

Hintergrundtexte zur Strahlenoptik 2

November 2023

Die folgenden Quellentexte stammen alle aus demselben Mittelschul-Lehrbuch, das auch im Original vorliegt:

[db] **Bader**, Franz, **Büchler**, Stefan, **Dorn**, Friedrich, **Limacher**, Hugo **Oberholz**, Heinz Werner: *Dorn Bader Physik in einem Band*. Westermann Schroedel, Diesterweg Braunschweig 2013.

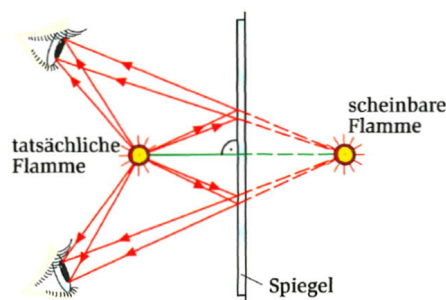


db: Licht an Grenzflächen – Reflexion und Brechung

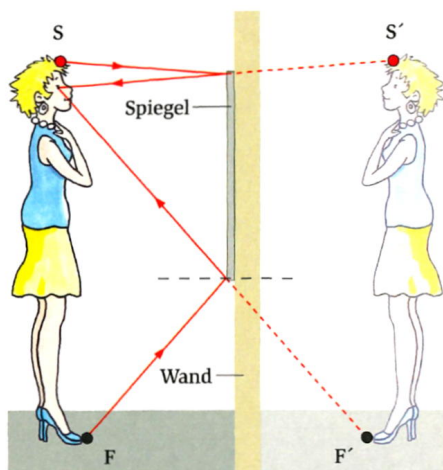
Reflexion



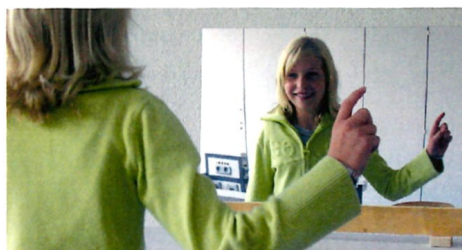
B1 Marc hält den Finger in die Flamme!



B2 Lichtbündel der Kerze vor der Glasscheibe erreichen auf direktem Weg die Beobachter, die an der Scheibe reflektierten Lichtbündel aus der Richtung der Kerze hinter der Scheibe.



B3 Konstruktion des Spiegelbildes



V1 Lisas Hand weist zum rechten Spiegelrand, die ihres Spiegelbildes auch. Wir sehen Lisa von hinten, ihr Spiegelbild von vorne.

1. Täuschung durch eine Glasscheibe

Marc meldet sich, als der Lehrer nach einem mutigen Schüler fragt. Er darf sich hinter eine große Glasscheibe stellen. Auf dem Tisch stehen zwei Kerzen. Eine vor der Glasscheibe und eine gleich große dahinter. Der Lehrer stellt sich mit dem Rücken zur Klasse und verdeckt so mit seinem Körper die beiden Kerzen. Als er sich wendet, brennen beide Kerzen.

Er bittet Marc nun, seinen Finger in die Flamme der Kerze hinter der Glasscheibe zu halten → **B1**. Mit schmerzverzerrtem Gesicht hält Marc den Finger über eine Minute lang knapp über die Flamme. Als er dann lächelnd zurück zu seinem Platz geht, wird es jedem klar: Das Schauspiel war fauler Zauber, die zweite Kerze brennt nicht.

→ **B2** zeigt uns solche Umwege. Ein Lichtbündel wird an der Grenzfläche Luft → Glas nicht nur gebrochen, sondern auch teilweise reflektiert. Das reflektierte Lichtbündel trifft in unser Auge. Wie bei den optischen Täuschungen durch die Brechung, gilt auch für die Reflexion: Wir sehen den Gegenstand (hier die Flamme) in der Richtung, aus der das Lichtbündel in unser Auge trifft. Offenbar liegt in dieser Richtung genau der Standort der zweiten Kerze. So sieht es jeder Beobachter, egal wo er sich im Klassenraum befindet.

Die in → **B2** gezeichneten Lichtbündel zeigen die von uns durch Nachdenken gefundenen Lichtwege. Damit können wir den Verlauf des Lichtbündels beim Spiegel konstruieren. Im Versuch haben wir den Ort gefunden, an dem wir das Spiegelbild sehen.

2. Eigenschaften des Spiegelbildes

In → **B3** „konstruieren“ wir das Spiegelbild der dargestellten Person. Sie sieht ihren höchsten Scheitelpunkt S ihres Kopfes als S' in der Senkrechten zum Spiegel mit gleichem Abstand zum Spiegel. Gleiches gilt für ihre Fußspitze F und F' . Wir können diese Spiegelpunkte also leicht mit dem Geodreieck einzeichnen. Wir machen das wie im Mathematikunterricht bei der Achsenspiegelung.

Entsprechendes können wir für jeden weiteren Punkt der zum Spiegel zugewandten Körperseite tun. Hinter dem Spiegel also erscheint uns das Spiegelbild – als optische Täuschung in der gedachten „Spiegelwelt“. An der Konstruktion erkennen wir unmittelbar, dass Spiegelbilder genauso groß sind wie der Gegenstand selbst.

Stelle dich selbst vor einen Spiegel, wie Lisa das in → **V1** tut, und zeige zum rechten Spiegelrand. Du siehst, dass auch dein Spiegelbild zu diesem Spiegelrand zeigt. Das Spiegelbild ist also nicht seitenverkehrt. Allerdings erkennen wir in → **V1** auch, dass vorne und hinten vertauscht sind.

Merksatz

Das Spiegelbild einer punktförmigen Lichtquelle erscheint senkrecht gegenüber der Spiegelfläche und im gleichen Abstand vom Spiegel wie der Punkt selbst.

Spiegelbilder sind genauso groß wie der Gegenstand.

Die Bilder sind aufrecht und seitenrichtig. Vertauscht sind allerdings vorne und hinten. □

3. Die Reflexionsrichtung ist vorhersagbar

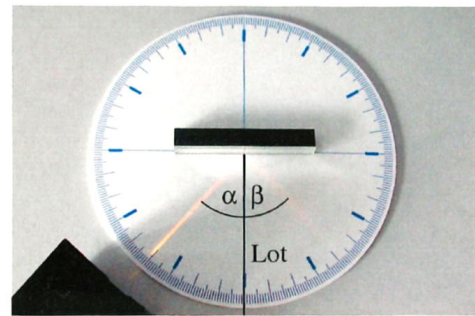
Du hast sicher schon einmal versucht, mit einem Geodreieck oder einer Armbanduhr Licht der Sonne zu reflektieren, um damit Mitschüler zu blenden. Nicht zufällig nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“, sondern mit einem gezielten Versuch wollen wir die Richtung des reflektierten Lichtbündels herausfinden.

