

Reflexion und Brechung – Aufgaben

Axel Donges, Isny im Allgäu
Illustrationen von Axel Donges



© Jamie Grill/The Image Bank/Getty Images Plus

Das Modell des Lichtstrahls ist die Grundlage der geometrischen Optik. Ein Lichtstrahl breitet sich stets geradlinig aus, es sei denn, er wird reflektiert oder gebrochen. Reflexion und Brechung sind daher die wesentlichen Grundlagen der Optik, die Ihre Schülerinnen und Schüler beherrschen sollten.

Impressum

RAABE UNTERRICHTS-MATERIALIEN Physik

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Es ist gemäß § 60b UrhG hergestellt und ausschließlich zur Veranschaulichung des Unterrichts und der Lehre an Bildungseinrichtungen bestimmt. Die Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH erteilt Ihnen für das Werk das einfache, nicht übertragbare Recht zur Nutzung für den persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung. Unter Einhaltung der Nutzungsbedingungen sind Sie berechtigt, das Werk zum persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung in Klassensatzstärke zu vervielfältigen. Jede darüber hinausgehende Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Hinweis zu §§ 60a, 60b UrhG: Das Werk oder Teile hiervon dürfen nicht ohne eine solche Einwilligung an Schulen oder in Unterrichts- und Lehrmedien (§ 60b Abs. 3 UrhG) vervielfältigt, insbesondere kopiert oder eingescannt, verbreitet oder in ein Netzwerk eingestellt oder sonst öffentlich zugänglich gemacht oder wiedergegeben werden. Dies gilt auch für Intranets von Schulen und sonstigen Bildungseinrichtungen. Die Aufführung abgedruckter musikalischer Werke ist ggf. GEMA-meldepflichtig.

Für jedes Material wurden Fremdrechte recherchiert und ggf. angefragt.

In unseren Beiträgen sind wir bemüht, die für Experimente nötigen Substanzen mit den entsprechenden Gefahrenhinweisen zu kennzeichnen. Dies ist ein zusätzlicher Service. Dennoch ist jeder Experimentator selbst angehalten, sich vor der Durchführung der Experimente genauestens über das Gefährdungspotenzial der verwendeten Stoffe zu informieren, die nötigen Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen sowie alles ordnungsgemäß zu entsorgen. Es gelten die Vorschriften der Gefahrstoffverordnung sowie die Dienstvorschriften der Schulbehörde.

Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH
Ein Unternehmen der Klett Gruppe
Rotebühlstraße 77
70178 Stuttgart
Telefon +49 711 62900-0
Fax +49 711 62900-60
meinRAABE@raabe.de
www.raabe.de

Redaktion: Anna-Greta Wittnebel
Satz: Röser Media GmbH & Co. KG, Karlsruhe
Bildnachweis Titel: © Jamie Grill/The Image Bank/Getty Images Plus
Illustrationen: Axel Donges, Isny im Allgäu
Korrektorat: Johanna Stotz, Wyhl a. K.; Dr. Stefan Völker, Jena

Reflexion und Brechung – Aufgaben

Axel Donges, Isny im Allgäu
Illustrationen von Axel Donges

Fachliche Hinweise	1
M 1 Reflexion	2
M 2 Brechung	4
M 3 Totalreflexion	6
M 4 Aufgaben zur Reflexion	7
M 5 Aufgaben zur Brechung	8
M 6 Aufgaben zur polarisationsabhängigen Reflexion	9
M 7 Aufgaben zur Totalreflexion	10
M 8 Vermischte Aufgaben	11
Lösungen	12

Die Schüler lernen:

In dem vorliegenden Unterrichtsmaterial wiederholen die Schülerinnen und Schüler¹ die wichtigsten Begriffe der **geometrischen Optik**: die **Reflexion** (einschließlich **Totalreflexion**) und die **Brechung**. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf der Bearbeitung von **Übungsaufgaben** zu diesem Themenbereich.

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im weiteren Verlauf nur noch „Schüler“ verwendet.

