

Skript zur Vorlesung

Optik

(Sommersemester 2013)

Diese Zusammenstellung enthält in kompakter, gelegentlich stichpunktartig aufzählender Form die wesentlichen fachlichen und methodischen Grundlagen der Grundschulmathematik, wie sie in der Vorlesung „Mathematik in der Grundschule 1“ über die Grundschulmathematik dargelegt werden. Es ist zum Gebrauch neben der Vorlesung gedacht und erhebt nicht den Anspruch, „in sich selbst verständlich“ oder vollständig zu sein.

S. Hilger

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der Geometrischen Optik \oplus	4
1.1 Lichtquellen und nicht-selbst-leuchtende Körper	4
1.2 Ausbreitung von Licht	5
1.2.1 Darstellung von Strahlengängen	6
1.3 Empfang von Licht	8
1.4 Die Sender-Empfänger-Auffassung vom Licht	8
1.5 Schattenbildung	9
1.5.1 Sonnenuhr	10
1.6 Mond- und Sonnenfinsternisse	11
1.7 Die Lichtgeschwindigkeit \ominus	12
1.7.1 Astronomisch: Olaf Römer	12
1.7.2 Terrestrisch: H. Fizeau	12
1.7.3 Im Labor: Modulierter Laser-Strahl	12
1.7.4 Die spezielle Relativitätstheorie: Albert Einstein	12
2 Reflexion \oplus	14
2.1 Gerichtete Reflexion	14
2.2 Diffuse Reflexion	14
2.3 Anwendung: Spiegelbild	15
2.3.1 Warum sind „Links“ und „Rechts“ beim Spiegel vertauscht?	17
2.3.2 Der Hohlspiegel \ominus	19
3 Brechung	20
3.1 Gesetz von Snellius \ominus	21
3.2 Die Optische Hebung	22
3.3 Totalreflexion	23
3.4 Dispersion und Brechung an einem Prisma	24
4 Optische Abbildungen	25
4.1 Reelle und virtuelle Bilder	25
4.2 Grundfunktionen optischer Geräte	26
4.3 Die Abbildung durch eine Sammellinse	28
4.4 Erzeugung reeller Bilder durch eine Sammellinse	29
5 Das Auge \oplus	31
5.1 Kurz- und Weitsichtigkeit \oplus	32
6 Optische Geräte	33
6.1 Die Lupe \oplus	33
6.2 Das astronomische Fernrohr \ominus	34
6.3 Das Mikroskop	35
7 Farben \oplus	37
7.1 Wir sehen Farben	37
7.2 Farben lassen sich anordnen: Das Farbspektrum	37
7.3 Spektralfarben und Frequenz	39
7.4 Die Wahrnehmung von Farben durch den Menschen \oplus	40
7.4.1 Additive Farbmischung	40
7.4.2 Subtraktive Farbmischung	42

7.5	Der Regenbogen	43
7.6	Anhang	46
7.7	Optische Illusionen	46

1 Grundlagen der Geometrischen Optik \oplus

1.1 Lichtquellen und nicht-selbst-leuchtende Körper

Körper, die bei fehlender äußerer Beleuchtung Licht aussenden, heißen *Lichtquellen* oder *selbst-leuchtende Körper*

- Thermische Anregung (hohe Temperaturen)
 - Sonne, Fixsterne, extragalaktische Objekte
 - Heiße Gase bei Verbrennungen (Feuer, Kerze, Gasflamme), Blitz
 - Heiße Lava
 - Heiße Körper: Glühwendel in Glühbirnen, Keramik oder Ziegelsteine beim Brennen, flüssiger Stahl, Glas beim Blasen
- Anregung durch el. Strom
 - Glimmlampen (Phasenprüfer, Nachtlicht, innerhalb Leuchtstoffröhre)
 - Fernseh- oder Monitorröhre
 - LED (Light Emitting Diode)
- Anregung durch Licht (oder UV-Licht, aus dem Geldscheinprüfgerät)
 - Phosphoreszierende Stoffe (Lichtschalter, Aufkleber, Playmobil-Gespenst, Leuchtstoffe an der Innenwand von Leuchtstoffröhren)
- Anregung durch chemische Vorgänge
 - Glühwürmchen
 - Anglerlicht
 - Disco-Lichter
- Sonstiges
 - LASER (Light Amplification by stimulated Emission of Radiation),
 - Kometen: Sie leuchten aufgrund der Anregung durch den Sonnenwind (= schnelle el. geladene Teilchen von der Sonne).
 - Polarlicht: Die Luft (100 km Höhe, nahe den magnetischen Polen) leuchtet aufgrund des Sonnenwinds, der im Magnetfeld der Erde abgelenkt wird.

Körper, die aufgrund äußerer Beleuchtung Licht aussenden, heißen *nicht-selbst-leuchtende Körper*

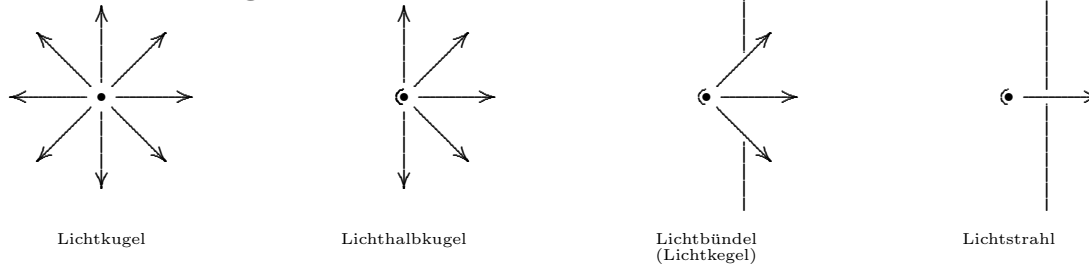
Unterscheide:

Oberfläche:	matt	spiegelnd	—
Durchsichtig:	Milchglas	Glasscheibe	Vakuum
Durchscheinend (streuend)		Trübes Wasser	Luftatmosphäre
Undurchsichtig:	Mond, Planeten, Schultafel, Stefan Hilger, ...	Metall, Spiegel	

In der geometrischen Optik werden als Lichtquellen oft Punktlichtquellen (PLQ) verwendet. Das sind „punktförmige“ Lichtquellen, die Licht — im Prinzip — in alle Richtungen aussenden. Hier handelt es sich um eine Modellvorstellung (Idealisierung).

In der Wirklichkeit kommen kleine klare Glühlampen oder LEDs dieser Modellvorstellung am nächsten.

1.2 Ausbreitung von Licht



- Das Modell des Lichtstrahls:
 - Die Punktlichtquelle sendet — prinzipiell — in alle Richtungen Licht aus: *Lichtkugel*.
 - Ein Teil des ausgesandten Lichts wird durch eine Blende ausgesondert. Es tritt ein *Lichtbündel* durch die Öffnung.
 - Bei kreisförmiger Blendenöffnung spricht man vom *Lichtkegel*.
 - Lichtstrahl: Die Blende wird (gedanklich) immer weiter verkleinert. Im (Ideal-)Grenzfall wird der Lichtkegel zum *Lichtstrahl*.
 - In der Realität gibt es keine Lichtstrahlen. Der Querschnitt eines Lichtbündels ist nicht punktförmig. das bedeutet auch, dass — prinzipiell immer — Beugungseffekte auftreten.
- Es handelt sich bei diesem Modell um eine Idealisierung. In Wirklichkeit müsste man immer Beugungseffekte miteinbeziehen.
- Lichtstrahlen breiten sich — in homogenen Medien — geradlinig aus. (Beim Durchqueren der Erdatmosphäre werden Lichtstrahlen aufgrund der variierenden (optischen) Dichte gekrümmt).
- Bei mehreren Punktlichtquellen oder flächenhaften Lichtquellen tritt ein „Riesenwirrwarr“ von Lichtstrahlen auf.
- Lichtstrahlen können einander durchdringen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.
- Lichtstrahlen sind unsichtbar (V: Laserpointer). Wie kann man sie (indirekt) sichtbar machen?
 - Streuung durch Staub in der Luft, Blütenstaub, Nebel, Weihrauch, Zigarettenrauch.
 - Auftreffen auf diffus reflektierende Flächen (Mattscheibe, Projektionsleinwand),
 - Entlangstreifen eines „*Lichtfächers*“ an Flächen.
 - Lichtstrahlen in Wasser können ebenfalls durch streuende Teilchen (beispielsweise Fluoreszin-Natrium) sichtbar gemacht werden.
- In der geometrischen Beschreibung der Lichtausbreitung (Strahlengänge) treten — je nach Situation — unterschiedlichste Namen von Lichtstrahlen auf:

Reflexionsstrahl, Brechstrahl, Brennstrahl, Parallelstrahl, Mittelstrahl, Konstruktionsstrahlen,...

1.2.1 Darstellung von Strahlengängen

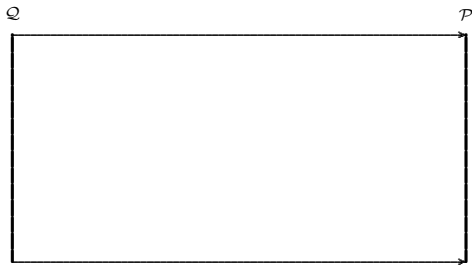
Im allgemeinen kann die Tatsache, dass Lichtausbreitung in Form von vielerlei sich durchdringenden Bündeln („Riesenwirrwarr“) geschieht, nur unzureichend zeichnerisch dargestellt werden.

