1 Im Wasser wird's bunt: Licht, Brechung und Farben

Übersicht

1.1 Lichtbrechung an Grenzflächen 1
1.2 Was ist Licht? - Das elektromagnetische Spektrum 7
1.3 Farben 12
1.4 Ein tieferer Blick nach oben - der Regenbogen 20
Aufgaben 33
Lösungen 34

1.1 Lichtbrechung an Grenzflächen

Wir beginnen unseren Ausflug in die Welt der Optik da, wo alles Leben seinen Ursprung hat, nämlich im Wasser. Genauer gesagt in der Zoohandlung um die Ecke. Auf Abb. 1.1 sehen wir einen Fisch im Aquarium, namentlich einen *Glyptoperichtys gibbiceps*. Wenn

Abb. 1.1 Ein Fisch im Aquarium, betrachtet an der Ecke eines Aquariums. Der Kopf des Tiers und auch Teile des Steins darunter sind doppelt zu sehen. In Abb. 1.2 ist die Situation skizziert.

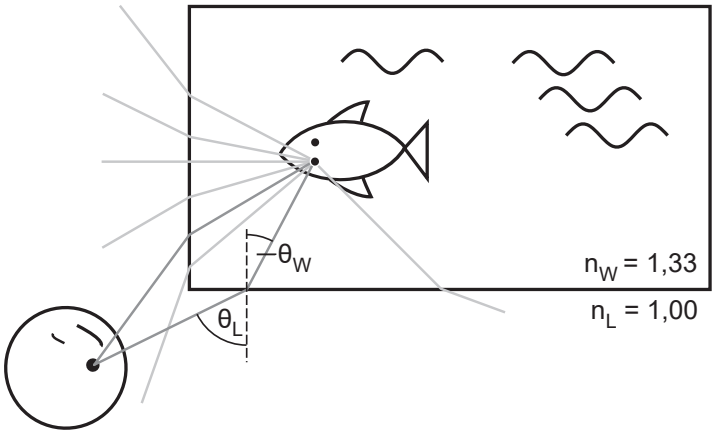

Abb. 1.2 Skizze der Fischbeobachtung in Draufsicht. Grau eingezeichnet sind die vom linken Auge des Fischs ausgehenden Lichtstrahlen. Treffen sie auf die Grenzfläche Wasser-Luft, so werden sie gebrochen, also von ihrem ursprünglichen Weg abgelenkt. Zum Effekt des „Doppelfischs" kommt es nun dadurch, dass durch die Brechung nicht nur ein, sondern zwei Lichtstrahlen (dunkelgrau) den interessierten Beobachter erreichen, und zwar pro Grenzfläche je einer. Dies gilt für jeden Punkt des Fischkopfs, nicht nur das Auge. n_{W} und n_{L} geben die Brechungsindizes in Wasser und Luft an. θ_{W} bezeichnet den Einfallswinkel des Lichtstrahls im Wasser auf die Grenzfläche, θ_{L} den Austrittswinkel in der Luft.

man sich mit der Anatomie dieses Tierchens näher auseinandersetzt, stellt man fest, dass es, wie die meisten Tiere, nur einen Kopf besitzt. Trotzdem erkennen wir hier im Bild eindeutig zwei linke Augen bzw. das linke Auge zweimal. Warum? Damit sind wir schon mitten in der Strahlenoptik (oder geometrischen Optik), also in der physikalischen Betrachtungsweise des Lichts als Strahlen. Im Laufe des Buchs werden wir noch weitere Betrachtungsweisen kennenlernen (in Kap. 4 und Kap. 7).

Grund für das scheinbar doppelte Auge ist die Lichtbrechung an Grenzflächen zwischen zwei Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex, in diesem Falle zwischen Wasser und Luft. Das bedeutet einfach, dass jeder auf diese Grenzfläche treffende Lichtstrahl um einen bestimmten Winkel abgelenkt wird. Genauer beschrieben ist der Sachverhalt in Abb. 1.2.

