

29 Einige Licht-Phänomene

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand Mai 2012)

Reflexion

A1 Man sagt immer, dass ein Spiegel links und rechts vertauscht? Was wird tatsächlich vertauscht? Hilf dir mit Abb. 1! Wie würdest du dich sehen, wenn ein Spiegel wirklich links und rechts vertauscht?



Abb. 1 zu A1 (Grafik: Janosch Slama)

A2 Du denkst dir vielleicht, das ist eine blöde Frage, aber kann man Spiegel eigentlich sehen?

A3 Ein Physikprofessor betrachtet betrübt mit einem Handspiegel über einen Garderobenspiegel seine sich langsam aber sicher lichtende Stelle am Hinterkopf. In welcher Entfernung sieht er diese?

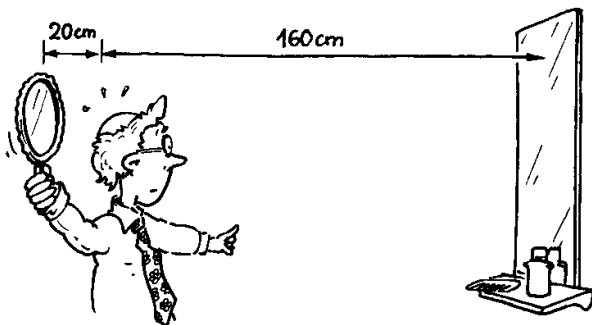


Abb. 2 zu A3 (Grafik: Janosch Slama).

A4 Eine typische Filmszene: Eine Frau schaut in den Spiegel und wir können ihr Bild sehen. Wie realistisch ist diese Szene?

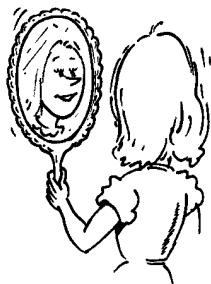
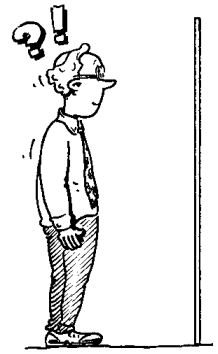


Abb. 3 (Grafik: Janosch Slama)

A5 Wie groß muss ein Garderobenspiegel mindestens sein, damit du dich ganz in ihm betrachten kannst? In welcher Höhe muss er aufgehängt sein? Und hat deine Entfernung zum Spiegel einen Einfluss darauf?

Abb. 4 (Grafik: Janosch Slama)



A6 Eine ebene Wellenfront nähert sich einem Spiegel (Abb. 5). Wir greifen die Punkte A_1 bis D_1 heraus. Nacheinander treffen diese auf und erzeugen, gemäß dem Huygens'schen Prinzip, Kreiswellen. Die reflektierte Wellenfront ist die Einhüllende dieser Kreiswellen, eine Tangente an alle Kreise. Du siehst, wie die Wellenfront nach und nach „umklappt“, bis sie gänzlich in die neue Richtung zeigt. Natürlich passiert das nicht nur an diesen Punkten, sondern kontinuierlich.

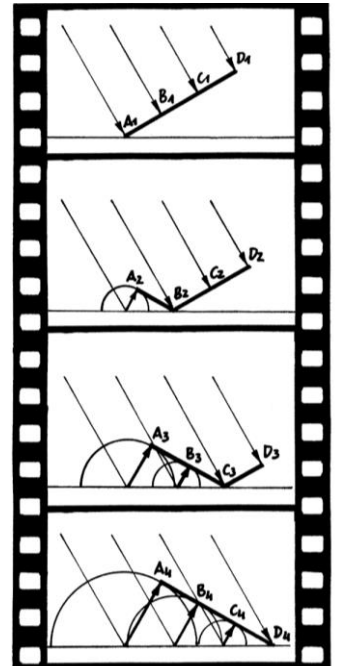


Abb. 5 (Grafik: Janosch Slama)

Das Reflexionsgesetz besagt, dass einfallende und reflektierte Strahlen denselben Winkel zum Lot einschließen. In Abb. 6 siehst du das erste und das letzte Bild der Filmsequenz übereinandergelegt. Die einfallende Lichtfront bildet das Dreieck $A_1D_1D_4$ und die reflektierte das Dreieck $D_4A_4A_1$. Wenn das Reflexionsgesetz richtig ist, dann müssen die Winkel α und β gleich groß sein. Wie kann man das geometrisch beweisen?

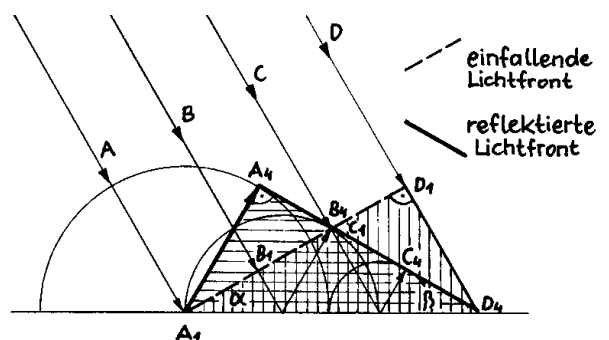


Abb. 6 (Grafik: Janosch Slama)

A7 Das Reflexionsgesetz besagt, dass einfallender und reflektierter Strahl den selben Winkel zum Lot haben (siehe auch A6). Begründe mit Hilfe des Prinzips von Fermat und mit Abb. 7, warum das so sein muss.

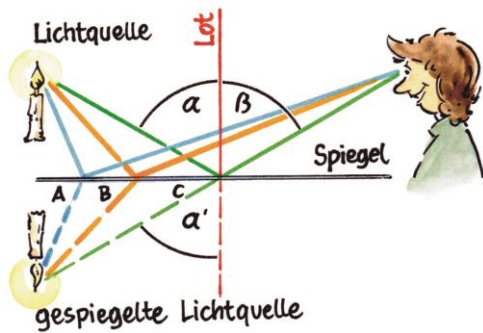


Abb. 7 zu A7 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 20.11, S. 59, BB6)

A8 Wieso kann ein Autofahrer in stockdunkler Nacht die von den eigenen Scheinwerfern angestrahlte Straße sehen (Abb. 8)? Nach dem Reflexionsgesetz dürften doch die Strahlen gar nicht zu ihm zurückkommen!

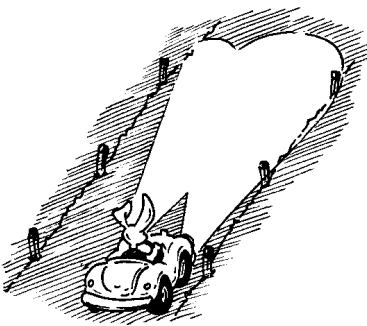


Abb. 8 zu A8 (Grafik: Janosch Slama)

A9 Warum muss ein Kosmetikspiegel eine völlig glatte Oberfläche haben, während eine Parabolantenne für das Satellitenfernsehen aus mattem Metall bestehen kann (Abb. 9) und eine Radarantenne sogar aus einer Art Drahtgestell (Abb. 10)? In allen Fällen werden elektromagnetische Wellen durch parabolische Flächen fokussiert!



