

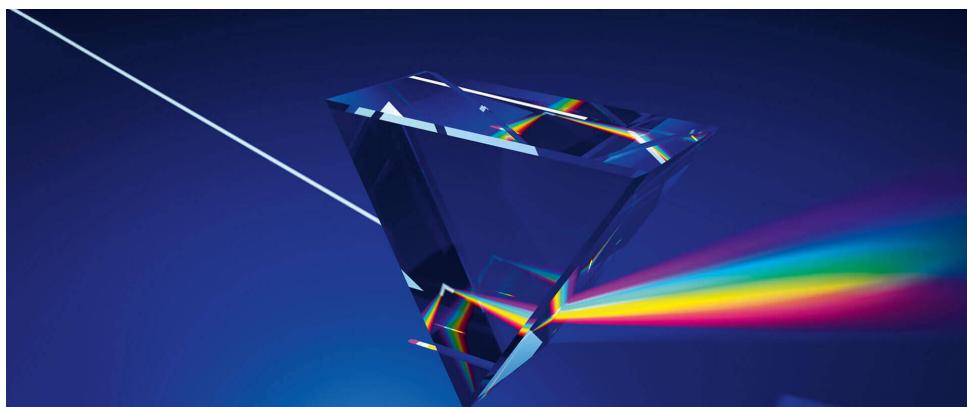
# Kapitel H

## Optik

*“Wo viel Licht ist, ist starker Schatten..”*  
- Johann Wolfgang von Goethe

Die Optik ist ein grosses Gebiet innerhalb der Elektrizitätslehre, und wenn Sie sich jetzt fragen, warum sie zur Elektrizitätslehre, genauer gesagt zur Elektrodynamik gehört, dann ist das eine sehr berechtigte Frage. Es hat lange gedauert, bis man erkannt hat, dass Licht eine besondere Form elektromagnetischer Strahlung ist. Genau genommen ist Licht elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 760 nm. Erst durch Maxwell und seine berühmten Gleichungen, die wir im letzten Kapitel ausführlich behandelt haben, konnte der Zusammenhang zwischen Licht und elektromagnetischer Strahlung hergestellt werden.

Optik befasst sich mit dem Verhalten und den Eigenschaften von Licht, insbesondere in Bezug auf Sehen und Bildgebung. Sie umfasst Themen wie Lichtbrechung, Reflexion, Farbwahrnehmung und die Funktionsweise optischer Instrumente wie Linsen und Spiegel. Optik ist ein zentraler Bereich der Physik, der viele Anwendungen in Technologie, Medizin, Astronomie und anderen Bereichen hat. Von der Grundlagenforschung bis hin zur Entwicklung hochmoderner optischer Geräte spielt die Optik eine entscheidende Rolle in unserem Verständnis der Welt und ihrer Anwendung.



In diesem Kapitel werden wir uns mit dem *Licht*, der *geometrischen Optik*, den *optischen Instrumenten* und ausführlich mit der *Interferenz und Beugung* beschäftigen. Da wir die Interferenz und Beugung bereits im Kapitel E über mechanische Wellen gestreift haben, werden wir sie hier ausführlich behandeln. Die Interferenz beschreibt das Zusammentreffen von Lichtwellen und die daraus resultierenden Muster verstärkter oder abgeschwächter Intensität. Beugung tritt auf, wenn Licht an einem Hindernis oder einer Öffnung abgelenkt wird und charakteristische Muster erzeugt. Das Verständnis dieser Phänomene ist entscheidend für die Entwicklung fortschrittlicher optischer Technologien und Anwendungen.

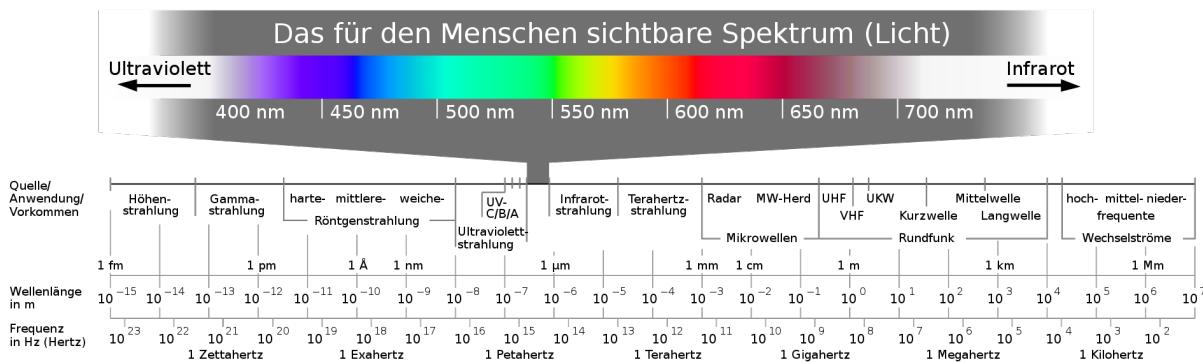
Die Unterkapitel haben unterschiedliche Schwierigkeitsgrade. Einige Themen werden bereits im Untergymnasium behandelt und erfordern daher kein Vorwissen in Physik und Mathematik. Andere Unterkapitel hingegen werden erst im letzten Schuljahr behandelt und setzen viel Vorwissen voraus.

# 1 Licht

## Lernziele

- Sie kennen die Überlegungen von Römer und wissen, warum die Lichtgeschwindigkeit nicht unendlich gross sein kann.
- Sie wissen, weshalb die Lichtgeschwindigkeit nicht mehr verändert wird.
- Sie verstehen, wie der Sehvorgang richtig abläuft und weshalb man zwei Arten davon unterscheiden muss.
- Sie verstehen das Reflexionsgesetz und wissen, weshalb es an einem Spiegel ein klares Bild und an einer unebenen Oberfläche ein diffuses Bild gibt.
- Sie verstehen das Prinzip von Fermat und können es auf bestimmte Beispiele anwenden.
- Sie verstehen, weshalb Lichtstrahlen gebrochen werden, wenn sie von einem Medium ins andere übergehen.
- Sie kennen die Definition der Brechzahl und können damit Geschwindigkeit von Licht in anderen Medien ausrechnen.
- Sie verstehen, weshalb es einen Totalreflexionswinkel geben muss und bei welchem Übergang.
- Sie können die Entstehung des Regenbogens in groben Zügen erklären.
- Sie kennen wesentliche Eigenschaften des Haupt- und Nebenregenbogens.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist Licht eine elektromagnetische Welle, die sich in einem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich des Spektrums befindet. Betrachten wir noch einmal das Spektrum der elektromagnetischen Wellen, um Licht einordnen zu können [53].



Dieses Bild zeigt sehr schön, dass Licht nur einen sehr kleinen Bereich des elektromagnetischen Spektrums einnimmt. In diesem Kapitel werden wir uns nur mit diesem Bereich befassen, obwohl einige der Schlussfolgerungen auch für den Rest gelten.

In diesem Kapitel über Licht werden wir uns mit der *Lichtausbreitung*, der *Reflexion* und der *Brechung* beschäftigen.

## 1.1 Lichtausbreitung

Die Lichtausbreitung umfasst einerseits die Lichtgeschwindigkeit und andererseits den Sehvorgang, der eine Folge der Lichtausbreitung ist. Gleichzeitig wollen wir auch kurz auf das Phänomen des Schattens eingehen.

### 1.1.1 Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht. Wie bei allen Wellen kann sie in verschiedenen Materialien unterschiedlich schnell sein. Aus der Speziellen Relativitätstheorie wissen wir, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. Das ist kein Widerspruch zu dem eben Gesagten, denn diese Konstanz gilt für das Licht im Vakuum.

Da sich das Licht mit einer für uns unvorstellbaren Geschwindigkeit ausbreitet, war lange Zeit nicht klar, dass sich das Licht überhaupt bewegt. Lange Zeit ging man von einer unendlich hohen Geschwindigkeit aus. Der erste, der dies in Frage stellte, war Olaf Rømer<sup>1</sup>. Der Nachweis gelang ihm nicht durch ein Experiment, sondern durch genaue Beobachtung der Verfinsterungen des Jupitermondes Io. Römer war nämlich aufgefallen, dass die Verfinsterungen zeitlichen Schwankungen unterlagen. Er erkannte, dass dies mit der Position der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne zusammenhängen musste. Die folgende Skizze zeigt die beiden Extremfälle:



Die Erde ist im Perihel ( $E_A$ ) und im Aphel ( $E_B$ ) auf ihrer Bahn um die Sonne (S) dargestellt. Jupiter (J) ist nur mit seinem Mond Io (I) auf der rechten Seite dargestellt. Befindet sich die Erde im Punkt  $E_A$ , so erreicht das Licht nach Io den Schatten des Jupiters früher, als wenn sich die Erde im Punkt  $E_B$  befindet. Diesen Zeitunterschied konnte Römer feststellen und damit zeigen, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich sein muss. Wäre sie unendlich schnell, gäbe es keinen Unterschied zwischen  $E_A$  und  $E_B$ .