In → **V2** trifft ein schmales Lichtbündel auf den Spiegel. Wie bei der Lichtbrechung messen wir die beiden Winkel α (Einfallswinkel) und β (Reflexionswinkel) zum Lot hin. Das Ergebnis ist viel einfacher als bei der Lichtbrechung. Das gefundene **Naturgesetz** lautet: Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind stets gleich groß.

Merksatz

Für schmale Lichtbündel gilt das **Reflexionsgesetz**:

1. Einfallendes und reflektiertes Licht liegen stets in einer Ebene senkrecht zum Spiegel.
2. Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind immer gleich groß. ■



V2 Ein schmales Lichtbündel trifft auf einen Spiegel. Der Winkel zwischen einfallendem Lichtbündel und Lot am Auftreffpunkt des Lichtbündels ist der Einfallswinkel α . Zwischen reflektiertem Bündel und Lot liegt der Reflexionswinkel β . In der Abbildung beträgt $\alpha = 40^\circ$ und $\beta = 40^\circ$.

Wir drehen die Winkelscheibe mit dem Spiegel. Nacheinander stellen wir so für den Winkel α in 10° -Schritten alle Winkel von 0° bis 90° ein. Wir messen jeweils den zugehörigen Reflexionswinkel β .

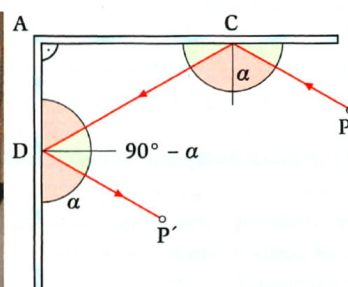
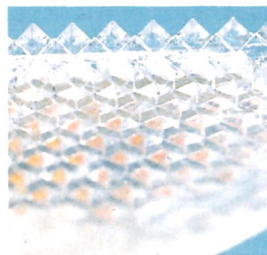
Vertiefung

Der Reflektor

Ein Reflektor am Fahrrad ist kein gewöhnlicher Spiegel. Vielmehr besteht er aus vielen kleinen gleichen Einheiten.

Jede dieser Einheiten selbst besteht aus drei immer gleich angeordneten Flächen.

Um den Sinn zu verstehen, betrachten wir zunächst einen **Winkelspiegel**. Er besteht aus zwei Spiegeln, die im rechten Winkel zueinander aufgestellt sind.



Ein schmales Lichtbündel trifft schräg hinein. Im Kreidestaub wird der Lichtweg sichtbar: Das Lichtbündel wird zweimal reflektiert und verlässt den Winkelspiegel wieder. Das Foto zeigt, dass das reflektierte Lichtbündel zum einfallenden parallel verläuft.

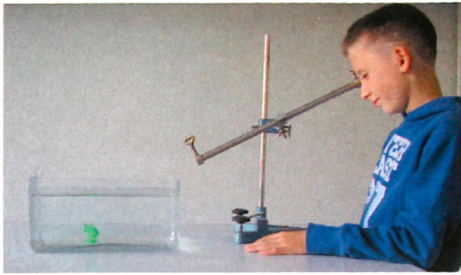
Die Zeichnung verrät, dass es sich hierbei um eine Folge des Reflexionsgesetzes handelt: Das von P ankommende Licht trifft auf den ersten Spiegel. Einfallswinkel und Reflexionswinkel müssen dabei gleich groß sein (rot gefärbt).

Bei der Reflexion am zweiten Spiegel gilt das Gleiche (diesmal sind die Winkel grün gefärbt). Winkelgesetz der Mathematik fordern, dass auch hier die rot gefärbten Winkel so groß sind wie α (mit dem Geodreieck nachmessen). Damit ist nachgewiesen, dass das reflektierte Lichtbündel unabhängig von der Größe des Einfallswinkels immer parallel zum einfallenden Lichtbündel ist.

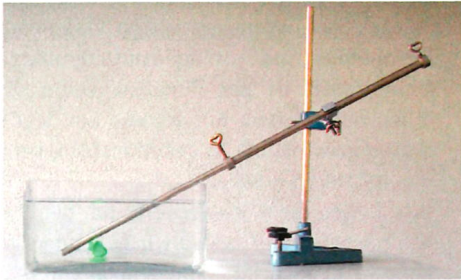
Wir haben das Lichtbündel in einer Ebene senkrecht zum Winkelspiegel betrachtet. Trifft ein Lichtbündel jedoch schräg zu dieser Ebene den ersten Spiegel, muss evtl. ein dritter Spiegel das Lichtbündel überhaupt auf den zweiten werfen. Dieser dritte Spiegel liegt senkrecht zum Winkelspiegel.

Diese **Tripelspiegel**, die man auch als Retroreflektoren bezeichnet, bilden die Einheiten des Reflektors und sorgen dafür, dass das reflektierte Licht immer in die Richtung zurückgeworfen wird, aus der es kam. Also zum Beispiel vom Fahrradreflektor zurück ins Auge des Autofahrers. Vor allem nachts erhöhen solche Reflektoren ungemein die Verkehrssicherheit.

Lichtbrechung



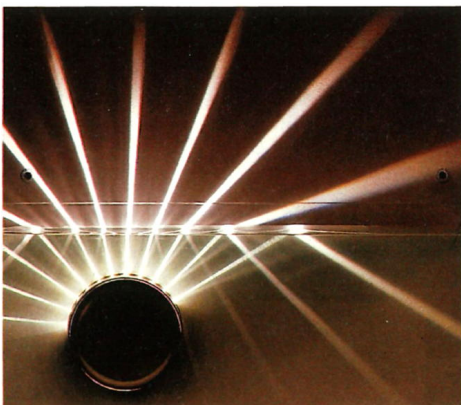
B1 Gut gezielt ...



B2 ... aber nicht getroffen.



V1 Mit einer Lampe wird ein Lichtbündel in einem Aquarium erzeugt. Es verläuft streifend entlang einer weißen Fläche, sodass man Form und Weg des Lichtbündels sehen kann.



V2 Wir erzeugen gleichzeitig viele Lichtbündel. Sie treffen unterschiedlich schräg auf die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft.