- Ebene statt räumliche Darstellung.
- Die Tatsache, dass von einem einzelnen Leuchtpunkt ein ganzes Lichtbündel, eben nicht nur ein Strahl ausgeht, kann man durch Schattierung andeuten.
- Im allgemeinen können nur vereinzelte für eine optische Situation (B: Abbildung) charakteristische Lichtstrahlen gezeichnet werden:
 - Die ein Lichtbündel begrenzenden Strahlen.
 - Strahlen eines *Lichtfächers*.
 - Einzelne *Konstruktionsstrahlen* dienen zur geometrischen Konstruktion einer optischen Situation. Es kann sein, daß sie real gar nicht existieren.

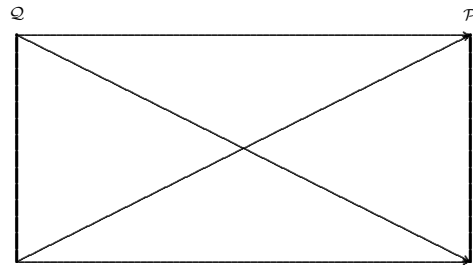
Die unzureichenden Möglichkeiten führen auch dazu, dass sich manche (fehlerhafte) Schülerauffassung über die Lichtausbreitung ausbildet.

Eine Möglichkeit, hier Abhilfe zu schaffen, bieten dynamische Darstellungen in Computer-Simulationen.

Welche Lichtstrahlen werden gezeichnet?



Die begrenzenden Lichtstrahlen



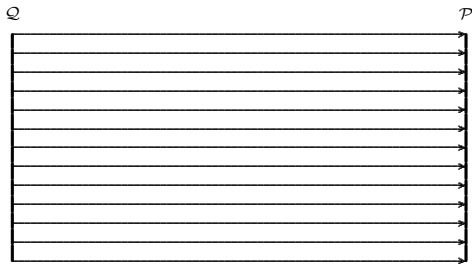
Die von den beiden äußersten Punkten ausgehenden Lichtstrahlen



„Alle“ ausgehenden Lichtstrahlen



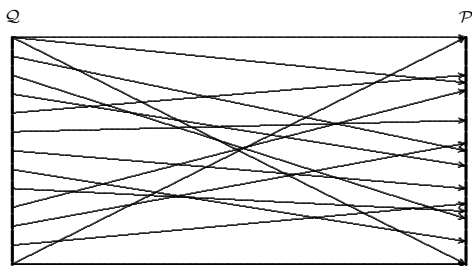
„Alle“ eintreffenden Lichtstrahlen



Nur parallele Lichtstrahlen



Alle Lichtstrahlen



Riesen-Wirrwarr



Reale Situation:
Kein Lichtstrahl sichtbar!

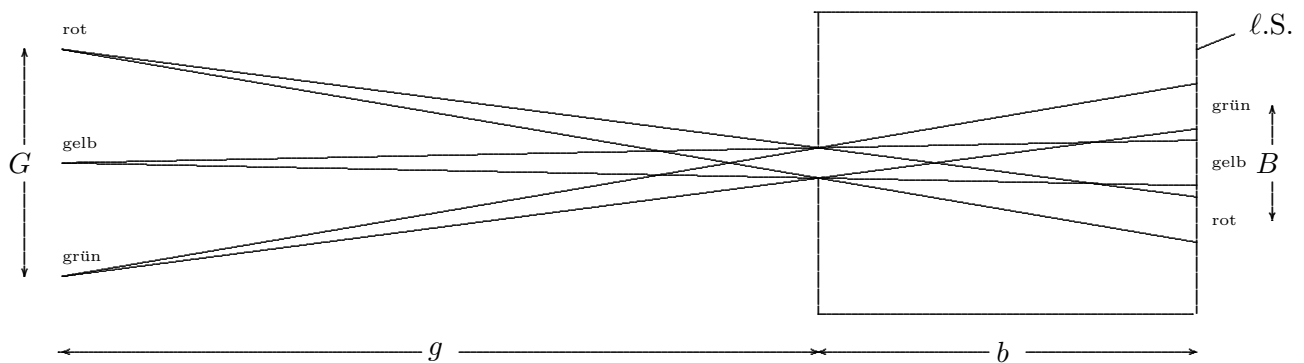
1.3 Empfang von Licht

Beim Auftreffen auf eine lichtempfindliche Schicht ($\ell.S.$) kann Licht „registriert“ werden. Beispiele:

- Netzhaut
- Film (lichtempfindliche chemische Substanzen)
- Fotozellen-Array

Wie aber können die Punkte eines leuchtenden Gegenstandes (Ampel) getrennt wahrgenommen werden?

- Ohne weitere Vorrichtung: Auf der $\ell.S.$ ist nichts zu erkennen.
- Camera obscura (Lochkamera): Auf der $\ell.S.$ ist die Ampel verschwommen und schwach zu erkennen (Es entstehen Lichtflecke).



- Es entsteht ein kopfstehendes und seitenverkehrtes (math. punktgespiegeltes) Bild. Die Bilder der Leuchtpunkte sind dabei Flecken (oder Scheibchen).
- Bei Verkleinerung der Öffnung wird das Bild schärfer, aber auch lichtschwächer.
- Vergleiche in der Tierwelt: „Lochkamera-Auge“ eines Kopffüßlers.
- Mathematik: Strahlensatz: $\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$.

- Linsensysteme: Es ist ein scharfes und helles Abbild der Ampel zu erkennen. Diese Prinzip wird beim menschlichen Auge und beim Fotografieren angewandt (\rightarrow später).

1.4 Die Sender-Empfänger-Auffassung vom Licht

Fehlvorstellung: Es wird oft intuitiv-spontan angenommen, dass beim Sehvorgang eine Aktivität des Sehenden vorliegt:

- Man wirft einen Blick auf etwas.
- Beim Zeichnen eines Strahlengangs wird versehentlich der Lichtstrahl vom Auge ausgehend gezeichnet.

Richtig dagegen ist, dass der Betrachter beim Sehen passiv ist. Licht kann streng genommen nur dadurch wahrgenommen werden, dass es ins Auge fällt.

Es gibt auch keinen Äther, ein Meer oder ein ähnliches Medium, das die Lichtausbreitung ermöglicht.

1.5 Schattenbildung

Der Schattenbildung liegt die folgende Situation zugrunde:

- Es gibt eine Lichtquelle \mathcal{Q} , die aus vielen leuchtenden Punkten Q besteht: Typische Beispiele sind die Sonne oder eine Lampe.
- Es gibt eine diffus reflektierende (oder diffus lichtdurchlässige) Fläche \mathcal{P} . Beispiele sind Erdboden, Grasfläche, Asphalt, Hauswand, Leinwand, Betttuch.
- Je nachdem, ob zwischen einem Punkt P der Fläche und einem Punkt Q der Lichtquelle eine geradlinige Verbindung besteht, kann ein von Q ausgehender Lichtstrahl \overrightarrow{QP} den Punkt P treffen oder nicht.
- Treffen dabei „ausreichend viele“ Lichtstrahlen $\overrightarrow{QP}, Q \in \mathcal{Q}$ auf den Punkt P , so kann das von P diffus reflektierte Licht von Betrachtern wahrgenommen werden.
 \implies Der Punkt P ist „im Licht“.
- Befindet sich ein (größerer) lichtundurchlässiger Gegenstand zwischen der Lichtquelle und dem Punkt P , so können viele (alle) von der Lichtquelle ausgehenden Lichtstrahlen den Punkt P nicht treffen. Die Intensität des von P ausgehenden Lichts ist geringer bzw. Null.
 \implies Der Punkt P ist „im Schatten“.

Unterscheide dabei die qualitative Situation:

im Licht — im *Kernschatten* „Alles oder Nichts“ / Schwarz–Weiß

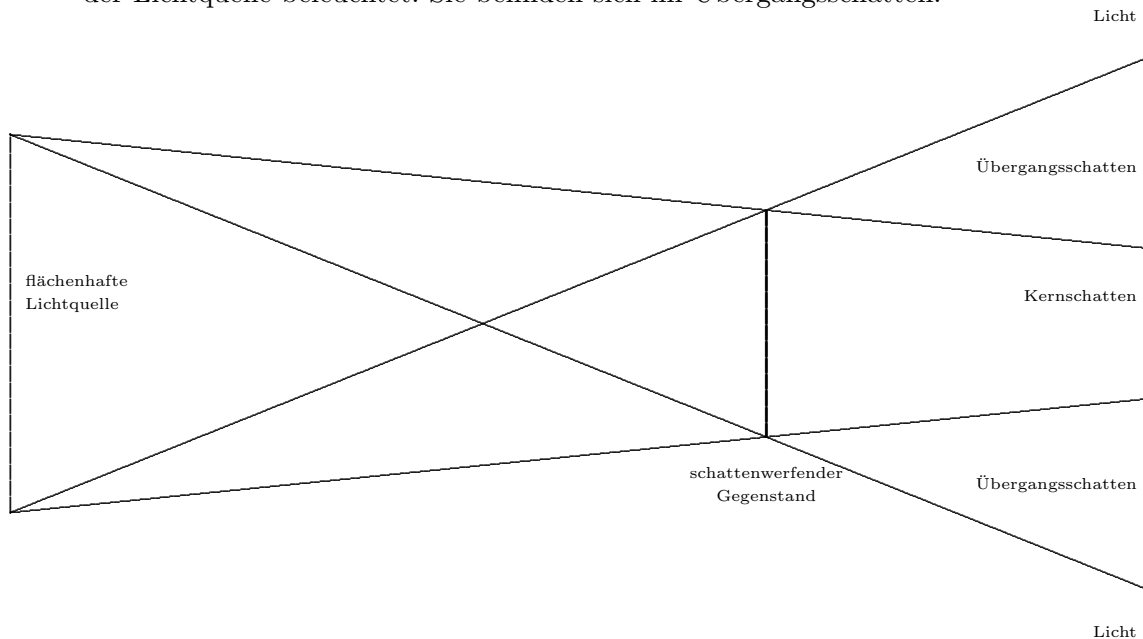
und die quantitative Situation

viel Licht — wenig Licht.