Abb. 9: eine Satellitenparabolantenne (Foto: JePe; Quelle: Wikipedia)



Abb. 10: eine meteorologische Radarantenne (Foto: Rameshng; Quelle: Wikipedia)

Brechung und Totalreflexion

A10 Überlege dir, warum ein solches Stück Glas wie rechts nicht wie eine Lupe wirken kann! Begründe mit Hilfe des Brechungsgesetzes und mit dem Prinzip von Fermat.

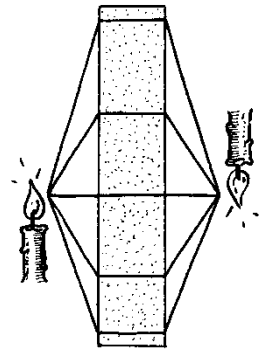


Abb. 11 (Grafik: Janosch Slama)

A11 Eine Luftblase befindet sich unter Wasser und du beleuchtest sie mit einer Taschenlampe. Wie werden die vorher parallelen Lichtstrahlen nach der Luftblase weiterlaufen: Konvergierend, divergierend oder parallel?

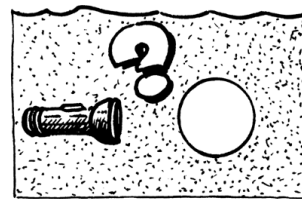


Abb. 12 (Grafik: Janosch Slama)

A12 Warum sieht man durch eine Taucherbrille unter Wasser alles größer? Versuche, den Strahlengang beim Übergang vom Wasser durch die Luft in der Brille zum Auge aufzuzeichnen.

A13 Die Brechzahl n eines Mediums ist als Quotient der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c_0) und in diesem Medium (c) definiert, also $n = c_0 / c$. Man kann das Brechungsgesetz daher auch so formulieren:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\frac{c_0}{n_1}}{\frac{c_0}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

In Tab. 1 siehst du einige Beispiele für absolute und relative Lichtgeschwindigkeiten und die dazugehörigen Brechzahlen in verschiedenen Materialien.

Material	c absolut [m/s]	% von c_0	$n = c_0 / c$
Vakuum	299.792.458	100	1
bodennahe Luft	299.704.944	99,97	1,000292
Wasser	225.407.863	75,19	1,33
Quarzglas	202.562.471	67,56	1,48
Diamant	123.881.181	41,32	2,42

Tab. 1: Einige Beispiele für Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Materialien. n bezeichnet man als Brechzahl (siehe auch Tab. 29.1, S. 21).

a Was passiert mit der Brechkraft einer Lupe, die unter Wasser gehalten wird? Wie siehst du ohne Taucherbrille unter Wasser? Wie hängen diese beiden Fragen zusammen? Versuche mit Hilfe des Brechungsgesetzes und Tab. 1 zu begründen.

b Nimm an, du tauchst und leuchtest mit einer Taschenlampe aus dem Wasser heraus (Abb. 13). Zeichne ein Diagramm, das den Zusammenhang zwischen den Winkeln α und β zeigt. Benutze dazu Tab. 1 und forme das Brechungsgesetz so um, dass du die Variable β freistellen kannst. Was fällt im Diagramm auf? Wie kann man das interpretieren?

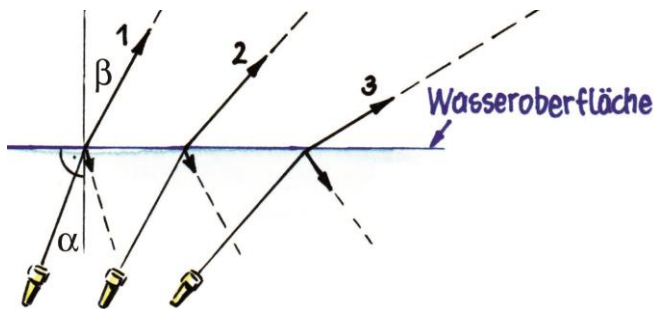


Abb. 13: Ein Lichtstrahl tritt aus dem Wasser aus (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 29.6, S. 21).

c Leite aus dem Brechungsgesetz eine allgemeine Formel ab, mit der du den Grenzwinkel α für die Totalreflexion berechnen kannst (siehe A13 b), und überprüfe diese Formel am Übergang von Wasser in Luft. Hilfe: Beim Grenzwinkel α läuft der gebrochene Strahl parallel zur Wasseroberfläche, schließt also mit dem Lot einen Winkel von 90° ein (siehe Abb. 39/4 im Lösungsteil).

d Was fällt an der Unterwasseraufnahme in Abb. 14 auf und was hat das mit A13 b und c zu tun?



Abb. 14 zu A13 d (Foto: Lyudmila Zinkova)

e Der Schützenfisch (Abb. 15) hat eine interessante Jagdmethode: Er „spuckt“ auf seine Beute. Mit dem Wasserstrahl, der etwa 16 km/h erreicht, kann er Insekten abschießen, die sich bis einen Meter über der Wasseroberfläche befinden. Seine Augen bleiben dabei unter Wasser. Was ist daran sehr bemerkenswert?

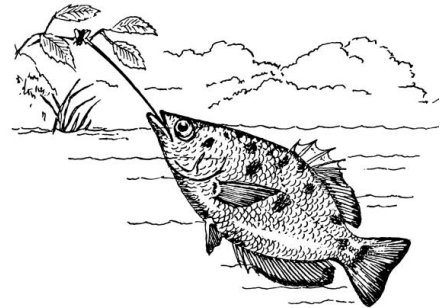


Abb. 15: Ein Schützenfisch (Grafik: Pearson Scott Foresman)

A14 Wenn du schon einmal den Himmel in einer klaren Nacht betrachtest hast, ist dir vielleicht das Funkeln der Sterne aufgefallen: Manche zittern, manche ändern Helligkeit und Farbe. Wodurch kommt das zustande? Planeten funkeln nur sehr schwach. Warum? Warum liefert das Hubble-Teleskop mit seinem Spiegeldurchmesser von bloß 2,5 m (Abb. 16) wesentlich bessere Bilder als die großen terrestrischen Teleskope mit Spiegeln von über 10 m Durchmesser?



Abb. 16: Das Hubble-Teleskop umkreist die Erde in einer Höhe von 575 Kilometern innerhalb von 96 Minuten. Es wurde 1990 im Rahmen einer Space-Shuttle-Mission ausgesetzt (Quelle: NASA).

A15 Du sitzt an einem schönen Sommerabend mit einem Cocktail am Meer und betrachtest den Sonnenuntergang. Dir fällt auf, dass die Sonne so seltsam abgeplattet ist, vor allem am unteren Rand (Abb. 17). Wodurch wird das verursacht? Bedenke, dass die Atmosphäre sich nach oben hin ausdünn. Was bedeutet das für den Lichtverlauf? Versuch eine Skizze zu machen!



Abb. 17: Kurz vor dem Untergehen ist die Sonne eigenartig abgeplattet (Foto: Martin Apolin).

A16 Die Straße in Abb. 18 sieht nass aus, obwohl sie staubtrocken ist. Das bezeichnet man als Luftspiegelung oder etwas romantischer auch als Fata Morgana. Wie kommt so etwas zu Stande? Bedenke, dass im Sommer die Straße sehr heiß wird und somit auch die Luftschichten darüber. Was bedeutet das für den Lichtverlauf? Versuch dazu eine Skizze zu machen!



