

### Info: Die Brechung des Lichtes an Grenzflächen

Wenn ein Lichtbündel schräg auf die Grenzfläche von Luft und Glas trifft, wird es „geknickt“; es ändert also seine Richtung. Man sagt: Das Licht wird an der Grenzfläche beider Stoffe **gebrochen**.

Bei der Brechung liegen die Richtungsstrahlen des einfallenden und des gebrochenen Lichtbündels sowie das Einfalls-*lot in einer Ebene*.

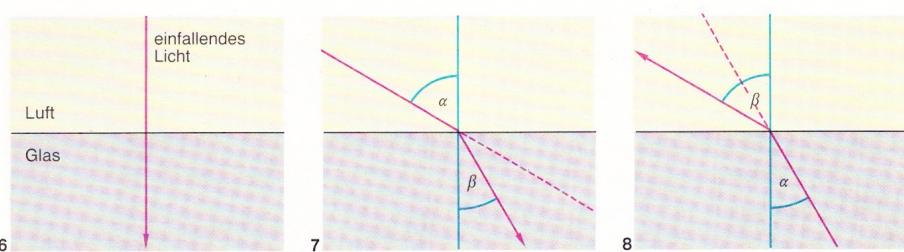
Als **Einfallswinkel**  $\alpha$  bezeichnen wir den Winkel der von dem einfallenden Strahl (Richtungsstrahl) und dem Einfalls-*lot* gebildet wird.

**Brechungswinkel**  $\beta$  nennen wir den Winkel zwischen dem gebrochenen Strahl (Richtungsstrahl nach der Brechung) und dem Einfalls-*lot*.

Die Bilder 6–8 zeigen ein sehr schmales Lichtbündel, das auf die ebene Oberfläche eines Körpers aus Glas trifft.

Dabei können wir folgende Beobachtungen machen:

○ Fällt das Lichtbündel senkrecht auf die Grenzfläche ( $\alpha = 0^\circ$ ), so ändert sich seine Richtung nicht; das Licht läuft ungebrochen weiter (Bild 6).



- Wenn das Lichtbündel von *Luft in Glas* übertritt ( $\alpha \neq 0^\circ$ ), ist der Brechungswinkel stets kleiner als der Einfallswinkel:  $\beta < \alpha$  (Bild 7).

Das Lichtbündel wird also zum *Einfalls-*lot** hin gebrochen.

- Wenn das Lichtbündel von *Glas in Luft* übertritt ( $\alpha \neq 0^\circ$ ), ist der Brechungswinkel stets größer als der Einfallswinkel:  $\beta > \alpha$  (Bild 8).

Das Lichtbündel wird also vom *Einfalls-*lot** weg gebrochen.

- Die Ablenkung aus der ursprünglichen Richtung ist um so stärker, je größer der Einfallswinkel ist. Dies gilt unabhängig davon, ob der Übergang von Luft in

*Glas* (Bild 7) oder von *Glas in Luft* erfolgt (Bild 8).

- In Bild 8 durchläuft das Licht den gleichen Weg wie in Bild 7 – allerdings in umgekehrter Richtung: Auch bei der Brechung ist der **Lichtweg umkehrbar**.

Wenn das Licht nicht senkrecht einfällt, sind Einfalls- und Brechungswinkel unterschiedlich groß. Man nennt

- das Medium, im dem der kleinere der beiden Winkel liegt, **optisch dichter**;
- das Medium, in dem der größere der beiden Winkel liegt, **optisch dünner**.

Zum Beispiel sind Wasser und Glas optisch dichter als Luft.

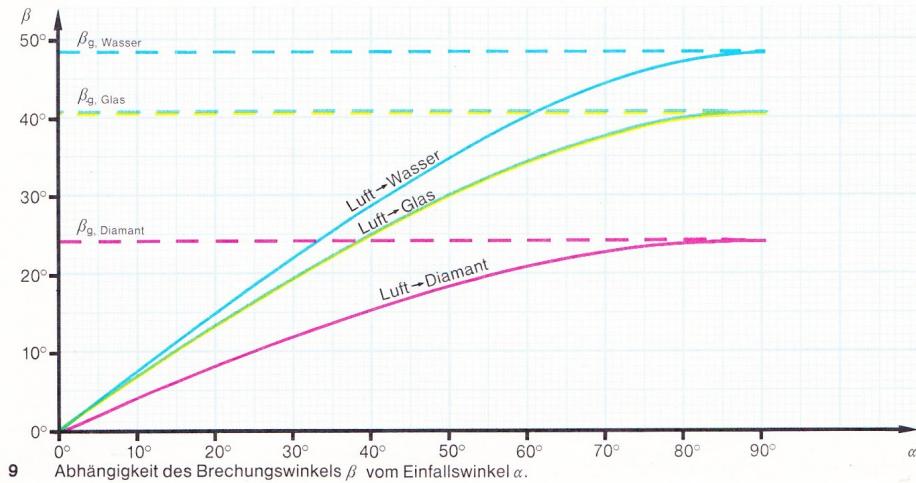
### Info: Der Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel

Wenn Licht von einem Stoff in einen anderen übergeht, wird es mit zunehmendem Einfallswinkel immer stärker aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt. Wie stark die Ablenkung bei einem bestimmten Einfallswinkel ist, hängt davon ab, aus welchem Stoff das Licht kommt und in welchen es eintritt.

