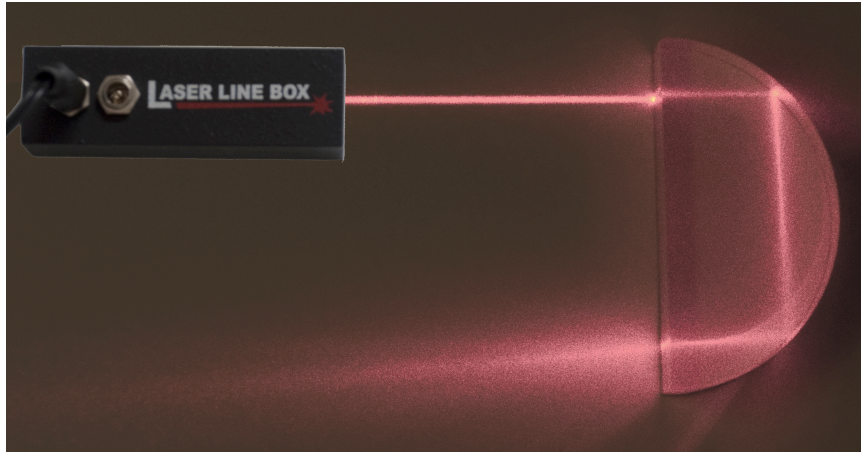


Die Messung der Totalreflexion an einem Halbkreiszyylinder

[VAD_Physik_Totalreflexion_Halbkreiszyylinder.doc]



Klassenstufe	Oberthemen	Unterthemen	Anforderungs- niveau	Durchführungs- niveau	Vorbereitung Durchführung
S II	Optik	Totalreflexion	● ● ●	■ ■	ca. 50 Minuten

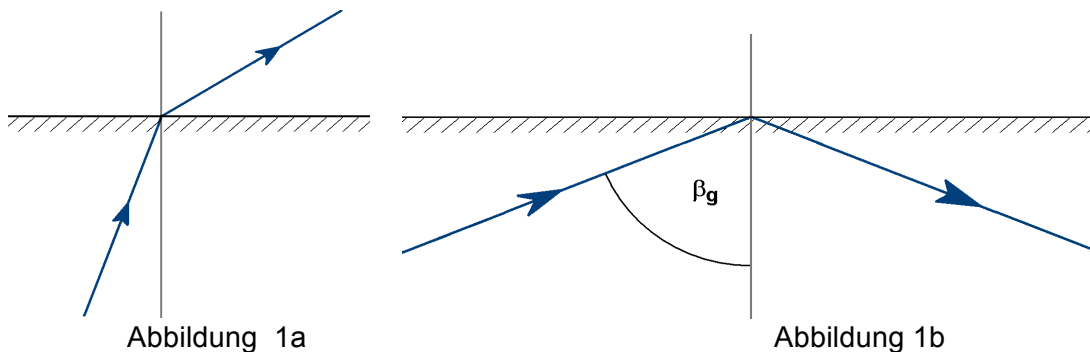
Autor: Prof. Dr. Klaus Dräger

1. Motivation	Seite 2
2. Geometrische Grundlagen	Seite 3
3. Die Richtung des Einfallenden Lichtes	Seite 3
4. Die Versuchsvorlage	Seite 5
5. Experimentelle Durchführung	Seite 6
6. Auswertung	Seite 7
Versuchsvorlage	Seite 8

1. Motivation

Die öffentlichen Medien sehen keinen Grund, sich mit der Totalreflexion zu beschäftigen. Dafür jedoch spekulieren sie umso eifriger über alles, was sich aus diesem physikalischen Phänomen ableiten und für das Publikum mit so bedeutungsvollen Vokabeln wie „Glasfasern als Datenträger“ oder „Lichtleiter und Endoskopie“ belegen lässt. Diese Techniken wären jedoch ohne das Merkmal „Totalreflexion“ nicht denkbar. Aber auch unter den gegebenen Verhältnissen führt die Totalreflexion als optisches Ereignis ein sehr verstecktes Dasein. Sie muss durch wohlüberlegte Maßnahmen eingekreist und in einem Experiment zum Auftritt gezwungen werden.

Wie ist dieses Phänomen zu erfassen? Das Folgende vorweg:
Lichtstrahlen, die aus dem Inneren eines optisch transparenten Körpers auf die Phasengrenze treffen und dann, im Regelfall, auch hindurchtreten, werden aus ihrer ursprünglichen Laufrichtung abgelenkt. Abbildung 1a zeigt die angesprochenen Verhältnisse.