Abb. 18: Eine Luftspiegelung, also eine Fata Morgana, an einem Sommertag (Quelle: Wikipedia).

A17 Skizziere den Strahlenverlauf im Inneren einer Glasfaser. Welcher Effekt spielt dabei eine Rolle? Wofür werden Glasfaserkabel verwendet?

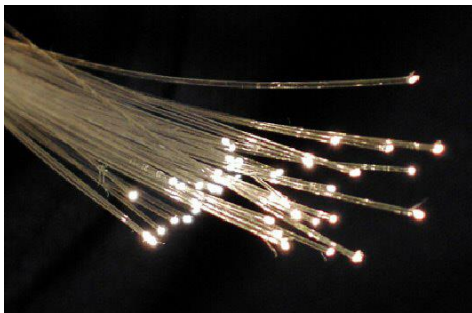


Abb. 19: Ein Bündel von Glasfasern (Foto: BigRiz; Quelle: Wikipedia)

A18 Leite das Brechungsgesetz (siehe A13) mit Hilfe des Prinzips von Fermat ab. Verwende dazu Abb. 20 und gehe von der Gleichung $t = \frac{l_1}{c_1} + \frac{l_2}{c_2}$ aus.

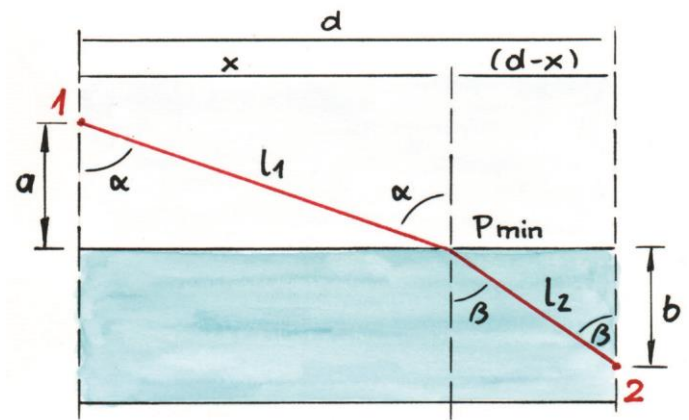


Abb. 20 zu A18 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 29.8, S. 22).

a Das Prinzip vom Fermat besagt, dass eine Welle den Weg zwischen zwei Punkten in der minimalen Zeit zurücklegt. Deshalb muss $dt/dx = 0$ gelten. Leite daher die Gleichung aus der Angabe nach dx ab und setze sie null.

b Überlege dir, wie l_1 und l_2 von x abhängen. Schreibe beide Gleichungen an.

c Berechne nun die Ableitungen $\frac{dl_1}{dx}$ und $\frac{dl_2}{dx}$, indem du das Ergebnis aus b verwendest.

d Setze dein Ergebnis aus c nun in das Ergebnis aus a ein, also in $dt/dx = 0$.

Dispersion und Farbmischung

A19 Sieh dir Abb. 21 an und überlege mit Hilfe des Brechungsgesetzes (siehe A13), welcher Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und den Farben der Lichtstrahlen bestehen muss.

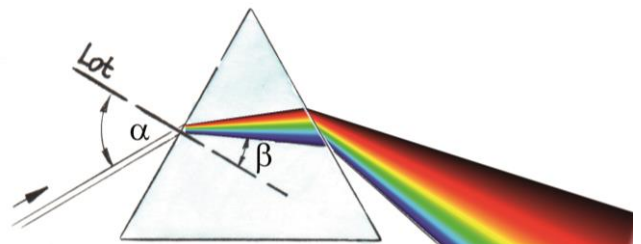


Abb. 21: Lichtbrechung an einem Prisma (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 29.11, S. 22).

A20 a In Abb. 22 siehst du zwei Diagramme. Welches ist richtig dargestellt? Überlege mit Hilfe von A19.

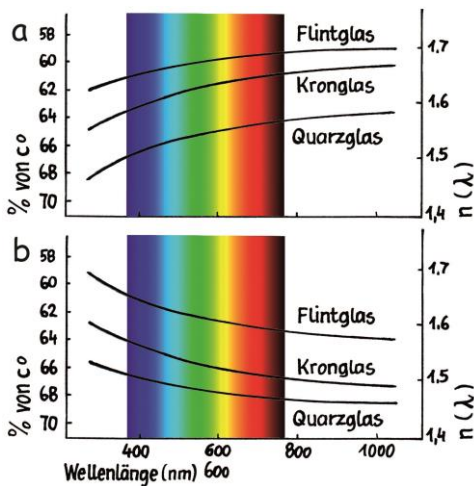


Abb. 22 zu A20a: Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Geschwindigkeit (bzw. Brechzahl) für drei Glassorten (Grafik Janosch Slama und Martin Apolin).

A20 b Sieh dir Tabelle 1 an und die Abb. 21 und 22. Was passt nicht zusammen?

A21 In Word kann man Farben benutzerdefiniert einstellen (Abb. 23). Dabei kann man den Farben Rot, Grün und Blau Werte von 0 bis 255 zuweisen. Wie viele Farben lasse sich damit in Summe darstellen? Wie groß ist die „Farbtiefe“ in bit? Diese gibt an, wie viele bits man benötigt, um einen farbigen Pixel abzuspeichern.

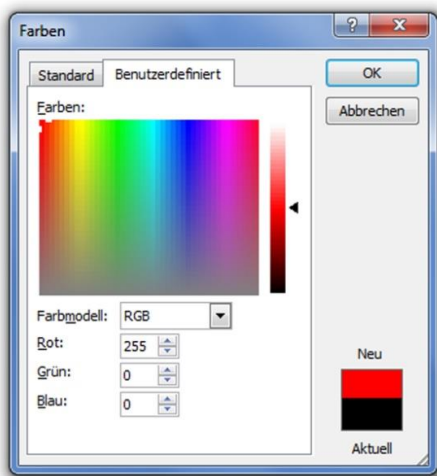


Abb. 23 zu A21 (Grafik: Martin Apolin)

Polarisation

A22 Erkläre mit Hilfe des „Gartenzaunmodells“, was mit Licht passiert, wenn es durch zwei Polfilter hintereinander geht! Was passiert, wenn die Filter parallel beziehungsweise normal orientiert sind?

A23 In Abb. 24 siehst du eine Brille mit Kunststoffgläsern, die zwischen zwei Polfiltern liegend fotografiert wurde. Erkläre, wie und warum es zu den Farberscheinungen kommt!



Abb. 24 zu A23 (Foto: Spigget; Quelle: Wikipedia)

A24 In Abb. 25 siehst du den Aufbau für einen Doppelspaltversuch. Hinter dem Doppelspalt befinden sich zwei senkrecht gestellte Polfilter. Welches Muster entsteht am Schirm, und warum ist das so? In Abb. 26 stehen die Polfilter senkrecht zueinander. Welches Muster entsteht am Schirm, und warum ist das so?