In Bild 9 ist der Brechungswinkel  $\beta$  in Abhängigkeit vom Einfallswinkel  $\alpha$  aufgetragen, und zwar für verschiedene Übergänge des Lichts: von *Luft in Wasser*, von *Luft in Glas* und von *Luft in Diamant*. An dem Schaubild kannst du erkennen, daß

der Zusammenhang zwischen Brechungs- und Einfallswinkel nicht proportional ist. Bei kleinen Einfallwinkeln wächst der Brechungswinkel  $\beta$  zwar fast in gleichem Maße wie der Einfallswinkel  $\alpha$ , bei größeren Einfallwinkeln nimmt  $\beta$  aber immer weniger rasch zu.

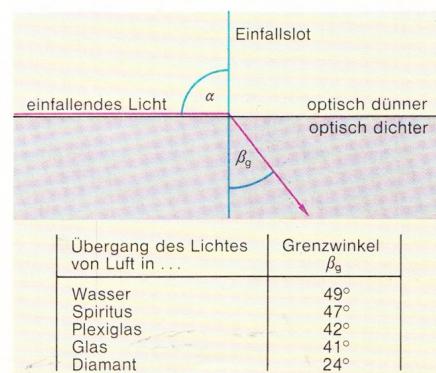
Außerdem erkennt man: Glas bricht das Licht stärker als Wasser. Bei gleichem Einfallswinkel ist nämlich der Brechungswinkel beim Übergang *Luft–Glas* kleiner als beim Übergang *Luft–Wasser* (damit ist die Ablenkung aus der ursprünglichen Richtung größer).



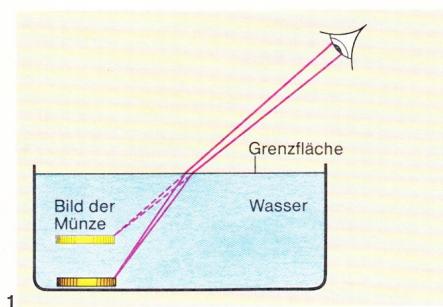
Wir betrachten nun den Fall, daß Licht von einem optisch dünneren Stoff in einen optisch dichten fällt (zum Beispiel von Luft in Wasser):

Vergrößert man den Einfallswinkel, so wächst natürlich auch der Brechungswinkel. Schließlich fällt das Licht streifend auf diese Grenzfläche; der Einfallswinkel beträgt dann annähernd  $90^\circ$  – größer als  $90^\circ$  kann er nicht werden. Auch der Brechungswinkel nähert sich dann einem Höchstwert, den er nicht überschreiten kann (Bild 10).

Dieser Höchstwert für den Brechungswinkel hängt von den aneinandergrenzenden Stoffen ab. Wir bezeichnen ihn als **Grenzwinkel**  $\beta_g$ .



## Info: „Trugbilder“ durch Brechung



1

Gegenstände, die sich ganz oder teilweise unter Wasser befinden, können geknickt, verkürzt oder angehoben erscheinen.

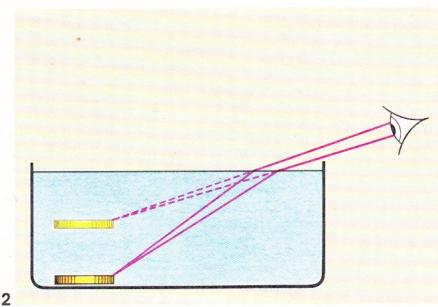
Ursache für diese „Trugbilder“ ist die **Brechung** des Lichts.

Sehen wir uns ein Lichtbündel an, das von einem Gegenstand unter Wasser, z.B. von einer Münze, ausgeht und in unser Auge gelangt (Bild 1):

Wenn das Lichtbündel schräg auf die Wasseroberfläche fällt, wird es an der Grenzfläche Wasser–Luft gebrochen. Unser Gehirn geht aber aufgrund der Erfahrung davon aus, daß sich Licht geradlinig ausbreitet. Es „verlegt“ deshalb den Ausgangspunkt des Lichtbündels an eine andere Stelle; wir nehmen den Gegenstandspunkt dort wahr, wo sich die rückwärts verlängerten Randstrahlen des gebrochenen Lichtbündels schneiden.

Wir sehen ein **virtuelles Bild** des Gegenstandes; der Gegenstand ist scheinbar angehoben.