Bsp. i.

Schätzen Sie die Zeitdifferenz, die heute für die Position im Perihel und im Aphel gemessen würde. Nehmen wir einen mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde von 150 Mio. km und eine Lichtgeschwindigkeit von ca. 300.000 km/s an.

Lsg:  $\Delta t \approx 17$  min

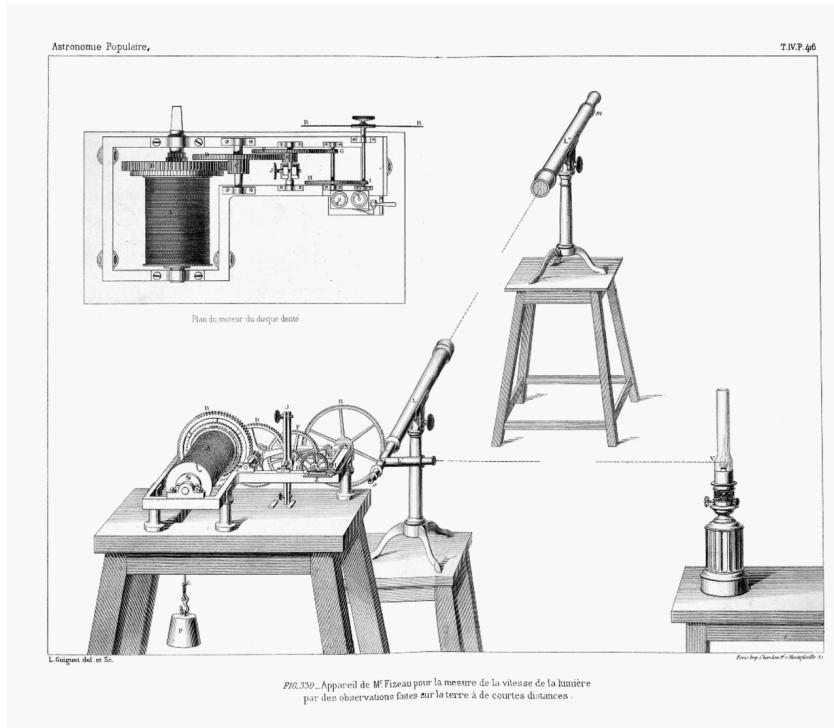
## Lösung:

Eine der ersten Messungen der Lichtgeschwindigkeit durch ein Experiment wurde durch Hippolyte Fizeau<sup>2</sup> durchgeführt. Er benutzte die Zahnradmethode, mit der er einen Wert für die Lichtgeschwindigkeit berechnen konnte, der etwa 5% über dem heutigen Wert lag.

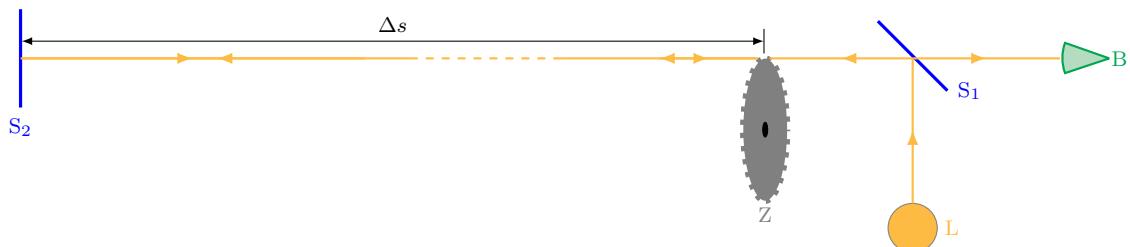
Der historische Versuchsaufbau von Fizeau nach François Arago [54] sieht wie folgt aus:

<sup>1</sup>Ole Christensen Rømer (1644-1710) war ein dänischer Astronom. Bekannt wurde er durch den 1676 veröffentlichten ersten Nachweis, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich und nicht unendlich gross ist, beziehungsweise durch die Anleitung, wie die Lichtgeschwindigkeit durch Beobachtung der Jupitermonde berechnet werden kann. Rømer selbst gab keinen Wert für die Lichtgeschwindigkeit an. Zwei Jahre später errechnete Christiaan Huygens einen Wert von etwa 212.000 km/s, indem er Daten von Rømer und Giovanni Domenico Cassini kombinierte.

<sup>2</sup>Armand Hippolyte Louis Fizeau (\* 23. September 1819 in Paris; † 18. September 1896 in Venteuil bei Épernay) war ein französischer Physiker. Fizeau beschäftigte sich als Privatgelehrter mit Physik und Astronomie. 1860 wurde er in die Académie des sciences aufgenommen, 1878 wählte man ihn zum Präsidenten des Bureau des Longitudes.



Er führte sein Experiment auf einer etwa 8.6 km langen Strecke in der Nähe von Paris durch. Das Licht wurde von der Lichtquelle (L) auf einen halbdurchlässigen Spiegel ( $S_1$ ) gelenkt, der das Licht über das rotierende Zahnrad ( $n$  Zähne) in Form von Lichtblitzen auf den zweiten Spiegel ( $S_2$ ) weiterleitete, von wo es (wieder über das Zahnrad) zum Beobachter (B) reflektiert wurde (siehe Skizze unten).



Nun wurde die Drehzahl ( $f$ ) des Zahnrades so lange erhöht, bis der vom zweiten Spiegel ( $S_2$ ) reflektierte Strahl auf dem Rückweg nicht mehr auf den Spalt, sondern auf den nächsten Zahn traf. Der Beobachter konnte dann den reflektierten Lichtstrahl nicht mehr sehen.

Eine erste Abschätzung für die Strecke  $\Delta s$  ergibt eine Zeit von etwa  $60\ \mu\text{s}$ . In dieser Zeit hat sich das Zahnrad um einen Zahn bewegt. Warum nicht mehr? Berechne selbst, welche Bahngeschwindigkeit das Zahnrad mindestens haben muss, um sich um mehr als einen Zahn zu bewegen.

Bsp. ii.

Bestimme die Bahngeschwindigkeit des Zahnrades am äussersten Punkt, wenn der Radius des Rades etwa 50 cm beträgt und das Rad 700 Zähne hat. Das Licht benötigte für diesen Weg ca.  $60 \mu\text{s}$ , das ist die Zeit, die das Rad für eine weitere Umdrehung benötigte, bevor das Licht wieder durchkam. Lsg:  $v \approx 37 \text{ m/s}$

Lsg:  $v \approx 37 \text{ m/s}$

## Lösung:

Mit diesem Experiment errechnete Fizeau für die Lichtgeschwindigkeit einen Wert von  $315'300 \pm 500$  km/s und ist damit etwa 5% über dem heutigen Wert<sup>3</sup> von

$$c = 299\,792.458 \text{ m/s.}$$

Weitere Experimente folgten und man kam immer näher dem heutigen Wert heran. Bis man ihn 1983 festlegte und seitdem nicht mehr ändert.



Warum können wir in die Vergangenheit sehen und ist dies auch mit nicht endlicher Geschwindigkeit möglich? Warum merken wir das nicht?

Diese Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gilt nur für das Vakuum. In anderen Medien hat das Licht unterschiedliche Geschwindigkeiten, wie die folgende Tabelle zeigt:

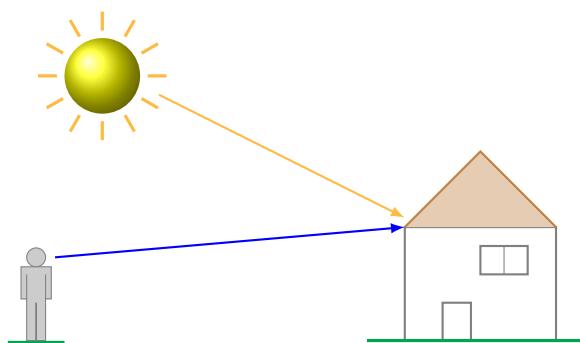
Medium	Lichtgeschwindigkeit $c_n$
Vakuum	$c/1$
Luft	$c/1.0003$
Wasser	$c/1.33$
Caesium	$c/0.345$
Fensterglas	$c/1.52$

Wie in der Tabelle zu sehen ist, ist die Lichtgeschwindigkeit in Wasser deutlich langsamer als in Luft. Wie verhält es sich mit Cäsium? Was bedeutet es, wenn der Nenner kleiner als 1 ist?

