



Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

326. Brechung. Totalreflexion

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:466:1-83789)

Punkten der Spiegelfläche zurückgeworfenen Strahlen schneiden sich daher nicht mehr in einem einzigen, sondern in unendlich vielen verschiedenen Punkten, deren stetige Aufeinanderfolge eine Brennfläche (kaustische Fläche) oder in einer durch die Achse gelegt gedachten Ebene eine Brennlinie (Kaustik) bildet. Man nimmt sie wahr im Innern von Serviettenringen, Tassen und anderen hohen spiegelnden Flächen in Form von zwei hellen Bogen, die sich beiderseits vom Brennpunkt aus nach der Spiegelfläche hin erstrecken. Um die Randstrahlen eines Bündels von parallelen Strahlen mit den Zentralstrahlen in einem Punkte zu vereinen, müßte man dem Spiegel statt der sphärischen eine parabolische Gestalt geben. Man nennt deswegen diesen Fehler, welcher das Zustandekommen scharfer Bilder bei Spiegeln von größerer Öffnung verhindert, die „Abweichung wegen der Kugelgestalt“ oder die sphärische Aberration.

326. Brechung. Totalreflexion. Lenkt man durch einen kleinen Spiegel *A* (Fig. 316) ein dünnes Bündel Lichtstrahlen (*AM*) auf die Oberfläche des Wassers in einem Glastrog, so wird ein Teil des einfallenden Lichtbündels dem Reflexionsgesetz gemäß nach *MN* zurückgeworfen, ein anderer Teil *MP* dagegen dringt in das Wasser ein, bildet aber nicht die direkte Fortsetzung des einfallenden Bündels, sondern verfolgt eine steilere, jedoch noch immer geradlinige Bahn. Da das eindringende Lichtbündel sonach am Einfallspunkte eine Knickung oder Brechung (Refraktion) erleidet, so bezeichnet man die Erscheinung mit letzterem Ausdruck. Die Abweichung des gebrochenen Strahlenbündels von der Richtung des einfallenden wird geringer, wenn man das letztere durch Drehung des Spiegels *A* immer steiler auf die Wasseroberfläche fallen läßt; bei senkrechtem Einfallen erfolgt gar keine Richtungsänderung mehr, sondern die in das Wasser eingedrungenen Strahlen bilden die geradlinige Fortsetzung der einfallenden. Trifft das eingedrungene Bündel senkrecht auf einen kleinen unter das Wasser gebrachten Spiegel *B*, so kehrt es auf dem gleichen Wege *BMA* zurück. In reiner Luft und in reinem Wasser würden die Strahlenbündel unsichtbar bleiben, sie werden aber wahrnehmbar durch die Erleuchtung von Rauch- oder Staubteilchen, mit welchen man die Luft und die Flüssigkeit absichtlich trübt. Löst man im Wasser eine kleine Menge Eosin (eine fluoreszierende Substanz) auf, so leuchtet der gebrochene Strahl mit grünlichem Licht.

Um den Verlauf des einfallenden (*am* Fig. 317) und des gebrochenen Strahles (*mb*) genau angeben zu können, denkt man sich in dem Einfallspunkt *m* eine Senkrechte *mc* errichtet und auch in das Wasser hinein (nach *md*) fortgesetzt; man nennt sie das Einfallslot. Man bemerkt nun zunächst, daß die Ebene, welche den einfallenden Strahl und das Einfallslot enthält (die Ebene der Zeichnung), stets auch den gebrochenen Strahl in sich aufnimmt. Sie heißt deshalb die Brechungsebene. Die Richtung der Strahlen selbst wird durch den Winkel bestimmt, welchen sie mit dem Einfallslot bilden, nämlich durch den Einfallswinkel *i* und den Brechungswinkel *r*. Jedem Einfallswinkel entspricht ein Brechungswinkel von bestimmter Größe. Indem man die zusammengehörigen Winkel mißt, findet man z. B. zu dem