Im zweiten Fall spricht man auch vom *Halbschatten* oder dem *Übergangsschatten*.

□ Ein oder mehrere Punkt- oder Flächenlichtquellen sind aufgestellt.

- Eine Punktlichtquelle: Es ist der Kernschatten deutlich abgegrenzt erkennbar.
- Sind zwei Punktlichtquellen aufgestellt, so befindet sich ein Punkt, der vom Licht einer der beiden getroffen wird, im Halbschatten.
- Bei Beleuchtung durch eine flächenhafte Lichtquelle werden Punkte nur von einem Teil der Lichtquelle beleuchtet. Sie befinden sich im Übergangsschatten.



1.5.1 Sonnenuhr

- □ Stelle einen Schirmständer auf und beobachte, wie der Schatten des Schafts im Laufe des Tages über den Boden wandert.
- Blumentopf-Sonnenuhr
- In Eichstätt: An der Johanniskirche, Widmannngasse

1.6 Mond- und Sonnenfinsternisse

Betrachte die Mondbahn auf dem Beiblatt.

Im Normalfall ist bei Vollmond der Mond und bei Neumond die Sonne zu sehen. Der Grund dafür: Die Mondbahnebene ist gegenüber der Ekliptik leicht (um etwa $5^{\circ}9'$) geneigt, der Mond zieht also — im Normalfall — ober- oder unterhalb der Sonne vorbei.

Gelegentlich kommt es zu Finsternissen.

- Die Schnittgerade von Mondbahnebene und Ekliptik wird als *Knotenlinie* bezeichnet. Sie „geht durch die Erde“ und dreht sich im Laufe eines Mondumlaufs ($T_{\text{sid}} = 27,32166$ d) geringfügig weiter. Die Ursache ist die Präzession, der Zeitraum zwischen zwei aufsteigenden Passagen des Mondes in der Knotenlinie wird als *drakonitischer Monat* $T_{\text{dra}} = 27,21$ d bezeichnet.
- Eine Finsternis kommt zustande, wenn — von der Erde aus gesehen — Sonne **und** Mond (in etwa) in Richtung der Knotenlinie stehen.
- Die Sonne steht zweimal im Jahr in Richtung der Knotenlinie.
- Der Mond steht zweimal im „Monat“ (27 Tage) in Richtung der Knotenlinie.
- Mondfinsternis (während des Vollmonds): Die Erde steht zwischen Mond und Sonne und wirft so einen Schatten. Das in der Erdatmosphäre gebrochene Licht wird stark im blauen gestreut. Der Mond erscheint rötlich gefärbt. Der Mond erscheint auf der ganzen Welt gleich aussehend.
- Sonnenfinsternis (während des Neumonds): Der Mond steht zwischen Erde und Sonne und verdeckt so partiell, ringförmig oder total die Sonne. Beachte, dass die scheinbaren Größen von Mond- und Sonnenscheibe etwa gleich sind.
- Bei der totalen Sonnenfinsternis (z.B. 11. August 1999 in Süddeutschland) wird es dunkel, Sterne in der Umgebung der Sonne und die Sonnenkorona werden sichtbar. Dies ist wichtig für astronomische Beobachtungen. Der Kernschatten hat einen Durchmesser von etwa 200 km und bewegt sich mit $28 \frac{\text{km}}{\text{min}}$ über die Erdoberfläche.
- 1919 beobachteten eine englische Expeditionen in Zentralafrika und Brasilien während einer Sonnenfinsternis Sterne in der direkten Umgebung der Sonne. Sie konnten so nachweisen, dass Lichtstrahlen in der Nähe großer Massen abgelenkt werden. Dies war eine Bestätigung einer zentralen Aussage der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins von 1915/16, sie erregte weltweites Aufsehen.

1.7 Die Lichtgeschwindigkeit \ominus

1.7.1 Astronomisch: Olaf Römer

Ole Rømer (Dän, 1644 – 1710) gelang 1675 die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus Beobachtungen der Verfinsterung der Jupitermonde.



Mit Hilfe der Ganymed-Verfinsterungen kann man feststellen:

1. Die Umlaufzeit von Ganymed.
2. Bei Erde-Jupiter-Konjunktion: Den Zeitpunkt, zu dem Ganymed hinter Jupiter tritt.
3. Bei Erde-Jupiter-Opposition (ein halbes Jahr später): Abermals den Zeitpunkt, zu dem Ganymed hinter Jupiter tritt.

Bei der letzten Messung 3 stellt sich heraus, dass Ganymed etwa 1000 s später als gemäß 1 und 2 vorausgerechnet hinter den Jupiter tritt.

Dies führt zu dem Schluss, dass das Licht diese 1000 s benötigt, um die zusätzliche Strecke

$$\text{Erde 2} \quad \longrightarrow \quad \text{Erde 3}$$

zurückzulegen. Damit ergibt sich als Wert für die Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{\text{Erdbahndurchmesser}}{1000 \text{ s}} = \frac{300\,000\,000 \text{ km}}{1000 \text{ s}} = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Olaf Römer fand vor über 300 Jahren den Wert (umgerechnet) $214\,300 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Dies ist angesichts seiner Zeit sehr beachtlich. Die eigentliche Bedeutung seiner Messung liegt noch mehr darin, dass er die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit nachgewiesen hatte.

1.7.2 Terrestrisch: H. Fizeau

Armand Hippolyte Louis Fizeau (Fr, 1819 – 1896) gelang 1849 eine erdgebundene Messung der Lichtgeschwindigkeit mit Hilfe der sogenannten Zahnradmethode. Vergleiche Beiblatt.

1.7.3 Im Labor: Modulierter Laser-Strahl

Heutzutage kann man die Lichtgeschwindigkeit wie folgt bestimmen: Ein (mit Hilfe des Kerr-Effekts, E -Feld abhängige Doppelbrechung) modulierter Laserstrahl legt eine Wegstrecke hin und zurück und wird mit „sich selbst“ in Resonanz gebracht (Interferometrie).

Aus der Wellenlänge des Lichts und den Modulationsfrequenzen läßt sich dann die Lichtgeschwindigkeit berechnen.

1.7.4 Die spezielle Relativitätstheorie: Albert Einstein

Eine Teilaussage der speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins (1905) besteht darin, dass in jedem Bezugssystem die Lichtgeschwindigkeit den gleichen Wert hat. Daraus folgt die Relativität der Zeitmessung.

Die 17. Generalversammlung für Maße und Gewichte hat 1983 diesen Erkenntnis dadurch Rechnung getragen, dass sie die SI-Einheit Meter als die Länge festgelegt hat, die das Licht in

$$\frac{1}{2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ s}}$$

zurücklegt. Das bedeutet umgekehrt, dass der Wert der Lichtgeschwindigkeit nicht mehr durch Messung, sondern durch „Verordnung“ bestimmt ist.

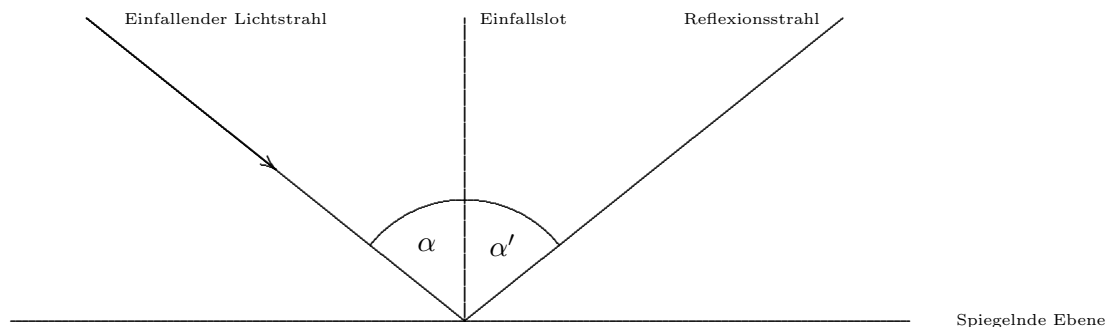
In der Meßpraxis bedeutet dies, dass Entfernungen und Abstände durch die Messung von Lichtlaufzeiten bestimmt werden.

Beispiele dafür sind ...

- Die Mond–Abstandsmessung: Amerikanische Astronauten haben auf dem Mond einen Tripelspiegel aufgestellt. Aus der Laufzeit eines Lichtsignals zum Mond und zurück (etwa 2,5 s) kann man die aktuelle Entfernung bestimmen.
- Vermessungsinstrumente (bsp. Fa. Hilti), die auf diesem Prinzip beruhen.
- In der Astronomie ist es — zum Teil — üblich, Entfernungen als Lichtlaufzeiten anzugeben. So ist die Sonne 8 Lichtminuten, unser Nachbarfixstern α Centauri 4,2 Lichtjahre, unsere Nachbargalaxie, der Andromedanebel $2,7 \cdot 10^6$ Lichtjahre entfernt.

2 Reflexion \oplus

2.1 Gerichtete Reflexion



Der Reflexionslichtstrahl ist eindeutig charakterisiert dadurch, dass ...

- Einfallender Lichtstrahl, Einfallslot und Reflexionslichtstrahl in einer Ebene liegen.
- Einfallswinkel und Reflexionswinkel (gemessen in dieser Ebene) übereinstimmen:

$$\alpha = \alpha' \quad (\text{Reflexionsgesetz})$$

Das Gesetz ist so auch richtig für gekrümmte (aber spiegelnde) Flächen. Aus diesem Grund arbeitet man auch lieber mit dem Einfallslot.