Im Kapitel über die Brechung werden wir sehen, dass diese unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten einen Einfluss auf die Ausbreitungsrichtung des Lichts haben. Bevor wir uns diesem Kapitel zuwenden, betrachten wir den Sehvorgang etwas genauer.

### 1.1.2 Sehvorgang

Der Sehvorgang wurde lange Zeit missverstanden. Man ging davon aus, dass der Sehvorgang vom Auge ausgeht und vom Körper reflektiert wird. Pythagoras war davon überzeugt, dass von uns ein gewisser Nebel ausgeht, der vom Gegenstand zurückgeworfen wird und schliesslich wieder im Auge landet. Ptolemäus erkannte dann, dass die Gegenstände auch beleuchtet werden müssen, um gesehen zu werden. Dennoch ging auch für ihn der Sehvorgang vom Auge aus. Dieser Irrtum lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen

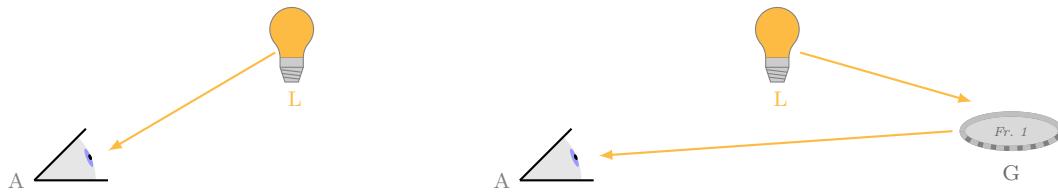


Wir wissen heute, dass der Sehvorgang nicht vom Auge ausgeht, sondern im Auge stattfinden muss. Dabei werden zwei Arten von Vorgängen unterschieden

- Bei selbstleuchtenden Gegenständen, so genannten Lichtquellen (L), kann das Licht direkt in das Auge (A) gelangen, so dass die Lichtquelle direkt gesehen werden kann. (Abb. links)
- Nicht selbstleuchtende Gegenstände (G) müssen immer von einer Lichtquelle beleuchtet werden. Sie reflektieren das Licht in das Auge des Betrachters. (Abb. rechts)

<sup>3</sup> Die internationale Generalkonferenz für Mass und Gewicht hat im Jahre 1983 die Lichtgeschwindigkeit zu einer Definitionsschlüssel umgewandelt und dadurch auf einen bestimmten Wert festgelegt. Dieser Wert wird nun auch dafür verwendet um den Meter zu definieren.

Die folgenden Abbildungen zeigen am Beispiel einer Glühlampe, wie man sich den Sehvorgang für Lichtquellen und nicht selbstleuchtende Gegenstände richtig vorstellt.



Daraus kann man sofort schliessen, dass man ohne Lichtquelle nichts sehen kann. Die Tatsache, dass manche Tiere im Dunkeln sehen können, bedeutet nur, dass es nicht völlig dunkel ist und sie das wenige Licht, das vorhanden ist, gut sammeln können.

Wie kommt es nun, dass wir manche Dinge sehr gut sehen und andere weniger? Die Antwort liegt auf der Hand! Gegenstände, die das Licht gut reflektieren, sehen wir gut, Gegenstände, die das Licht schlecht oder kaum reflektieren, sehen wir nicht oder nur verschwommen.

Ein schönes Beispiel aus der Astronomie hat mit den Mondphasen zu tun. Wir sehen immer nur den Teil des Mondes, der von der Sonne beschienen wird. Der Mond reflektiert nur 7% des Sonnenlichts, etwa so viel wie Kohle. Trotzdem haben wir das Gefühl, dass der Mond uns blendet. Das liegt daran, dass der Kontrast in der Nacht sehr gross ist und wir in der Regel erweiterte Pupillen haben.

### Bsp. iii.

Sie betreten mit einer Taschenlampe einen dunklen Raum ohne Lichtquelle. Nachdem Sie die Tür hinter sich geschlossen haben, ist der Raum völlig dunkel. Nun schalten Sie die Taschenlampe ein und leuchten auf die gegenüberliegende Wand. Was sehen Sie? Lsg: –

Lösung:	
---------	--

Das folgende Experiment bestätigt die Antwort im Beispiel.

#### Exp. 1: Lichtbündel im dunklen Raum

Wir verdunkeln den Klassenraum vollständig und lassen eine Taschenlampe gegen eine Wand leuchten. Wenn wenig Staub im Raum ist, sieht man den Lichtkegel nur an der Wand. Wirbelt man dagegen etwas Staub auf, sieht man den Lichtkegel bis zur Wand.

Im nächsten Abschnitt wollen wir uns etwas genauer ansehen, wie Bilder bzw. Abbilder entstehen können. Dazu müssen wir uns mit dem Begriff der Spiegelung auseinandersetzen.

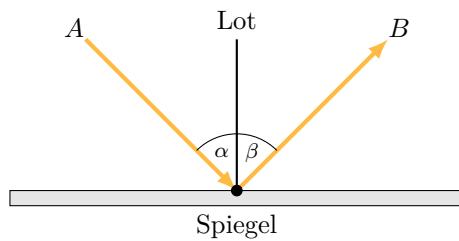
## 1.2 Reflexion

Wir alle haben schon einmal bemerkt, dass wir uns auf einer ruhigen Wasseroberfläche spiegeln können, während wir uns auf einer unruhigen Wasseroberfläche kaum sehen können. Um diesen Effekt besser zu verstehen, schauen wir uns an, was beim Spiegeln passiert. Die optische Reflexion ist ein spannendes und wichtiges Thema der Physik und beschäftigt sich mit der Frage, wie Lichtstrahlen an Oberflächen reflektiert werden. Die Reflexion von Licht ist ein Phänomen, das wir täglich beobachten können, sei es beim Blick in den Spiegel oder beim Betrachten von Gegenständen in unserer Umgebung. Doch wie funktioniert die Reflexion von Licht eigentlich?

In der geometrischen Optik wird Licht als Strahl betrachtet und die Reflexion an glatten, ebenen Flächen durch das Reflexionsgesetz beschrieben. Es besagt, dass der Einfallswinkel des Lichtstrahls gleich dem Ausfallwinkel

des reflektierten Lichtstrahls ist, wobei beide Winkel relativ zur Senkrechten gemessen werden. Dieses Gesetz kann z. B. bei Spiegeln oder anderen glatten Oberflächen beobachtet werden. Bei der Reflexion an unebenen oder diffusen Oberflächen, wie z.B. einer rauen Wand, werden die Lichtstrahlen in verschiedene Richtungen gestreut und es entsteht ein diffuses Bild.

Für eine glatte Oberfläche wie einen Spiegel könnte dies wie folgt aussehen:



**Ges. 1:** (Reflexionsgesetz) Das Gesetz besagt, dass der Einfallsinkel  $\alpha$  und der Ausfallswinkel  $\beta$  immer gleich sind.

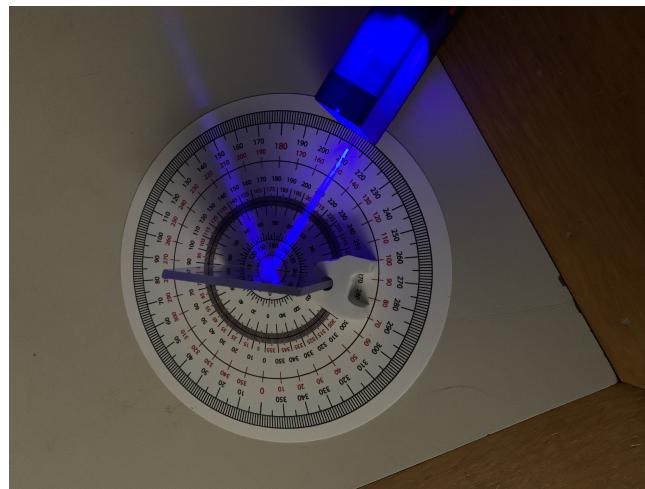
$$\alpha = \beta$$

Eine Begründung für die Gültigkeit dieses Gesetzes geht auf das Fermatsche Prinzip zurück. Es besagt, dass das Licht nicht den kürzesten, sondern den schnellsten Weg von A nach B sucht. Da sich das Licht auf beiden Seiten des Lots gleich schnell bewegt, ist der schnellste Weg in diesem Fall auch der kürzeste.

Das folgende Experiment soll dies ebenfalls bestätigen.