Einfallswinkel	0°	den Brechungswinkel	0°
"	15°	"	$11\frac{1}{5}^{\circ}$
"	30°	"	22°
"	45°	"	32°
"	60°	"	$40\frac{1}{2}^{\circ}$
"	75°	"	$46\frac{1}{2}^{\circ}$
"	90°	"	$48\frac{1}{2}^{\circ}$

In Figur 317 ist nach der Angabe dieser kleinen Tabelle zu dem Einfallswinkel $i = 60^{\circ}$ der zugehörige Brechungswinkel $r = 40\frac{1}{2}^{\circ}$ gezeichnet. Beschreiben wir nun in der Brechungsebene um den Einfallspunkt m einen Kreis mit beliebigem Halbmesser und ziehen von den Punkten a und b aus, in welchen der einfallende und der gebrochene Strahl die Kreislinie schneiden, die Geraden ac und bd senkrecht auf das Einfallslot, so ergibt sich, daß bd $\frac{3}{4}$ ist von ac

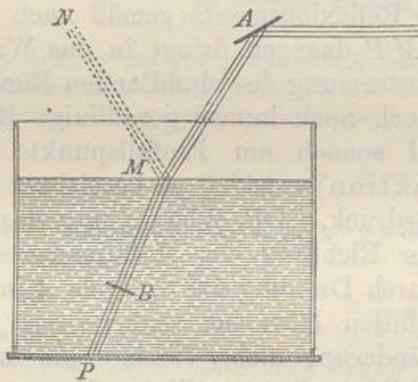


Fig. 316.
Brechung.

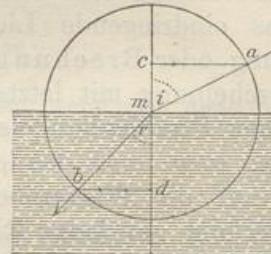


Fig. 317.
Brechungsgesetz.

oder $ac \frac{4}{3}$ von bd . Verfahren wir ebenso für alle in der obigen Tabelle ausgeführten Winkelpaare, so finden wir stets, daß die zum Einfallswinkel gehörige Senkrechte $\frac{4}{3}$ mal so groß ist wie die zum Brechungswinkel gehörige. Die Zahl $\frac{4}{3}$ oder $1\frac{1}{3}$, welche als Maß gelten kann für die Stärke der Brechung beim Übergang des Lichts aus Luft in Wasser, heißt das Brechungsverhältnis oder der Brechungssindex (Brechungskoeffizient, Brechungsexponent) des Wassers.¹⁾ Aus der Luft in Glas werden die Lichtstrahlen stärker gebrochen, und zwar ist hier das Verhältnis jener beiden zum Einfallslot senkrechten Geraden ausgedrückt durch die Zahl $\frac{3}{2}$ oder 1,5. In dieser Weise besitzt jeder durchsichtige Körper ein ihm eigenständiges Brechungsverhältnis; für einige von ihnen sind die Brechungsverhältnisse in der folgenden kleinen Tabelle zusammengestellt:

Wasser	...	1,333
Alkohol	...	1,362
Canadabalsam	...	1,530
Schwefelkohlenstoff	...	1,627

¹⁾ Der Brechungsindex ist das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichts im ersten und zweiten Mittel; vgl. 356.

Crownglas	1,530
Flintglas von Fraunhofer . . .	1,635
Flintglas von Merz	1,732
Diamant	2,417

Bekanntlich nennt man die Senkrechten ac und bd (Fig. 317), falls der Halbmesser des Kreises = 1 genommen worden ist, die Sinus der zugehörigen Winkel i und r . Wir können daher das Brechungsgesetz in folgender Weise aussprechen: Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels in einem unveränderlichen Verhältnis. Bezeichnet man das Brechungsverhältnis mit n , so wird das Brechungsgesetz ausgedrückt durch die Gleichung (Snellius, 1620; Descartes, 1637):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \quad \text{oder} \quad \sin i = n \sin r.$$