Je flacher wir auf die Wasseroberfläche schauen, desto höher scheint der Gegenstand zu liegen (Bild 2). Der Grund dafür



2

ist, daß das ins Auge fallende Lichtbündel jetzt stärker aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird.

Wenn wir einen Stab (oder ein Lineal) senkrecht ins Wasser tauchen, erscheint er uns verkürzt. Ein schräg ins Wasser gehaltener Stab, der teilweise aus dem Wasser herausragt, scheint geknickt zu sein.

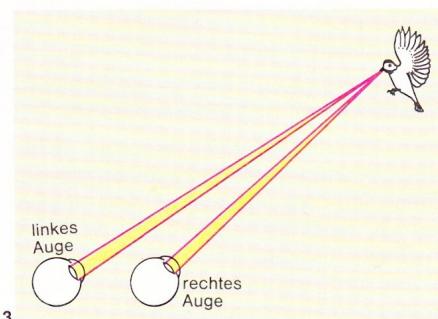
Die Erklärung ist in beiden Fällen die gleiche: Jeder Punkt des Gegenstandes unterhalb der Wasseroberfläche erscheint uns angehoben.

Wenn man durch eine Taucherbrille blickt, scheinen alle Gegenstände näher zu sein, als sie es in Wirklichkeit sind. Auch wenn du schräg auf die senkrechte Wand eines Aquariums blickst, erscheinen die Fische herangerückt. Die Rückwand des Aquariums scheint sich sogar zu verbiegen, wenn du den Kopf hin und her bewegst.

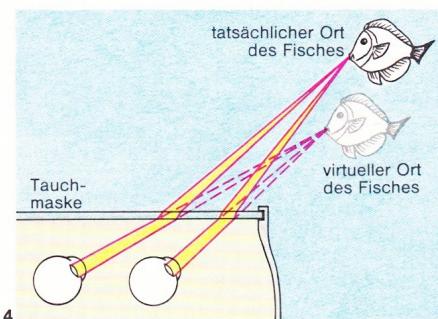
Diese scheinbaren Entfernungssänderungen haben folgenden Grund:

Wenn man auf einen Gegenstand in der Nähe blickt, sind beide Augen auf einen Punkt des Gegenstandes gerichtet (Bild 3). Aus der Stellung der Augen schließt unser Gehirn auf die Entfernung des Gegenstandes.

Bild 4 zeigt die Verhältnisse bei der Taucherbrille. Die beiden Lichtbündel, die von dem Gegenstandspunkt ausgehen, laufen nach der Brechung stärker voneinander weg als vorher. Daher stehen die Augen so, als würde man einen recht nahen Gegenstand sehen; der Gegenstand, den man gerade betrachtet, erscheint somit herangerückt.

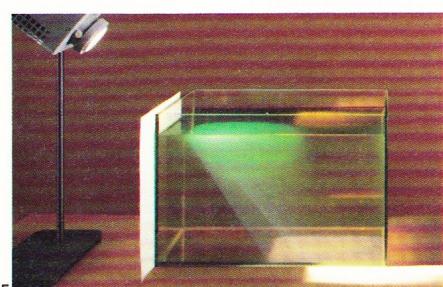


3

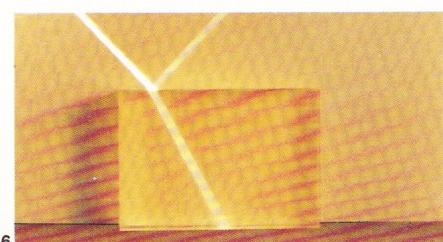


4

## Aufgaben



5



6

- 1** Schon Johannes Kepler (1571–1630) suchte Gesetzmäßigkeiten bei der Brechung. Seine Versuchsanordnung ist in Bild 5 nachgebaut.

Warum ist der Schattenraum in der Flüssigkeit kleiner als außerhalb?

- 2** Bild 6 zeigt, wie Licht beim Übergang von Luft in Plexiglas gebrochen wird. Wie könnte man hier vorgehen, wenn man die Umkehrbarkeit des Lichtweges nachweisen wollte?

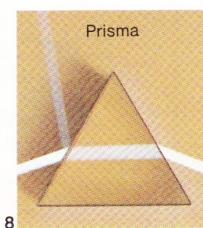
- 3** Ein Lichtbündel geht von einem optisch dichten in einen optisch dünnen Stoff über. Was kannst du über den Brechungswinkel im Vergleich zum Einfallswinkel aussagen?

- 4** In Bild 7 fällt ein Lichtbündel durch eine Glasscheibe. Warum behält es seine Richtung bei und wird nur parallel versetzt?

- 5** Licht, das ein Prisma durchläuft, wird zweimal gebrochen (Bild 8). Wie kommt es, daß es besonders stark aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird?