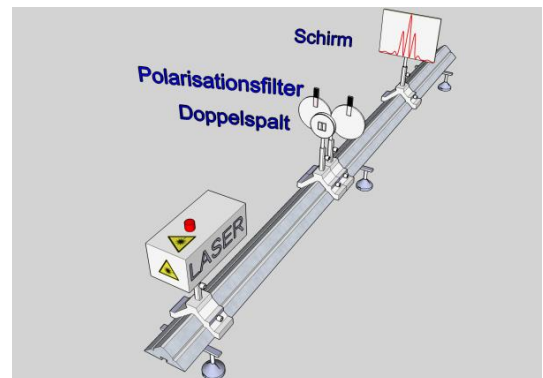


Abb. 25: Die Polfilter sind parallel ausgerichtet (Grafik: Karlsruher Institut für Technologie; Quelle: <http://psi.physik.kit.edu>).

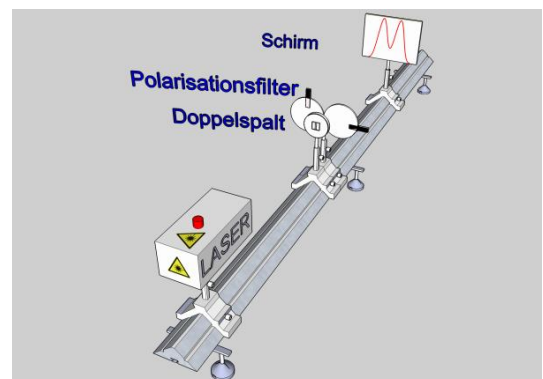


Abb. 26: Die Polfilter sind normal zueinander ausgerichtet (Grafik: Karlsruher Institut für Technologie; Quelle: <http://psi.physik.kit.edu>).

Hilfe zu A1: Sieh dir das Koordinatensystem und sein Spiegelbild in Abb. 1 an. Wohin zeigt der nach oben gerichtete Pfeil im Spiegel? Nach oben! Und der nach rechts gerichtete Pfeil? Nach rechts! Und der herausgerichtete Pfeil? Hinein! Ein Spiegel vertauscht also nicht oben und unten, nicht links und rechts, sondern vorne und hinten! Und das ist wohl schon eine kleine Überraschung! Durch das Umkehren von vorne und hinten vertauscht der Spiegel somit aber auch noch etwas anderes, nämlich den Drehsinn. Uhrzeiger bewegen sich im Spiegel gegen den Uhrzeigersinn. Wie das aussieht, wenn ein Spiegel wirklich links und rechts vertauscht, kannst du in Abb. 27 sehen. Im Alltag wäre das ja ein wenig unpraktisch.

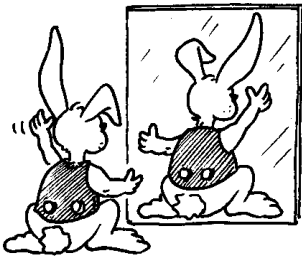


Abb. 27 zu A1
(Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A2: Auf diese Frage antworten die meisten mit „ja“. Das ist ein Beweis dafür, dass wir oft eine völlig ungenügende Kenntnis der alltäglichsten Dinge haben. Ein guter, sauberer Spiegel ist nämlich völlig unsichtbar. Man kann den Rahmen des Spiegels sehen, das schützende Glas oder die Gegenstände, die sich in ihm spiegeln. Aber den Spiegel selbst, dort, wo das Licht reflektiert wird, sieht man nicht. Jede reflektierende Oberfläche ist zum Unterschied von einer zerstreuen Fläche als solche völlig unsichtbar.

Hilfe zu A3: Da ein Spiegel die normal auf ihn stehende Achse vertauscht, befindet sich jedes Spiegelbild genauso weit hinter dem Spiegel wie das dazugehörige Objekt davor. Das Spiegelbild des Hinterkopfs befindet sich dadurch 20 cm hinter dem Handspiegel und somit wiederum 200 cm hinter dem Wandspiegel. Die Augen des Professors befinden sich etwa 20 cm vor seinem Hinterkopf, also 140 cm vor dem Spiegel. Somit sieht er seine sich lichternde Stelle in 340 cm Entfernung.

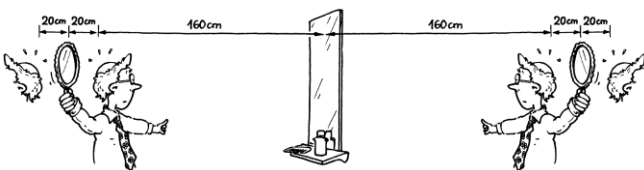


Abb. 28 zu A3 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A4: Hast du dich jemals gefragt, was die Schauspielerin in diesem Fall sieht? Sie sieht die Kamera! Wieso? Der Lichtweg ist immer umkehrbar. Es ist unmöglich, der Schauspielerin in die Augen zu sehen, ohne dass die Schauspielerin beim Blick in den Spiegel die Kamera sieht. Würde sie den Spiegel so halten, dass sie sich selbst gut sehen kann, dann würden wir rechts an ihrem Gesicht vorbeisehen und vielleicht einen gelangweilten Studioarbeiter beobachten (Abb. 29), aber niemals das Gesicht der Schauspielerin.

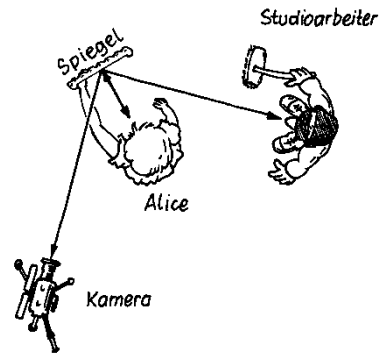


Abb. 29 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A5: Nimm an, du betrachtest deine Schuhspitzen. An welcher Stelle treffen die Lichtstrahlen von den Schuhen – sozusagen das „Schuhlicht“ – auf den Spiegel? Genau in der Mitte zwischen Boden und Augen (Abb. 30 links). Strahlen unterhalb gelangen nicht in deine Augen. Du benötigst daher den unteren Teil des Spiegels nicht. Ähnliches gilt für den oberen Teil des Spiegels. Das „Kopflicht“ muss auf halbem Weg zwischen dem obersten Punkt des Kopfs und den Augen auf den Spiegel treffen (siehe Abb. 30 rechts). Der darüber liegende Teil ist nicht nötig. Wie groß muss daher der Spiegel mindestens sein, damit man sich ganz sehen kann? Von der Hälfte zwischen Augen und Boden bis zur Hälfte zwischen Augen und Kopfspitze. Ein Wandspiegel muss daher nur halb so groß sein wie die Person, die sich darin betrachtet (Abb. 31)

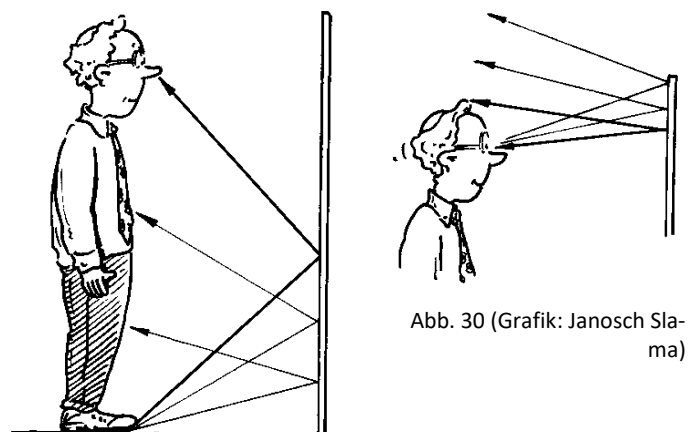


Abb. 30 (Grafik: Janosch Slama)