Bei dem Übertritt des Lichts aus der Luft in einen flüssigen oder festen Körper wird der gebrochene Strahl dem Einfallslot genähert. Kommt aber ein Lichtstrahl in der Richtung bm (B M Fig. 316) aus dem Wasser, so erleidet er ganz dieselbe Ablenkung wie der in der Richtung mb (MB) ins Wasser eintretende Strahl; er schlägt beim Austritt aus dem Wasser die Richtung ma (MA) ein und wird sonach durch die Brechung vom Lot entfernt. Für die zusammengehörigen Winkel r und i gelten jetzt genau dieselben Werte wie vorhin, nur daß der Einfallswinkel im Wasser dem früheren Brechungswinkel, der jetzige Brechungswinkel dem früheren Einfallswinkel in der Luft gleich ist. Wenn also $\frac{4}{3}$ (oder allgemein n) das Brechungsverhältnis für den Übergang aus Luft in Wasser (oder irgend eine andere Substanz) ist, so ist $\frac{3}{4}$ (oder $\frac{1}{n}$) dasjenige für den Übergang aus Wasser (oder aus jener Substanz) in Luft (Gesetz der Reziprozität).

Um den Gang von Strahlen, die aus dem Wasser kommen, zu beobachten, bringen wir unter das Wasser des Glastroges (Fig. 318) einen kleinen drehbaren Spiegel B , welcher das durch den Spiegel A vertikal nach abwärts gelenkte Lichtbündel auffängt und nach aufwärts gegen die Wasseroberfläche zurückwirft. Läßt man den aus dem Wasser kommenden Strahl BM immer schräger auf die Wasseroberfläche fallen, so nimmt auch der austretende Strahl eine immer schrägere Richtung an, indem er mit dem Einfallslot stets einen größeren Winkel bildet als jener, und sich der Wasseroberfläche mehr und mehr nähert. Endlich, wenn der Einfallswinkel im Wasser den Wert $48\frac{1}{2}$ erreicht hat, streift der austretende Strahl an der Wasseroberfläche hin: sein Austrittswinkel beträgt jetzt 90° . Einen größeren Austrittswinkel kann es aber nicht geben; mit ihm ist die Grenze der Möglichkeit des Austritts erreicht. Wenn daher der Strahl noch etwas schräger von innen auf die Wasseroberfläche trifft, so tritt kein Licht mehr in die Luft hinaus; die Wasseroberfläche erweist sich für so schief auffallende Strahlen als völlig undurch-

dringlich. Man bemerkt zugleich, daß in dem Augenblick, in welchem diese Grenze überschritten wird, der nach innen zurückgeworfene Strahl MD , welcher bis dahin bedeutend lichtschwächer war als der einfallende BM plötzlich an Lichtstärke gewinnt und ebenso hell wird wie der einfallende. Während sich nämlich bei den weniger schrägen Strahlen das Licht in einen austretenden und einen in das Wasser zurückgeworfenen Strahl teilte, geht es jetzt, da der erstere nicht mehr zustande kommt, ohne allen Verlust in den letzteren über; es wird bei jenem Einfallswinkel sowie bei jedem größeren vollständig zurückgeworfen oder total reflektiert. Total-

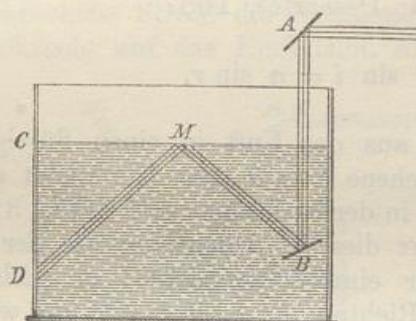


Fig. 318.
Totale Reflexion.

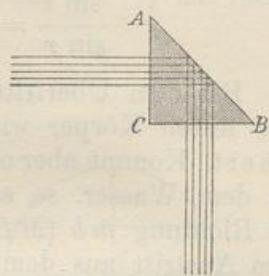


Fig. 319.
Reflexionsprisma.