1. Richtig gezielt – aber nicht getroffen

In einigen Südseeländern gehen Eingeborene mit dem Speer auf Fischjagd. Wir wollen dies im Klassenraum nachspielen. Henning versucht durch Verschieben des Rohrs in **→ B1** genau auf den Fisch zu zielen. Die übrigen Schüler bezweifeln, dass der Speer trifft. Henning schiebt nun in **→ B2** einen Stab durch das Rohr. Und tatsächlich, obwohl er den Fisch zuvor im Rohr gesehen hatte, trifft der Stab den Fisch nicht. Wie ist dies möglich?

„Das Licht vom Fisch gelangt in unser Auge“, sagt Lena, „sonst hätte Henning ihn nicht sehen können.“ „Das Licht kommt durch das Rohr, das ist auch klar“, so Mike. „Bleibt die Frage, auf welchem Weg das Lichtbündel vom Fisch ins Rohr gelangt.“ In Luft breitet sich Licht geradlinig aus, das wissen wir schon.

Ein Versuch soll weiterhelfen. Wir wollen den Weg eines Lichtbündels aus dem Wasser heraus verfolgen. Mithilfe einer Unterwasserlampe wird in **→ V1** ein Lichtbündel erzeugt. Wir erkennen die überraschende Lösung unseres Problems: Auch im Wasser breitet sich Licht geradlinig aus. Aber beim Übergang von Wasser nach Luft ändert es seine Richtung. Die Randstrahlen werden geknickt. Man sagt: Das Lichtbündel wird an der **Grenzfläche** zwischen Wasser und Luft **gebrochen**.

„Dann hat Henning tatsächlich richtig gezielt“, sagt Lena. „Das Lichtbündel kam aus der Richtung des Rohres in sein Auge. Dass es unterwegs seine Richtung geändert hat, davon hat sein Auge nichts mitgekriegt – es wurde getäuscht.“ Henning hatte also den Eindruck, der Fisch befände sich in der Richtung, aus der das Lichtbündel sein Auge traf.

Täuscht uns die Lichtbrechung immer so deutlich wie im obigen Versuch? In **→ V2** finden wir die Lösung. Die Lichtbrechung ist nicht immer gleich stark. Ein Lichtbündel, das senkrecht die Grenzfläche trifft, wird nicht gebrochen. Von oben gezielt hätte Henning also den Fisch getroffen. Die Brechung ist umso stärker, je schräger das Lichtbündel auf die Grenzfläche trifft. Außerdem erkennen wir, dass ein Teil des Lichtbündels auch an der Grenzfläche wie an einem Spiegel reflektiert wird.

Merksatz

Trifft ein schmales Lichtbündel schräg von Wasser auf Luft, so wird es an der Grenzfläche gebrochen und teilweise reflektiert. □

2. Bei der Lichtbrechung ist der Lichtweg umkehrbar

Wir haben entdeckt, dass Lichtbündel beim Übergang von Wasser nach Luft gebrochen werden. Gilt dies auch beim Übergang in umgekehrter Richtung?

In **→ V3** erkennen wir, dass auch Lichtbündel beim Übergang von Luft nach Wasser gebrochen werden. Auch hier gilt: Je schräger das Lichtbündel auf die Grenzfläche trifft, desto stärker wird es gebrochen. Um die Stärke der Brechung beschreiben zu können, vergleichen wir Winkel. In der Optik ist es üblich, die Winkel zu einer Senkrechten zur Grenzfläche zu messen. Wir zeichnen also das **Lot**

am Auftreffpunkt des schmalen Lichtbündels. Wir erkennen: Der Winkel α in Luft ist immer größer als der Winkel β in Wasser. Das fanden wir auch bei der Lichtbrechung beim Übergang von Wasser in Luft im vorherigen Versuch. Gibt es einen Zusammenhang?

In → V4 führen wir die beiden Lichtwege Luft → Wasser und Wasser → Luft zusammen. Die Lampe unter Wasser erzeugt ein Lichtbündel, das beim Übergang Wasser → Luft gebrochen wird. Eine zweite Lampe erzeugt ein rotes Lichtbündel, das beim Übergang Luft → Wasser gebrochen wird. Wir erkennen, dass beide Lichtbündel übereinander liegen. Bei der Umkehrung des Lichtwegs ersetzt also das einfallende Lichtbündel das vorher gebrochene und umgekehrt. Das Paar aus Winkel in Luft und Winkel in Wasser ist von der Lichtrichtung unabhängig.

3. Lichtbrechung bei Glas

Wasser und Luft sind durchsichtig. Daher erwarten wir auch Lichtbrechung an der Grenzfläche zu anderen durchsichtigen Körpern. Eine Untersuchung mit einem Glaskörper zeigt → B3. Beim schrägen Eintritt des Lichtbündels von Luft in Glas wird das Lichtbündel gebrochen. An der Winkelscheibe erkennen wir, dass der Winkel α in Luft größer ist als der Winkel β in Glas. Das fanden wir bereits bei Lichtbrechung an der Grenzfläche Luft → Wasser. Bei der Umkehrung des Lichtweges bleibt auch hier das Winkelpaar gleich. Auch bei Versuchen mit anderen durchsichtigen Körpern findet man entsprechende Ergebnisse.

Merksatz

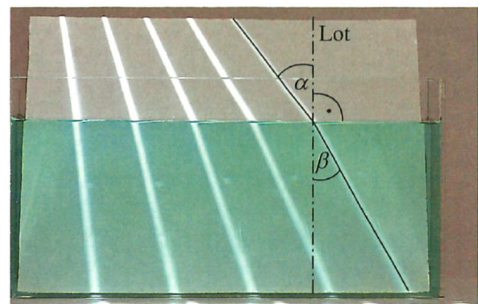
Trifft ein Lichtbündel schräg auf eine Grenzfläche zweier durchsichtiger Körper, so wird es gebrochen. Die Brechung ist umso stärker, je schräger das Lichtbündel auf die Grenzfläche trifft. □

An der Grenzfläche Luft zu einem festen oder flüssigen Körper gilt stets: Der Winkel zum Lot in Luft ist größer als der im anderen Körper.

4. Lichtbrechung mathematisch erfasst

Bisher haben wir erkannt, dass die Lichtbrechung stärker wird, wenn das Lichtbündel schräger auf die Grenzfläche auftrifft. Durch Winkelmessung belegen wir dies mit Zahlen. Am Beispiel der Lichtbrechung beim Übergang Luft → Glas lässt sich dies leicht durchführen. Wie in → B4 dargestellt, messen wir den Winkel α zwischen dem einfallenden Lichtbündel und dem Lot in Luft (hier $\alpha = 40^\circ$), sowie β , den Winkel zwischen dem gebrochenen Lichtbündel und dem Lot in Glas (hier etwa $\beta = 25^\circ$).