### Exp. 2: Reflexion am Spiegel

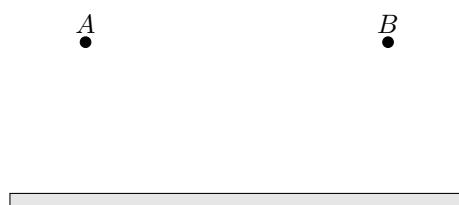
Mit Hilfe einer dünnen Lichtquelle soll das Reflexionsgesetz an einem Spiegel selbstständig überprüft werden. Dazu benötigt man eine Winkelmessschablone, einen Spiegel und eine Lichtquelle.



Wie in diesem Bild zu sehen ist, sind der Einfallsinkel und der Ausfallwinkel gleich gross.

### Bsp. iv.

Konstruiere den kürzesten Weg über den Spiegel zwischen den Punkten A und B und zeige, dass der Einfalls- und der Ausfallswinkel gleich sein müssen.



Lsg: —

## Lösung:

Das nächste Beispiel ist schon etwas anspruchsvoller und verwendet den Strahlensatz, den wir gleich im Beispiel selbst kennenlernen werden.

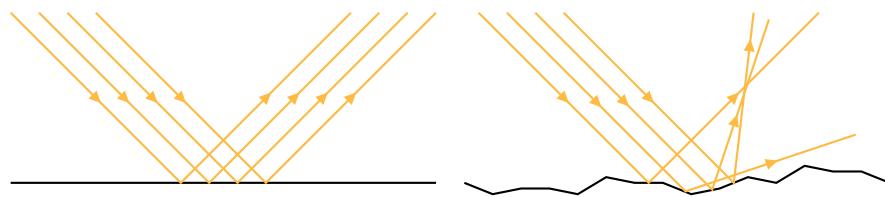
## Bsp. v.

Ein Turm steht am Ufer eines 300 Meter breiten Sees. Man steht am anderen Ufer und schaut in den See, der heute sehr ruhig und glatt ist. In einer Entfernung von etwa 5 Metern spiegelt sich die Spitze des Turms. Wie hoch ist der Turm, wenn sich deine Augen auf einer Höhe von etwa 1.5 m befinden? Lsg:  $y_1 \approx 88.5$  m

Lsg:  $y_1 \approx 88.5$  m

## Lösung:

Normalerweise spiegelt sich das andere Ufer nicht so gut auf der Wasseroberfläche. Warum eigentlich nicht? Betrachten wir eine glatte und eine rauhe Oberfläche im Vergleich. Auf der glatten Oberfläche bleiben parallele Strahlen auch nach der Reflexion parallel. Bei der rauen Oberfläche bleiben die Strahlen nicht parallel, wie das Bild zeigt.



Man sieht sehr deutlich, dass das Bild nicht scharf reflektiert wird und man daher ein sehr diffuses Bild erhält. Der folgende Versuch soll dies verdeutlichen.

### Exp. 3: Reflexion an Alu-Folie

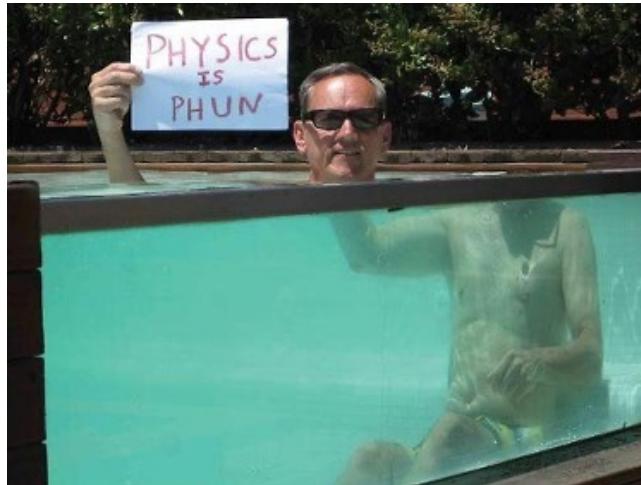
Wir nehmen eine steife Aluminiumfolie und schneiden den Streifen in zwei Hälften. Die eine Hälfte des Streifens zerknüllen wir, die andere lassen wir so glatt wie möglich. Nun leuchten wir einen beliebigen Gegenstand an und versuchen, ihn auf beiden Streifen zu erkennen.



Wie man auf den Bildern sehen kann, ist auf dem linken Bild sogar der Text zu erkennen, während auf dem rechten Bild kaum etwas zu erkennen ist.

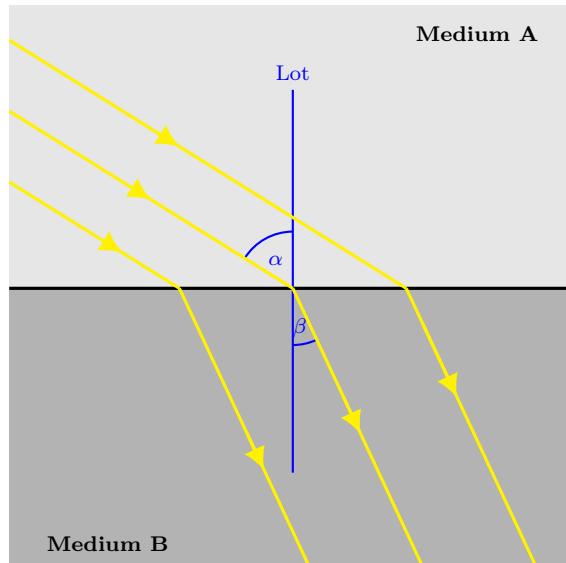
### 1.3 Brechung

Nachdem wir einen Strahl immer im gleichen Medium verfolgt haben, können wir ihn nun auch in verschiedenen Medien verfolgen. Das wohl häufigste Beispiel ist der Übergang vom Medium Luft in das Medium Wasser. Dabei treten optische Täuschungen auf, die mit dem Effekt der *Lichtbrechung* zu tun haben, wie das folgende Bild zeigt.



Irgendwie sieht es aus, als wäre der Kopf verschoben. Natürlich wissen wir, dass das nicht sein kann. Aber wie ist das möglich? Das soll nun erklärt werden!

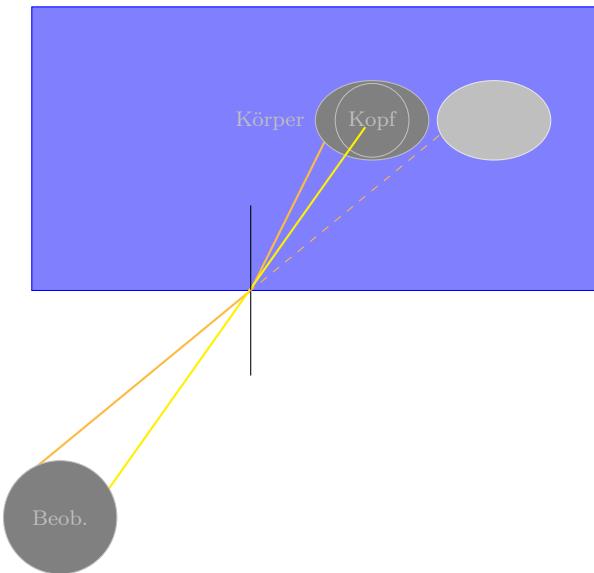
Dazu betrachten wir ganz allgemein, was passiert, wenn ein Lichtstrahl von einem Medium A in ein Medium B eintritt. Wir nehmen zunächst an, dass das Medium B optisch dichter ist als das Medium A, z. B. von Luft (A) zu Wasser (B). Um dieses Gesetz zu verstehen, betrachten wir folgende Skizze:



Wir erkennen, dass der Winkel  $\beta$  kleiner ist, als der Winkel  $\alpha$ . Man sagt, dass der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen wird, wenn man von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium eintaucht. Diesen Zusammenhang hat bereits Snellius<sup>4</sup> vor über 400 Jahren entdeckt. Es ist heute unter dem Namen Brechungsgesetz bekannt:

**Ges. 2: (Brechungsgesetz von Snellius)** *Tritt Licht unter einem schießen Winkel in ein anderes Medium mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit ein, so wird das Licht gebrochen.*

Bevor wir uns einem weiteren Experiment zuwenden, wollen wir sehen, wie das mit dem Kopf und dem Körper des Menschen möglich ist. Dazu betrachten wir die folgende Skizze.