V

- Optische Scheibe,
- Achte darauf, dass bei einem normalen Spiegel die eigentlich spiegelnde Fläche unterhalb der physischen Oberfläche des Spiegels ist. Verwende einen „Oberflächenspiegel“!
- Der „Ein-Ebenen-Anteil“ des Reflexionsgesetzes kann leicht mit dem folgenden Experiment dargelegt werden: Ein Lot (Senkblei) wird über einem waagrecht liegenden Spiegel montiert. Dann wird der Strahl eines Laserpointers (Vorsicht) auf den Punkt des Spiegels genau unter dem Lot gerichtet. Bläst man nun Rauch oder Kreidestaub in den Strahlengang, so kann man erkennen, dass Einfallstrahl, Einfallslot und Reflexionsstrahl in einer Ebene liegen.

2.2 Diffuse Reflexion

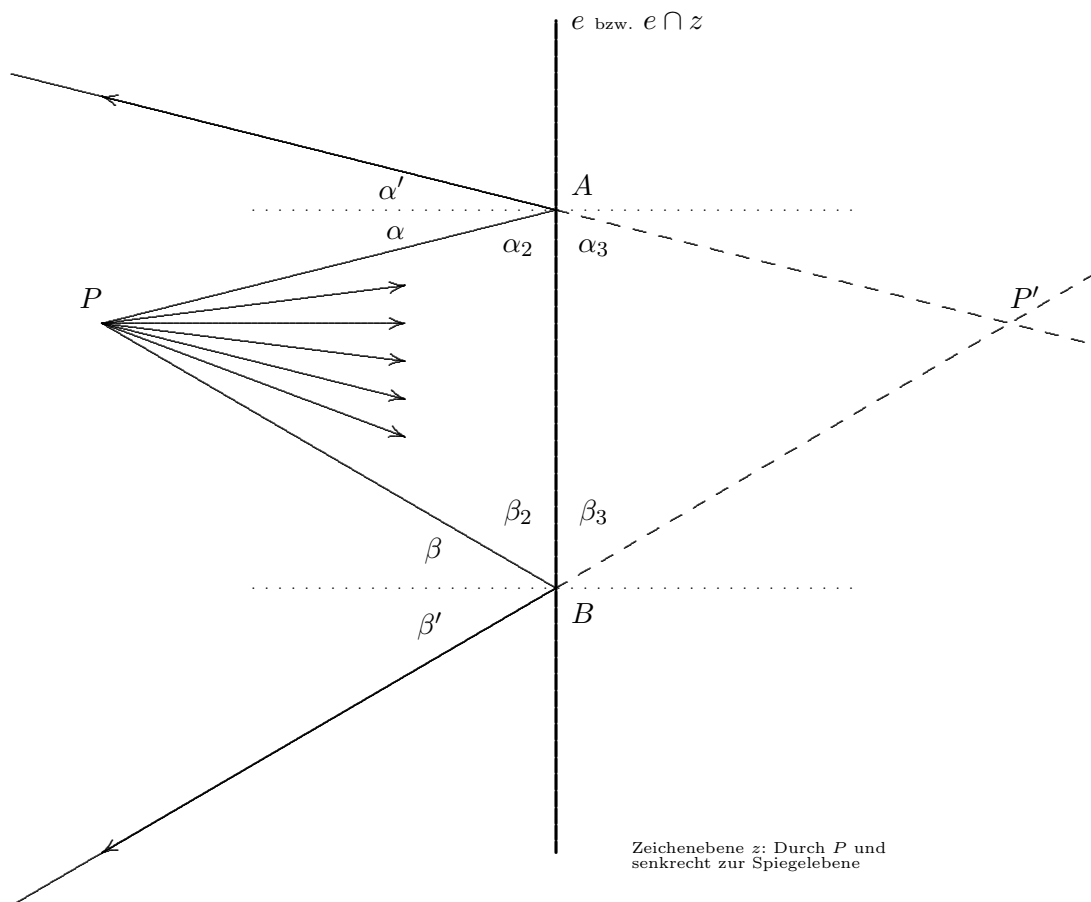
Ist eine Oberfläche matt, so tritt diffuse (= ungerichtete) Reflexion auf, die gelegentlich dadurch dargestellt wird, dass eng benachbarte parallele Lichtstrahlen in verschiedene Richtungen gerichtet reflektiert werden.

Tatsächlich sind aber die Abmessungen der Rauigkeit bereits in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts, so dass die Wellentheorie des Lichts und der Teilchencharakter der Oberflächenmaterie berücksichtigt werden müssen. („Reflexionsgitter“, Streuung)

Das gestreute Licht verändert im allgemeinen seine Farbe.

Nur bei der diffusen Reflexion kann ein Körper einem Lichtstrahl Informationen über sein Aussehen mitgeben. Die optische Wahrnehmung der „Welt“ wird so erst möglich.

2.3 Anwendung: Spiegelbild



- Gegeben sei im Raum eine Spiegelebene e und ein Leuchtpunkt P .
- Wir betrachten zwei der Lichtstrahlen, die von P aus auf die Spiegelebene fallen und ihre Reflexionsstrahlen.
- Es sei P' der Schnittpunkt der nach der anderen Spiegelseite verlängerten Reflexionsstrahlen.
- Behauptung: P und P' liegen (innerhalb der Zeichenebene z) zueinander achsensymmetrisch bezüglich der Achse $e \cap z$ (und damit räumlich symmetrisch bezüglich der Ebene e).
- Begründung:

1. Aufgrund des Reflexionsgesetzes gilt:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha' & \implies & \alpha_2 = \alpha_3 \\ \beta &= \beta' & \implies & \beta_2 = \beta_3 \end{aligned}$$

2. Wegen $\overline{AB} = \overline{AB}$ sind die Dreiecke $\triangle PAB$ und $\triangle P'AB$ (nach dem WSW-Satz) kongruent.
3. Das bedeutet aber, dass die beiden Dreiecke achsensymmetrisch bzgl. $e \cap z$ liegen.

Die Reflexionsstrahlen scheinen also von dem Punkt P' hinter dem Spiegel herzukommen. P' heißt deshalb *virtueller Bildpunkt* von P .

Entsprechend heißt das Bild G' eines leuchtenden Gegenstandes G das *virtuelle Bild* von G .

Aus dieser Überlegung heraus ergeben sich die folgenden Eigenschaften eines Spiegelbildes, die man auch experimentell ermitteln kann:

- Entsprechende Längen bei Gegenstand und Spiegelbild stimmen überein.
- Entsprechende Winkel bei Gegenstand und Spiegelbild stimmen (im Maß) überein.
- Gegenstand und Spiegelbild (bzw. ihre entsprechenden Punkte) haben den gleichen Abstand zum Spiegel. Genauer: Die (gedachte) Verbindungsstrecke von Gegenstandspunkt und Spiegelpunkt wird von der Spiegelebene senkrecht halbiert.
- Das Spiegelbild ist ortsfest, d.h. unabhängig vom Betrachtungsstandpunkt. Es kann aber nicht auf dem Spiegel lokalisiert werden.
- Das Spiegelbild weist die gleiche Form (und Farbe) auf wie der Gegenstand.
- Das Spiegelbild eines rechts-orientierten Dreibeins (B: Daumen – Zeigefinger – Mittelfinger der rechten Hand) ist links-orientiert, d.h. die Begriffe „Links“ und „Rechts“ werden vertauscht.

V Es wird eine Glasplatte (als halbdurchlässiger Spiegel) **senkrecht** auf einem Tisch aufgestellt. Als Halterung kann man Stative aus der Physiksammlung oder schwere Bücher verwenden. Zwei genau gleiche Plastikfiguren (o.ä.) werden auf beiden Seiten der Glasscheibe so aufgestellt, dass beim Blick von vorne das Spiegelbild der vorderen Figur und die hintere Figur zur Deckung kommen.

Eventuell sollte man auf die Beleuchtung achten. Unter Umständen treten lästige Doppelreflexionen (an Vorder- und Rückseite der Glasplatte) auf.

Mit dieser Anordnung kann man die obigen Gesetze überprüfen.

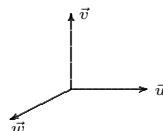
- Die beiden Plastikfiguren stehen achsensymmetrisch zueinander. (Die Achse ist die Schnittgerade von Glasplattenebene und Tischebene.)
- Die Kerze im Wasserglas: Hinter der Glasplatte wird ein wassergefülltes Glas, vor der Glasplatte eine brennende Kerze aufgestellt. Wenn man dies geeignet arrangiert, entsteht beim Blick durch die Glasplatte der Eindruck, als würde die Kerze im Wasser brennen.

2.3.1 Warum sind „Links“ und „Rechts“ beim Spiegel vertauscht?

Für eine fundierte Beantwortung dieser Frage gilt es zunächst, genauer festzulegen, was „Links“ und „Rechts“ bedeuten. Zur Klärung bedienen wir uns letztlich der mathematischen Grundlegung dieser Begriffe, die folgenden Ausführungen genügen allerdings nicht dem Anspruch einer mathematisch-vollständigen und begrifflich-sauberen Argumentation.

Wir bezeichnen eine Menge von drei Ortsvektoren $\{\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}\}$ im „Anschauungsraum“, die

- alle den gleichen Anfangspunkt haben und
- paarweise senkrecht aufeinander stehen,



als *kartesisches Koordinatensystem* oder kurz *Dreibein*.

Zwei solche Dreibeine heißen *gleich-orientiert*, wenn sie durch Verschiebungen oder Drehungen ineinander überführt werden können.

Es stellt sich heraus, dass es gerade zwei Klassen von gleich-orientierten Dreibeinen gibt.

Durch die Wahl einer Reihenfolge der Vektoren, zum Beispiel

$$(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}) \quad \text{oder} \quad (\vec{w}, \vec{v}, \vec{u})$$

im Dreibein ist eine Orientierung festgelegt. Vertauscht man zwei Vektoren in der Reihenfolge, so ändert sich die Orientierung, d.h. also, dass das keine Überführung des einen in das andere durch Drehung oder Verschiebung möglich ist.