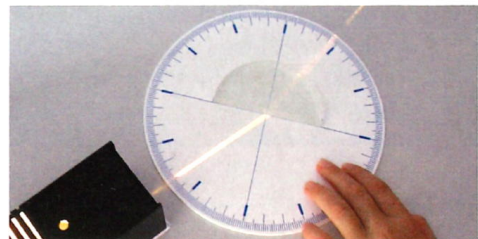
Wir beginnen beim Winkel $\alpha = 0^\circ$. Das Lichtbündel geht ungebrochen hindurch, es gilt also $\beta = 0^\circ$. Nun drehen wir die Winkelscheibe in 10° -Schritten weiter – bis $\alpha = 90^\circ$. Den zugehörigen Winkel β lesen wir jeweils ab. Die Messwerte sammeln wir in einer Tabelle und übertragen sie anschließend in ein Koordinatensystem. Auf der Rechtsachse trägt man meistens die Größe ab, die man vorgegeben hat – hier den Einfallswinkel. Auf der Hochachse die davon abhängige Größe – hier den Brechungswinkel. Unser Ergebnis zeigt → B5.



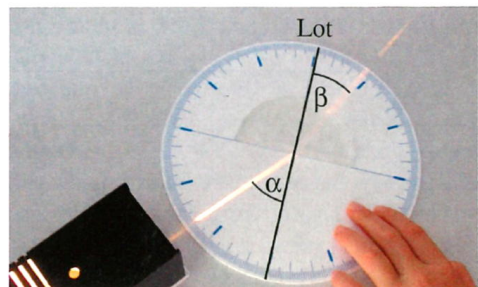
V3 Mehrere schmale Lichtbündel, die unterschiedlich schräg auf ein mit Wasser gefülltes Aquarium treffen.



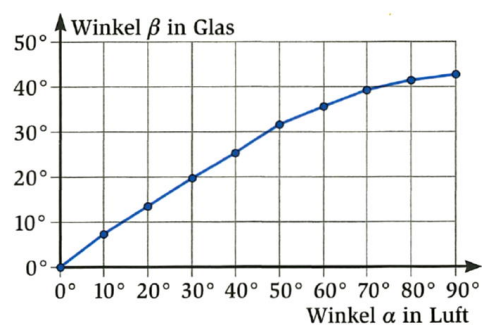
V4 Der Lichtweg ist umkehrbar.



B3 Lichtbrechung an der Grenzfläche Luft → Glas



B4 Einfalls- und Brechungswinkel



B5 Diagramm unserer Messwerte

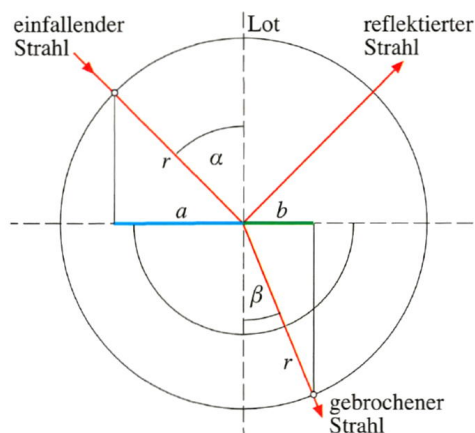
Praktikum

Lichtbrechung selbst messen

Im folgenden Praktikum soll die Lichtbrechung für den Übergang Luft → Wasser gemessen werden. Verwendet dazu die Winkelscheibe aus → B4 (S. 27). Der Halbzylinder aus Glas wird durch einen hohlen Halbzylinder mit Kunststoffwänden ersetzt. Das Innere füllt ihr mit Wasser.

Arbeitsaufträge

1. Baut den Versuch nach → B4 auf.
2. Dreht die Winkelscheibe so, dass der Winkel α in Luft zum Lot 0° beträgt und lest den zugehörigen Winkel β in Wasser ab. Vergrößert den Winkel α in 10° -Schritten bis (fast) 90° und misst jeweils den zugehörigen Winkel β .
3. Tragt die Winkelpaare in eine Tabelle ein und überträgt sie anschließend in ein Koordinatensystem.
4. Vergleicht eure Messwerte mit den Werten aus dem Diagramm in der Basis-spalte.
5. Diskutiert Gründe für mögliche Abweichungen.

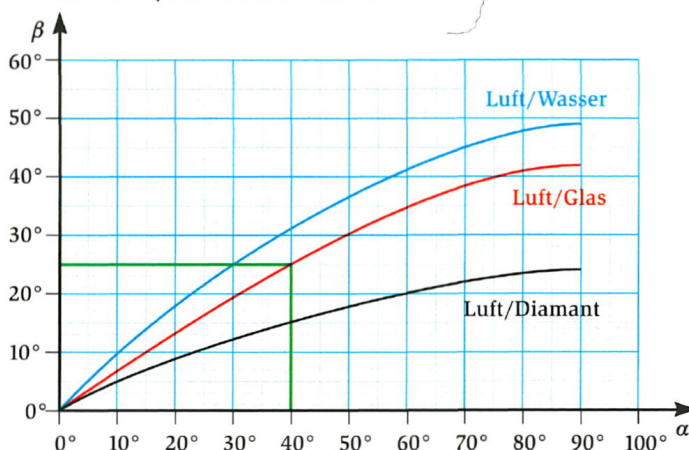


B1 Aus den geometrischen Verhältnissen bei der Brechung lässt sich das Brechungsgesetz von SNELLIUS ableiten.

Materialien	Brechzahl n
Luft-Wasser	1,33
Luft-Eis	1,31
Luft-Quarzglas	1,46
Luft-Plexiglas	1,49
Luft-Diamant	2,42

T1 Brechzahlen für verschiedene Materialien

Wiederholt man den Versuch mit anderen durchsichtigen Körpern, so erhält man jeweils andere Kurven:



Wir erkennen:

- Die Lichtbrechung hängt von den verwendeten Stoffen ab. Beim Übergang Luft → Diamant unterscheiden sich α und β viel deutlicher als beim Übergang Luft → Wasser. Die Brechung bei Diamant → Luft ist also deutlich stärker als bei Wasser → Luft.
- Für alle durchsichtigen Körper gilt: Je größer der Winkel α in Luft, desto größer ist der Winkel β im Körper.
- Die Zuordnung: $\alpha \rightarrow \beta$ ist nicht proportional (der Graph ist keine Ursprungsgerade).
- Für jedes Material gibt es für die Lichtbrechung einen größten Winkel β . Für Luft → Glas beträgt er etwa 42° , für Luft → Wasser etwa 49° .