Die Stärke dieser Ablenkung ist abhängig vom Auftreffwinkel: Der Strahl senkrecht zur Grenzfläche passiert diese ohne Richtungsänderung, mit steigendem Winkel zwischen Einfallslot und Strahl nimmt die Brechung aber zu. Als Einfallslot bezeichnet man die Gerade, die senkrecht zur Grenzfläche steht (ähnlich zu einem Baum, der senkrecht auf dem ebenen Boden steht). In Formeln lässt sich die Ablenkung im sogenannten Snelliusschen Brechungsgesetz darstellen:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \tag{1.1}$$

In Worten: Je größer der Unterschied der Brechungsindizes zweier Medien ist, desto stärker wird der Strahl beim Übergang von seinem eigentlichen Weg abgelenkt, wie in Abb. 1.3 zu sehen ist. θ_1 und θ_2 beschreiben die Winkel zwischen Strahl (grau) und einer auf der Grenzfläche senkrecht stehenden Linie, dem sogenannten Einfallslot (schwarz gestrichelt), und nicht, wie vielleicht angenommen, der Grenzfläche selbst. Die Strahl-

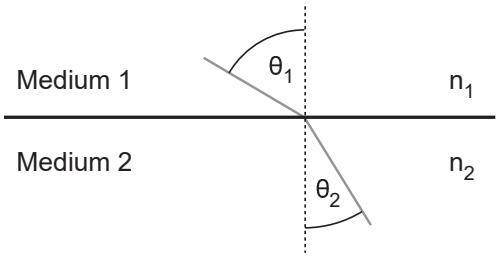

Abb. 1.3 Strahlengang an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes n_1 und n_2. Das Einfallslot ist gestrichelt eingezeichnet. Ob das Licht nun von Medium 1 zu Medium 2 läuft oder andersherum, spielt für die Berechnung keine Rolle.

richtung des Lichts (von Medium 1 zu Medium 2 oder andersherum) spielt hierbei keine Rolle, der Lichtweg lässt sich einfach umkehren. n_1 und n_2 sind die Brechungsindizes der beiden Medien.

Generell bewegt sich der Wert von n für sichtbares Licht, abhängig vom Material, meist zwischen 1 und 2, mitunter aber auch höher. So besitzt ein Diamant einen Brechungsindex von etwa $n_\mathrm{D} = 2,42$. Tabelle 1.1 zeigt beispielhaft einige Werte.

Der Brechungsindex eines Mediums kann von verschiedenen Faktoren abhängig sein, beispielsweise von der Temperatur des Mediums (zum Beispiel wird er in Luft mit steigender Temperatur kleiner) oder auch der Frequenz und der Wellenlänge (also der Farbe) des einfallenden Lichts. Letzteres bezeichnet man als Dispersion, sie spielt zum Beispiel beim Regenbogen eine Rolle. (Hierzu mehr in Abschnitt 1.3.) Ein Medium mit höherem Brechungsindex nennt man optisch dichter, eines mit niedrigerem optisch dünner.

Eine Sache ist jetzt noch ungeklärt, vielleicht ist sie euch auch schon aufgefallen. Die Grenzfläche Wasser-Luft, von der die Rede war, existiert doch an den Seiten des Aquariums überhaupt nicht. Zwischen Wasser und Luft befindet sich üblicherweise ja noch das Aquarium, also eine Schicht Glas. Ohne diese wäre es wohl auch etwas undicht. Also hat man statt zwei insgesamt drei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes, und das Licht passiert zwei Grenzflächen: Wasser-Glas und Glas-Luft. Tatsächlich spielt diese zusätzliche Schicht für die Brechungswinkel aber keine Rolle. Warum, könnt ihr in Aufgabe 1.2 herleiten.

Tab. 1.1 Brechungsindizes verschiedener Materialien (bei $20\,^\circ\mathrm{C}$ und $\lambda = 590\,\mathrm{nm}$)

Material	**Brechungsindex** n
Luft	$1,00$
Wasser	$1,33$
Glas	$1,45$ bis etwa $1,60$, je nach Zusammensetzung
Diamant	$2,42$

1.1.1 Die Fresnelschen Formeln

Wenn ihr euch noch einmal Abb. 1.1 anseht, fällt euch neben dem Fisch sicherlich auch die Spiegelung der Deckenbeleuchtung im Glas auf. Ihr seht beides, da das Licht des Fischs durch die Grenzfläche transmittiert, also durchgelassen, und die Deckenbeleuchtung dort reflektiert, also zurückgeworfen, wird. Der Strahlengang der Transmission wird mit dem schon bekannten Snelliusschen Brechungsgesetz beschrieben. Auch die Reflexion tritt immer dann auf, wenn Licht auf eine Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex trifft. Die Ablenkung des Lichtstrahls lässt sich hier sehr einfach bestimmen, es gilt stets: Reflexionswinkel ist gleich Einfallswinkel:

$$\theta_{\mathrm{R}} = \theta_{\mathrm{E}} \tag{1.2}$$

Diese Winkel liegen wieder zwischen Lichtstrahl und Einfallslot.