Wir nennen ein Dreibein *rechts-orientiert*, wenn es die gleiche Orientierung hat wie das durch den menschlichen Körper festgelegte orientierte Dreibein, bestehend aus den Vektoren (mit Reihenfolge)

1. Richtung vom Kopf zum Fuß,
2. Richtung vom Hinterkopf zum Gesicht,
3. Richtung von der Körperhälfte mit Herz zur Körperhälfte ohne Herz.

Ein umgekehrt orientiertes Dreibein heißt *links-orientiert*.

Beachte, dass die Ersetzung der ersten Richtung durch „nach unten“ problematisch ist ebenso wie die Ersetzung des Herzens durch die Schreibhand bei der dritten Richtung.

Diese Definition stellt eine mathematische Präzisierung des Alltagsbegriffs „Rechts“ dar. Die Alltagsfestlegung „Rechts“ beruht tatsächlich auf einer intuitiv-unausgesprochenen Auszeichnung einer Reihenfolge von insgesamt drei Richtungen. Man bemerkt dies beispielsweise dadurch, dass sich die Richtung „Rechts“ tatsächlich im Raum genau umdreht, wenn ein Mensch sich entweder selbst umdreht oder einen Kopfstand macht. Auch die Sprechweise „Von Dir aus gesehen rechts“ belegt, dass dieser Begriff durch die Stellung „Mensch im umgebenden Raum“ fixiert ist.

Auch das orientierte Dreibein, bestehend aus

1. Richtung des Daumens,

2. Richtung des Zeigefingers,

3. Richtung des Mittelfingers

jeweils ausgestreckt an der rechten Hand, ist rechts-orientiert.

Man kann dies leicht an sich selbst nachvollziehen, in dem man diese Finger in die jeweils zugeordneten weiter oben beschriebenen Richtungen ausstreckt.

Man kann nun mathematisch beweisen, dass bei der Spiegelung an einer Ebene die Orientierung eines Dreibeins gerade umgekehrt wird.

Auch das (physikalisch-optische) Spiegelbild eines Gegenstands-Dreibeins hat eine entgegengesetzte Orientierung.

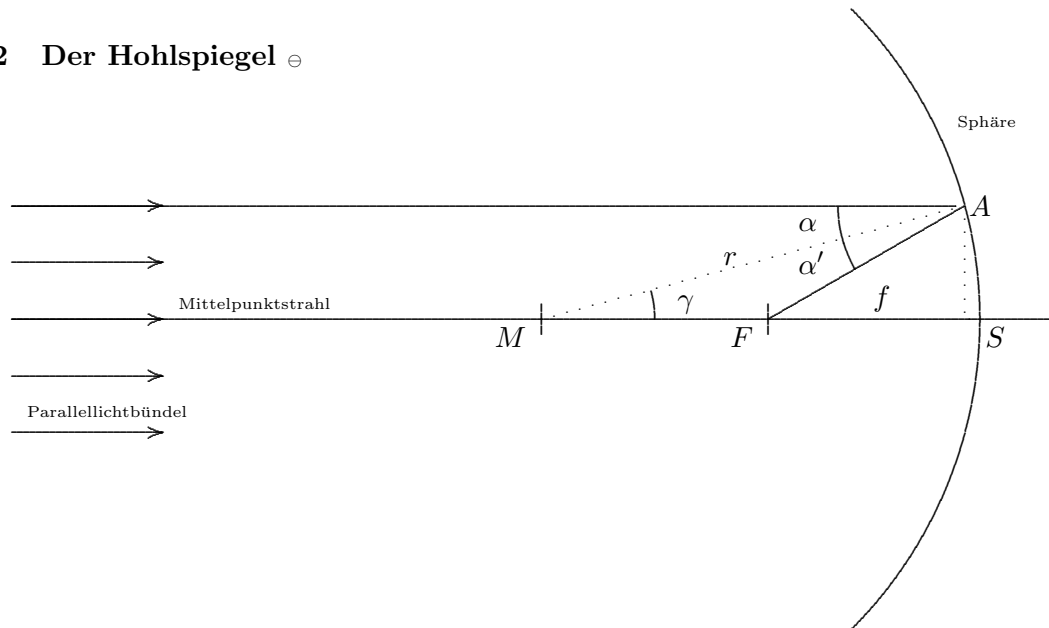
Das oben angegebene rechts-orientierte Mensch-Dreibein kann nicht durch Drehung oder Verschiebung in das Spiegel-Dreibein des „gespiegelten“ Menschen überführt werden.

Die in der Überschrift gestellte Frage ist also mit **Ja** zu beantworten.

Weitere Fragen zur Anregung:

- Kann ein Mensch im Weltraum den Begriff „Rechts“ festlegen.
- Können Sie dem Bewohner einer außerirdischen fernen Welt per Funksignal klar machen, was „Rechts“ bedeutet? Gehen Sie ruhig davon aus, dass er perfekt Deutsch spricht.
- Werden nur bei senkrecht hängenden Wandspiegeln „Rechts“ und „Links“ vertauscht?
- Werden bei einer Spiegelung „oben“ und „unten“ vertauscht? Wie ist das bei der Spiegelung an einer Wasseroberfläche?
- Hat der „Uhrzeigersinn“ etwas mit der Orientierung von Dreibeinen zu tun?
- Können Wesen, die in einer zweidimensionalen (n -dimensionalen) Welt leben, festlegen, was „Rechts“ bedeutet?
- Können wir den Begriff „Rechts“ nur deshalb festlegen, weil wir Winkel messen können?

2.3.2 Der Hohlspiegel \ominus



Ein Bündel von **achsennahen** parallelen Lichtstrahlen, beispielsweise von der Sonne, fällt auf den Hohlspiegel.

Wir bezeichnen mit F den Schnittpunkt von Mittelpunktstrahl und dem Reflexionsstrahl eines — beliebig ausgewählten — Strahls. Dieser Punkt F heißt — naheliegend — *Brennpunkt*.

Wir zeigen, dass F Mittelpunkt von $[MS]$ — und damit unabhängig von dem gewählten Strahl — ist.

Es gilt:

- $\alpha = \alpha'$ (gemäß Reflexionsgesetz)
- $\alpha = \gamma$ (Z -Winkel)
- $\overline{FA} \approx \overline{FS}$ (Kleinwinkelnäherung, A und S liegen nahe beieinander.)
- $\implies \alpha' = \gamma \implies \triangle MAF$ gleichschenkelig $\implies \overline{MF} = \overline{FA} = \overline{FS}$.

Insgesamt ist also F näherungsweise Mittelpunkt von $[MS]$: Die Näherung wird bei der Definition der Brennweite unterschlagen. Es gilt also:

$$\boxed{f = \frac{1}{2} \cdot r} \quad (\text{Die Brennweite ist gleich dem halben Radius.})$$

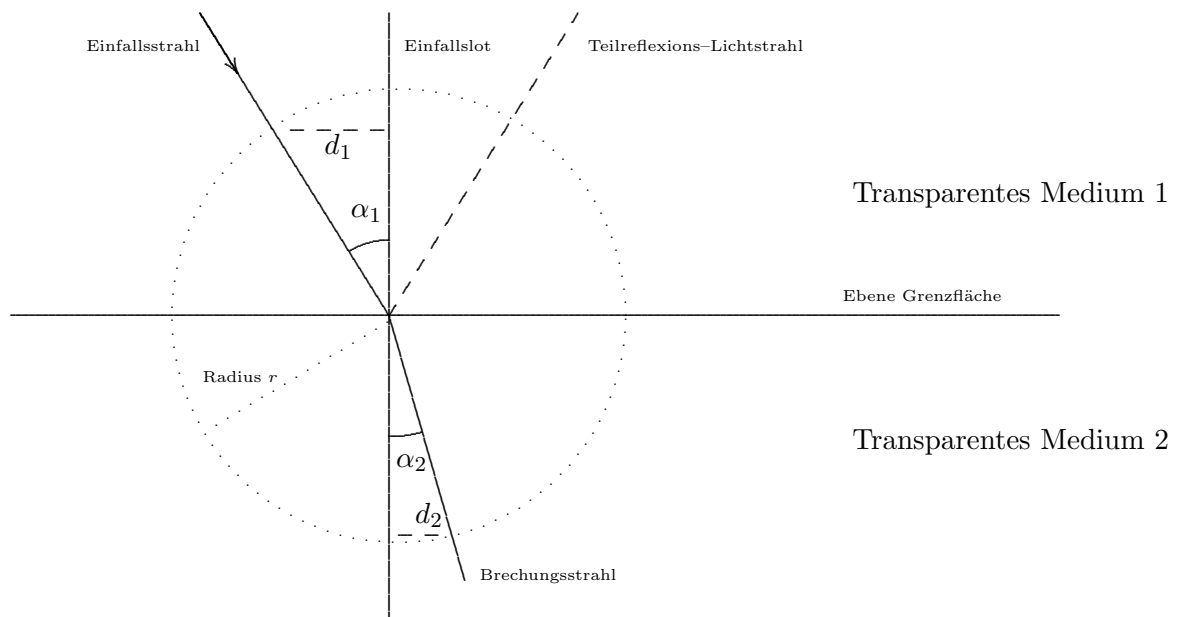
Man kann — geometrisch — zeigen, dass parallel einfallende Lichtstrahlen genau durch einen Punkt reflektiert werden, wenn der Hohlspiegel parabolisch geformt (Paraboloid) ist und er so gehalten wird, dass die Dreh-Symmetrieachse zum einfallenden Licht parallel ist.