Überblick:

Legende der Abkürzungen:

Ab = Arbeitsblatt

LEK = Lernerfolgskontrolle

Thema	Material	Methode
Reflexion	M1	Ab
Brechung	M2	Ab
Totalreflexion	M3	Ab
Aufgaben zur Reflexion	M4	Ab
Aufgaben zur Brechung	M5	Ab
Aufgaben zur polarisationsabhängigen Reflexion	M6	Ab
Aufgaben zur Totalreflexion	M7	Ab
Vermischte Aufgaben	M8	LEK

Kompetenzprofil:

Inhalt: Gerichtete, teilgerichtete und diffuse Reflexion; Totalreflexion; Brechung; s- und p-Polarisation, Brewster-Winkel

Medien: GTR/CAS; Lehrbücher und Internet

Kompetenzen: Über Basiswissen verfügen (F1), Probleme lösen (F3), Wissen kontextbezogen anwenden (F4), Phänomene beschreiben (E1), Modellvorstellungen verwenden (E3), Formeln anwenden (E4), Idealisierungen vornehmen (E5), Hypothesen aufstellen (E6), recherchieren (K3)

Fachliche Hinweise

Das vorliegende Material beschäftigt sich mit den Grundlagen der elementaren geometrischen Optik: der **Reflexion** (einschließlich der Totalreflexion) und der **Brechung**. Es wird vorausgesetzt, dass Ihren Schülern diese Begriffe bereits bekannt sind. Dennoch werden diese Begriffe in **M 1–M 3** nochmals kompakt zusammengefasst. **M 1–M 3** kann ausgelassen werden, wenn Sie diesen Themenbereich gerade behandelt haben.

In **M 4–M 7** werden Ihren Schülern Übungsaufgaben (und Lösungen) zur Reflexion, Brechung und Totalreflexion zur Verfügung gestellt. Den Abschluss bildet eine Lernerfolgskontrolle (**M 8**). Das Niveau liegt über dem von reinen Einsetzaufgaben. Das Material ist daher für die Oberstufe gedacht. Auf dem folgenden Bild erkennt man die Reflexion, die Brechung und die Totalreflexion am Übergang von Wasser zu Luft.



© RAABE 2020

© www.lernhelfer.de

M 1 Reflexion

Gerichtete und diffuse Reflexion

Breitet sich ein Lichtstrahl in einem Medium 1 aus und fällt auf die Oberfläche eines anderen Mediums 2, so wird ein Teil der einfallenden Welle reflektiert (Abb. 1).

Es werden drei Fälle unterschieden:

- a) **Gerichtete Reflexion:** Der Lichtstrahl wird nur in eine Richtung reflektiert.



Es gilt das **Reflexionsgesetz:**

Einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Lot auf der reflektierenden Fläche liegen in einer Ebene. Es gilt:

Einfallswinkel = Ausfallswinkel ($\alpha = \beta$, Abb. 1a).

Das Reflexionsgesetz gilt auch bei gekrümmten glatten Reflexionsflächen (Abb. 2).

- b) **Teilgerichtete Reflexion:** Ein Teil des Lichts wird gerichtet, der Rest wird diffus reflektiert.
- c) **Diffuse Reflexion:** Unabhängig vom Einfallswinkel wird das Licht in alle möglichen Richtungen reflektiert.

Diffuse Reflexion tritt auf, wenn die Oberfläche des Mediums 2 rau ist (z. B. Blatt Papier). Gerichtete Reflexion tritt bei glatter Oberfläche (z. B. polierte Metallfläche) auf (siehe Abb. 3 auf der nächsten Seite). Die gerichtete und die diffuse Reflexion sind Grenzfälle der teilgerichteten Reflexion.

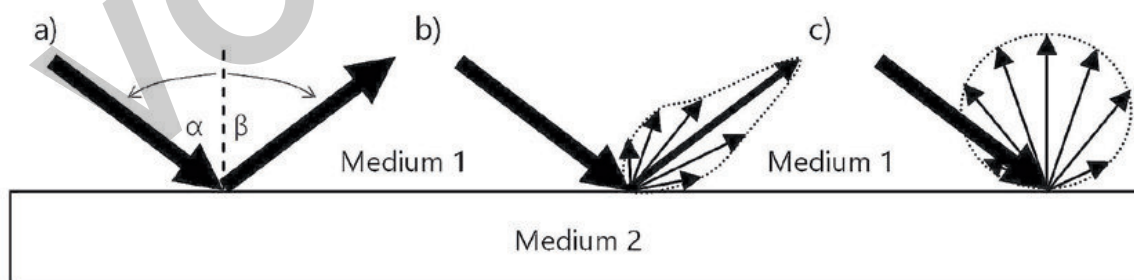


Abb. 1: Veranschaulichung der a) gerichteten, b) teilgerichteten und c) diffusen Reflexion;