5. Das Brechungsgesetz von SNELLIUS

Je größer der Einfallswinkel α ist, desto stärker weicht der Brechungswinkel β von α ab (vgl. dazu den Graph → B3 auf Seite 27). Zieht man einen Kreis mit Radius r um den Auftreffpunkt des Lichtstrahles auf die Grenzfläche, findet man einen erstaunlich einfachen Zusammenhang. Die Projektionen des Lichtstrahls innerhalb des Kreises auf die Grenzfläche bezeichnen wir mit a und b → B1. Misst man die Strecken a und b für verschiedene Einfallswinkel, so stellt man fest, dass das Verhältnis $a : b$ immer denselben Wert hat. Dieser Quotient wird Brechzahl n genannt. Mit Hilfe der trigonometrischen Funktionen erhält man:

$$\frac{a}{b} = \frac{\left(\frac{a}{r}\right)}{\left(\frac{b}{r}\right)} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

Merksatz

Ein Lichtstrahl wird an der Grenze zweier transparenter Materialien gebrochen. Für den Winkel α des einfallenden Lichtbündels mit dem Lot und dem Winkel β zwischen dem gebrochenen Strahl und dem Lot gilt das **Brechungsgesetz von SNELLIUS**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Die Brechzahl n ist von der Materialkombination abhängig. ■



B2 Das Paddel scheint abgelenkt.

6. Geknickt – eine optische Täuschung

Das Paddel in **→ B2** erscheint uns geknickt. Ähnlich wie beim Zielen auf den Fisch, hat uns die Lichtbrechung getäuscht. Wie in **→ B4** dargestellt, scheint das Lichtbündel der Paddelspitze aus einer etwas anderen Richtung zu kommen. Unser Auge sieht die Paddelspitze also etwas angehoben und näher an der Wasseroberfläche.

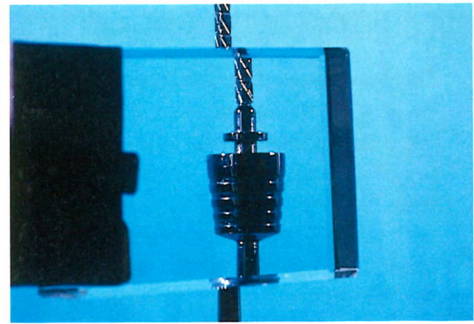
Gleiches gilt für jeden Punkt des Holzstabes unter Wasser – für den Teil über der Wasseroberfläche gilt der Effekt nicht. Der Stab erscheint also an der Grenzfläche geknickt.

7. Brechung an zwei Grenzflächen

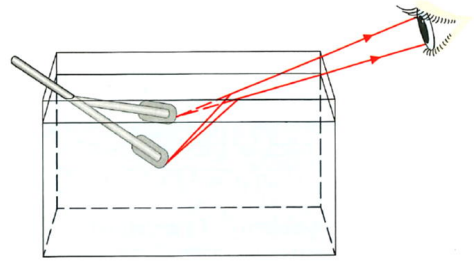
Das Modell des Stuttgarter Fernsehturms in **→ B3** scheint durch die Glasplatte verschoben zu sein. Mit unserem bisherigen Wissen können wir diese Täuschung erklären. Von einem Punkt des Modells ausgehend durchquert das Lichtbündel die Glasplatte, bevor es in unser Auge trifft. Weil es schräg auf die Platte trifft, wird es beim Eintritt in die Glasplatte und beim Austritt aus der Glasplatte jeweils gebrochen.

In **→ B5** ist der Weg eines schmalen Lichtbündels gezeichnet. Gegenüber der ursprünglichen Richtung wurde das Lichtbündel beim Durchgang durch die Glasplatte parallel verschoben. Wir erkennen an der Zeichnung: Je dicker die Glasplatte ist, desto weiter läuft das Lichtbündel im Glas in die „falsche“ Richtung. Also: Je dicker die Glasplatte, desto größer ist die Parallelverschiebung. Den oberen und unteren Teil des Modells sehen wir nicht verschoben, weil deren Lichtbündel auf dem Weg zum Auge die Glasplatte nicht durchqueren.

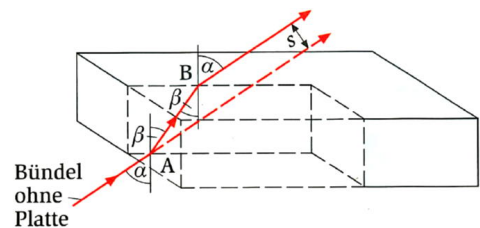
Ist der Glaskörper kein Quader, sondern keilförmig, wie beim **Prisma → B6**, so wird das Lichtbündel durch die Brechung an zwei Grenzflächen nicht parallel verschoben. Vielmehr wird es zweimal zur gleichen Seite hin abgelenkt. Der Effekt ist umso stärker, je größer der Prismenwinkel ist. Betrachtet man einen Körper also durch ein solches Prisma, so scheint er sich in einer ganz anderen Richtung zu befinden.



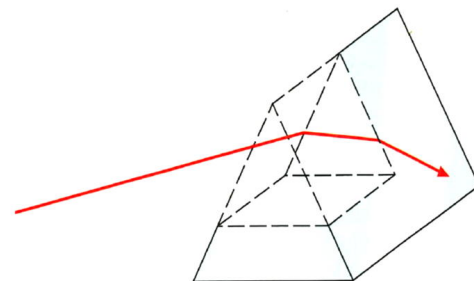
B3 Das Modell des Stuttgarter Fernsehturms scheint verschoben.



B4 Der Lichtweg beim Paddel



B5 Der Lichtweg durch eine Glasplatte: Im Punkt A wird das Lichtbündel an der Grenzfläche Luft → Glas zum ersten Mal gebrochen. Es gilt $\alpha > \beta$. Im Punkt B wird es wieder gebrochen. Diesmal an der Grenzfläche Glas → Luft. Weil die Glasplatte parallele Flächen hat, sind die beiden mit β bezeichneten Winkel gleich groß. Wegen der Umkehrbarkeit des Lichtweges, ist der Winkel α bei B dann auch wieder so groß wie α bei A.

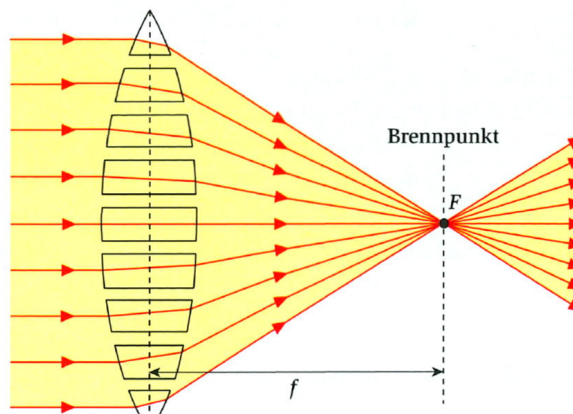


B6 Zweifachbrechung am Prisma

Lichtbrechung erklärt die Linsenwirkung

Auch bei einer Linse wird Licht an zwei Grenzflächen gebrochen. Dabei schafft es die Linse, ein breites Lichtbündel in einem Punkt zu sammeln. Wie ist dies möglich?