Blickt man — von innerhalb der Brennweite — in einen Hohlspiegel, so tritt eine vergrößernde Wirkung auf. Genauer: Das (virtuelle) Spiegelbild ist größer als der Gegenstand. Damit verbunden ist eine Verkleinerung des Gesichtsfelds.

Beispiele für Hohlspiegel:

- Brennspiegel (Entzündung des Olympia-Feuers)
- Kosmetik- oder Rasierspiegel,
- Spiegel in Scheinwerfern von Autos oder Fahrrädern, Taschenlampen,
- Augenspiegel des Arztes,
- V Kaustik in einem Ring.

3 Brechung



Beim Übergang eines Lichtstrahls von einem Medium 1 in ein Medium 2 wird ein Lichtstrahl gebrochen, d.h. es gilt i.a. $\alpha_1 \neq \alpha_2$.

Ist der Winkel α_1 größer als der Winkel α_2 , so nennt man das Medium 1 *optisch dünner* als Medium 2. Umgekehrt spricht man von einem *optisch dichteren* Medium 2.

Umgekehrt formuliert man dann als „Gesetz“, dass der Lichtstrahl beim Übergang von einem optisch dünneren Medium in ein optisch dichteres zum Lot hin gebrochen wird. Ein „Teil“ des Lichtstrahls wird — gemäß Reflexionsgesetz — reflektiert.

Phänomene, Beispiele, Experimente:

- Optische Scheibe evtl. Magnethafttafel.
- Sichtbarkeit von Sternen oder der Sonne: Beim Eintritt in die Erdatmosphäre wird Licht von Himmelskörpern gebrochen. Die Position des Himmelskörpers über dem Horizont erscheint höher über dem Horizont. Es kann sein, dass ein „astronomisch-geometrisch untergegangener“ Himmelskörper noch zu sehen ist.
- Sonnenabplattung: Infolge der Brechung erscheint auch die Sonne beim Untergang (oder Aufgang) angehoben. Außerdem erscheint sie bzgl. der vertikalen Ausdehnung verkürzt; dieser Effekt ist aber so klein, dass man ihn kaum wahrnehmen bzw. von einer optischen Täuschung kaum unterscheiden kann.
- Fischestecken
- Münze im Wasser

3.1 Gesetz von Snellius \ominus

Genauer gilt: Das Verhältnis der Sinusfunktionen von Einfallswinkel α_1 und Brechungswinkel α_2 ist konstant:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n_{12} = \text{const}$$

Die (dimensionslose) Konstante n_{12} ist dabei von dem Medienpaar 1 und 2 abhängig.

Dies kann man auch geometrisch über die Halbsehnen d_1 und d_2 für einen beliebigen Kreis mit Radius r um den Einfallspunkt erfassen. Wegen $\sin \alpha_j = \frac{d_j}{r}$ gilt

$$\frac{d_1}{d_2} = n_{12} = \text{const}$$

Vergleicht man für viele verschiedene Medienpaare x, y die Konstanten n_{xy} , so stellt sich heraus, dass man jedem Medium x eine Zahl n_x zuordnen kann, so dass

$$n_{xy} = \frac{n_y}{n_x}.$$

n_x heißt *Brechzahl* oder *Brechungsindex* für das Medium x . Zusammengefasst kann man damit das Gesetz von Snellius (Snell van Royen, nl, 1581 – 1626) (auch: Descartes) aufstellen:

Jedem transparenten Medium x kann man eine Brechzahl n_x so zuordnen, dass beim Übergang eines Lichtstrahls von einem Medium 1 zu einem anderen Medium 2 der folgende Zusammenhang zwischen Einfalls- und Brechungswinkel gilt:

$$\boxed{\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}}$$

Dabei müssen Einfallstrahl, Brechungsstrahl und Einfallslot in einer Ebene liegen. Einige interessante Brechzahlen sind

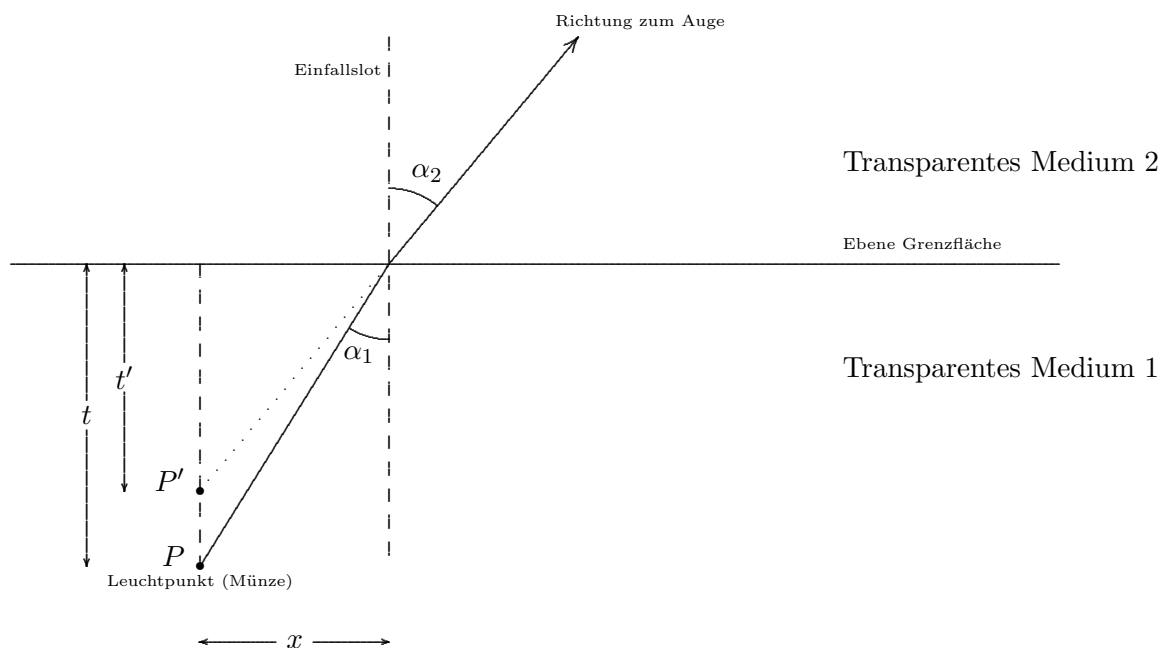
Vakuum (Normierung)	1 (exakt)
Luft (Normalbedingung)	1,00027
Wasser	1,33
Fensterglas	1,51
Benzol	1,50
Saphir	1,77
Diamant (mit Abstand)	2,42

Im 19. Jahrhundert haben Messungen der Lichtgeschwindigkeit gezeigt, dass die Brechzahlen die Verhältnisse der Lichtgeschwindigkeiten wiedergeben. Das Snellius-Gesetz kann ergänzt werden durch die Gleichung

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad \text{bzw.} \quad n_x = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_x}.$$

Im Rahmen der Theorie von Lichts als elektromagnetischer Welle kann dieser Zusammenhang (glänzend) theoretisch begründet werden.

3.2 Die Optische Hebung



Aus der Zeichnung ist zu entnehmen, dass

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \stackrel{\text{KWN}}{\approx} \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{x/t}{x/t'} = \frac{t'}{t}, \quad \text{also} \quad t' \approx \frac{n_2}{n_1} t.$$

KWN: Kleinwinkelnäherung, wir legen die Annahme zugrunde, dass die Winkel α_1 und α_2 klein sind, d.h. der Blick auf die Grenzfläche ist steil.

Ein (virtueller) Bildpunkt P' des Leuchtpunkts P (Tiefe t) befindet sich in der Tiefe t' . Der Leuchtpunkt scheint auf den Bruchteil $\frac{n_2}{n_1}$ der Tiefe angehoben.

Phänomene, Beispiele, Experimente:

- Das geknickte Stab: Taucht man einen geraden Stab (Lineal) schräg ins Wasser, so erscheint er — bei seitlich schräger Betrachtung — unter Wasser nach **oben** abgelenkt. Beachte, dass eine Zeichnung des Strahlengangs beim Brechungsgesetz suggeriert, dass der Stab nach unten geknickt sei.
- Gegenstände (Münzen) unter Wasser erscheinen angehoben.
- Der Fischfang mit dem Speer.
- Wenn man umgekehrt von „unter Wasser“ Gegenstände (Menschen) außerhalb betrachtet, diese vornüber gebeugt.
- Der Spuckfisch.
- „Die Münze wird sichtbar.“

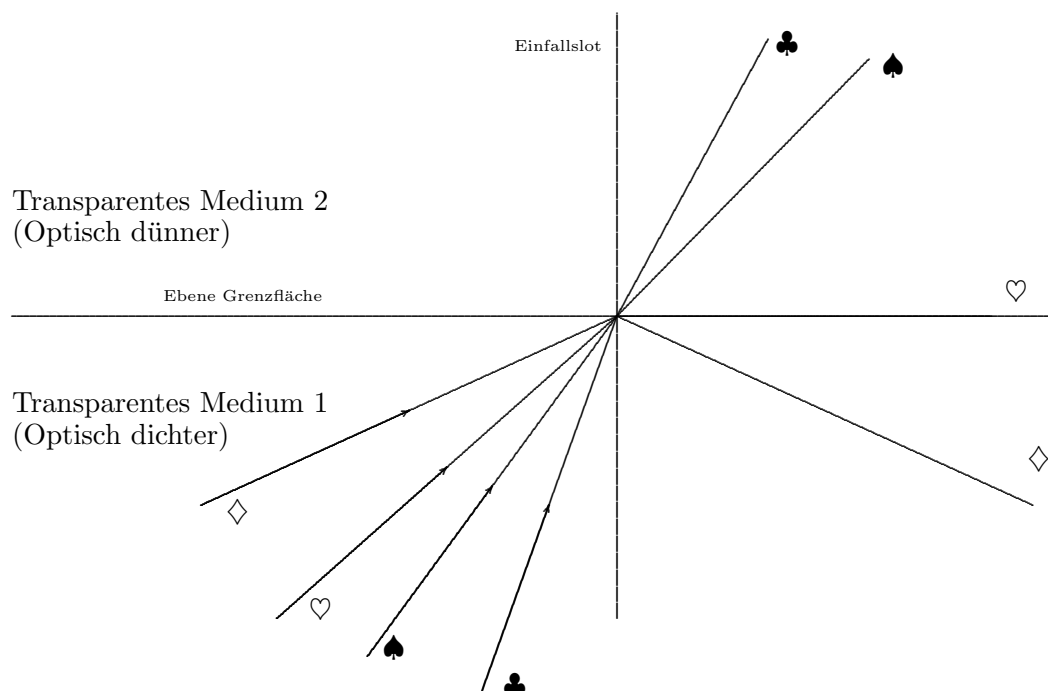
Bei exakter Rechnung ohne Kleinwinkelnäherung:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = \left(\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}\right)^2 = \frac{\frac{x^2}{t^2+x^2}}{\frac{x^2}{t'^2+x^2}} = \frac{t'^2+x^2}{t^2+x^2}$$