© A. Donges

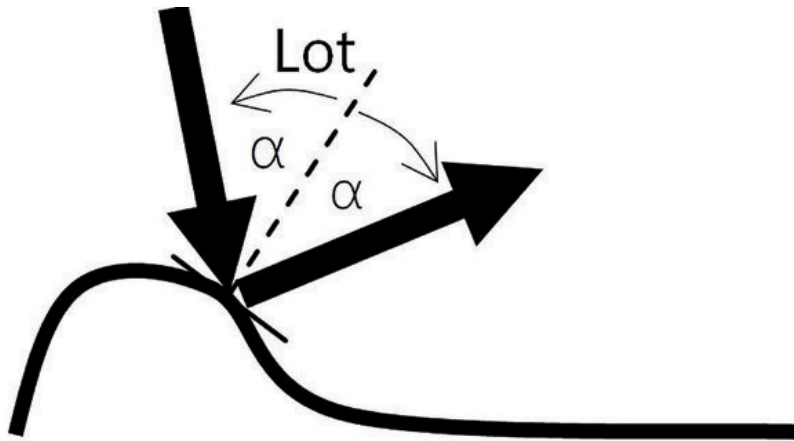


Abb. 2: Gerichtete Reflexion an einer gekrümmten Oberfläche; die Tangentialebene an die Fläche ist eingezeichnet; © A. Donges

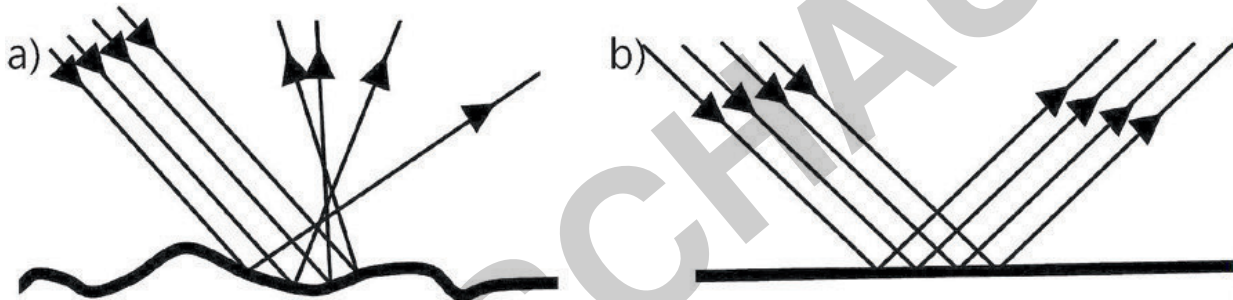


Abb. 3: Je nach Oberflächenbeschaffenheit tritt a) diffuse oder b) gerichtete Reflexion (oder eine Mischung aus beidem) auf; © A. Donges

© RAABE 2020

Reflexionsgrad

Die Reflexion erfolgt nicht vollständig, d. h., ein Teil der einfallenden Lichtleistung (P_{ein}) geht in das Medium 2 über. Für die Leistung des reflektierten Lichtstrahls gilt dann: $P_{\text{refl}} = R \cdot P_{\text{ein}}$ mit $0 \leq R \leq 1$. R heißt **Reflexionsgrad**. Die Leistung $(1 - R) \cdot P_{\text{ein}}$ dringt in das Medium 2 ein. Das eingedrungene Licht breitet sich im Medium 2 aus und/oder wird dort absorbiert. Der Reflexionsgrad R ist materialabhängig (Medium 1, Medium 2, Oberflächenbeschaffenheit). Außerdem hängt R von der Wellenlänge λ (Abb. 4), dem Einfallswinkel α und der Polarisationsrichtung des Lichts ab (Abb. 5).