7



8

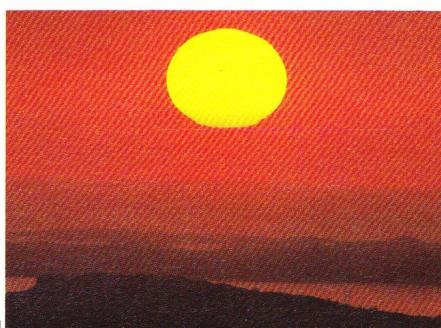
## Aus Umwelt und Technik: Die Abendsonne ist nicht rund!

Kurz vor Sonnenuntergang erscheint die Sonne etwas „plattgedrückt“ – insbesondere bei starkem Abendrot. Ihre senkrechte Achse ist also kürzer als die waagerechte (Bild 11). Wie kommt das?

Die Lufthülle der Erde weist keine scharfe Grenze auf, sondern sie wird zur Erdoberfläche hin immer dichter. Licht, das aus dem Weltall kommt, wird daher nicht einmalig an einer Grenzfläche gebrochen; vielmehr erfolgt die Brechung nach und nach.

Bild 12 zeigt diesen Vorgang in einem **Versuch**: Hier wurde über eine Zuckerlösung vorsichtig Wasser „geschichtet“. Die Grenzschicht zwischen beiden Flüssigkeiten wurde dann etwas aufgerührt, so daß ein allmählicher Übergang entstand.

Wie sich die Brechung durch die Lufthülle auswirkt, sieht man leicht



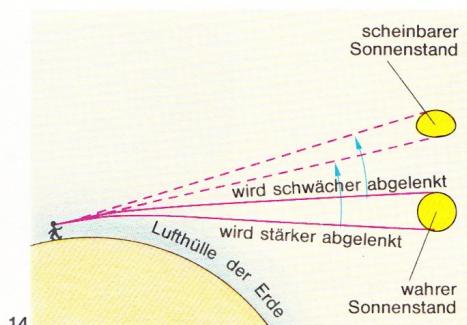
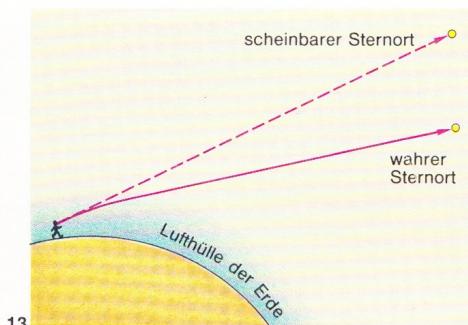
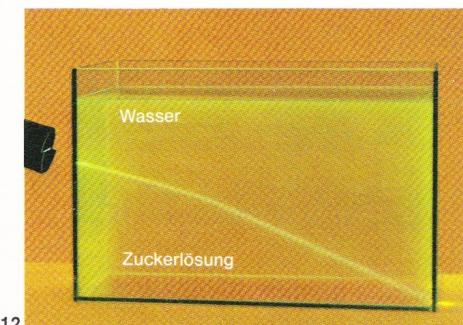
bei einer punktförmigen Lichtquelle ein: Wenn wir einen schräg über uns stehenden Stern beobachten, fällt von diesem ein schmales Lichtbündel in unser Auge. Es durchquert die Lufthülle auf einer gekrümmten Bahn. In der Richtung, aus der das Bündel ins Auge trifft, vermuten wir den Stern (Bild 13). In Wirklichkeit steht er aber tiefer über dem Horizont. Es ist sogar möglich, daß wir einen Stern noch se-

hen, obwohl sein wahrer Ort bereits unterhalb der Horizontlinie liegt.

Auch die untergehende Sonne steht nicht in der Richtung, in der wir sie wahrnehmen, sondern etwas tiefer. Sie wird durch den Brechungsvorgang scheinbar angehoben. Warum aber ist sie *nicht rund*?

Das Lichtbündel, das unser Auge vom *untenen Sonnenrand* her erreicht, trifft *flacher* auf die Lufthülle der Erde als das vom *oberen Rand*; es wird daher *stärker gebrochen* als das vom oberen Rand (Bild 14). Der untere Rand der Sonne wird deshalb *stärker „angehoben“*; das hat zur Folge, daß uns die senkrechte Achse der Sonne verkürzt erscheint.

Für die waagerechte Achse gilt dies nicht, weil die Bündel, die vom linken und rechten Sonnenrand ausgehen, gleich stark gebrochen werden.



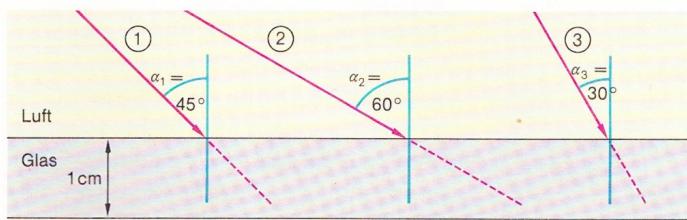
- 6** In Bild 9 trifft Licht auf eine 1 cm dicke Glasplatte. Übertrage die Abbildung in dein Heft, und zeichne den weiteren Verlauf der Richtungsstrahlen. Berücksichtige dabei die Brechung an *beiden* Grenzflächen.