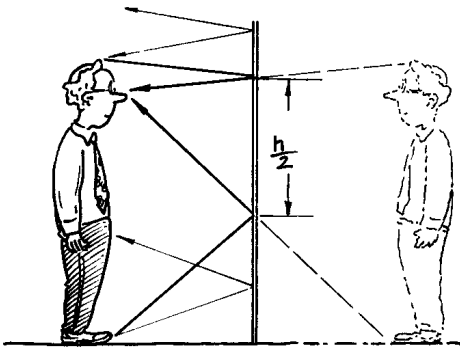


Abb. 31 (Grafik: Janosch Slama)

Hat die Entfernung zum Spiegel einen Einfluss darauf, wie viel man von sich sieht? Nein! Spiegel wirken so, wie wenn du durch ein Fenster in eine dahinter liegende virtuelle Welt blickst. Auch ein Fenster muss nur halb so groß sein wie du selbst, damit du deinen imaginären Zwilling betrachten kannst (der natürlich immer gleich weit vom Fenster entfernt ist wie du). Das ist unabhängig davon, wie weit du vom Fenster weg bist (siehe Abb. 32). Es hat daher keinen Sinn, näher zu einem Spiegel zu gehen, damit man seine Füße sieht. Was hat Sinn? Man müsste sich vorbeugen, weil dann nämlich auch Lichtstrahlen, die sonst über deinen Kopf gehen würden, in deine Augen gelangen.

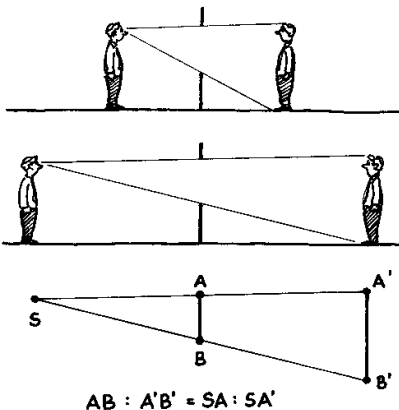


Abb. 32 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A6: Wir müssen zeigen, dass die beiden Dreiecke $A_1D_1D_4$ und $D_4A_4A_1$ invers kongruent sind, also gleich, aber gespiegelt (siehe Abb. 33). Wenn sie invers kongruent sind, dann gilt $\alpha = \beta$. Und wenn das gilt, dann haben die einfallenden und reflektierten Strahlen denselben Winkel. Beide Dreiecke haben einen rechten Winkel. Weiters haben sie die Seite A_1D_4 am Spiegel gemeinsam. Und dann sind die Seiten A_1A_4 und D_1D_4 gleich groß. Wieso? Deren Länge hängt nur von der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts ab. Der linke Teil der Wellenfront wird zuerst reflektiert. In der Zeit, in der sich das reflektierte Licht von A_1 nach A_4 bewegt, bewegt sich der rechte Teil der Lichtfront von D_1 bis zum Spiegel bei D_4 . Diese beiden Strecken werden in derselben Zeit

zurückgelegt und müssen daher auch gleich groß sein. Wir haben also zwei gleich lange Seiten und einen gleichen Winkel! Was bedeutet das? Die Dreiecke haben keine andere Chance, sie müssen in diesem Fall (invers) kongruent sein. Dann sind aber die Winkel α und β ebenfalls gleich groß.

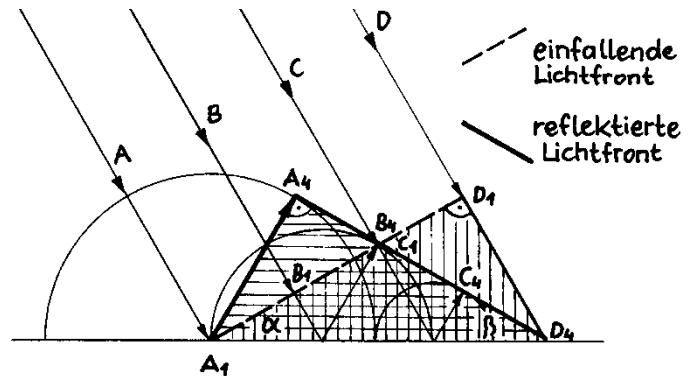


Abb. 33 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A7: Der Weg vom Spiegelbild in dein Auge ist immer der schnellste, also gerade (er läuft über C)! Aus geometrischen Gründen muss somit α' so groß sein wie β . Ein Spiegelbild befindet sich andererseits scheinbar immer so weit hinter dem Spiegel wie das Objekt vor dem Spiegel. Deshalb muss gelten $\alpha' = \alpha = \beta$, und das ist nichts anderes als das Reflexionsgesetz.

Hilfe zu A8: Gilt bei der nächtlichen Straßenszene auf einmal das Reflexionsgesetz nicht mehr?! Doch, dieses Gesetz gilt immer. Weil aber die Straße rau ist, tritt hier die sogenannte diffuse Reflexion auf (siehe Abb. 34).

Bei der Reflexion werden parallel einfallende Lichtstrahlen zerstreut. Aber für jeden einzelnen Strahl gilt trotzdem das Reflexionsgesetz. Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind zur Tangentialebene gleich groß. Durch diese Diffusion gelangt auch wieder Licht zum Autofahrer zurück. Was würden wir von der Straße sehen, wenn sie vollständig verspiegelt wäre? Nichts, sie wäre stockdunkel!

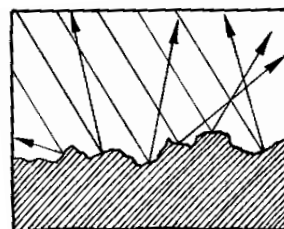


Abb. 34 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A9: Das hat mit der Wellenlänge der jeweiligen EM-Wellen zu tun. Die Radarwellen haben in unseren Beispielen die größte Wellenlänge, deshalb wirkt aus ihrer Sicht das Gitter wie eine glatte Fläche. Aus der Sicht der Trägerwellen

des Satellitenfernsehens wirkt wiederum die Sat-Schüssel wie ein polierter Spiegel. Je kleiner die Wellenlänge, desto glatter muss die Oberfläche des Spiegels sein.

Hilfe zu A10: Damit das Licht der Kerze auf diese Art und Weise gesammelt werden kann, müsste der Brechungswinkel β immer null sein, weil das Licht beim Übergang von Luft in Glas parallel zum Lot gebrochen wird. Kann das sein? Nein! Das Brechungsgesetz lautet $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$. Wenn $\sin \beta$ null ist, muss auch v_2 null sein. Das Licht würde praktisch im Glas stecken bleiben und könnte nie ein Bild erzeugen. Die andere Erklärung dafür, warum Abb. 11 nicht funktionieren kann, ist die, dass das Fermat'sche Prinzip nicht erfüllt wäre. Denn alle Strahlen müssen zur selben Zeit ankommen. Nun haben aber alle Lichtstrahlen den gleichen Weg durch das Glas. Somit können die Randstrahlen keine Zeit gewinnen und kommen später an. Die charakteristische Linsenkrümmung entsteht daher aus der Notwendigkeit, die „Glaslaufzeit“ der Randstrahlen zu verringern.