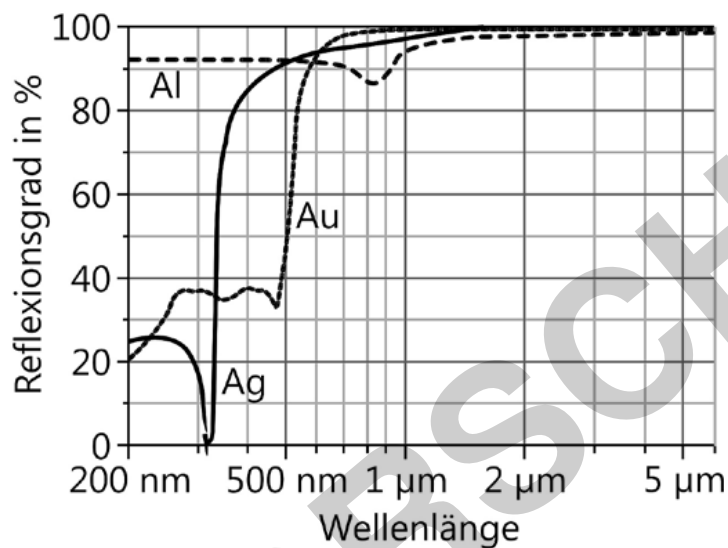


Abb. 4: Reflexionsgrad beim Übergang von Luft zu poliertem Aluminium (Al), Silber (Ag) und Gold (Au) bei senkrechtem Einfall des Lichts;

© Dr. W. Zettlmeier

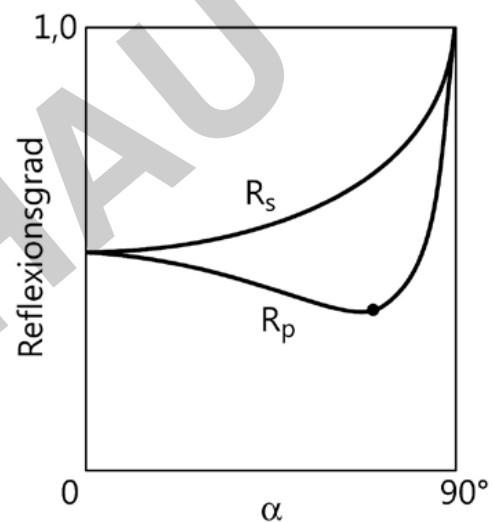


Abb. 5: Typischer Verlauf des Reflexionsgrades einer polierten Metalloberfläche. R_s bzw. R_p : Reflexionsgrad für Licht, dessen E-Feld senkrecht bzw. parallel zu der Ebene steht, die durch einfallenden und reflektierten Lichtstrahl gebildet wird (siehe auch Abb. 7);

© Dr. W. Zettlmeier

© RAABE 2020

M 2 Brechung

Brechungsgesetz

Ein Lichtstrahl breitet sich in einem transparenten Medium 1 aus und fällt auf die Grenzfläche zu einem anderen transparenten Medium 2. An der Grenzfläche wird ein Teil der einfallenden Welle reflektiert (Abb. 6). Es gilt das Reflexionsgesetz (siehe **M 1**). Der Rest dringt in das zweite Medium ein und breitet sich in diesem aus. Dabei wird das Licht gebrochen, d. h., die Ausbreitungsrichtung ändert sich beim Übergang von Medium 1 zu Medium 2 (Abb. 6). Für die Winkel – gemessen gegen das Lot – gilt das **Brechungsgesetz**: $n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2)$. Hierbei sind n_1 und n_2 die **Brechzahlen** der beiden Medien.