Interessanter wird es, wenn man sich mit den Intensitäten des reflektierten und transmittierten Lichts beschäftigt. Abb. 1.4 zeigt einen Meterstab, der so an einem Aquarium hängt, dass sich ein Arm im Wasser und der andere in der Luft befindet. Bei Betrachtung von außen dominiert je nach Blickwinkel entweder die Transmission des im Wasser befindlichen Teils oder die Reflexion des außerhalb des Aquariums liegenden Stücks. Das heißt, die Intensität von Transmission und Reflexion ist nicht konstant, sondern abhängig vom Winkel zwischen Lichtstrahl und Grenzfläche. Dieses Verhalten wird mit den Fresnelschen Formeln beschrieben.

Sie dienen dazu, die Transmissions- und Reflexionsfaktoren sowie die Transmissions- und Reflexionsgrade zu bestimmen, wenn Licht auf eine Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex trifft. Die Unterscheidung zwischen senkrechter und paralleler Polarisation beschreibt die Richtung des elektromagnetischen Felds des einfallenden Lichts. Darauf wird später im Buch eingegangen, in Abschnitt 5.2.2.

In Tabelle 1.2 sind die verschiedenen Fresnelschen Formeln übersichtlich dargestellt. Hierbei beschreibt θ_{E} den Einfallswinkel im Einfallsmedium mit Brechungsindex n_{E} und n_{T} den Brechungsindex des zweiten Mediums, wie in Abb. 1.5 skizziert. Dort findet ihr auch anschauliche Graphen zu den Formeln. Transmissions- und Reflexionsfaktor beschreiben das Verhalten der Amplituden, also des Ausschlags der elektromagnetischen Welle. Für uns von größerer Bedeutung ist aber die Intensität der Welle. Dafür nutzt man den Transmissions- und Reflexionsgrad. Um diese zu erhalten, werden die Faktoren quadriert (und bei der Transmission mit einem weiteren Vorfaktor multipliziert). Genaueres zu Amplitude und Intensität gibt es in Abschnitt 4.1.5. Wenn ihr euch jetzt fragt, was das mit fettigem Papier und nassen Klamotten zu tun haben könnte, solltet ihr einen Blick in Aufgabe 1.5 werfen.