Die Brechungswinkel kannst du aus dem Diagramm (Bild 9 der vorigen Doppelseite) ablesen. Aus welchem Grund brauchst du für die Bre-

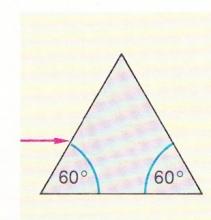
chung an der Plattenunterseite keine zusätzlichen Angaben über den Übergang Glas–Luft?

- 7** Bild 10 zeigt ein Prisma aus Glas.

Wie verläuft der eingezeichnete Strahl *im* Prisma, und wie *nach* dem Prisma? Übertrage die Abbildung vergrößert in dein Heft, und konstruiere den Lichtweg.



9



10

- 8** Wenn man in ein Aquarium blickt, sieht man nur ein *virtuelles* Bild der Fische.

- Begründe diese Behauptung.
- Wenn man vor der Scheibe eines Aquariums steht, scheinen alle Gegenstände näher herangerückt. Wie kommt das?
- Bewegt man den Kopf vor dem Aquarium hin und her, so verschiebt sich das virtuelle Bild der Fische. Erkläre mit Hilfe einer Skizze.
- Vergleiche diese durch Brechung erzeugten virtuellen Bilder mit Spiegelbildern. Welche Unterschiede findest du?

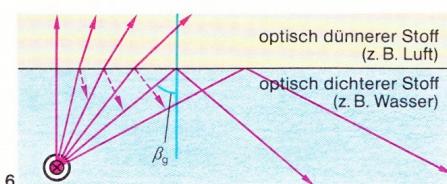
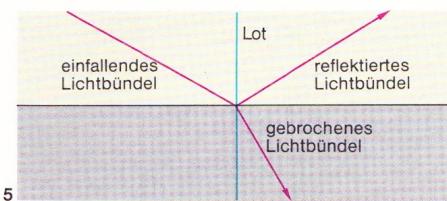
### Info: Brechung und Reflexion – oder keine Brechung und Totalreflexion

Wenn ein Lichtbündel auf die Grenzfläche zwischen zwei lichtdurchlässigen Stoffen fällt, wird nie *alles* Licht gebrochen; stets wird auch Licht reflektiert.

Das Lichtbündel wird also in ein gebrochenes und ein reflektiertes Teilbündel aufgespalten (Bild 5).

Je größer der Einfallswinkel ist, desto mehr Licht wird reflektiert und desto weniger wird gebrochen. Daß das tatsächlich so ist, kannst du auch im Alltag beobachten: Eine Glasscheibe wirkt um so mehr wie ein Spiegel, je flacher du auf die Scheibe blickst.

Beim Übergang von einem optisch dünneren in einen optisch dichteren Stoff findet auch dann noch eine Brechung statt, wenn das Licht nahezu an der Oberfläche entlangstreift. In diesem Fall ist der Brechungswinkel praktisch gleich dem



Grenzwinkel  $\beta_g$ . Allerdings dringt nur wenig Licht in den optisch dichteren Stoff ein; fast alles Licht wird reflektiert.

Was beim Übergang vom optisch dichten zum optisch dünneren Stoff ge-

schieht, zeigt Bild 6: Vergrößert man den Einfallswinkel, so wird auch hier ein zunehmender Teil des Lichts reflektiert; der übrige Teil des Lichts, der durch die Grenzfläche dringt, nimmt dementsprechend ab.

Wenn der Einfallswinkel eines Lichtbündels aber größer als  $\beta_g$  wird, kann das Licht nicht mehr die Grenzfläche durchdringen; es wird **vollständig** reflektiert. Man spricht von **Totalreflexion**.

Totalreflexion tritt immer dann auf, wenn Licht von einem optisch dichten Stoff auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren fällt und wenn dabei der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel  $\beta_g$  ist:  $\alpha > \beta_g$ . Der Winkel  $\beta_g$  heißt **Grenzwinkel der Totalreflexion**. Er beträgt z.B. für den Übergang Wasser–Luft  $49^\circ$  und für den Übergang Glas–Luft  $42^\circ$ .

### Aus Umwelt und Technik: **Glasfasern leiten Licht**



Bild 7 zeigt eine **Glasfaserleuchte**. In ihrem Innern fällt Licht einer Glühlampe auf Enden von **Glasfasern**. Das Licht geht durch die Glasfasern hindurch und tritt erst an ihren äußeren Enden wieder aus – obwohl die Glasfasern teilweise stark gebogen sind. Wie ist das möglich, wo sich das Licht doch geradlinig ausbreitet?