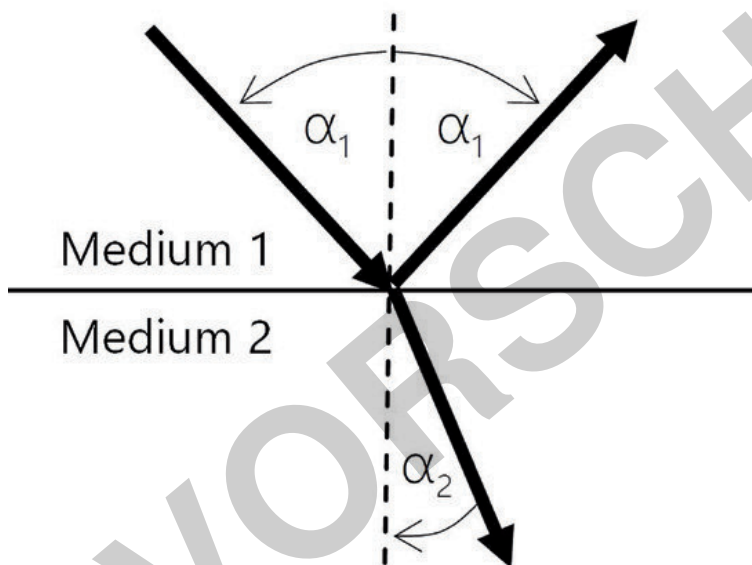


Abb. 6: Reflexion und Brechung an der Grenzfläche zwischen zwei Medien; © A. Donges

Im Fall $n_1 < n_2$ – man sagt: Medium 1 ist „optisch dünner“ als Medium 2 – ist $\alpha_2 < \alpha_1$, d. h., der Lichtstrahl wird **zum Lot hin gebrochen**. Im Fall $n_1 > n_2$ – man sagt: Medium 1 ist „optisch dichter“ als Medium 2 – ist $\alpha_2 > \alpha_1$ d. h., der Lichtstrahl wird **vom Lot weg gebrochen**.

Reflexions- und Transmissionsgrad

Je größer der Unterschied zwischen den Brechzahlen n_1 und n_2 der beiden Medien ist, umso mehr Licht wird reflektiert bzw. umso weniger Licht tritt ins zweite Medium ein. Für die Berechnung des Reflexionsgrades R nutzt man die sogenannten **Fresnel'schen Formeln**:

Formeln:

$$R_s = \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

(E-Feld steht senkrecht auf der Ebene, die einfallender und reflektierter Lichtstrahl aufspannen, Abb. 7) bzw.

$$R_p = \frac{\tan^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\tan^2(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

(E-Feld liegt in der Ebene, die einfallender und reflektierter Lichtstrahl aufspannen). Für den Transmissionsgrad (Verhältnis der Leistungen des eindringenden und einfallenden Lichtstrahls) gilt wegen des Energieerhaltungssatzes

$$T_s = 1 - \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad \text{bzw.} \quad T_p = 1 - \frac{\tan^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\tan^2(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

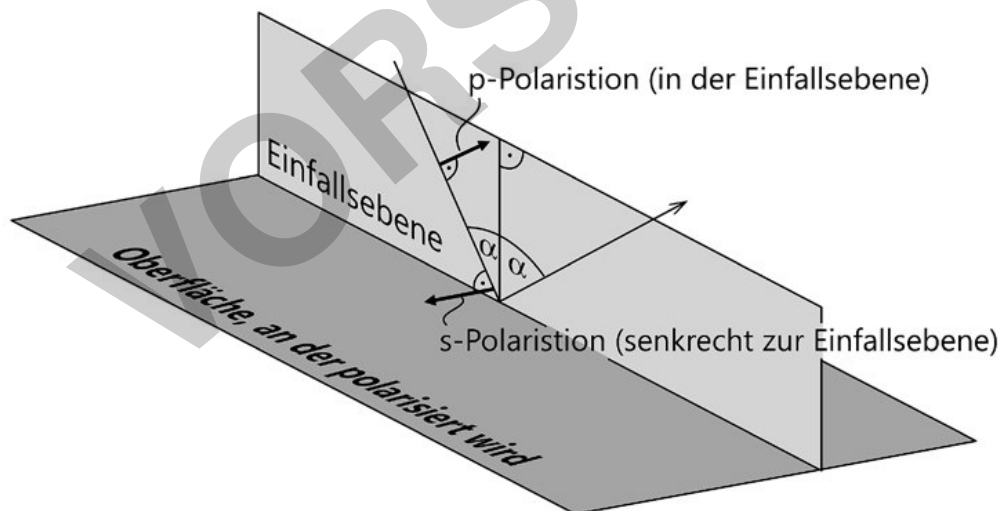


Abb. 7: Zur Definition von s- und p-Polarisation; © Dr. W. Zettlmeier

© <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/el-2009/node40.html>

(zuletzt aufgerufen am 14.10.2020)