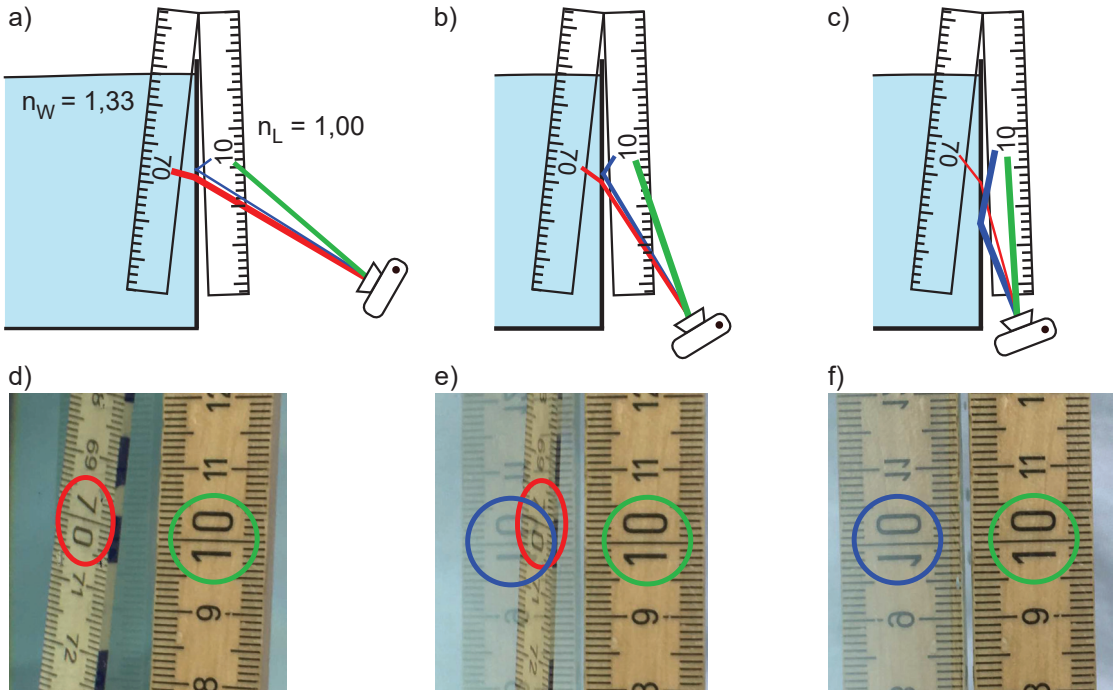

Abb. 1.4 Vorneweg: Lasst euch von diesen Skizzen nicht abschrecken, eigentlich ganz einfach. a), b), c) Skizzen des Meterstabs, der über der Kante des Aquariums hängt, mit der Kamera in unterschiedlichen Abständen. Durch den sinkenden Abstand der Kamera zur Grenzfläche nimmt der Betrachtungswinkel von a) nach c) zu, mit ihm auch die Einfallswinkel des Lichts auf die Grenzfläche. Die die Kamera erreichenden Lichtstrahlen sind rot (transmittierter Strahl, von der Siebzig im Wasser) blau (reflektierter Strahl, von der Zehn in der Luft) und grün (direkter Strahl von der Zehn) gezeichnet. d), e), f) Mit steigendem Einfallswinkel von d) nach f) nimmt die Transmission ab (die Siebzig verschwindet) und die Reflexion zu (das Spiegelbild der Zehn erscheint).

Tab. 1.2 Die Fresnelschen Formeln

	Für alle Formeln gilt $B = \sqrt{n_\mathrm{T}^2 - n_\mathrm{E}^2 \sin^2\theta_\mathrm{E}}$	
Polarisation	**Transmissionsfaktor**	**Transmissionsgrad**
Senkrecht	$t_\mathrm{s} = \dfrac{2n_\mathrm{E}\cos\theta_\mathrm{E}}{n_\mathrm{E}\cos\theta_\mathrm{E} + B}$	$T_\mathrm{s} = \dfrac{B}{n_\mathrm{E}\cos\theta_\mathrm{E}} t_\mathrm{s}^2$
Parallel	$t_\mathrm{p} = \dfrac{2n_\mathrm{E}\cos\theta_\mathrm{E}}{n_\mathrm{T}\cos\theta_\mathrm{E} + \dfrac{n_\mathrm{E}}{n_\mathrm{T}} B}$	$T_\mathrm{p} = \dfrac{B}{n_\mathrm{E}\cos\theta_\mathrm{E}} t_\mathrm{p}^2$

	Reflexionsfaktor	**Reflexionsgrad**
Senkrecht	$r_\mathrm{s} = \dfrac{n_\mathrm{E}\cos\theta_\mathrm{E} - B}{n_\mathrm{E}\cos\theta_\mathrm{E} + B}$	$R_\mathrm{s} = r_\mathrm{s}^2$
Parallel	$r_\mathrm{p} = \dfrac{n_\mathrm{T}\cos\theta_\mathrm{E} - \dfrac{n_\mathrm{E}}{n_\mathrm{T}} B}{n_\mathrm{T}\cos\theta_\mathrm{E} + \dfrac{n_\mathrm{E}}{n_\mathrm{T}} B}$	$R_\mathrm{p} = r_\mathrm{p}^2$