reflexion kann hiernach nur eintreten, wenn der Strahl, aus einem stärker brechenden Mittel kommend, auf ein schwächer brechendes Mittel trifft. Der Einfallswinkel, bei welchem der Austritt aufhört und die totale Reflexion beginnt, also derjenige, zu welchem ein Austrittswinkel von 90° gehört, heißt der Grenzwinkel; er beträgt für Wasser $48\frac{1}{2}^\circ$, für Glas $40\frac{3}{4}^\circ$, für Diamant $23\frac{3}{4}^\circ$. Da dem Grenzwinkel $r = \gamma$ der Austrittswinkel $i = 90^\circ$ entspricht, und $\sin 90^\circ = 1$ ist, so ergibt sich aus dem Brechungsgesetz $1 = n \sin \gamma$, oder $\sin \gamma = 1/n$. Durch Messung des Grenzwinkels kann daher das Brechungsverhältnis eines Stoffes gefunden werden (Wollaston, 1802, F. Kohlrausch, Totalreflektometer, 1878, neuere Totalreflektometer von Abbe, Pulfrich).

Eine Glasfläche, an welcher das Licht vollständig zurückgeworfen wird, erscheint in erhöhtem, metallähnlichem Glanz; sie bildet den klarsten und vollkommensten Spiegel, den man herstellen kann. Man verwendet daher bei optischen Instrumenten häufig ein total reflektierendes Prisma (Reflexionsprisma, Fig. 316), um die Strahlen ohne merklichen Verlust an Lichtstärke in eine andere Richtung zu lenken. Dieses Prisma besteht aus einem Glasstück, an welches zwei zueinander rechtwinkelige Flächen AC und BC und eine dritte Fläche AB angeschliffen sind, welche zu jenen unter Winkeln von 45° geneigt ist. Lichtstrahlen, welche senkrecht auf die Fläche AC fallen, dringen ohne Ablenkung in das Glas und treffen unter einem Einfalls-

winkel von 45° (welcher sonach größer ist als der nur $40\frac{3}{4}^{\circ}$ betragende Grenzwinkel) auf die Fläche AB ; hier werden sie, ohne daß auch nur eine Spur von Licht in die hinter AB befindliche Luft austritt, vollständig zurückgeworfen und treten sodann wieder ohne Ablenkung aus der Fläche BC aus.

Legt man gegen die Hypotenusefläche eines totalreflektierenden Prismas die gleiche Fläche eines ganz gleichen Prismas, so daß völlige Berührung eintritt, so geht das Licht ohne Reflexion wie durch einen homogenen Glaswürfel hindurch. Ist die Hypotenusefläche des zweiten Prismas nur in ihrem mittleren Teile eben geschliffen, im übrigen aber schwach konvex, so tritt Berührung nur in dem mittleren Teile ein; durch diesen sieht man dann direkt hindurch, während die äußeren Teile der Hypotenusefläche des ersten Prismas totalreflektiertes Licht ins Auge senden. Auf der Anwendung eines derart gestalteten Prismenkörpers beruht das Photometer von Lummer-

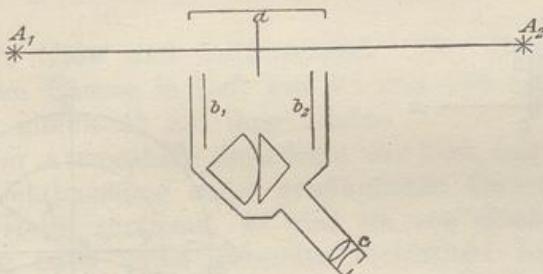


Fig. 320.
Photometer von Lummer-Brodhun.

Brodhun (Fig. 320). Man beleuchtet bei ihm mit den beiden zu vergleichenden Lichtquellen (A_1 und A_2) je eine weiße Fläche, nämlich die beiden Seiten des weißen Schirmes a ; das von der einen Seite kommende Licht gelangt nach Reflexion an dem Spiegel b_1 durch die Mitte des Prismenkörpers, das andere nach Reflexion an dem Spiegel b_2 durch Totalreflexion ins Auge. Die Mitte der Hypotenusefläche erscheint alsdann dem durch das seitliche Rohr mit der Lupe c blickenden Beobachter als ein dunkler oder heller Fleck, je nachdem die erste Fläche dunkler oder heller als die zweite beleuchtet ist, und man kann, indem man die Entfernung der Lichtquelle variiert, mit großer Schärfe auf Gleichheit der Beleuchtungsstärken einstellen.