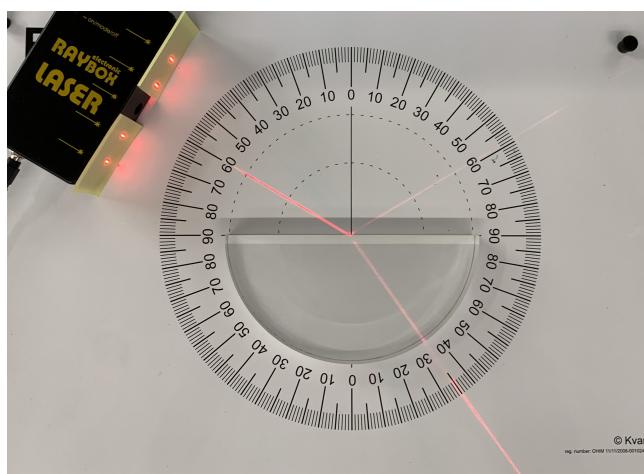
Der gelbe Lichtstrahl, der vom Kopf ausgeht, wird nicht gebrochen, da sich der Kopf über dem Wasser befindet. Der Lichtstrahl, der vom Körper ausgeht, wird dagegen gebrochen, da er vom Wasser in die Luft gebrochen wird. Dieser Strahl wird vom Lot weg gebrochen, da er von einem dichten Medium in ein dünneres Medium übergeht. Was wir interpretieren, ist jedoch ein gerader Strahl, d.h. der Körper erscheint verschoben. In der Abbildung steht der Beobachter viel weiter links und blickt aus einem grösseren Winkel auf die Situation. Dies führt zu einer noch grösseren Verschiebung.

Schauen wir uns gemeinsam das folgende Experiment an und überprüfen wir anschliessend selbst mit dem Optik-Kasten, ob dieses Phänomen der Brechung wirklich zutrifft.

---

#### Exp. 4: Brechung

Bei diesem Experiment wird ein halbkreisförmiger Glaskörper mit einem Laser bestrahlt (siehe Abbildung).




---

<sup>4</sup>Willebrord van Royen Snell (auch Willebrordus Snel van Royen oder Snellius; 13. Juni 1580 in Leiden, Spanische Niederlande - 30. Oktober 1626), war ein niederländischer Astronom und Mathematiker. Er ist bekannt für die Entwicklung des optischen Brechungsgesetzes, nach ihm als snelliussches Brechungsgesetz bezeichnet. Er gebrauchte den Namen Snellius für wissenschaftliche Veröffentlichungen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der einfallende Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen wird. In Zahlen ausgedrückt beträgt der Einfallswinkel etwa  $60^\circ$  und der Brechungswinkel  $35^\circ$ . Also deutlich kleiner!

Die folgende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Verhältnisse der Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  für einen Lichtstrahl beim Übergang von Luft in Wasser.

Winkel zwischen Luft und Wasser	
Einfalls- $\alpha$	Brechungs- $\beta$
30°	22.1°
45°	32.1°
60°	40.6°

Die folgende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Verhältnisse der Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  für einen Lichtstrahl beim Übergang von Luft in Wasser.

### Bsp. vi.

Ergänze jeweils den fehlenden Lichtstrahl direkt in der Skizze. Oben ist Luft, unten ist Wasser und der Lichtstrahl ist nur in der Luft eingezeichnet.

Verwenden Sie dazu die soeben gezeigt Tabelle.

Lsg: —

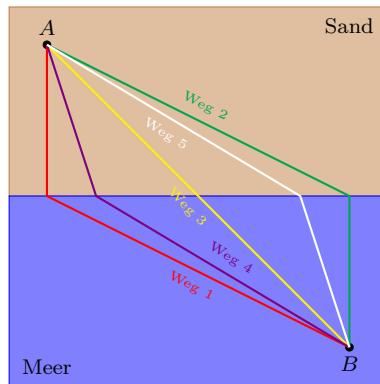
Nachdem wir nun einiges zum Brechungsgesetz erarbeitet haben, fragen Sie sich vielleicht. Weshalb das Licht einen solchen Knick macht. Wieso kann es nicht einfach den kürzesten Weg wählen. Die Antwort hat Fermat<sup>5</sup> vor über 400 Jahren bereits gegeben. Heute ist es unter seinem Namen bekannt, das sogenannte Fermat'sche Prinzip.

**Ges. 3:** (Fermat'sche Prinzip) Das Prinzip besagt, dass das Licht nicht den kürzesten, sondern den schnellsten Weg zwischen zwei Punkten wählt.

Bsp. vii.

<sup>5</sup>Pierre de Fermat (geb. in der zweiten Hälfte des Jahres 1607 in Beaumont-de-Lomagne, heute im Département Tarn-et-Garonne; gest. 12. Januar 1665 in Castres) war ein französischer Mathematiker und Jurist.

Stellen wir uns eine einfache Situation vor. Angenommen, Sie befinden sich am Strand von *A* und wollen Ihren Freund in *B* retten (siehe Abbildung).



Weil er ein guter Freund ist, möchtest du ihn so schnell wie möglich retten, damit er nicht ertrinkt. Du weisst, dass du auf dem Sand viel schneller laufen kannst als im Meer schwimmen. Welcher Weg ist wohl der schnellste?

Lsg: —

## Lösung:

Anhand dieses Beispiels verstehen wir nun auch, warum Licht gebrochen wird. Licht breitet sich in Wasser oder in einem Glaskörper nicht gleich schnell aus wie in Luft oder im Vakuum. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, hat man den sogenannten Brechungsindex definiert.

**Def. 1:** (Brechungsindex) Der Brechungsindex (auch Brechezahl) für das Medium A  $n_A$  ist definiert als:

$$n_A = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium}, A}},$$

wobei  $c_{\text{Medium A}}$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einem Medium A und  $c_{\text{Vakuum}}$  im Vakuum sind.

In der nachfolgenden Tabelle sind für Licht einige Werte aufgelistet:

Medium	Brechzahl $n$
Vakuum	1
Luft	1.0003
Wasser	1.33
Caesium	0.345
Fensterglas	1.52

Lösen Sie zur oberen Tabelle das folgende Beispiel:

### Bsp. viii.

Wie schnell ist Licht a) in Wasser und b) in Cäsium? Die Geschwindigkeiten werden nicht gesucht, sondern mit Hilfe der Definition des Brechungsindexes berechnet. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt 300'000 km/s.

Lsg: a) 200'000 km/s, b) 870'000 km/s

## Lösung:

Wir sind nun dem Strahl vom dünneren zum dichteren Medium gefolgt. Was passiert nun, wenn wir vom dichten zum dünneren Medium gehen? Natürlich! Der Strahl wird vom Lot weg gebrochen. Aber die Frage, die sich hier stellt, ist: Passiert das immer? Die Antwort ist klar: Nein! Überlegen Sie selbst anhand des folgenden Beispiels.

Bsp. ix.

Betrachte einen Lichtstrahl, der von einem dichteren Medium, z.B. Wasser, in ein dünneres Medium, z.B. Luft, übergeht. Was fällt auf, wenn der Einfallswinkel immer grösser wird? Gibt es immer einen Brechungswinkel? Warum? Lsg: -

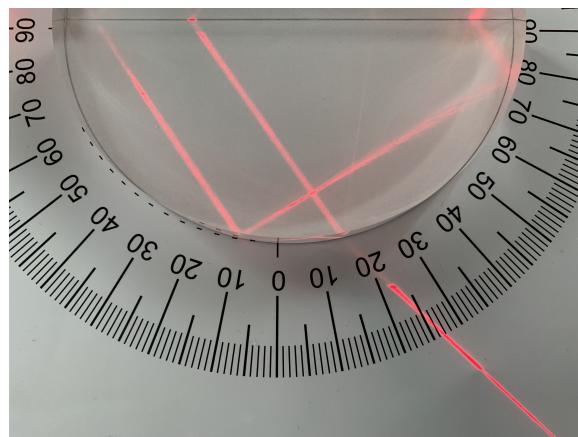
Lsg: —

## Lösung:

Schauen wir uns diese *Totalreflexion* noch einmal im Experiment an, wobei wir den gleichen Aufbau wie oben verwenden.

## Exp. 5: Totalreflexion

Betrachten wir die gleiche Situation wie oben, nur dass wir jetzt den Strahlengang drehen und sehen, wie sich der Strahl im Glaskörper verhält. (siehe Abbildung).



Zwei parallele Strahlen treffen unter verschiedenen Winkeln auf die Schicht zwischen Glas und Luft. Der eine Strahl wird nur reflektiert, der andere auch gebrochen. Dies zeigt, dass ab einem bestimmten Winkel der Strahl nicht mehr gebrochen wird.

Die Anwendungen der Totalreflexion sind vielfältig. Eine, die oft erwähnt wird, sind natürlich die Glasfaserkabel.