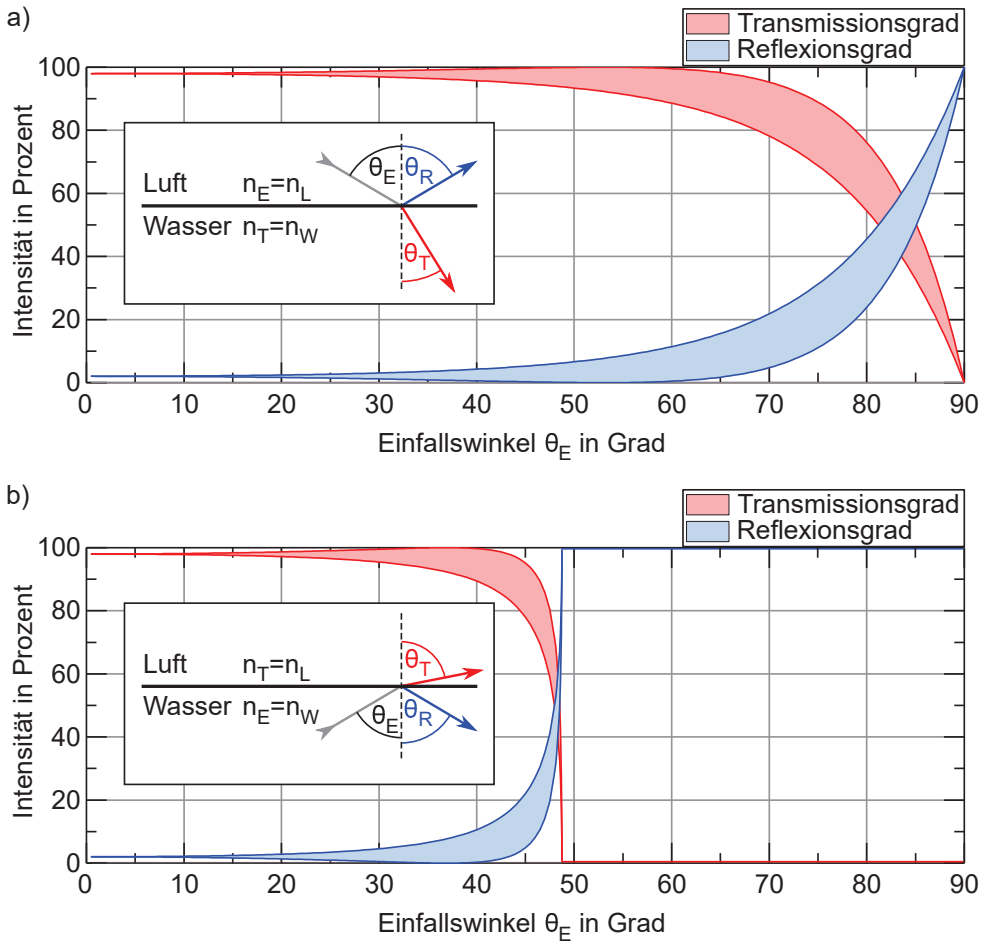

Abb. 1.5 a) Transmissions- und Reflexionsgrad beim Übergang von Luft zu Wasser in Abhängigkeit vom Einfallswinkel θ_E, berechnet mithilfe der Fresnelschen Formeln. Bei kleinen Einfallswinkeln, also bei senkrechtem Blick auf die Grenzfläche, wird ein Großteil des Lichts transmittiert und die Reflexion ist nur sehr schwach (etwa $2\,\%$). Steigt der Einfallswinkel des Lichts, nimmt die Reflexion bis auf $100\,\%$ zu, die Transmission nimmt ab. Sichtbar ist dieser Effekt in Abb. 1.4 am Aquarium. b) Hier ist der gleiche Effekt gezeigt, nur diesmal beim Übergang von Wasser zu Luft. Die Trends sind identisch zu a), allerdings passiert hier etwas Interessantes bei $\theta_\mathrm{E} = 48,8°$: Bereits bei diesem Winkel ist die Transmission auf $0\,\%$ abgefallen, jegliches Licht wird reflektiert. Dies bleibt so für alle weiteren Einfallswinkel bis $90°$, und man nennt diesen Effekt Totalreflexion. Abschließend sei noch angemerkt: Der Grund, warum die Graphen anstatt als eine Linie als breite Streifen dargestellt werden, ist, dass sich der tatsächliche Wert von Transmission und Reflexion irgendwo innerhalb dieser Fläche bewegt, da er auch von der Polarisation des einfallenden Lichts abhängt. Mehr dazu in Abschnitt 5.2.2.