Hilfe zu A11: Du kannst die Frage mit der Wasserblase lösen, indem du das Brechungsgesetz anwendest und dir überlegst, wie die Lichtstrahlen bei den Übergängen gebrochen werden. Zuerst erfolgt eine Brechung vom Lot und dann eine zum Lot. Beide Brechungen führen dazu, dass der Lichtstrahl nach außen abgelenkt wird.

Du kannst das Problem aber auch ganz allgemein anpacken. Was macht ein großer Wassertropfen mit parallelem Licht? Er wirkt wie eine dicke Sammellinse und wird es bündeln (siehe Abb. 36a). Was passiert mit parallelem Licht, wenn du unsere Luftblase mit

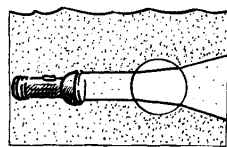


Abb. 35 (Grafik: Janosch Slama)

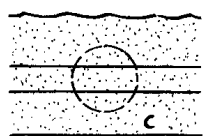
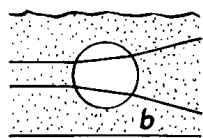
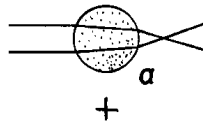


Abb. 36 (Grafik: Janosch Slama)

diesem großen Wassertropfen ganz ausfüllst? Weil sich das Licht nur in Wasser bewegt, läuft es gerade weiter (c). Die kombinierte Wirkung der Luftblase und des Tropfens ist daher ein gerader Strahl. Welche Wirkung führt kombiniert mit Zusammenlaufen der Strahlen zu keiner Wirkung? Auseinanderlaufen! Also muss die Luftblase alleine dazu führen, dass

die Strahlen divergieren (also $c - a = b$). Und genau das macht sie.

Hilfe zu A12: Das Licht wird beim Übergang vom Wasser zur Luft vom Lot gebrochen und täuscht uns dadurch einen größeren Sehwinkel vor, d.h. der Öffnungswinkel der beiden Strahlen ist größer als in Luft. Daher erscheinen uns Objekte größer.

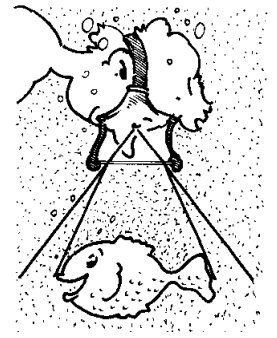


Abb. 37 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A13 a: Bei gleichem Eintrittswinkel α gilt $\sin \beta \sim n_1/n_2$. Wasser hat eine größere Brechzahl als Luft (Tab. 1), daher ist beim Übertritt des Lichtstrahls von Wasser in das Glas n_1/n_2 größer und somit auch $\sin \beta$. Ein größerer Winkel zum Lot bedeutet aber eine geringere Brechung. Somit nimmt die Brechkraft einer Lupe unter Wasser ab. Auch die Brechkraft der Augen nimmt deshalb unter Wasser sehr stark ab, wodurch man weitsichtig wird und alles unscharf sieht.

Hilfe zu A13 b: Wenn du das Brechungsgesetz nach β umformst, erhältst du $\beta = \arcsin\left(\sin \alpha \frac{n_1}{n_2}\right)$. Wenn du für Wasser eine Brechzahl von 1,33 einsetzt, erhältst du ab einem Winkel von $48,75^\circ$ keine Werte mehr (siehe Abb. 38), weil der Arkussinus nur im Bereich von -90° bis $+90^\circ$ definiert ist. Was bedeutet das für den austretenden Lichtstrahl?

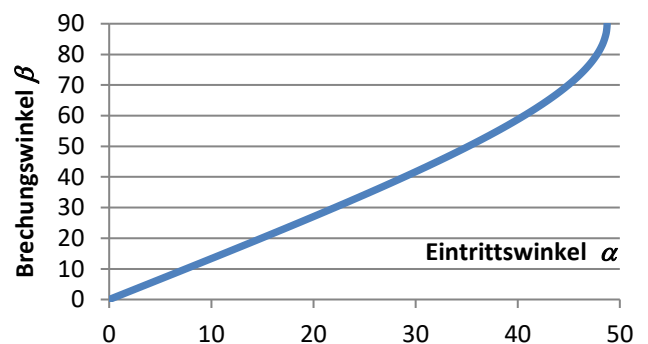


Abb. 38 (Grafik: Martin Apolin)

In Abb. 39 siehst du, was passiert, wenn Licht auf ein optisch dünneres Medium trifft, also zum Beispiel aus dem Wasser in Luft gelangt. Je größer der Einfallswinkel, desto stärker der Knick. Bei einem bestimmten Grenzwinkel verläuft der gebrochene Strahl parallel zur Wasseroberfläche (4), und bei noch größerem Winkel wird alles reflektiert (5). Man spricht daher von Totalreflexion. Weil kein Lichtstrahl mehr austre-

ten kann, gibt es auch keine Lichtbrechung mehr, und das bemerkt man auch im Brechungsgesetz.

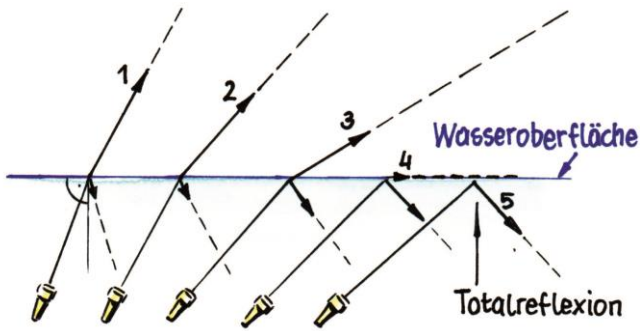


Abb. 39: Totalreflexion an der Wasseroberfläche. Der Grenzwinkel (bei 4) beträgt für Wasser $48,75^\circ$ (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 29.6, S. 21).

Hilfe zu A13 c: Beim Grenzwinkel ist der Winkel des gebrochenen Strahls zum Lot 90° (siehe Abb. 39/4) und $\sin \beta$ hat somit den Wert 1. In diesem Fall gilt $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \sin \alpha = \frac{n_2}{n_1}$ und daraus folgt $\alpha = \arcsin(n_2/n_1)$. Für Luft und Wasser erhält man den Winkel $48,75^\circ$.

Hilfe zu A13 d: Wenn man flach von unten gegen die Wasseroberfläche blickt und der Winkel zum Lot größer als $48,75^\circ$ ist, verhält sich die Wasseroberfläche wie ein Spiegel.