Eine Anwendung der Totalreflexion sind Glasfaserkabel. In den Fasern wird Licht als Informationsträger verwendet. Das Licht wird am Rand der Faser immer wieder totalreflektiert und tritt daher nie seitlich aus, wie das folgende Experiment zeigt.

## Exp. 6: Glasfaserkabel

Ein Glasfaserbündel und eine Vergrößerung einer solchen Faser werden mit einem Laser oder einer anderen starken Lichtquelle beleuchtet (siehe Abbildung).



Man sieht sehr schön, dass das Licht im Leiter bleibt und nicht austritt, weil die Geometrie des Leiters so gewählt ist, dass jeder Einfallswinkel des Lichts grösser ist als der Totalreflexionswinkel.

Abschliessend soll das Phänomen des Regenbogens betrachtet werden. Der Regenbogen entsteht hauptsächlich durch Lichtbrechung und/oder Totalreflexion.

Bsp. x.

Betrachten Sie das folgende Bild und notieren Sie alles, was Ihnen dazu einfällt.



Gibt es Unterschiede zwischen den zwei Regenbogen?

Lsg: =

## Lösung:

Im Folgenden möchten wir gerne einige Antworten zu den Überlegungen geben. Zunächst betrachten wir die Entstehung des Farbspektrums. Dazu verwenden wir ein Prisma und lassen das Sonnenlicht hindurchscheinen.

### Exp. 7: Farbspektrum

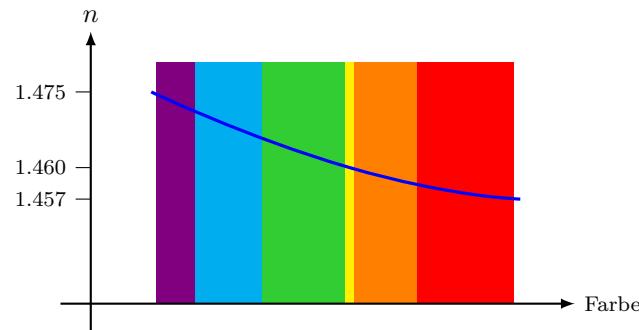
Die Schülerinnen und Schüler sollen mit Hilfe eines Glasprismas, ähnlich dem Prisma auf dem Bild, einen Farbverlauf an der Wand erzeugen.



Wir erkennen also, wenn weisses Licht durch ein Medium hindurch geht, dann wird es in seine Bestandteile - hier Farben - aufgeteilt. Wieso passiert das?

Die Antwort liegt in der Ausbreitungsgeschwindigkeit der verschiedenen Farben im Medium, und wie wir wissen, hängt der Brechungsindex von der Ausbreitungsgeschwindigkeit ab.

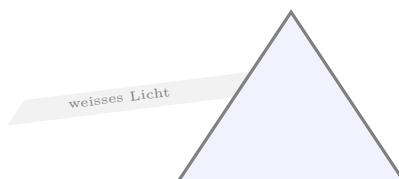
Betrachten wir es etwas genauer! Die Grafik zeigt die Abhängigkeit des Brechungsindex  $n$  von Licht für unterschiedlichen Farben. Dabei ist die Funktion nicht exakt berechnet worden, sondern stark angenähert. Es ist auch klar, dass die Farben nicht so scharf voneinander getrennt sein sollten, sondern dass es sich um einen kontinuierlichen Übergang handeln sollte.



Die blaue Kurve zeigt, dass der Brechungsindex für rotes Licht kleiner ist als der Brechungsindex für violettes Licht. Das bedeutet, dass violettes Licht stärker gebrochen wird als rotes.

### Bsp. xi.

Zeichnen Sie in der folgenden Skizze den Übergang von weissem Licht (hier grau angedeutet) zu farbigem Licht, bis das farbige Licht wieder aus dem Prisma austritt.

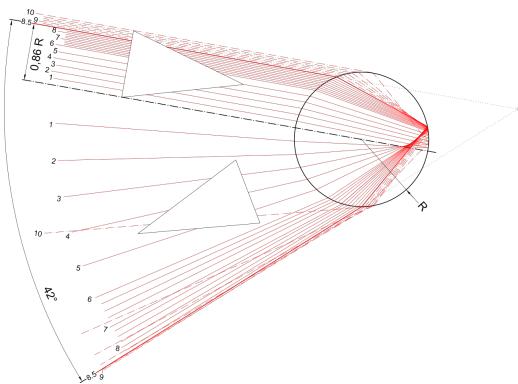


Nehmen Sie die Mitte des weissen Lichte und fahren qualitativ mit den unterschiedlichen Farben weiter. Lsg: -

**Lösung:**

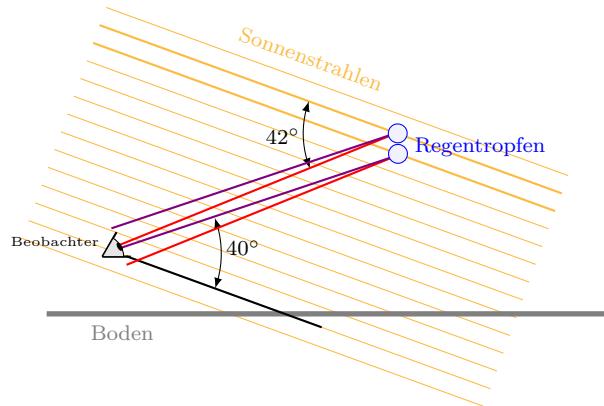


Beim Regenbogen fällt das Licht nicht durch ein Prisma, sondern durch einen Regentropfen, womit wir schon bei der ersten Voraussetzung für einen Regenbogen wären. Am Ort des Regenbogens muss es regnen. Dieser wird im Folgenden als Kugel betrachtet, was der tatsächlichen Form nicht unähnlich ist. Das folgende Bild aus [56] zeigt alle möglichen Einfallswinkel des Sonnenlichts und deren Ausfallwinkel in Richtung des Beobachters auf der Erde.

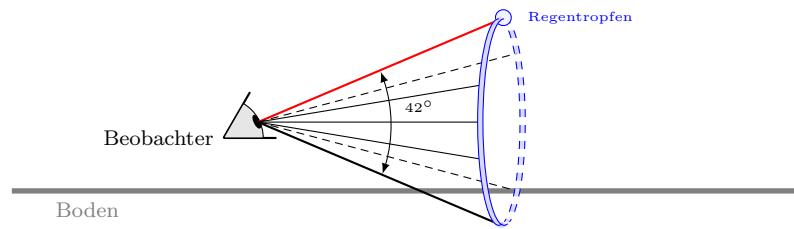


Die gestrichelte schwarze Linie zeigt den Einfallwinkel von  $0^\circ$ . Dieser Strahl würde den Tropfen unreflektiert durchdringen. Alle Strahlen, die unterhalb dieser Linie einfallen, werden nach oben abgelenkt und erreichen den Beobachter ebenfalls nicht. Es verbleiben also nur die Strahlen oberhalb der gestrichelten Linie bis zur Tangente an den Kreis, hier durch Strahl 10 angedeutet. (Die Grafik wurde für rotes Licht gezeichnet.)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Strahlen 7-9 in einem relativ schmalen Bereich reflektiert werden, so dass von diesen Strahlen viel Licht zu sehen ist. Misst man nun den Winkel zwischen diesen einfallenden und reflektierten Strahlen, so erhält man für rotes Licht einen Winkel von  $42^\circ$ . Analog kann diese Skizze auch für violettes Licht erstellt werden, wobei sich ein Winkel von etwa  $40^\circ$  ergibt. Alle anderen Farben liegen dazwischen. Wir sehen also nur das Licht, das unter einem Winkel von  $40^\circ - 42^\circ$  auf unser Auge trifft, wie das folgende Bild zeigt. Wir sehen auch, dass rotes Licht immer von einem Tropfen kommt, der über einem Tropfen liegt, von dem violetten Licht kommt. Damit ist klar, warum der Hauptregenbogen diese Farbreihenfolge haben muss.



Wir verstehen nun, wie die einzelnen Farben des Regenbogens in unser Auge gelangen. Aber wir wissen noch nicht, wie daraus ein Bogen entsteht. Die Antwort liegt wieder in den  $42^\circ$  und der Tatsache, dass das Problem rotationssymmetrisch ist. Zeichnet man nämlich alle Lichtstrahlen, die unter einem Winkel von  $42^\circ$  gesehen werden, auf, so erhält man einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von  $42^\circ$  und der Regenbogen ist ein Schnitt durch den Kegel, ein sogenannter Kegelschnitt. Dies soll in der folgenden Skizze verdeutlicht werden.