Denken wir uns ein breites Lichtbündel in viele schmale parallele Lichtbündel aufgeteilt. Licht, das die Linse am Rand durchläuft, muss also viel stärker abgelenkt werden als Licht in der Nähe der Linsenmitte. Im Bild ist die Erklärung angedeutet: Wir können uns die Linse näherungsweise aus mehreren Prismenstücken zusammengesetzt denken. Die Prismen am Rand der Linse sind Prismen mit großen Winkeln, damit sie das Lichtbündel stark ablenken können.



Das Prisma in der Linsenmitte ist eine Glasplatte mit nur sehr geringer Parallelverschiebung des Lichtbündels. Alle anderen Prismen haben geeignete Winkel.

- A1** Auf welchen Gegenstand musst du zielen, um den Fisch zu treffen?



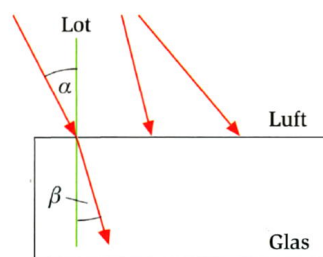
- A2** Erkläre die optische Täuschung.



- A3** Nutze zur Lösung das Diagramm zur Lichtbrechung:
- Der Einfallswinkel sei 60° . Gib die Winkelpaare für die Übergänge von Luft nach $\rightarrow$ Diamant, $\rightarrow$ Wasser und $\rightarrow$ Glas an.
 - Der Einfallswinkel sei 40° . Gib die Winkelpaare für die Übergänge Wasser $\rightarrow$ Luft und Diamant $\rightarrow$ Luft an.

- c)** Ein schmales Lichtbündel trifft mit einem Einfallswinkel von 40° auf die Grenzfläche Luft $\rightarrow$ Glas. Berechne den Ablenkswinkel des Lichtbündels.

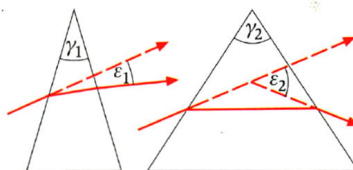
- A4 a)** Übertrage folgende Skizze in dein Heft.



Vervollständige den Verlauf der Lichtbündel. Zeichne dazu an der Grenzfläche das Lot. Miss nun den Winkel α und lies im Diagramm zur Lichtbrechung den zugehörigen Winkel β ab und trage ihn auf der anderen Seite ans Lot an.

- b)** Übertrage das Bild noch einmal ins Heft und ersetze das Glas durch Wasser. Zeichne wiederum das gebrochene Lichtbündel.

- A5** Das Bild zeigt den Lichtweg eines schmalen Lichtbündels durch zwei unterschiedliche Prismen.

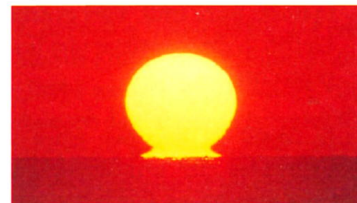


- a)** Kontrolliere grob, ob der Lichtweg richtig gezeichnet ist.

- b)** Begründe, warum der Ablenkswinkel im zweiten Prisma größer ist als im ersten.

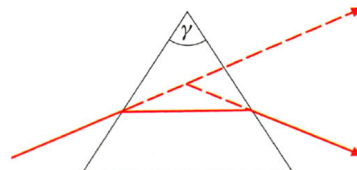
- A6** Auf dem Foto sehen wir die Sonne noch knapp über dem Horizont, tatsächlich ist sie bereits unter dem Horizont.

Recherchiere im Internet nach einer Erklärung und schreibe sie mit eigenen Worten auf.



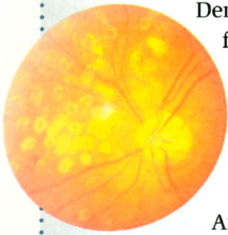
- A7** In der Skizze von $\rightarrow$ A4 sei $\beta = 17^\circ$. Berechne mit Hilfe der Brechzahlen in $\rightarrow$ T1, S.28, den Einfallswinkel des Lichtstrahls in das Quarzglas.

- A8** Bei einem gleichseitigen Prisma verlaufe der Lichtstrahl im Plexiglas parallel zur Basisfläche. Berechne den Ablenkswinkel ϵ zwischen dem zweifach gebrochenen und dem einfallenden Strahl.



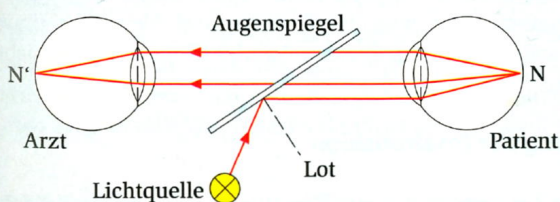
Physik und Medizin

Blick in den Körper mit Licht ...



Der Augenhintergrund mit der Netzhaut ist für das Sehen von großer Bedeutung. Er verrät aber auch manche verborgene Krankheit, z. B. eine länger andauernde Diabetes. Die Netzhaut selbst kann ebenfalls in seltenen Fällen bedroht sein. Es ist also sehr wichtig, dass ein Arzt diese betrachten kann.

Schon 1850 entwickelte Hermann v. HELMHOLTZ den **Augenspiegel**, mit dem er den Augenhintergrund beleuchten und das von dort gestreute Licht in sein eigenes Auge lenken konnte. Dieses einfache Instrument gibt es auch heute noch mit einigen Veränderungen in jeder augenärztlichen Praxis. Der wesentliche Bestandteil des Augenspiegels ist eine Glasscheibe als halbdurchlässiger Spiegel. Sie wird zwischen das Auge des Patienten und das Auge des Arztes gehalten. Trifft ein Lichtstrahl auf diese Scheibe, so wird ein Teil des Lichts reflektiert und durch die Augenlinse des Patienten in sein Auge gelenkt. Der durchgehende Rest des Lichts ist ohne Bedeutung. Vom beleuchteten Netzhautpunkt N (→ B1) geht gestreutes Licht in alle Richtungen. Strahlen, die durch die Linse gehen, laufen nach der Brechung parallel auf den Spiegel zu. Ein Teil des Lichts wird gespiegelt und ist für die Untersuchung verloren. Der Rest aber läuft zur Augenlinse des Arztes und wird dort gebrochen. Auf seiner Netzhaut entsteht der Bildpunkt N' , den der Arzt jetzt wahrnimmt. Für andere Netzhautstellen passiert das Gleiche: Der Arzt sieht die Netzhaut des Patienten.