1.1.2 Totalreflexion

In Abb. 1.5 b) kommt es bei $\theta_\mathrm{E} = 48,8°$ zur sogenannten Totalreflexion. Dies bedeutet, dass ab diesem Winkel, dem sogenannten kritischen Winkel θ_k, sämtliches einfallendes Licht vollständig an der Grenzfläche reflektiert wird. Er berechnet sich allgemein über

$$\theta_\mathrm{k} = \arcsin\left(\frac{n_\mathrm{T}}{n_\mathrm{E}}\right) \tag{1.3}$$

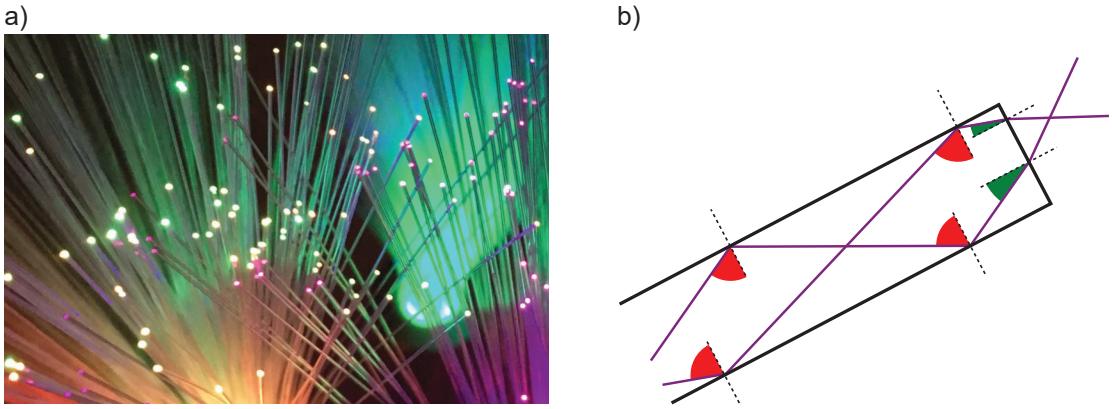

Abb. 1.6 a) Bunte Glasfaserlichter. Sie leuchten ausschließlich an ihren Enden, da das Licht zuvor die Faser aufgrund der Totalreflexion nicht verlassen kann. b) Strahlengang in solch einer Glasfaser. Die Lichtstrahlen (violett) treffen oft auf die Grenzfläche Faser-Luft, können diese aber nicht passieren, da die Einfallswinkel (rot) immer größer als der kritische Winkel sind. Erst am Faserende werden sie ausgekoppelt, hier sind die Einfallswinkel (grün) unterhalb des kritischen Winkels.

mit den Brechungsindizes der Medien des einfallenden (n_E) und des transmittierten (n_T) Strahls. Nur für $n_\mathrm{T} < n_\mathrm{E}$ tritt Totalreflexion auf. Ab diesem Einfallswinkel auf die Grenzfläche kann keinerlei Licht mehr das Medium verlassen, es ist darin gefangen. Eine praktische Anwendung dieses Effekts sind Glasfaserkabel, die weltweit für schnelle Internetverbindungen sorgen. Ähnlich bedeutsam sind die bunten Glasfaserlampen im heimischen Partykeller. Um das Licht durch schmale Fäden blumenartig in alle Richtungen zu verteilen, nutzen auch sie die Totalreflexion. Diese macht sich hier auffällig bemerkbar, weil das durch die einzelnen Fasern strahlende Licht ausschließlich an den Endpunkten ausgekoppelt wird, wie in Abb. 1.6 a) zu sehen ist. Der Rest der Faser ist dunkel, das Licht kann die Faser nicht verlassen.

Durch diese Totalreflexion wirken Grenzflächen wie perfekte Spiegel. Direkt beobachtbar ist die Totalreflexion leider nur selten, da sie nur beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium auftritt. Um sie zu sehen, muss man sich also selbst im optisch dichteren Medium befinden, also in dem mit höherem Brechungsindex. Gelingen kann dies unter Wasser mit Blick von unten auf die Grenzfläche Wasser-Luft. In Abb. 1.7 b) ist die Kamera baden gegangen und fotografiert die Hand des Autors, der seine Finger unter Wasser hält. Je nach Reflexionswinkel an der Grenzfläche tritt Totalreflexion auf.

1.2 Was ist Licht? - Das elektromagnetische Spektrum

Das sichtbare Licht ist nur ein winziger Ausschnitt aus dem gesamten elektromagnetischen Spektrum. Funk- und Radiowellen beispielsweise unterscheiden sich in ihrer grund-

http://www.springer.com/978-3-662-58938-0

Durchblick in Optik
Mit Phänomenen, Formeln und Fragen zum Verständnis

M. Gmelch, S. Reineke
2019, 242 S., Softcover
ISBN: 978-3-662-58938-0