels Nonius abgelesen werden kann. Durch Justage zu Beginn des Versuches ist sicherzustellen, daß der Laserstrahl exakt die Drehachse des Tisches schneidet. Der Modellkörper kann mittels einer 2-Koordinaten-Verschiebung auf dem Drehtisch positioniert werden. Zentrisch zur Drehachse ist ein Schirm angeordnet mit dessen Hilfe die Winkelposition abgelenkter Strahlen vermessen und mittels Nonius relativ zum Drehwinkel des Tisches bestimmt werden kann.

1. Justieren Sie den Laser mittels der 4 Stellschrauben an seiner Befestigung parallel zur optischen Bank so, dass der Laserstrahl ca. 5 mm über dem Proben­tisch und exakt durch die Drehachse des Tisches verläuft.

Als Justierhilfe dient eine senkrecht auf einem Fuß stehende Glaskapillare. Die Kapillare wird zunächst so auf der Drehachse positioniert, dass der Laserspot auf der Kapillarenwand invariant zu einer beliebigen Drehung des Tisches ist (Achten Sie als Hilfestellung auf das Streulicht an der Wand). Danach erfolgt die Einstellung am Laser für einen Strahlverlauf durch die Kapillarenmitte. Achten Sie ebenfalls durch Verschiebung des Tischreiters

auf der optischen Bank auf eine parallele Höheneinstellung. Die einzelnen Positionierschritte sind ggf. sukzessive zu wiederholen.

2. Befestigen Sie den zu untersuchenden Modellkörper mittels Haftstreifen auf dem Drehtisch und positionieren Sie ihn mit Hilfe der 2-Koordinaten-Verschiebung. Die Drehachse muß auf der ebenen Wandfläche in der Mitte der Längsabmessung liegen (Hinweis: Für Flüssigkeitsküvetten erfolgt die Justage auf die Küvetteninnenseite). Das ist erreicht, wenn der Probekörper mit der ebenen Begrenzung parallel zum Laserstrahl orientiert, diesen auf seiner gesamten Länge zur Hälfte schneidet (Überprüfen Sie die entsprechende Einstellung bei einer Drehung um exakt  $180^\circ$ ). Bei einer Drehung des Tisches um  $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$  ist zu kontrollieren, ob der Strahldurchgang entlang der Symmetrieachse des Probekörpers erfolgt.

Wenn dies erreicht ist, entspricht die Winkelposition des den Körper durchlaufenden Strahls auf dem Schirm der Position des Laserstrahl ohne Probekörper. Der an der dem Laser zugewandten vorderen Fläche reflektierte schwache Spot fällt dabei exakt in die Lichtaustrittsblende des Lasers zurück. Verschiebungen in beide Koordinatenrichtungen sind jeweils wechselseitig zu kontrollieren.

Notieren Sie zum Abschluss die Winkelpositionen von Tisch und Schirm als Bezugswerte für Ihre späteren Messungen.

3. Bestimmen Sie, beginnend mit einem Einfallswinkel von  $10^\circ$ , in  $5^\circ$ -Schritten Einfalls- und Brechungswinkel für den Modellkörper.
4. Bestimmen Sie den Grenzwinkel der Totalreflexion wie unter 2.1. beschrieben. Als Auskoppelkörper, der ohne die Justierung zu verletzen unmittelbar hinter den Probekörper gelegt wird, dient ein zweiter Modellkörper mit halbkreisförmiger Grundfläche bzw. ein speziell verkürzter Körper bei der Untersuchung an Flüssigkeitsküvetten (Kompensation der Wandstärke der Küvette).
5. Wiederholen Sie die Punkte 2.- 4. mit einem zweiten Modellkörper (Küvette).

### 3.2 Messungen am ABBE-Refraktometer

1. Beschicken Sie die Messapparatur, indem das Doppelprisma geöffnet und soweit geneigt wird, bis die blanke Fläche des Messprismas waagrecht

liegt. Mit einem Glasstab gibt man 2 Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit auf die Fläche, ohne sie zu berühren. Das Beleuchtungsprisma wird vorsichtig angeklappt und das Doppelprisma geschlossen (Luftblasen unbedingt vermeiden). Danach kann das Gerät in die Beobachtungsstellung aufgerichtet werden.