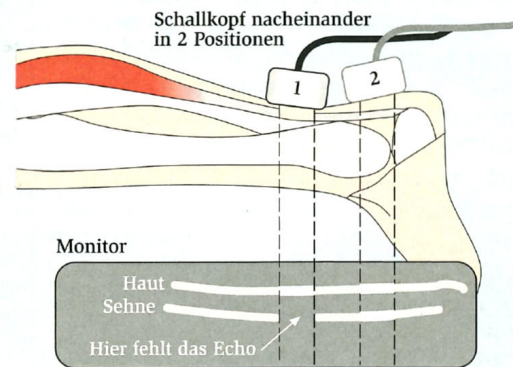


B1 Strahlengang bei der Untersuchung mit einem Augenspiegel. N und N' liegen jeweils in der Brennebene.

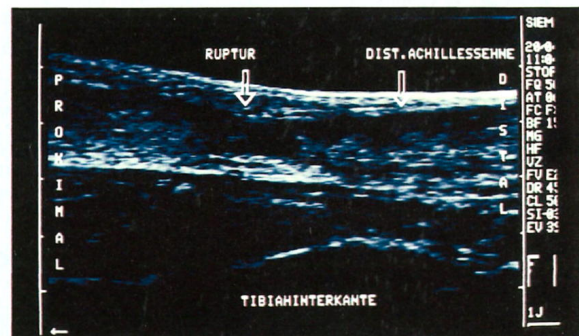
... mit Ultraschall

In ein Auge „hineinschauen“ können wir, weil Licht aus dem anderen Auge in unser Auge gelangen kann. Um Informationen aus lichtundurchlässigen Teilen des Körpers zu bekommen, hat die Medizintechnik Delfine und Fledermäuse nachgeahmt. Beide orientieren sich mithilfe von Ultraschallsignalen, die sie in die Umgebung aussenden.

In der Medizin nimmt man einen Ultraschallkopf, der kurze Pulse mit z. B. 5 MHz direkt auf der Haut ausstrahlt. Der Schall wird an Muskelfasern, Sehnen und Knochen reflektiert und gelangt wieder in den Schallkopf. Dieser dient in den Sendepausen als Mikrofon. Je später nun ein Echo eintrifft, desto tiefer muss die reflektierende Stelle unter der Haut liegen (→ B2, 3). Ein Computer zeichnet daraus ein Bild.

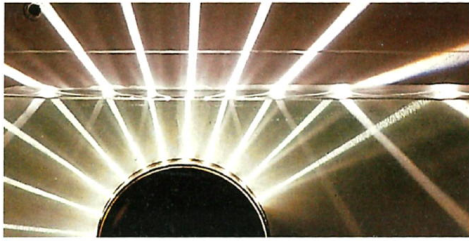


B2 Die nahe Haut liefert das Echo schnell, am oberen Bildschirmrand wird ein heller Fleck gezeichnet. Die Sehne liegt weiter weg, ihr Echo kommt später, der zugehörige helle Fleck wird weiter unten gezeichnet.

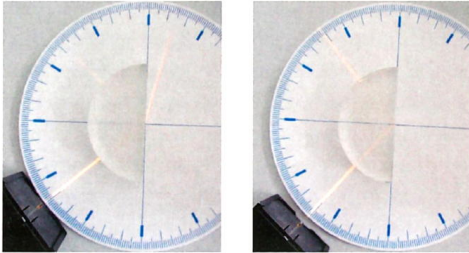


B3 Mithilfe von Ultraschall erkennt der Arzt, dass die Achillessehne gerissen ist (Ruptur = Riss).

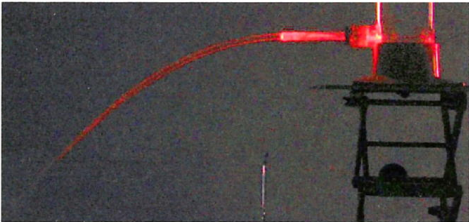
Totalreflexion



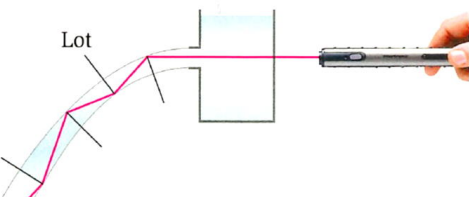
B1 Verschiedene Lichtbündel treffen unterschiedlich schräg auf die Grenzfläche.



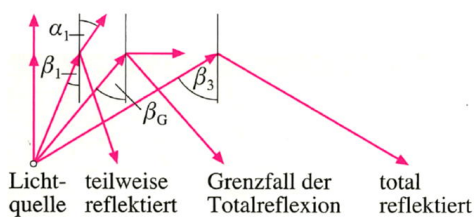
V1 Wir zielen mit einem schmalen Lichtbündel auf die runde Seite eines Glashalbzyinders. Das Lichtbündel verlässt dann den Halbzyinder in der Mitte der Winkelscheibe. Bei einem kleinen Einfallswinkel sehen wir ein gebrochenes und ein reflektiertes Lichtbündel. Wir vergrößern langsam den Einfallswinkel – bis etwa 42° . Jetzt wird kein Licht mehr gebrochen.



B2 Das Lichtbündel folgt dem Wasserstrahl.



B3 Totalreflexion an den Grenzflächen



B4 Zur Berechnung der Totalreflexion

1. Nicht jedes Lichtbündel wird gebrochen

In $\rightarrow$ **B1** wird das rechte Lichtbündel an der Grenzfläche Wasser $\rightarrow$ Luft nicht gebrochen. Vielmehr wird es vollständig wie an einem Spiegel reflektiert.

Wir messen im Foto den Einfallswinkel nach. Er beträgt etwa 60° . Aus unserem Diagramm zur Lichtbrechung bei dieser Grenzfläche lesen wir ab, dass der Winkel β maximal 49° groß sein kann. Also kann es bei einem Einfallswinkel von 60° keine Brechung geben, das Lichtbündel wird vollständig reflektiert. Man spricht in diesem Fall von **Totalreflexion**.