Spezialfall: senkrechter Lichteinfall

Im Grenzfall kleiner Winkel ($\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow 0$) gilt:

$$\sin(\alpha_1 - \alpha_2) \approx \tan(\alpha_1 - \alpha_2) \approx \alpha_1 - \alpha_2 \text{ bzw.}$$

$$\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \approx \tan(\alpha_1 + \alpha_2) \approx \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\text{und damit } R_s \approx R_p \approx \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)^2.$$

Für kleine Winkel vereinfacht sich das Brechungsgesetz zu $n_1 \cdot \alpha_1 = n_2 \cdot \alpha_2$ bzw.

$$\alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \alpha_1.$$

Für den Reflexions- und Transmissionsgrad gelten somit im Grenzfall kleiner Winkel (z. B. senkrechter Lichteinfall):

$$R_s \approx R_p \approx \left(\frac{\alpha_1 - \frac{n_1}{n_2} \cdot \alpha_1}{\alpha_1 + \frac{n_1}{n_2} \cdot \alpha_1} \right)^2 = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \text{ bzw.}$$

$$T_s \approx T_p \approx 1 - \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2.$$

Beispiel

Ein Lichtstrahl breitet sich in Luft (Brechzahl $n_1 = 1,0$) aus und fällt dann senkrecht auf die Grenzfläche zu Glas (Brechzahl $n_2 = 1,5$).

Dann wird der Bruchteil

$$R_s \approx R_p \approx \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 = \left(\frac{1,5 - 1,0}{1,5 + 1,0} \right)^2 = 0,04 = 4 \%$$

der einfallenden Lichtleistung reflektiert und $0,96 = 96 \%$ der Lichtleistung dringen ins Glas ein. Dies erklärt, warum eine (praktisch) transparente Fensterscheibe auch als Spiegel wirkt. Wenn es draußen dunkel ist, kann man dieses Phänomen besonders deutlich beobachten.

M 3 Totalreflexion

Brechung bei Übergang vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium

Ein Lichtstrahl breitet sich in einem transparenten Medium 1 (Brechzahl n_1) aus und fällt auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium 2 (Brechzahl $n_2 < n_1$).

In diesem Fall gilt: $\alpha_2 > \alpha_1$ (falls $\alpha_1 \neq 0$), d. h., der Lichtstrahl wird vom Lot weg gebrochen (Abb. 8).

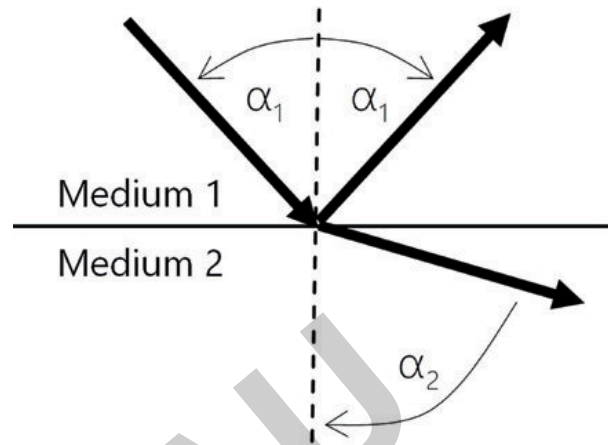


Abb. 8: Beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium wird der Lichtstrahl vom Lot weg gebrochen; © A. Donges

Grenzwinkel der Totalreflexion

Aus dem Brechungsgesetz folgt:

$\sin(\alpha_1) = \frac{n_2 \cdot \sin(\alpha_2)}{n_1}$. Der größtmögliche Ausfallswinkel α_2 ist im Fall $n_1 > n_2$:

$\alpha_{2,\max} = 90^\circ$. Damit gilt für den größtmöglichen Einfallswinkel α_1 , für den das Brechungsgesetz **gerade noch** gilt: $\sin(\alpha_{1,\max}) = \frac{n_2 \cdot \sin(90^\circ)}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} < 1$. Für Winkel

$\alpha_1 > \alpha_{1,\max}$ liegt dann **keine** Brechung mehr vor. Das bedeutet, dass das einfallende Licht zu 100 % reflektiert wird. Man spricht dann von **Totalreflexion**. $\alpha_{1,\max}$ heißt

Grenzwinkel der Totalreflexion.