In der Skizze ist der Einfachheit halber nur ein Regentropfen gezeichnet und auch nur eine Farbe, die vom Regentropfen kommt. Natürlich gibt es Millionen von Regentropfen und das ganze Farbspektrum. Wir sehen an der Skizze, warum der Regenbogen kein Kreis sein kann, solange wir uns in Bodennähe befinden. Der Kegelschnitt, hier als blaue Ellipse gezeichnet, reicht in der Regel bis zum Boden. Bevor wir mit dem Nebenbogen fortfahren, halten wir kurz inne und stellen uns folgende Fragen.

Bsp. xii.

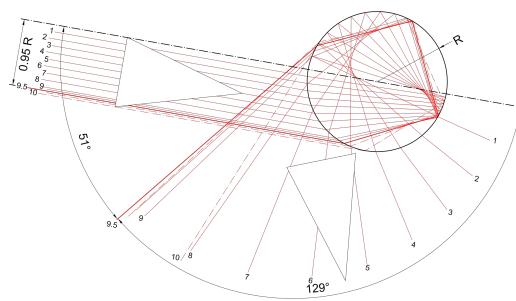
Beantworten Sie die folgenden Fragen in kurzen Sätzen und/oder mit Hilfe einer Skizze.

- a) Wo steht die Sonne, wenn man einen Regenbogen sieht?
  - b) Sieht man den Regenbogen zu jeder Tages- und Jahreszeit?
  - c) Warum ist beim Hauptregenbogen der rote Bogen aussen und der violette Bogen innen?

Lsg: —

## Lösung:

Nicht ganz so ausführlich soll nun der Nebenregenbogen erklärt werden. Wie man auf dem ersten Bild mit dem Regenbogen sieht, gibt es noch einen zweiten Regenbogen, den sogenannten Nebenregenbogen. Dieser ist immer schwächer und die Farben sind invertiert, also der rote Bogen unten und der violette Bogen oben. Zur Erläuterung reicht meines Erachtens auch dieses eine Bild [56].



Das Bild zeigt, dass die Strahlen zwischen 9 und 9.5 am nächsten beieinander liegen, d.h. am stärksten fokussiert sind und einen Winkel von  $51^\circ$  aufweisen. Dies erklärt, warum der Nebenregenbogen über dem Hauptregenbogen liegt. Der violette Strahl wird weniger stark gebrochen als der rote Strahl, so dass der violette Strahl durch die zusätzliche Reflexion im Tropfen unterhalb des roten Strahls austritt. Die Farben des Nebenregenbogens sind also invertiert.

Damit ist das erste Kapitel über das Licht abgeschlossen, und wir wenden uns nun der geometrischen Optik zu, auch wenn wir in diesem Abschnitt die Grundlagen der geometrischen Optik bereits behandelt haben.

## Zusammenfassung Kapitel H1

1. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist eine hohe jedoch endliche Geschwindigkeit. Sie beträgt:

$$c = 299\,792.458 \text{ m/s}.$$

2. Nicht selbstleuchtende Gegenstände können nur gesehen werden, wenn sie von Lichtquellen beleuchtet werden und das Licht in unser Auge reflektiert wird.
3. Das Reflexionsgesetz besagt, dass der Einfallswinkel und der Ausfallswinkel gleich sind.
4. Das Brechungsgesetz von Snellius besagt, dass wenn ein Lichtstrahl unter einem schießen Winkel in ein anderes Medium mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit eintritt, es gebrochen wird.
5. Das Fermat'sche Prinzip besagt, dass das Licht immer den schnellsten Weg wählt, also nicht den kürzesten.
6. Der Brechungsindex (auch Brechzahl) für das Medium A  $n_A$  ist definiert als:

$$n_A = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium},A}},$$

wobei  $c_{\text{Medium},A}$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einem Medium A und  $c_{\text{Vakuum}}$  im Vakuum sind.

7. Der Totalreflexion tritt nur dann auf, wenn ein Lichtstrahl von einem dichteren in ein dünneres Medium eintritt. Ab diesem Winkel werden alle Strahlen nur noch reflektiert.

## Konzeptfragen Kapitel H1

1. Was passiert, wenn Licht nicht senkrecht auf die Oberfläche eines transparenten Mediums trifft und ein Teil des Lichts in das neue Medium gelangt?
  - Es wird im Allgemeinen langsamer und ändert seine Richtung.
  - Es wird im Allgemeinen schneller und ändert seine Richtung.
  - Es wird im Allgemeinen langsamer und behält seine Richtung bei.
  - Es wird im Allgemeinen schneller und behält seine Richtung bei.
2. Warum sehen wir Dinge?
  - Die meisten Dinge, die wir sehen, sind sichtbar, weil wir Augen mit einer weissen Linse haben.
  - Die meisten Dinge, die wir sehen, sind sichtbar, weil wir Augen mit einer dunklen Linse haben.
  - Die meisten Dinge, die wir sehen, reflektieren Licht von einer Quelle zu unseren Augen.
  - Die meisten Dinge, die wir sehen, brechen das Licht von einer Quelle zu unseren Augen
3. Warum können wir in der Dunkelheit der Nacht keine Dinge sehen?
  - Unsere Augen haben eine geringe Leuchtkraft und eine dunkle Netzhaut.
  - Die Dinge sind aufgrund des Lichtmangels nicht sichtbar.
  - Das Licht dehnt unsere Netzhaut.
  - In der Nacht sind unsere Augen müde

## Aufgaben Kapitel H1

Weitere einfachere Aufgaben mit ausführlichen Lösungen findet man unter:

<https://www.dropbox.com/sh/m9vlo6gwqli3nds/AABWhKMXUJG70jsXx7ovB-fDa?dl=0> in den Kapiteln 36 & 37.



1. Lange Zeit wurde zur Meterdefinition das sogenannte "Ürmeter" verwendet. Da die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum eine Naturkonstante ist und heute die Zeitmessung sehr genau möglich ist, hat man seit 1983 international die Einheit der Länge wie folgt definiert:

*1 m ist diejenige Strecke, die das Licht im Vakuum während der Dauer von  $\frac{1}{299792458}$  s zurücklegt.*

Zeige, dass sich aus dieser Definition der Längeneinheit der genaue Wert der Lichtgeschwindigkeit ergibt.

**Lsg:**  $c = 299792458 \text{ m/s}$

2. Im Liedtext *Diamonds* von *Rihanna* steht folgender Satz:

*Shine bright like a diamond*

Was sagen Sie aus physikalischer Sicht zu diesem Satz?

**Lsg:** –

3. Ein Tourist versucht, mit einem kleinen Spiegel die Höhe eines Turmes zu bestimmen. Mit 42 Meterschritten bestimmt er seine Entfernung zum Turm, der auf der gleichen Horizontalebene steht wie er selbst. Seine Augen befinden sich 1.60 m über dem Boden und er kann die Turmspitze in seinem kleinen Spiegel erblicken, wenn er diesen 2.0 m vor sich auf den Boden legt. Wie hoch ist der Turm?

**Lsg:**  $y_2 \approx 32 \text{ m}$

4. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in einem Diamanten ist 124'000 km/s. Bestimmen Sie daraus den Brechungsindex von Diamanten.

**Lsg:**  $n \approx 2.4$

5. Aus einem Glasprisma, dessen Grundfläche ein gleichseitiges Dreieck ist, tritt ein Lichtstrahl aus und trifft auf eine planparallele Platte.

a. Zeichnen Sie den weiteren Weg des Strahls durch die planparallele Platte. Geben Sie die Grösse der einzelnen Winkel in Grad an!

b. An welcher Stelle und unter welchem Winkel ist der gezeichnete Strahl in das Prisma eingetreten? Konstruieren Sie! Geben Sie die Grösse der Winkel in Grad an!

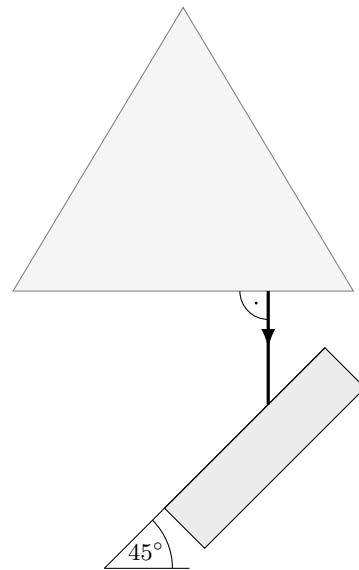
### Übergang Luft-Glas

$\alpha$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$	$90^\circ$
$\beta$	$0^\circ$	$6.6^\circ$	$13^\circ$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$	$35^\circ$	$39^\circ$	$41^\circ$	$42^\circ$

Grenzwinkel der Totalreflexion:  $42^\circ$

**Hinweis:** Nimm an, dass das Verhältnis der Winkel regelmässig verläuft!

Z. B.  $\alpha = 75^\circ \rightarrow \beta = 40^\circ$ .



Lsg: –

6. Für einen Versuch wird gelbes Licht benötigt. Gib drei Möglichkeiten an, um gelbes Licht zu erhalten.

Lsg: –

7. Beantworten Sie die folgenden Fragen wo nötig mit einer Skizze.

- Geben Sie die Reihenfolge der Farben beim Hauptregenbogen wieder (welche Farbe hat der Außen- bzw. Innenkreis?)
- Erläutere mit Hilfe einer Zeichnung deine Antwort zu Teilfrage a. Vergleichen Sie z.B. die Farben Violett und Rot.
- Warum ist beim Nebenregenbogen die Farbreihenfolge gerade umgekehrt wie beim Hauptregenbogen?