Wir überprüfen, ob es dieses Phänomen auch bei anderen Grenzflächen gibt. In $\rightarrow$ **V1** verwenden wir unseren Halbzylinder aus Glas auf der Winkelscheibe. Auch hier gibt es einen größten Winkel für die Lichtbrechung. Ab einem Einfallswinkel von etwa 42° verlässt keine Lichtbündel mehr das Glas an der Grenzfläche, das Licht wird vollständig reflektiert. Diesen Winkel von 42° können wir auch aus dem Diagramm für die Lichtbrechung für den Übergang Glas $\rightarrow$ Luft ablesen.

Merksatz

Übersteigt der Einfallswinkel eines Lichtbündels an den Grenzflächen von Glas oder Wasser $\rightarrow$ Luft jeweils einen bestimmten Wert, so wird das Lichtbündel an der Grenzfläche nicht mehr gebrochen, sondern vollständig reflektiert. □

2. Licht lässt sich um Kurven leiten

Wir haben gesehen, dass ein Lichtbündel im Wasser oder im Glas bleibt, wenn es total reflektiert wird. Trifft das reflektierte Lichtbündel wiederholt unter einem großen Einfallswinkel auf die Grenzfläche, so bleibt es weiterhin im Wasser bzw. im Glas.

In $\rightarrow$ **B2** ist ein solcher Fall offenbar eingetreten. Mit einem Laser wird ein rotes Lichtbündel so durch ein Wasserglas geschickt, dass es von hinten das Ausgussrohr trifft (Lehrerversuch). Wir beobachten, dass das Lichtbündel dem gekrümmten Wasserstrahl bis ins Ausgussbecken folgt.

Die Erklärung zeigt uns $\rightarrow$ **B3**. Der Einfallswinkel im Wasser ist an jedem Auftreffpunkt der Grenzfläche größer als 49° . Folglich findet jedes Mal Totalreflexion statt und keine Brechung, d.h. das Lichtbündel verlässt den Wasserstrahl nicht. Ist der Wasserstrahl jedoch stark gekrümmt, dann wird der Einfallswinkel kleiner, es findet Brechung statt, die jedes Mal einen Teil des Lichts aus dem Lichtleiter heraus führt.

3. Berechnung der Totalreflexion

Lassen wir den Lichtstrahl unter dem Winkel β auf die Grenzfläche treffen ($\rightarrow$ **B4**), können wir mit dem Brechungsgesetz von SNELLIUS den Winkel α des gebrochenen Strahls bestimmen (gegenüber dem Brechungsgesetz auf S. 28 verläuft der Lichtweg umgekehrt!):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \Rightarrow \sin \alpha = n \sin \beta.$$

Mit zunehmendem Eintrittswinkel β wird der Brechungswinkel α größer. Er wird bereits 90° , wenn der Eintrittswinkel β erst einen Wert $\beta_G < 90^\circ$ erreicht hat. Ab diesem Winkel lässt sich kein Brechungswinkel α mehr bestimmen und Licht kann nicht mehr austreten. Wir erhalten somit den Grenzwinkel β_G , wenn wir im Brechungsgesetz $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$ setzen:

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta_G} = \frac{1}{\sin \beta_G} = n \Rightarrow \sin \beta_G = \frac{1}{n}.$$

Merksatz

Übersteigt der Winkel β eines Lichtstrahls zum Lot in einem Medium den Grenzwinkel $\beta_G = \frac{1}{n}$, so tritt **Totalreflexion** auf. Der Lichtstrahl wird an der Grenzfläche vollständig reflektiert und kann das Medium nicht verlassen.

Beispiel Wasser

Die Brechzahl des Übergangs Luft–Wasser beträgt $n = 1,33$. Für den Grenzwinkel der Totalreflexion ergibt sich also:

$$\sin \beta_G = \frac{1}{1,33} = 0,75, \beta_G = 49^\circ.$$

Dieser Grenzwinkel stimmt mit dem früher gemessenen Winkel überein.

A1 In einem durchsichtigen Material tritt Licht bis zu einem Winkel von $24,4^\circ$ aus dem Material aus. Wie groß ist die Brechzahl und um welches Material könnte es sich handeln?

A2 In der Wüste ist ein Phänomen bekannt, welches mit der Totalreflexion stark verwandt ist. Um welches Phänomen handelt es sich?

Interessantes

Glasfaserkabel



Wie im Wasserstrahl kann Licht auch in einem Leiter aus Glas bzw. Plexiglas um Kurven geführt werden. In der Technik nutzt man dies in so genannten Glasfaserkabel aus. Es besteht aus einem Bündel aus sehr dünnen, ummantelten Plexiglasfäden. Jeder dieser Plexiglasfäden ist ein Lichtleiter. Damit werden Daten übertragen, z.B. im Internet. Dazu müssen die Informationen beim Sender in Lichtimpulse verwandelt und beim Empfänger wieder in elektrische Impulse umgewandelt werden.

Mit Lichtleitern kann man aber auch direkt Gegenstände betrachten. Jeder Punkt des Gegenstandes sendet ein Lichtbündel aus. Treffen diese auf einen Lichtleiter, so leitet er alle diese Lichtbündel bis zu seinem Ende. Allerdings überkreuzen sie sich unterwegs. Der Gegenstand wäre nicht zu erkennen. Verwendet man jedoch ein Glasfaserkabel mit sehr vielen eng beieinander liegenden Plexiglasfäden, so überträgt jedes dieser Fäden nur das Lichtbündel eines einzigen Gegenstandspunktes. Die Fäden überkreuzen sich nicht. Auf diese Weise können Gegenstände Punkt für Punkt übertragen werden.

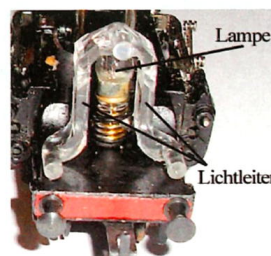


Endoskop

In der Medizin wird das Endoskop eingesetzt, um sich innere Organe anzuschauen oder auch mit speziellen Geräten kleine Operationen im Körperinnern durchzuführen. Das Endoskop besteht im Wesentlichen aus einem Schlauch. In ihm befinden sich u.a. zwei Glasfaserkabel. So lässt sich durch das eine Glasfaserkabel Licht z.B. in das Mageninnere leiten. Durch das zweite Glasfaserkabel gelangt Licht wieder nach außen. Mit ihm kann der Arzt sich das Innere des Magens anschauen.



Lichtleiter in der Modelleisenbahn



Das Foto zeigt eine Spielzeuglokomotive. Sie hat vorne drei Lampen. Öffnen wir das Gehäuse, so erkennen wir, dass sie tatsächlich im Innern nur eine kleine Glühlampe besitzt. Ein Lichtleiter aus Plexiglas leitet das Licht zu drei Austrittsstellen, die drei Lampen an unterschiedlichen Stellen darstellen.