Hilfe zu A13 e: Weil sich seine Augen unter Wasser befinden, muss der Schützenfisch die Lichtbrechung miteinbeziehen. Ein scheinbarer Winkel von 35° unter Wasser entspricht z. B. einem tatsächlichen Überwasserwinkel von 50° . Würde er unter dem falschen Winkel spucken, wäre die Abweichung in einer Entfernung von 1 m bereits 26 cm. Was kann der Schützenfisch tun, um die Winkelabweichung gering zu halten? Er kann sich möglichst steil stellen, weil dann die einzukalkulierende Abweichung kleiner wird (würde er senkrecht stehen, gäb's gar keine Ungenauigkeit). Und das macht der Schützenfisch auch: beim Spucken nimmt er einen Winkel von 10 bis 40° zum Lot ein. Nicht dumm, dieser Fisch!

Hilfe zu A14: Die Dichte der Atmosphäre nimmt zwar im großen Maßstab mit der Höhe ab (siehe A15), aber durch ungleiche Wärmeverteilungen kommt es zu kleinen Turbulenzzellen, oft mit Durchmessern von wenigen Zentimetern. Dadurch verändert sich die Brechzahl pausenlos. Das Licht wird ständig in eine etwas andere Richtung abgelenkt und die Sterne beginnen zu zittern! Weil damit auch die Anzahl der Lichtstrahlen variiert, die von einem Stern in deine Augen gelangen, verändert sich die Helligkeit ebenfalls.

Woher kommen die Farbschwankungen? Beim Eindringen in die Atmosphäre wird das Sternenlicht wie in einem Prisma unterschiedlich stark gebrochen. Diese Abweichungen sind zwar minimal, es kann aber trotzdem passieren, dass z. B. nur das rote Licht abgeschwächt wird, und dann nimmst du das als Farbschwankung wahr.

Funkeln auch Planeten? Nur ganz wenig! Im Gegensatz zu Sternen sehen wir sie als Scheibchen und die Effekte der einzelnen Lichtpunkte heben sich beinahe auf. Das Funkeln wird nur sichtbar, wenn die Ablenkung in der Größenordnung des scheinbaren Planetendurchmessers liegt (siehe Abb. 40). Und wie ist es im Weltall? Keine Atmosphäre, kein Funkeln! Das ist der Grund, warum das kleine Hubble-Teleskop bessere Bilder liefert als die riesigen Erdteleskope.

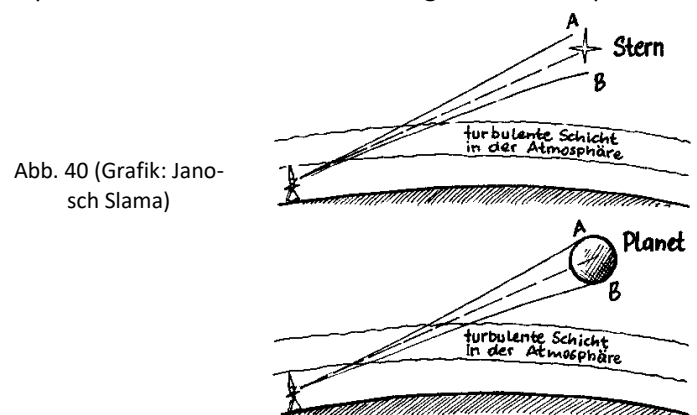


Abb. 40 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A15: Unsere Atmosphäre dünnt sich nach oben hin aus. Denk sie dir aus vielen übereinander liegenden Schichten zusammengesetzt (Abb. 41 nächste Seite). Je höher diese Schichte über der Erdoberfläche ist, desto weniger Luft lastet auf ihr und desto weniger wird sie komprimiert. Damit sinkt ihre Dichte und mit dieser auch die Brechzahl. Während diese auf Meeresniveau 1,00029 beträgt (siehe Tab. 1), ist sie in Höhe von 10 km bei einem Viertel der Luftdichte bereits auf 1,00007 abgesunken. Diese Änderung ist nicht umwerfend groß (bloß 0,02 %), aber sie reicht immerhin aus, um die Sonne platt zu machen.

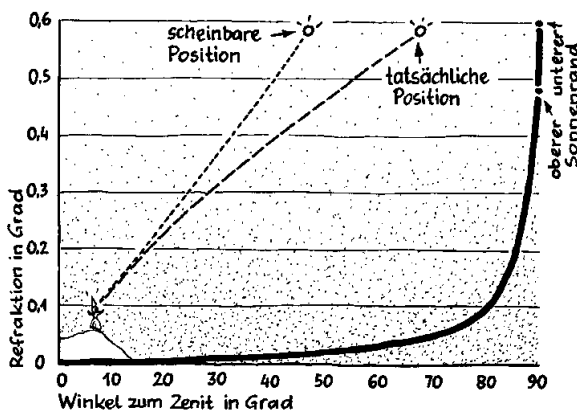


Abb. 41 (Grafik: Janosch Slama)

Schräg einfallendes Licht gelangt in immer dichtere Schichten und wird so kontinuierlich nach unten gebrochen (Abb. 41). Dadurch sehen wir alle astronomischen Objekte wie Sterne, Sonne oder Mond etwas gehoben. Das nennt man die atmosphärische Refraktion. Je größer der Winkel zum Zenit ist, desto stärker wird der Effekt. Die Refraktion nimmt kurz überm Horizont sehr stark zu. Deshalb wird der obere Rand der Sonne nur um $0,48^\circ$, der untere bereits $0,6^\circ$ gehoben. Die Differenz beträgt $0,12^\circ$. Die Sonne mit einer scheinbaren Größe von $0,5^\circ$ wird somit um fast ein Viertel ihres Durchmessers gestaucht.

Hilfe zu A16: Bei sehr starker Sonneneinstrahlung sind die Luftschichten knapp über dem Boden heißer als die darüber. Der Temperaturabfall kann auf den ersten Zentimetern gut 30°C ausmachen. Größere Wärme bedeutet geringere Dichte und somit auch eine kleinere Brechzahl. Das Licht breitet sich in Bodennähe daher schneller aus und wird vom Boden weg gebrochen (Abb. 42). Irgendwann wird der Grenzwinkel überschritten und es kommt zur Totalreflexion.

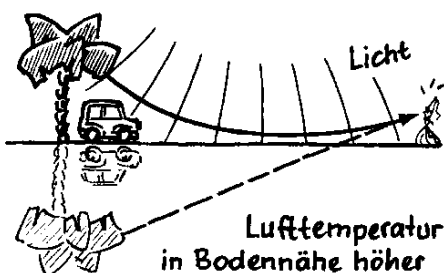


Abb. 42: Lichtverlauf bei einer Fata Morgana (Grafik: Janosch Slama).

Hilfe zu A17: Der Lichtstrahl kann aus der Glasfaser auf Grund der Totalreflexion nicht austreten (Abb. 43). Glasfasern werden vor allem zur Datenübertragung verwendet und auch bei Endoskopen (siehe Kap. 50, BB8) in der Medizin.