Nach t'^2 aufgelöst ergibt dies:

$$t'^2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot (t^2 + x^2) - x^2, \quad \text{mit } x \rightarrow 0 \text{ dann} \quad t' \rightarrow \frac{n_2}{n_1} \cdot t.$$

3.3 Totalreflexion



Beim Übergang eines Lichtstrahls (♣, ♠) von einem optisch dichteren Medium 1 in ein optisch dünneres Medium 2 wird er immer mehr vom Lot weg gebrochen (Die teilreflektierten Strahlen fehlen in der Zeichnung).

Irgendwann (♥) tritt der Fall ein, dass der Brechungswinkel den Wert 90° hat.

$$\alpha_2 = 90^\circ \implies \sin \alpha_2 = 1.$$

Der dazu gehörige Einfallswinkel α_1 heißt *Grenzwinkel der Totalreflexion* α_g . Gemäß Brechungsgesetz ergibt sich:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin \alpha_g}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_g.$$

Das heißt der Grenzwinkel hängt von den Brechzahlen der beiden Medien ab.

Wenn der Grenzwinkel überschritten wird (♠), so tritt *Totalreflexion* ein.

Anwendungen:

- Lichtleiter (Technik, Lampen, Beleuchtung).
- Prismenfeldstecher,
- Luftspiegelungen aller Art.

V Blick durch ein Glasprisma.

Total-reflektiertes Licht erweckt — wie das gewöhnlich reflektierte Licht auch — einen silbrig-spiegelnden Eindruck:

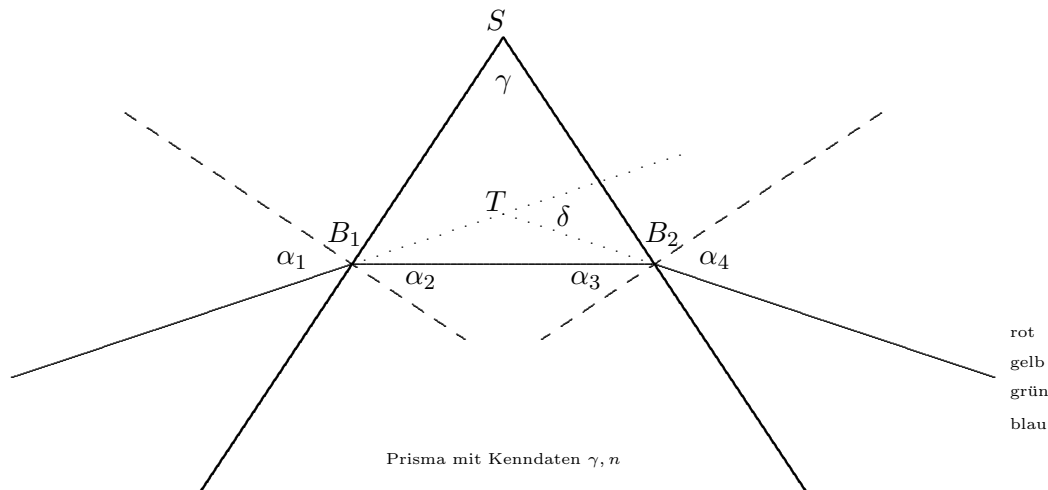
- Glasrichter oder luftgefüllte Hohlräume (Plastiktüte) unter Wasser.
- „Bauernsilber“: Glas mit eingeschlossener Luft erscheint silbrig.
- Sprünge in durchsichtig-massiven Körpern.
- Legt man eine Münze unter den gewölbten Boden eines Konservenglases, so „verschwindet“ sie, wenn in das Glas Wasser eingefüllt wird.

3.4 Dispersion und Brechung an einem Prisma

Als *Dispersion* bezeichnet man die Tatsache, dass die Brechzahlen geringfügig, aber doch mess- und beobachtbar, von der Frequenz (Farbe) des Lichts abhängen.

Dies macht sich bemerkbar bei ...

- Farbspielen an Prismen, Linsen und anderen transparenten Körpern (Schmuck),
- Farbfehler bei optischen Geräten (OHP, Mikroskop)
- Entstehung des Regenbogens.



Mit Hilfe einer Lampe, einer Linse und eines Spalts wird ein Parallellichtfächer erzeugt. Im Querschnitt erscheint ein „Lichtstrahl“. Er ist so gerichtet, dass ein — bzgl. der Symmetrieebene des Prismas — symmetrischer Strahlengang auftritt, d.h. $\alpha_1 = \alpha_4$, $\alpha_2 = \alpha_3$.

Wir wollen — in Abhängigkeit von den Prismendaten n und γ die Winkel α_1 und α_2 sowie den Ablenkwinkel δ bestimmen.

Dazu betrachten wir die Innenwinkelsummen in den beiden Dreiecken

$$\begin{aligned} \Delta B_1 B_2 T: & 2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + 180^\circ - \delta = 180^\circ \\ \Delta B_1 B_2 S: & 2 \cdot (90^\circ - \alpha_2) + \gamma = 180^\circ \end{aligned}$$

Wir vereinfachen diese beiden Gleichungen und schreiben das Brechungsgesetz dazu:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{\delta}{2}, \quad \alpha_2 = \frac{\gamma}{2}, \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n.$$

Damit haben wir drei Gleichungen für die drei unbekannt Winkel $\alpha_1, \alpha_2, \delta$.

Die Lösung läßt sich leicht ermitteln:

$$\alpha_2 = \frac{\gamma}{2}, \quad \sin \alpha_1 = n \cdot \sin \frac{\gamma}{2}, \quad \boxed{\sin \frac{\gamma + \delta}{2} = n \cdot \sin \frac{\gamma}{2}}$$

Infolge der Dispersion werden die Farbanteile im Lichtstrahl beim Durchgang durch das Prisma abhängig von der Frequenz (Farbe) verschieden stark abgelenkt. Verwendet man weißes Licht, so ist ein Farbspektrum (auf einer Mattscheibe o.ä.) erkennbar.

Diese Idee findet Anwendung bei der „Prismenspektroskopie“.

4 Optische Abbildungen

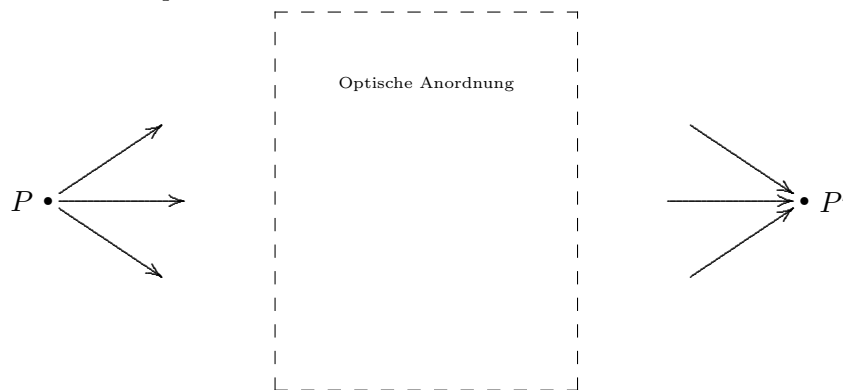
4.1 Reelle und virtuelle Bilder

Wir betrachten die Situation, die einer optischen Abbildung zugrundeliegt, zunächst abstrakt-mathematisch.

Es sei im dreidimensionalen Raum ein Leuchtgegenstand gegeben. Von jedem einzelnen Punkt dieses Leuchtgegenstandes wird ein (Vollwinkel-)Lichtbündel in den umgebenden Raum ausgesandt. Der Gegenstand kann auch „unendlich weit entfernt sein“.

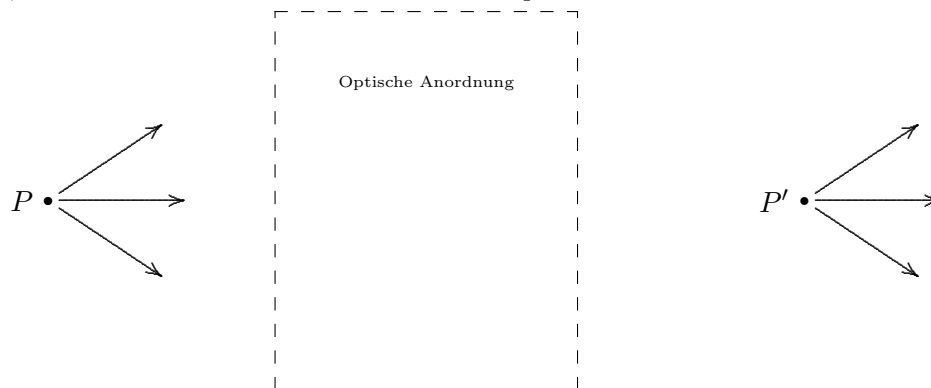
Es sei P irgendein beliebiger Punkt des Leuchtgegenstandes.