Merke:

Totalreflexion tritt nur dann auf, wenn die beiden Bedingungen

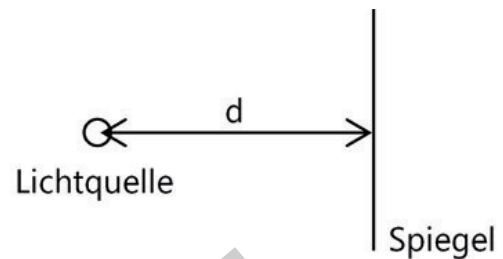
- $n_1 > n_2$ und
- $\alpha_1 > \alpha_{1,\max} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

erfüllt sind.

M 4 Aufgaben zur Reflexion

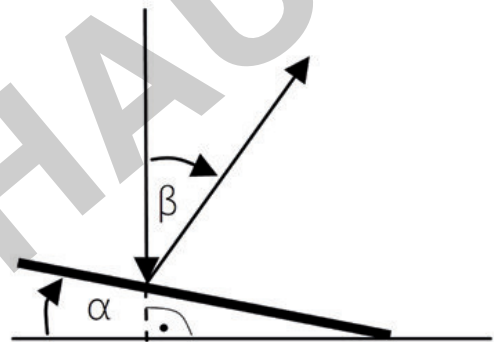
Aufgaben

1. Eine punktförmige Lichtquelle befindet sich im Abstand d vor einem ebenen Spiegel (siehe Abbildung). Zeichnen Sie einige Lichtstrahlen, die von der Lichtquelle ausgehen und auf den Spiegel treffen, ein. Konstruieren Sie mithilfe des Reflexionsgesetzes die dazugehörigen reflektierten Lichtstrahlen. Wo entsteht das Spiegelbild der Lichtquelle?

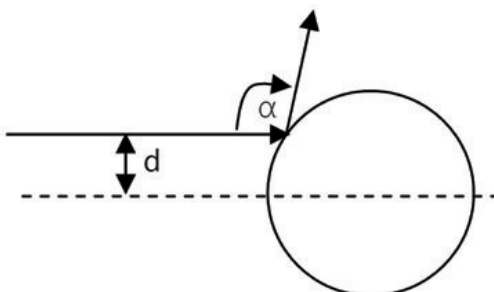


2. Wie hoch muss ein Spiegel mindestens sein, damit sich ein Betrachter komplett – von Kopf mit Hutspitze bis Fuß – sehen kann?

3. Ein Lichtstrahl fällt – wie skizziert – auf einen schräg gelagerten (Winkel $\alpha = 10^\circ$) ebenen Spiegel (siehe Abbildung). Wie groß ist der Winkel β ?



4. Ein Lichtstrahl fällt – wie skizziert – im Abstand $d = 30\text{ cm}$ auf einen verspiegelten Zylinder (Radius $r = 100\text{ cm}$). Berechnen Sie den Umlenkwinkel α .



5. Ein Lichtstrahl fällt – wie skizziert – auf einen Winkelspiegel (rechter Winkel zwischen den beiden Teilsiegeln). Berechnen Sie den Winkel α .

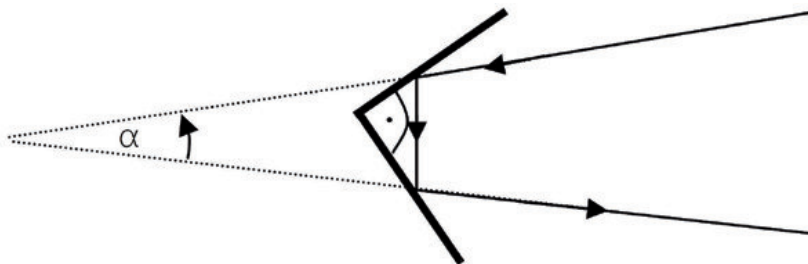


Abb. 9 bis 12, Grafiken: © A. Donges