Lichtstrahlen jedoch, die dabei einen bestimmten Grenzwinkel β_g überschreiten – zu dessen Bewertung das Lot auf die Phasengrenze eingetragen wird – werden dagegen, nach den Gesetzen der Reflexion, wieder vollständig in das Körperinnere zurückgeworfen. Siehe dazu Abbildung 1b. Dieses Ereignis ist gemeint, wenn von der Totalreflexion gesprochen wird.

2. Geometrische Grundlagen

Zu den entscheidenden Maßnahmen, die Totalreflexion experimentell sicher zu erfassen, gehört auch die Auswahl einer geeigneten Geometrie, die dem optisch transparenten Körper gegeben wird. Ein Zylinder mit einem kreisförmigen Querschnitt hat in dieser Hinsicht bemerkenswerte Eigenschaften. Bei ihm steht jeder Radiusvektor \vec{r} genau senkrecht auf der Kreislinie. Andererseits verläuft die Tangente im Schnittpunkt von Radius und Kreis für ein wenn auch kleines Wegstück gemeinsam mit der Kreislinie, Abbildung 2. Das ist gerade genug, um die geometrischen Verhältnisse auch für das Verhalten eines schmalen Lichtbündels nutzbar zu machen. Für das optische Experiment empfiehlt es sich darüber hinaus, dem optischen Körper die Form eines Halbkreiszyinders zu geben, weil dann das System entlang seiner ebenen Schnittfläche sehr viel einfacher und besser zu justieren ist. Siehe dazu Abbildung 3.

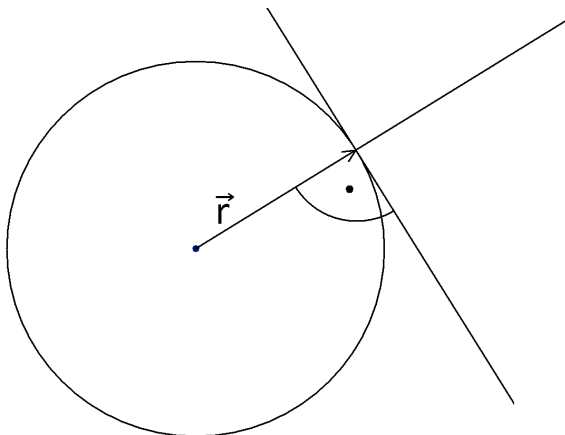


Abbildung 2

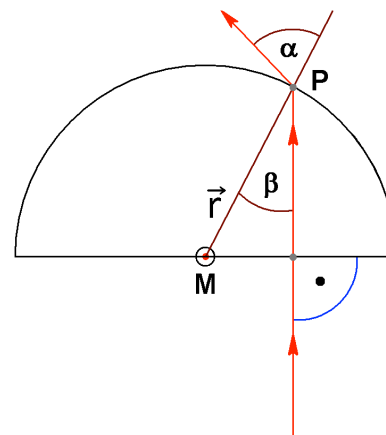


Abbildung 3

3. Die Richtung des einfallenden Lichtes

Um dem Lichtstrahl im Inneren des optischen Körpers stets eine wohldefinierte Richtung vorzugeben, wird die Lichtquelle genau senkrecht zur diagonalen Schnittlinie des Halbkreises ausgerichtet. Bei dieser Wahl – und nur bei dieser – erfährt der einfallende Lichtstrahl dort keine Brechung sondern erreicht auf geradem Wege die Kreisbegrenzung im Punkt P . Dort übernimmt der Radiusvektor \vec{r} , und dies entlang der gesamten Kreislinie, die Rolle einer Flächennormalen, auf die sich in der Optik sowohl der Einfalls- wie auch der Ausfallwinkel eines Lichtstrahls beziehen, Abbildung 3. Qualitativ gilt dabei für alle Winkel $\beta > 0$ die Regel:

$$\alpha > \beta \quad (1)$$

Aus dieser Relation entwickelt sich eine Bedingung, bei der die Totalreflexion verlässlich auftritt. Da nämlich der größte Winkel α , unter dem ein Lichtstrahl austreten kann, nicht

VAD_Physik_Totalreflexion_Halbkreiszyylinder.doc

mehr als 90° beträgt, muss es im Inneren des optischen Körpers einen Grenzwinkel β_g geben, für den dieses Ereignis zutrifft. Ihn gilt es zu ermitteln.