Auf Totalreflexion beruht auch Wollastons sog. Camera lucida, eine Vorrichtung zum Abzeichnen von Gegenständen nach der Natur. Sie besteht aus einem vierseitigen Glasstück $abcd$ (Fig. 321), das bei b einen rechten, bei d einen stumpfen Winkel von 135° hat. Ein von dem Gegenstand kommender Lichtstrahl x , welcher auf die Vorderseite bc des Glasstückes trifft und in dasselbe eindringt, wird zuerst an der Fläche cd , dann an da vollständig zurückgeworfen

und gelangt, nachdem er aus der Fläche ab , nahe der Kante a , ausgetreten ist, von unten, in der Richtung der punktierten Linie kommend, in das Auge. Indem dieses, an der Kante a vorbei, auf das zur Aufnahme der Zeichnung bestimmte Papierblatt so nach abwärts blickt, daß die Hälfte des Sehloches pp von dem Glasstück verdeckt wird, nimmt es das Bild des Gegenstandes wahr, als wäre es auf dem Papierblatt entworfen. Man kann daher die Umrisse des Bildes mit der gleichzeitig gesehenen Bleistiftspitze leicht nachzeichnen.

Mittels des Brechungsgesetzes lässt sich zu jedem Einfallswinkel der zugehörige Brechungswinkel (und umgekehrt) leicht bestimmen, sei es durch Rechnung, sei es durch Zeichnung. Letztere könnte nach Anleitung der Fig. 317 ausgeführt werden. Bequemer ist jedoch die in Fig. 322 angewendete Konstruktion. Man beschreibe um den Einfallspunkt a zwei Kreise, den einen mit dem Radius 1, den anderen mit dem Radius n , wenn n das Brechungsverhältnis

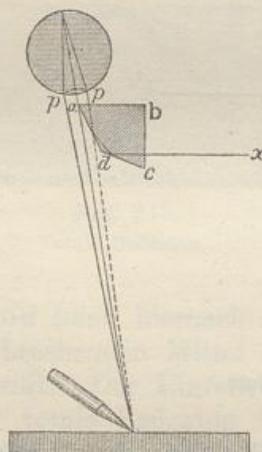


Fig. 321.
Camera lucida.

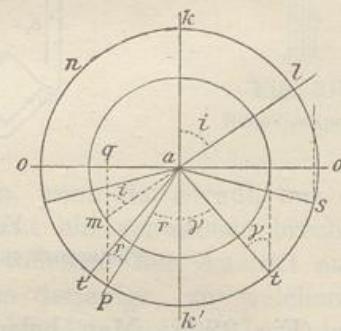


Fig. 322.
Zum Brechungsgesetz.

aus dem ersten Mittel in das zweite ist. Den einfallenden Strahl $l'a$ verlängere man bis zum Durchschnitt m mit dem ersten Kreis und ziehe durch m eine Parallele $q\,m\,p$ zu dem Einfallslot $k\,a\,k'$; dann gibt die Verbindungsline des Punktes p , in dem diese Parallele den zweiten Kreis schneidet, mit dem Einfallspunkte a den gebrochenen Strahl $a\,p$. Denn man hat, da Winkel $q\,m\,a$ gleich dem Einfallswinkel i ist, $\sin i = q\,a$; ferner, wenn Winkel $q\,p\,a$ mit r bezeichnet wird, $n \sin r = q\,a$; also $\sin i = n \sin r$. Also ist r , dem Brechungsgesetz zufolge, gleich dem Brechungswinkel.

Für einen Strahl $p\alpha$ der aus dem zweiten Mittel kommt, zieht man durch p , wo er den zweiten Kreis trifft, eine Parallele zum Lot, welche dem Kreis 1 im Punkte m begegnet; die Verbindungslinie von m mit α liefert alsdann den austretenden Strahl.

Letztere Konstruktion wird unmöglich, wenn, wie bei dem Strahl s_a , die Parallelen zum Lot den ersten Kreis gar nicht trifft. Durch diesen Umstand macht sich die totale Reflexion kenntlich, welche dieser Strahl erleidet.