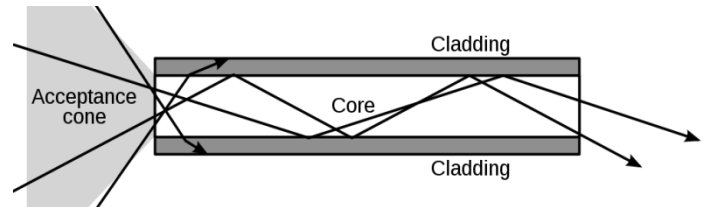


Abb. 43: core = Kern; cladding = Ummantelung; acceptance cone ist der kegelförmige Bereich, in dem das Licht einfallen kann, um durch Totalreflexion weitergeleitet zu werden (Grafik: Gringer; Quelle: Wikipedia)

Hilfe zu A18a: $\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c_1} \frac{dl_1}{dt} + \frac{1}{c_2} \frac{dl_2}{dt} = 0$

Hilfe zu A18b: In beiden Fällen kann der Satz des Pythagoras angewendet werden: $l_1^2 = a^2 + x^2$ und somit $l_1 = \sqrt{a^2 + x^2}$ sowie $l_2^2 = b^2 + (d-x)^2$ und $l_2 = \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$.

Hilfe zu A18c: $\frac{dl_1}{dx} = \frac{d(\sqrt{a^2+x^2})}{dx} = \frac{1}{2\sqrt{a^2+x^2}} \cdot 2x = \frac{x}{l_1} = \sin\alpha$
 $\frac{dl_2}{dx} = \frac{d(\sqrt{b^2+(d-x)^2})}{dx} = \frac{1}{2\sqrt{b^2+(d-x)^2}} \cdot 2(d-x) \cdot (-1) = -\frac{d-x}{l_2} = -\sin\beta$

Hilfe zu A18d: Wenn du das Ergebnis aus c in $\frac{dt}{dx}$ einsetzt, erhältst du $\frac{1}{c_1} \frac{dl_1}{dt} + \frac{1}{c_2} \frac{dl_2}{dt} = \frac{\sin\alpha}{c_1} + \frac{-\sin\beta}{c_2} = 0$ und somit durch Umformung $\frac{\sin\alpha}{c_1} = \frac{\sin\beta}{c_2}$ beziehungsweise $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2}$.

Hilfe zu A19: β ist der Winkel des gebrochenen Strahls zum Lot. Wenn du das Brechungsgesetz umformst, erhältst du $\sin\beta = \sin\alpha \cdot (c_2/c_1) \sim c_2$. Der Brechungswinkel ist in Abb. 21 bei rotem Licht größer als bei blauem. Daher muss die Geschwindigkeit eines roten Lichtstrahls in Glas auch größer sein als die eines blauen.

Hilfe zu A20 a: Die Überlegungen zeigen, dass der Brechungswinkel beim Übergang von Luft in Glas dann größer ist, wenn die Geschwindigkeit des Lichts in Glas größer ist. Rotes Licht wird weniger stark gebrochen als blaues Licht (β ist also größer; siehe A19). Daher muss die Geschwindigkeit von rotem Licht in Glas größer sein als die von blauem, und daher muss Abb. 22b richtig sein.

Hilfe zu A20 b: In der Tabelle ist nur eine Brechzahl angegeben, die daher auch streng genommen nur für eine Wellenlänge gilt. Wenn man die Dispersion berücksichtigt, müsste man einen Bereich für die Brechzahl angeben. Würde für alle Farben dieselbe Brechzahl gelten, gäbe es keine Dispersion.

Hilfe zu A21: Jede Farbe kann 256 Werte aufweisen (0 bis 255). Daher kann man durch Mischung in Summe $256^3 \approx 16,7$ Millionen Farben darstellen. Wie viele bit braucht man, um eine Zahl von 0 bis 255 darzustellen? Man benötigt dazu 8 bit, weil die Binärzahl 11111111 dezimal 255 ergibt. Um daher einen Pixel zu speichern, der etwa 16,7 Millionen Farben haben kann, benötigt man eine Farbtiefe von $3 \cdot 8 \text{ bit} = 24 \text{ bit}$.

Hilfe zu A22: Normales Licht ist unpolarisiert. Der elektrische Feldvektor schwingt in beliebigen Richtungen quer zur Ausbreitungsrichtung (Abb. 44 a). Bei polarisiertem Licht schwingt der Feldvektor nur in einer Richtung (b). Geht das Licht durch einen zweiten, parallel orientierten Filter, passiert nichts (Abb. 45 a). Steht der zweite Filter quer (b), wird das Licht ausgelöscht. Das gilt auch für einzelne Photonen. Bei Zwischenstellungen findet, je nach Stärke der Drehung, eine Abschwächung des Lichts statt. Für ein einzelnes Photon kann man eine Wahrscheinlichkeit angeben, mit der es durchkommt oder nicht.

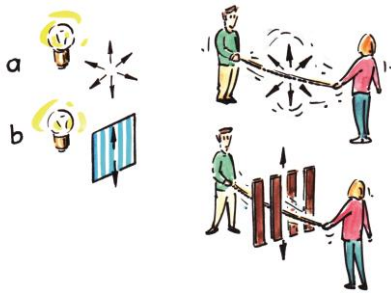


Abb. 44: Unpolarisiertes und polarisiertes Licht und Analogie mit dem „Gartenzaunmodell“ (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 36.24, S. 93).

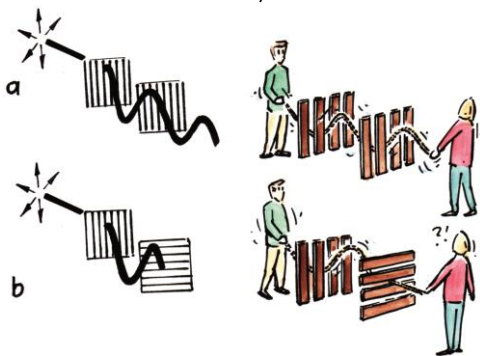


Abb. 45: Verhältnisse bei zwei Polfiltern und Analogie mit dem „Gartenzaunmodell“. Ist der zweite Zaun unter 90° verdreht, kann das Seil nicht schwingen. Analog ist es auch mit Lichtwellen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 36.25, S. 93).

Hilfe zu A23: Auch Kunststoffe wie Brillengläser können optisch aktiv sein, wobei der Drehwinkel von der mechanischen Spannung abhängt. Man spricht daher von Span-

nungsoptik. Man platziert den Kunststoff zwischen zwei Polfiltern und beleuchtet ihn. Weil die Drehung der Schwingungsebene auch von der Wellenlänge abhängt, werden nicht alle Farben gleich stark gedreht und somit vom zweiten Filter unterschiedlich stark abgeschwächt. Aus dem dadurch entstehenden Farbmuster kann man die Belastung an den verschiedenen Stellen ablesen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Kunststoffgläser durch das Einpassen in die Fassung am Rand unter Spannung stehen.

Hilfe zu A24: Wenn sich hinter dem Doppelspalt zwei senkrecht gestellte Polfilter befinden, kann man die Photonen, die durch den linken und rechten Spalt gehen, nicht unterscheiden. Daher entsteht das bekannte Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen (Abb. 25). Wenn man Polfilter jedoch kreuzt, könnte man feststellen, durch welchen Spalt die Photonen gegangen sind. Sie sind quasi markiert. Deshalb verschwindet das Interferenzmuster - man sieht nur zwei helle Streifen. Das Interessante dabei ist, dass man gar nicht messen muss, durch welchen der beiden Spalte das Photon gegangen ist. Allein die Tatsache, dass man es messen *könnte*, genügt, dass das Interferenzmuster verschwindet (siehe auch Kap. 33).