Wie bereits festgestellt, wird ein Lichtstrahl, der genau senkrecht auf die ebene Schnittfläche eines Halbkreiszyinders zuläuft, erst an der Kreislinie gebrochen. An dieser Tatsache wird auch eine Parallelverschiebung des Primärstrahls grundsätzlich nichts ändern. Allerdings wird sich der innere Winkel β , je weiter der Primärstrahl zur Außenseite des Halbkreiszyinders verschoben wird, schrittweise vergrößern und diese Tendenz nach Regel (1) auch auf den zugehörigen Außenwinkel α übertragen.

Bei dieser Systematik muss überlegt werden, wie der in die Grenzlage abgedrängte Lichtstrahl reagiert. Da er den Außenwinkel α von 90° nicht überschreiten kann, muss ein anderer Vorgang ausgelöst werden. Die Ausweichreaktion des Lichtstrahls liegt in einer drastischen Umverteilung seiner Intensität. Sie wird in vollem Umfang auf den reflektierten Strahl übertragen, der in das Innere des optischen Körpers zurückgeworfen wird.

Damit wird die Parallelverschiebung des Primärstrahls ein verlässlicher Parameter, durch den dann auch der Grenzwinkel β_g eindeutig markiert werden kann. Er gilt als erreicht, wenn der austretende Strahl verschwindet und die Gesamtintensität auf den ins Innere reflektierten Strahl übergeht.

Dieses singuläre Ereignis kann ohne weitere Hilfsmittel sehr gut beobachtet werden.

Da die Beobachtung aber sowohl zum rechten wie zum linken Rand der Halbkreislinse hin gemacht werden kann, ergibt sich die Möglichkeit, den Grenzwinkel β_g der Totalreflexion rein geometrisch und ohne jeden Formelapparat zu ermitteln.

4. Die Versuchsvorlage

Das Experiment ist für einen Halbkreiszyylinder mit einem Durchmesser von $D = 15 \text{ cm}$ vorbereitet worden. Es gibt dazu eine Versuchsvorlage im DIN A4-Format. Auf ihr ist die geforderte Position des optischen Körpers durch ein Feld in grauer Tönung vorgegeben. Darauf muss der Halbkreiszyylinder zunächst einjustiert werden. Die nächste Maßnahme zielt darauf ab, die Lichtquelle außerhalb der Vorlage so zu positionieren, dass der Primärstrahl exakt entlang der eingetragenen „1. Einstrahlrichtung“ verläuft. Auf diese Weise erreicht man eine Ausgangsstellung, die den optischen Normalfall ausmacht.

Für den Versuchsablauf empfiehlt es sich, nicht die Lichtquelle sondern die Vorlage mit dem aufgesetzten Halbkreiszyylinder vorsichtig und dabei genau senkrecht zur Einstrahlrichtung zu verschieben. Diese Operation ist durch das Feld paralleler Linien sehr genau zu kontrollieren. Die Bewegungsrichtung ist dabei so zu wählen, dass sich der Primärstrahl dem rechten Rand der Halbkreislinse nähert. Der Vorgang endet, wenn der nach oben austretende, gebrochene Lichtstrahl verschwindet. Die nach diesem Kriterium ausgewählte Leuchtspur des Primärstrahls ist durch eine Punktfolge zu dokumentieren. Sie wird dazu direkt auf die Vorlage übertragen. Der erste Teil des Experimentes ist damit absolviert.

Der zweite Teil startet mit der „2. Einstrahlrichtung“ und stellt sinngemäß eine spiegelgleiche Abfolge aller Maßnahmen aus Teil I dar. Die auf diesem Wege ermittelte zweite Leuchtspur verläuft dementsprechend näher zum linken Rand und wird wie zuvor durch eine Punktfolge auf der Vorlage dokumentiert; Abbildung 4a .

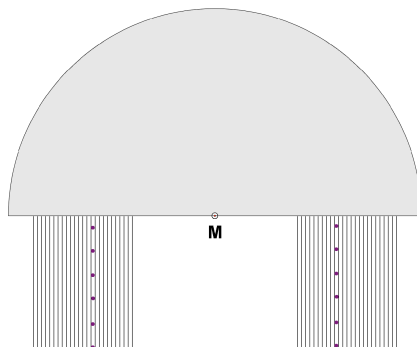


Abbildung 4a

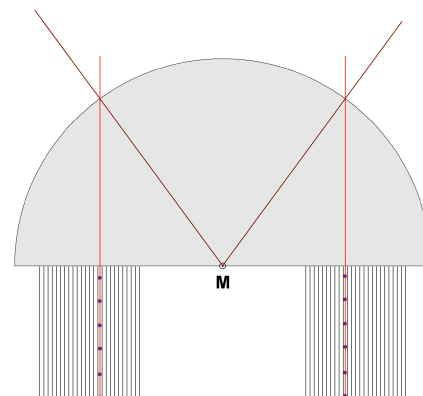


Abbildung 4b

5. Experimentelle Durchführung

Für die gestellte Aufgabe sind Zweiergruppen vorgesehen.