Wenn die Parallele den ersten Kreis gerade noch am Ende seines horizontalen Durchmessers berührt, wie dies bei dem Strahl ta der Fall ist, so tritt der gebrochene Strahl, an der Trennungsfläche der beiden Mittel hinstreifend, längs ao aus, und $ta'k' = \gamma$ ist der Grenzwinkel, für welchen sich aus der

Figur $n \sin \gamma = 1$ ergibt. Dreht sich der aus dem ersten Mittel kommende Strahl um 180° aus der Lage $o\alpha$ über $k\alpha$ bis $o'\alpha$, so dreht sich der im zweiten Mittel zum Lote gebrochene Strahl von at über ak' nach at' um den doppelten Grenzwinkel.

Ein lichtstrahlender Punkt, welcher sich unter Wasser befindet, wird von einem Auge, welches von oben her in das Wasser schaut, nicht an seinem wirklichen Ort, sondern an einer höher liegenden Stelle gesehen, weil die aus dem Wasser austretenden Strahlen stärker auseinandergehen als die im Wasser verlaufenden und daher von einem der Wasserfläche näheren Punkt herzukommen scheinen. Daraus erklärt es sich, daß ein Gewässer, dessen Grund man sehen kann, weniger tief zu sein scheint, als es wirklich ist. Aus derselben Ursache zeigt sich der unter Wasser befindliche Teil eines lotrecht stehenden Pfahles verkürzt und ein schief ins Wasser gehaltener Stab an der Eintauchungsstelle geknickt. Eine unter Wasser liegende Münze wird, von oben betrachtet, schwach vergrößert gesehen, weil sie dem Auge genähert und daher unter einem größeren Sehwinkel erscheint.

Auch die Gase sind lichtbrechend. Der Brechungskoeffizient aus dem leeren Raum in Luft von 0° und 760 mm Druck beträgt 1,00029 und nimmt ab mit ihrer Dichte.

Da in der Atmosphäre die Dichte der Luft und damit auch die Stärke der Lichtbrechung unter gewöhnlichen Umständen von oben nach unten stetig zunimmt, so wird ein von einem hochgelegenen Punkt schräg nach unten gehender Lichtstrahl immer mehr zum Lote gebrochen, er verfolgt eine nach unten konkave krummlinige Bahn und gelangt schließlich in steilerer Richtung ins Auge, als wenn er sich im leeren Raum geradlinig fortpflanzte, so daß jener Punkt an einer höheren Stelle gesehen wird (atmosphärische Strahlenbrechung). Sterne erscheinen dadurch um so mehr erhoben, je größer ihr Zenitabstand ist (astronomische Refraktion). Am Horizont beträgt die Erhebung ungefähr $34'$, ist also nahezu gleich dem scheinbaren Durchmesser von Sonne und Mond ($32'$); diese sind also vermöge der Strahlenbrechung schon oder noch sichtbar, bevor sie aufgegangen oder nachdem sie untergegangen sind. — Das Zittern der durch erhitzte Luft gesehenen Gegenstände röhrt davon her, daß die Lichtstrahlen durch Luftströme von ungleicher Dichte bald nach der einen, bald nach der anderen Seite gebrochen werden.

327. **Luftspiegelung** tritt ein, wenn Luftsichten von verschiedener Dichte und daher auch verschiedenem Lichtbrechungsvermögen übereinander lagern. Sind die untersten Luftsichten stark erhitzt und daher weniger dicht als die höher liegenden, was über dem heißen Sandboden der Wüsten häufig eintritt, so nimmt jeder Lichtstrahl, der von einem hervorragenden Gegenstand gegen den Boden geht, infolge des nach unten abnehmenden Brechungsvermögens der Luft eine immer schrägere Richtung an, beschreibt eine nach oben konkave krummlinige Bahn, biegt endlich um und gelangt nun von unter her in das Auge des Beobachters, als wenn der Strahl an einer wagrechten Spiegelfläche zurückgeworfen wäre. Das Auge sieht daher unterhalb des wirklichen Gegenstandes in umgekehrter Lage ein Spiegelbild desselben, und da auch das Licht