Obwohl Glasfasern sehr dünn sind, bestehen sie meist aus zwei verschiedenen Glassorten: einem *Kern* aus optisch dichterem Glas und einem *Mantel* aus optisch dünnerem Glas.

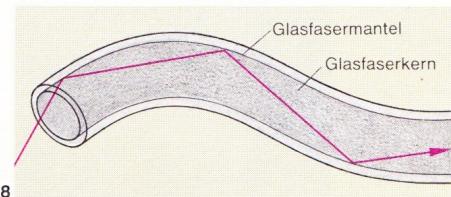
Wenn nun Licht an einem Ende in die Glasfaser eintritt, treffen die Lichtbündel bald auf die Grenzfläche zwischen Kern und Mantel. Dort tritt Totalreflexion auf (Bild 8). Dies wiederholt sich auf dem Weg durch die Glasfaser immer wieder. Die Licht-

bündel können also die Glasfaser nicht verlassen und folgen sogar ihren Biegungen. Man bezeichnet Glasfasern daher auch als *Lichtleiter*.

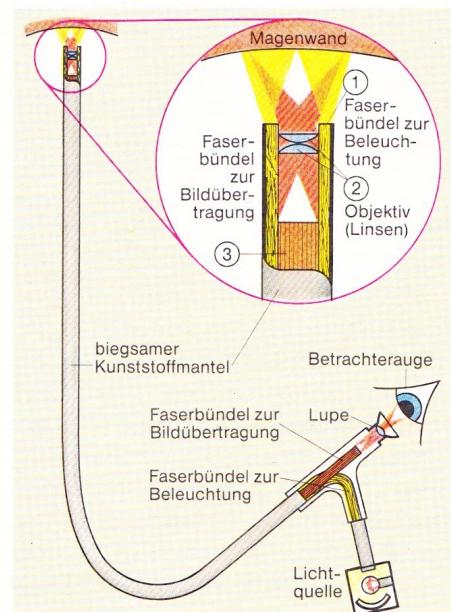
Man kann nun viele Tausend solcher Glasfasern zu einem Bündel von nur einigen Millimetern Durchmesser zusammenfassen. Auf diese Weise erhält man ein **Glasfaserkabel**. Für solche Kabel gibt es viele Verwendungsmöglichkeiten.

Wenn z.B. ein Arzt bei einem Patienten in den Magen sieht, benutzt er ein *Endoskop*. Das ist ein schlauchartiges Instrument, das durch die Speiseröhre des Patienten in den Magen eingeführt wird. Es besteht hauptsächlich aus zwei Glasfaserkabeln (Bild 9). Außerdem enthält es ein kleines Objektiv, das ähnlich wie das Objektiv im Fotoapparat funktioniert.

Durch das äußere Glasfaserkabel wird Licht in den Magen geleitet (1); auf diese Weise wird z.B. ein Teil der Magenwand beleuchtet. Mit Hilfe des Objektives (2) entsteht nun ein Bild von dieser Stelle des Magens, und zwar auf dem Ende des inneren Glasfaserkabels (3). Da jede Faser das Licht eines bestimmten Punktes der Magenwand überträgt, sieht der Arzt auf dem Ende des Glasfaserkabels



8



9

ein Bild der betreffenden Magenwandstelle; es ist Punkt für Punkt zusammengesetzt. Er betrachtet dieses Bild durch eine eingebaute Lupe.

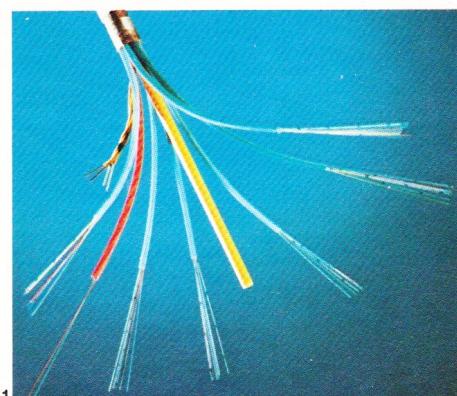
## Aus Umwelt und Technik: Nachrichtenübertragung mit Glasfasern

In Zukunft werden **Glasfaserkabel** große Bedeutung für die Nachrichtenübertragung erlangen.

Zum Beispiel funktioniert das Telefonieren über Glasfaser so:

Die Sprache wird zunächst in elektrische Signale und dann – von einer geeigneten Lichtquelle – in Lichtblitze umgewandelt. (Zur Sprachübertragung sind etwa 30 000 Lichtblitze pro Sekunde nötig.) Das Licht durchläuft eine Glasfaser, und am Ende wird aus den Lichtblitzen wieder die ursprüngliche Sprache „hergestellt“.

Man kann Licht durch Glasfasern ca. 20 km weit übertragen. Bei größe-



ren Entfernungen müssen die Blitze unterwegs mit Hilfe weiterer Lichtquellen „erneuert“ werden.