Lsg: –

# Literaturverzeichnis

- [1] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Mars\\_Climate\\_Orbiter](http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter), Juni 2012
- [2] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales\\_Einheitensystem](http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales_Einheitensystem), Juni 2012
- [3] Wikipetzi, IngenieroLoco - Eigenes Werk. Based on File: Relations between new SI units definitions.png, CC BY-SA 4.0,  
URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40278935>
- [4] CMS Collaboration, *Combination of results on the rare decays  $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  from the CMS and LHCb experiments*, CMS-PAS-BPH-13-007
- [5] Aoyama, Tatsumi and Hayakawa, Masashi and Kinoshita, Toichiro and Nio, Makiko, *Tenth-Order QED Contribution to the Electron g-2 and an Improved Value of the Fine Structure Constant*, Phys. Rev. Lett. Vol. 109, 2012, 10.1103/PhysRevLett.109.111807
- [6] URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Steradian>, Juni 2012
- [7] Aristoteles,
- [8] Galileo Galilei, *De motu*, 1590
- [9] DMK/DPK, *Formeln und Tafeln*, Orell Füssli, 7. Auflage, 1997
- [10] F. A. Brockhaus, *Der grosse Brockhaus*, 16. Auflage, 1955
- [11] URL: <http://www.quartets.de/acad/firstlaw.html>, September 2013
- [12] URL: <http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/me/kreis/index>
- [13] Lewis C. Epstein, *Denksport Physik*, dtv, 9. Auflage, 2011
- [14] Harry Nussbaumer, *Astronomie*, 7. Auflage, 1999, vdf Hochschulverlag AG
- [15] URL: <http://lexikon.astronomie.info/mars/beobachtung2012/>, April 2013
- [16] Matthias Bartelmann, *Das Standardmodell der Kosmologie, Teil 1 und Teil 2 in Sterne und Weltraum*, Ausgabe: August 2007
- [17] Roman Sexl et al. *Einführung in die Physik - Band 1 & 2*, 3. korrigierte Auflage 2009, Sauerländer Verlag AG
- [18] Paul A. Tipler, *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford, 2. Auflage, 1994
- [19] URL: <https://www.etsy.com/ch/listing/1230366346/precision-made-scientific-mechanical>
- [20] Hans Kammer, Irma Mgelandze, *Physik für Mittelschulen*, 1. Auflage 2010, hep Verlag AG
- [21] URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/aerodynamik-report-spritsparmodelle-aus-dem-windkanal>
- [22] Wikipedia, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fluid>, August 2013
- [23] Basiswissen Schule Physik, Duden Paetec, Berlin 2010
- [24] URL: <http://www.schulserver.hessen.de/>, Oktober 2013
- [25] URL: <http://www.leifiphysik.de>, September 2013
- [26] URL: <http://photos.zoochat.com>, September 2013

- [27] URL: <http://www.lab-laborfachhandel.de>, Oktober 2013
- [28] Bissig Michael, *Schwimmwelt, Schwimmen lernen - Schwimmtechnik optimieren*, Schulverlag, Bern,
- [29] URL: [https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm\\_data/lm\\_282/auto/kap09/cd259.htm](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_282/auto/kap09/cd259.htm), März 2014
- [30] URL: <https://www.vibos.de/veranstaltung/physik-teil-3-von-4-schwingungen-und-wellen>, März 2024
- [31] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/707>
- [32] E.F.F. Chladni, *Die Akustik*, Taschenbuch Auflage 2012, Nabu Press
- [33] URL: <http://ephex.phys.ethz.ch>, Februar 2015
- [34] URL: <http://aufzurwahrheit.com/physik/quantenmechanik-5461.html>, März 2015
- [35] M. Cagnet, M. Françon, J.C. Thierr, *Atlas opitscher Erscheinungen*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1962
- [36] Bruno Cappeli et al. *Physik anwenden und verstehen*, Orell Füssli Verlag AG, 2004
- [37] Richard P. Feynman, *QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, Piper, 3. Auflage, 2018
- [38] Keith Johnson, *Physics for You: Revised National Curriculum Edition of GCSE*, Nelson Thornes, 2001
- [39] URL: <https://tu-dresden.de/mn/physik/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/praktika/pdf/TA.pdf?lang=en>, Juli 2018
- [40] Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1998
- [41] Unbekannt, *Engraving of Joule's apparatus for measuring the mechanical equivalent of heat*, Harper's New Monthly Magazine, No. 231, August, 1869
- [42] URL: <http://www.tf.uni-kiel.de>, März 2014
- [43] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie\\_\(Thermodynamik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_(Thermodynamik)), März 2014
- [44] URL: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20070616\\_Dampfmaschine.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20070616_Dampfmaschine.jpg), März 2014
- [45] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Bcoulomb.png>, März 2014
- [46] URL: <http://www.bader-frankfurt.de/widerstandscode.htm>, August 2014
- [47] Carl D. Anderson, *The Positive Electron*. Physical Review 43 (6): 491–494
- [48] URL: <http://pgd5.physik.hu-berlin.de/elektrostatik/ele12.htm>, Oktober 2014
- [49] URL: <http://www.aip.org/history/lawrence/radlab.htm>, Oktober 2014
- [50] URL: [http://www.solstice.de/grundl\\_d\\_tph/exp\\_besch/exp\\_besch\\_04.html](http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_besch/exp_besch_04.html), Oktober 2014
- [51] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6639>, Oktober 2017
- [52] URL: <https://de.serlo.org/52586/elektromagnetische-wellen>, Oktober 2017
- [53] URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum), August 2022
- [54] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zahnradmethode>, September 2022
- [55] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Double-Rainbow.jpg>, November 2023
- [56] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Regenbogen>, April 2024
- [57] Proton-Proton Kollision, CERN, Lucas Taylor
- [58] Ze'ev Rosenkranz, *Albert Einstein – Derrière l'image*, Verlag Neue Zürcher Zeitung, 2005.
- [59] Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik 17 (10): 891–921.
- [60] Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Springer-Verlag, 23. Auflage, 1988

- [61] Wikipedia, [https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitat\\_der\\_Gleichzeitigkeit](https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitat_der_Gleichzeitigkeit), August 2018
- [62] URL: <http://static.a-z.ch>, Mrz 2015
- [63] Max Planck, *Vom Relativen zum Absoluten*, Naturwissenschaften Band 13, 1925
- [64] A. H. Compton, *The Spectrum of Scattered X-Rays*, Physical Review 22 (5 1923), S. 409–413
- [65] URL: <http://www.peter-glowatzki.de>, Mai 2015
- [66] James Franck, *Transformation of Kinetic Energy of Free Electrons into Excitation Energy of Atoms by Impacts*, Nobel Lectures, Physics 1922-1941
- [67] URL: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche>, Mai 2015
- [68] David Prutchi, Shanni Prutchi, *Exploring Quantum Physics through Hands-on Projects*, Wiley, 1 edition (February 7, 2012)
- [69] URL: <http://w3.ppp1.gov/>, September 2015
- [70] O. Hofling, Physik. Band II Teil 1, Mechanik, Warme. 15. Auflage. Ferd. Dummfers Verlag, Bonn 1994
- [71] Kovalente Atomradien auf Basis der Cambridge Structural Database  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge\\_Structural\\_Database](https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge_Structural_Database), April 2018
- [72] G. Audi und A.H. Wapstra, Nuclear Physics A595, 409 (1995)
- [73] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gammastrahlung>, April 2018
- [74] URL: <http://www.wn.de/Muenster/2012/07/Das-Wunder-von...>, Juni 2012
- [75] L. Susskind und G. Hrabovsky, *The Theoretical Minimum - What you need to know to start doing physics*, Basic Books, 2014