Bei der Untersuchung von Festkörperproben wird mit einem Tropfen Monobromnaphthalin der zu untersuchende Körper mit der waagrecht stehenden blanken Fläche des Messprismas in optischen Kontakt gebracht. Das Beleuchtungsprisma bleibt aufgeklappt.

2. Leuchten Sie die Probe durch Einstellung des Beleuchtungsspiegels aus. Als Lichtquelle dient eine Tischleuchte, deren Licht auf die Eintrittsöffnung des Beleuchtungsprismas zu richten ist. Für die Untersuchung von Festkörperproben ist das Refraktometer erhöht zu stellen. Die Beleuchtung erfolgt in dem Fall über die Lichteintrittsöffnung des Messprismas, deren Verschluss vorher abzunehmen ist.
3. Stellen Sie die Hell-Dunkel-Grenze auf die Mitte des Fadenkreuzes im Beobachtungsfernrohr bei gleichzeitiger Kompensation des Farbsaumes ein.
4. Lesen Sie den Wert für  $n_D$  am Teilkreis (Genauigkeit - 3 Nachkommastellen) und den der Farbkompensatorteilung  $z$  ( 1 Nachkommastelle) ab und bestimmen die mittlere Dispersion  $n_F - n_C = A + B \times \sigma$  anhand der am Versuchstisch ausliegenden Dispersionstafel.  
Alle Einstellungen sind mindestens 3 mal vorzunehmen. Da optische Konstanten temperaturabhängig sind, ist die Raumtemperatur im Messprotokoll zu vermerken.
5. Entfernen Sie die jeweilige Probe und reinigen Sie die Prismenflächen mit Ethanol.
6. Wiederholen Sie Pkt. 1.-5. für insgesamt 5 Flüssigkeiten und eine Festkörperprobe nach Auswahl des betreuenden Assistenten.

#### 4. Auswertung

- 4.1 Stellen Sie die Messwerte für Einfallswinkel  $\varphi$  und Brechungswinkel  $\varphi'$  graphisch in der Form  $\sin \varphi'$  über  $\sin \varphi$  dar und ermitteln Sie den Brechungsindex  $n$ .
- 4.2 Berechnen Sie den Brechungsindex  $n$  ausgehend von dem ermittelten Grenzwinkel der Totalreflexion  $\varphi_g$ .



- 4.3 Vergleichen Sie beide Ergebnisse und führen Sie eine Größtfehlerberechnung durch.
- 4.4 Geben Sie für die untersuchten Flüssigkeits- und Festkörperproben den Brechungsindex  $n_D$  und die ABBE'sche Zahl  $v$  tabellarisch an.

5. Kontrollfragen

1. Erläutern Sie Brechung und Reflexion einer ebenen Welle an der Grenzfläche zweier Medien ausgehend vom HUYGENS'schen Prinzip.
2. Diskutieren Sie den Strahlenverlauf bei Brechung einschließlich der Bedingungen für Totalreflexion für den Übergang aus einem Medium 1 in ein Medium 3 mit einer dazwischenliegenden parallelen Schicht eines Mediums 2.

(Betrachten Sie alle möglichen Relationen der Brechungsindizes  $n_1, n_2, n_3$ .)

3. Schätzen Sie (Formel) den systematischen Fehlereinfluss der Wandstärke der Flüssigkeitsküvette auf die experimentelle Bestimmung des Brechungsindex ab (siehe Skizze) und geben Sie eine numerische Abschätzung für die von Ihnen mit der Modellkörperküvette untersuchte Flüssigkeit.

Gehen Sie von einem Brechungsindex des Küvettenmaterials (Pyacryl)  $n_K = 1.49$ , einer Wandstärke  $d_K = 2.0$  mm und einem Beobachtungsabstand Schirm-Drehachse von  $R = 142$  mm aus.