Hunderte von Glasfasern können zu einem Kabel zusammengefaßt werden. Bild 1 zeigt ein solches Kabel mit 42 Fasern.

Mit einer einzigen Glasfaser lassen sich heute schon Zehntausende von Telefongesprächen zur gleichen Zeit übertragen – und zwar ohne Rauschen und Knacken, ohne Verzerrungen und Störungen.

In demselben Leitungsnetz können außer Telefongesprächen auch Computerdaten, einzelne Fernsehbilder (Bildschirmtext, Bildtelefon) sowie ganze Fernsehprogramme übertragen werden.

## Aus Umwelt und Technik: Lichtleiter in der Natur



Lichtleiter aus Glasfasern sind Produkte hochentwickelter Technik. Erstaunlicherweise gibt es aber auch Lichtleiter in der Natur.

In bestimmten Gebieten Amerikas sowie am Kaspischen Meer findet man *Ulexitkristalle* (Bild 2).

Wenn ein solcher Kristall an zwei gegenüberliegenden Seiten plan geschliffen und poliert ist, nennt ihn die Amerikaner *television stone*. Legt man nämlich eine Buchseite oder ein Foto unter einen solchen „Fernsehstein“, so sieht man die Schrift oder das Bild auf der Oberfläche des Steines (Bild 3).

Des Rätsels Lösung sind unzählige haarfeine Fasern, die alle parallel angeordnet sind und gemeinsam den Kristall bilden. Licht, das in einer dieser Fasern an einem Ende eindringt, wird durch Totalreflexion bis zum anderen Ende fortgeleitet. Die einzelnen Fa-

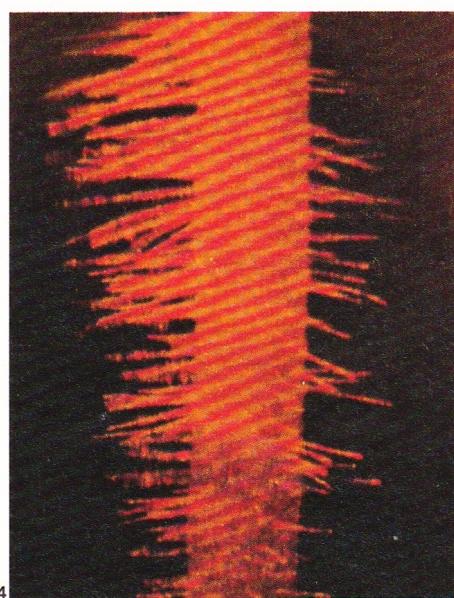
sern sind also Lichtleiter. Jede Faser, überträgt das Licht eines winzigen Gegenstandspunktes von der Unterseite des Kristalls bis hin zu seiner

Oberseite; dort entsteht Punkt für Punkt ein Bild des Gegenstandes.

Auch in der Pflanzenwelt kommen Lichtleiter vor. Bild 4 zeigt eine *Maiswurzel*, deren oberirdischer Wurzelansatz mit rotem Licht beleuchtet wurde. Das Licht gelangt bis in die feinsten Wurzelfasern. Die Wurzel stellt ein Bündel aus „Zellsäulen“ dar; die einzelnen Zellsäulen sind die Fasern, die das Licht leiten. Die Totalreflexion erfolgt an den Zellwänden.

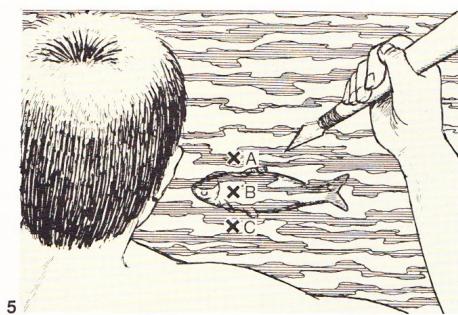
Durch das in die Wurzeln geleitete Licht werden verschiedene Vorgänge des Pflanzenwachstums gesteuert:

Maiswurzeln wachsen steiler nach unten in den Boden, sobald sie Licht erhalten. Bei keimenden Haferkörnern hängt das Wachstum des oberirdischen Sprosses davon ab, wieviel Licht in bestimmte, mehrere Zentimeter unter der Erde liegende Pflanzenteile gelangt.



## Brechung und Totalreflexion

### Alles klar?



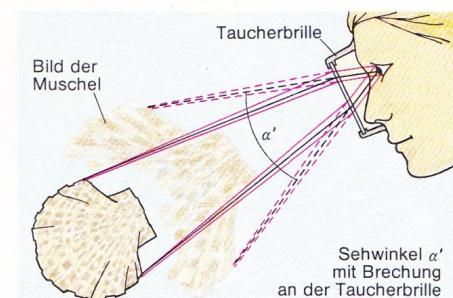
5

1 Wohin muß der Eingeborene mit seinem Speer zielen (Bild 5)?

2 Steht man am Rande eines Schwimmbeckens mit konstanter Wassertiefe, so erscheint die gegenüberliegende Seite flacher. Erkläre diese Beobachtung.