1. Aufteilung der Aktivitäten

Der erste Experimentator legt den Linsenkörper nach Vorgabe in das Positionsfeld ab. Der zweite überprüft die Orientierung. Der erste korrigiert, falls nötig; danach richtet er von einer Position **außerhalb** der Vorlage den Primärstrahl entlang der 1.

Einstrahlrichtung im rechten Linienfeld aus. Der zweite überprüft die Ausrichtung und der erste korrigiert sie gegebenenfalls.

2. Danach wird die Vorlage vom ersten Experimentator so lange senkrecht zum Linienfeld verschoben [links und rechts mit Daumen und Mittelfinger halten !], bis der zweite das Verschwinden des austretenden Lichtstrahls signalisiert. Das Ergebnis ist durch minimales Vor- und Zurückschieben zu sichern.

Der Primärstrahl ist endgültig positioniert, wenn er exakt parallel zum umgebenden Linienfeld verläuft.

3. Die Markierung der so ausgezeichneten Leuchtspur erfolgt durch den zweiten Experimentator, während der erste Vorlage und Lichtquelle unverrückt auf ihren Positionen hält. Für die Markierung kann ein Filzschreiber mit schmalen Strich empfohlen werden. Damit werden im Abstand von 5 mm jeweils Punkte entlang der gesamten Leuchtspur auf die Vorlage übertragen; Abbildung 4a .

Teil I des Experiments ist damit abgeschlossen. Es schließt sich Teil II an, der auf der linken Hälfte des Blattes ganz analog zu Teil I mit der 2. Einstrahlrichtung durchgeführt wird, so wie es unter dem Abschnitt „**Die Versuchsvorlage**“ beschrieben worden ist.

6. Auswertung

Auf der Vorlage sind dann weitere zeichnerische Operationen zu vollziehen.

1. Mit Lineal und spitzem Bleistift sind jeweils die im Experiment markierten Leuchtspuren zu rekonstruieren. Diese sind dann jeweils über den Rand des Halbkreises hinweg zu verlängern. Bei den so eingetragenen Spuren des Primärstrahls ist sorgsam darauf zu achten, dass sie streng parallel zum jeweils umgebenden Linienfeld verlaufen.
2. Danach ist jeweils eine weitere Verbindungsgerade zwischen dem Mittelpunkt M und dem Schnittpunkt der rekonstruierten Leuchtspur – Abbildung 4b – mit der Kreislinie einzutragen und auch dies **deutlich** über den Schnittpunkt hinaus, um eine vorgesehene Winkelmessung zu erleichtern. Nach diesen Einträgen für Teil I und Teil II des Experimentes ist – mit der Spitze im Zentrum M – ein Winkel γ erzeugt worden, Abbildung 5. Er war das Ziel dieser Operationen.

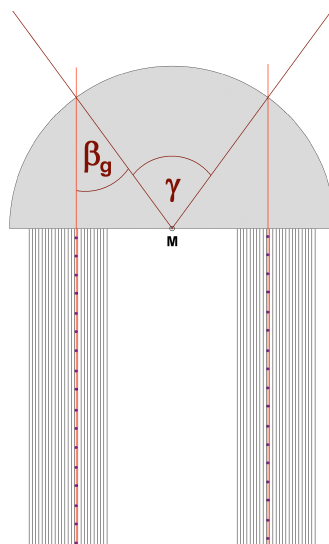


Abbildung 5

3. Der Winkel γ repräsentiert den Winkel β_g der Totalreflexion, wie einfache geometrische Überlegungen zeigen. Denn da der Punkt M im Zentrum des Halbkreises und auf einer Symmetrie-Ebene der Anordnung liegt, folgt für diesen Winkel der Totalreflexion :

$$\beta_g = \frac{1}{2} \gamma$$

Jeder Lichtstrahl aus dem Inneren eines optischen Körpers, der mit einem Winkel $\beta > \beta_g$ auf die Grenzfläche trifft, wird vollständig in das Innere des Körpers reflektiert.

Versuchsvorlage zur Messung des Grenzwinkels der Totalreflexion an einem Halbkreiszyylinder

$D = 15 \text{ cm}$