3 Warum ist es gefährlich, in ein Wasserbecken zu springen, von dem man den Grund zwar sieht, die Tiefe aber nicht kennt?

4 Ein Lichtstrahl, der von Luft in Wasser übergeht, wird *zum Einfallsslot hin* gebrochen. Eine schräg ins Wasser ge-



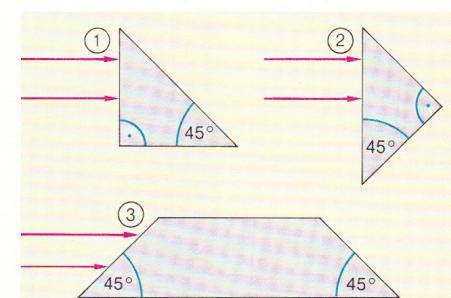
6

haltene Stricknadel scheint geknickt zu sein; sie wird unter Wasser scheinbar vom *Einfallslot hin* gebrochen! Wie kommt das? Zeichne!

5 An Land sehen Muscheln viel kleiner aus, als sie unter Wasser durch die Taucherbrille hindurch erscheinen. Bild 6 hilft dir bei der Erklärung.

6 Ein Springbrunnen wird von unten beleuchtet. Warum leuchten die gebogenen Wasserstrahlen?

7 In Bild 3 auf der vorigen Doppelseite scheint die Wasseroberfläche undurch-



7

sichtig zu sein: Der Arm ist nicht vollständig zu sehen. Erkläre!

8 Der Rücken vieler Fische ist so gefärbt wie der Meeresboden; ihre Unterseite sieht aus wie ein Spiegel. Welchen Vorteil hat das für die Fische?

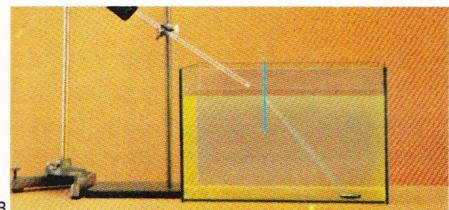
9 Bild 7 zeigt verschiedene Glasprismen. Übertrage die Abbildungen in dein Heft, und ergänze die Lichtwege.

10 „Der Lichtweg bei Brechung und Reflexion ist umkehrbar.“ Erkläre diese Behauptung anhand des Lichtweges, den du zu Prisma 3 in Bild 7 gezeichnet hast.

### Auf einen Blick

#### Lichtbrechung an Grenzflächen

**Wenn Licht schräg auf die Grenzfläche zwischen zwei lichtdurchlässigen Stoffen fällt, wird es gebrochen.**



8

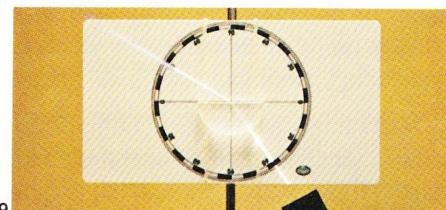
Beim Übergang von einem optisch dünneren Stoff in einen optisch dichteren (z.B. von Luft in Glas) wird ein Lichtbündel **zum Einfallslot hin** gebrochen (Bild 8).

Geht aber das Lichtbündel von einem optisch dichten Stoff in einen optisch dünneren Stoff über, wird es **vom Einfallslot weg** gebrochen (Bild 9).

Je größer der Einfallswinkel ist, desto stärker wird das Licht aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt.

Fällt das Licht senkrecht auf die Grenzfläche, wird es überhaupt nicht gebrochen.

Aufgrund der Brechung des Lichts an ebenen Grenzflächen sieht man **virtuelle Bilder**.

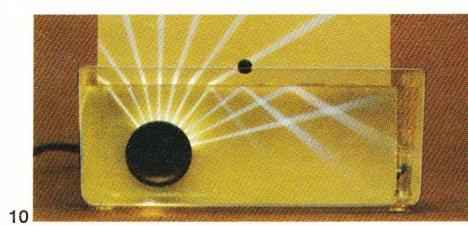


9

#### Reflexion des Lichtes an Grenzflächen

An Grenzflächen wird nur ein Teil eines einfallenden Lichtes gebrochen; der andere Teil wird **reflektiert**.

Der reflektierte Anteil des Lichtes ist um so größer, je größer der Einfallswinkel des Lichtbündels ist (je flacher es also auf die Grenzfläche trifft).



10

Beim Übergang von einem optisch dichten in einen optisch dünneren Stoff (z.B. von Wasser in Luft) wird das Licht von einem bestimmten Einfallswinkel an vollständig reflektiert (**Totalreflexion**). Diesen Winkel nennt man **Grenzwinkel der Totalreflexion**.