- Wird durch eine optische Anordnung erreicht, dass ein Teil des von dem Punkt P ausgehenden Lichtbündels sich wieder in einem Punkt P' des Raumes vereinigt, so heißt dieser Punkt P' *reeller Bildpunkt* von P .



Befindet sich an dem Bildpunkt P' ein diffus streuender oder reflektierender Gegenstand, so „leuchtet“ der Bildpunkt auf.

- Wird durch eine optische Anordnung erreicht, dass ein Teil des von dem Punkt P ausgehenden Lichtbündels sich so ausbreitet, als würde es von einem Punkt P' des Raumes ausgehen, so heißt dieser Punkt P' *virtueller Bildpunkt* von P .



Der virtuelle Bildpunkt ist unter Umständen optisch völlig unzugänglich (B: Spiegelbild).

4.2 Grundfunktionen optischer Geräte

Man kann drei Grundfunktionen optischer Geräte unterscheiden:

1. Bilderzeugung: Es wird ein **reelles** Bild eines leuchtenden Gegenstandes erzeugt. Es kann **direkt am Ort des Bildes** aufgefangen werden durch:
 - matte (diffus reflektierende) Flächen: Leinwand, Projektionsschirm, Mattscheibe, helles Papier oder helle Wand, evtl. genügt die Handfläche.
 - Milchige (diffus streuende) Scheiben: Milchglasscheiben, Pergamentpapier (oder OHP-Zwischenpapier).
 - Lichtempfindliche Schichten: Netzhaut, Filme, Fotozellenfelder.

Beispiele:

- Projektoren aller Art: Dia-, Film-, Tageslichtprojektor, Episkop, Computer-Beamer.
 - Fotoapparat, Fernseh- oder Filmkamera,
 - Objektiv eines Mikroskops oder Fernrohrs.
- V Mit einer Sammellinse werden Gegenstände außerhalb der Brennweite reell abgebildet.
- (Hohlspiegel: Im Prinzip ja, in der Praxis eher nicht).
 - Beim Auge: Es wird ein reelles Bild des betrachteten Gegenstandes auf der Netzhaut erzeugt.

Im Falle der Erzeugung reeller Bilder ist der Abbildungsmaßstab A definiert als Quotient von Bildgröße B und Gegenstandsgröße G

$$A := \frac{B}{G}.$$

2. Bewaffung des Auges: Es wird ein **virtuelles** Bild eines leuchtenden Gegenstandes erzeugt. Es kann durch ein optisches Zusatzgerät (meist das Auge), **indirekt an einem anderen Ort** als reelles Bild aufgefangen werden.

Beispiele:

- Lupe (Sammellinse: Gegenstand innerhalb der Brennweite oder genau in Brennweite).
- (Okulare von) Fernrohren, Operngläsern, Feldstechern, Mikroskopen.
- Brillen, Kontaktlinsen.
- Ebene Spiegel, Wölbspiegel.

Im diesem Zusammenhang wird die Vergrößerung V definiert als Verhältnis der Sehwinkel (= Winkel, unter dem der Gegenstand vom Ort des Auges aus erscheint) mit (ε) und ohne (ε_0) Gerät.

$$V := \frac{\tan \varepsilon}{\tan \varepsilon_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}.$$

In der zweiten Gleichung wird die sogenannte Kleinwinkelnäherung benutzt. Für kleine Winkel ε gilt

$$\varepsilon \approx \tan \varepsilon \approx \sin \varepsilon.$$

Im Falle des unbewaffneten Auges muss eine Normentfernung festgelegt werden. Diese ist

- $g = \infty$ im Fall unendlich weit entfernter Gegenstände.
 - $g = s_0 = 25 \text{ cm}$ im Fall endlich weit entfernter Gegenstände.
3. Ausleuchtung von Gegenständen: Ein Gegenstand soll beleuchtet (Auflicht) oder durchleuchtet (Durchlicht) werden. Dabei soll das diffus reflektierte bzw. gestreute Licht unter Umständen in eine bestimmte Richtung gelenkt werden.

Beispiele:

- Kondensor in (Dia-)Projektoren.
- Fresnellinse unter der Schreibfläche eines Tageslichtprojektors.
- Spiegelsysteme in Scheinwerfern, Flutlichtanlagen, Kopiergerät.
- Beleuchtungsoptik unter dem Objektisch eines Mikroskops.
- Augenspiegel eines Arztes.
- Ausrüstung von Fotografen, Filmleuten.
- Brennspiegel.

4.3 Die Abbildung durch eine Sammellinse

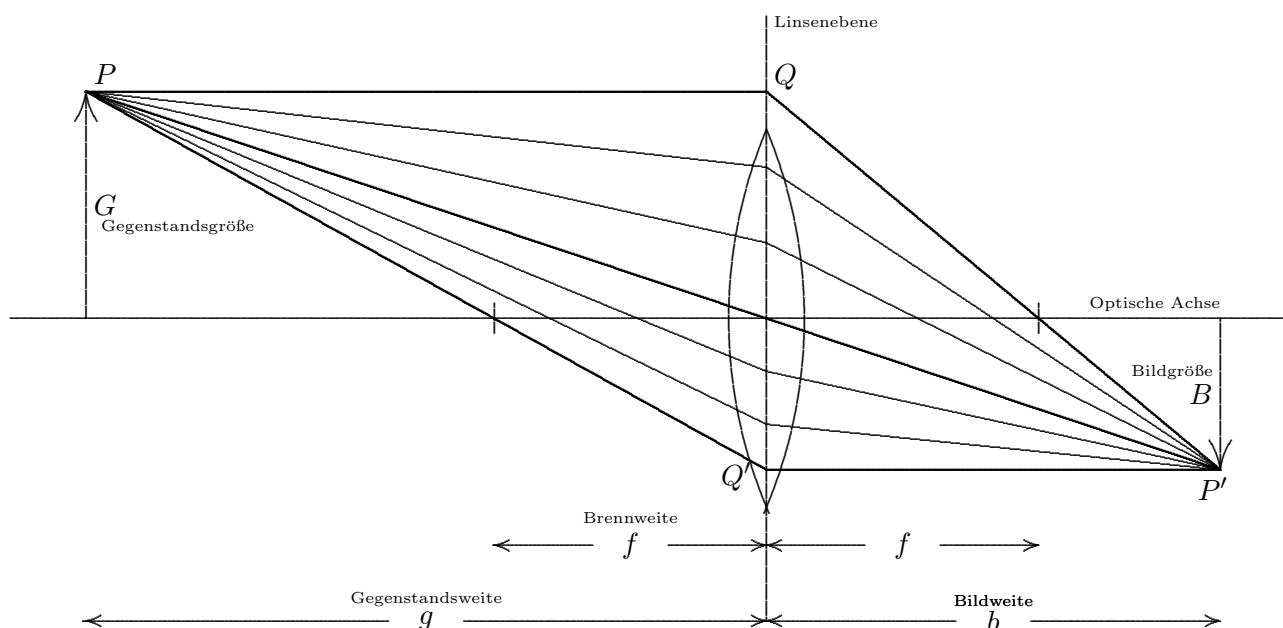
□ V Intensives Licht (Sonnenlicht) fällt durch eine Sammellinse. Wird ein Schirm in geeigneter Entfernung hinter die Linse gehalten, so kann man einen hell aufleuchtenden Leuchtpunkt erkennen. Ersetzt man den Schirm durch ein Blatt Papier, so kann es evtl. entzündet werden.

- Der Punkt, an dem das helle Leuchten zu beobachten ist, heißt *Brennpunkt* (oder Fokus) der Sammellinse.
- Der Abstand zwischen (Mittelpunkt der) Linse und Brennpunkt heißt *Brennweite* f .
- Die Ebene durch den Brennpunkt senkrecht zur optischen Achse heißt *Brennebene*.
- Der Kehrwert der Brennweite heißt *Brechkraft* der Linse. Die zugehörige Einheit ist die *Dioptrie*:

$$D := \frac{1}{f}, \quad [D] = \frac{1}{\text{m}} = 1 \text{ dpt.}$$

Aus dem Brechungsgesetz läßt sich herleiten, dass ein Punkt (PLQ) durch eine (dünne) Sammellinse so abgebildet wird, dass

- der Brennstrahl zum Parallelstrahl wird,
- der Parallelstrahl zum Brennstrahl wird und
- der Mittelstrahl „unverändert passiert“.



Zur Herleitung der Abbildungsgleichungen (manchmal auch: Linsengleichungen) für eine „dünne“ Linse mit Hilfe der Strahlensätze schauen wir uns an, wie die Pfeilspitze P auf ihren Bildpunkt P' abgebildet wird.

1. Betrachte die X -Figur „ PP' – Optische Achse“.

Es ergibt sich die **erste Abbildungsgleichung**:

$$A := \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

2. Betrachte die V -Figur „ $Q'QP$ – Optische Achse“. Es ist zu sehen, dass

$$\frac{f}{g} = \frac{B}{B+G}.$$

3. Betrachte die V -Figur „ $QQ'P'$ – Optische Achse“. Analog ergibt sich

$$\frac{f}{b} = \frac{G}{B+G}.$$

4. Die Addition der beiden letzten Gleichungen ergibt

$$\frac{f}{g} + \frac{f}{b} = \frac{B}{B+G} + \frac{G}{B+G} = \frac{B+G}{B+G} = 1,$$

eine anschließende Division durch f ergibt die **zweite Abbildungsgleichung**

$$\boxed{\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}}$$

4.4 Erzeugung reeller Bilder durch eine Sammellinse

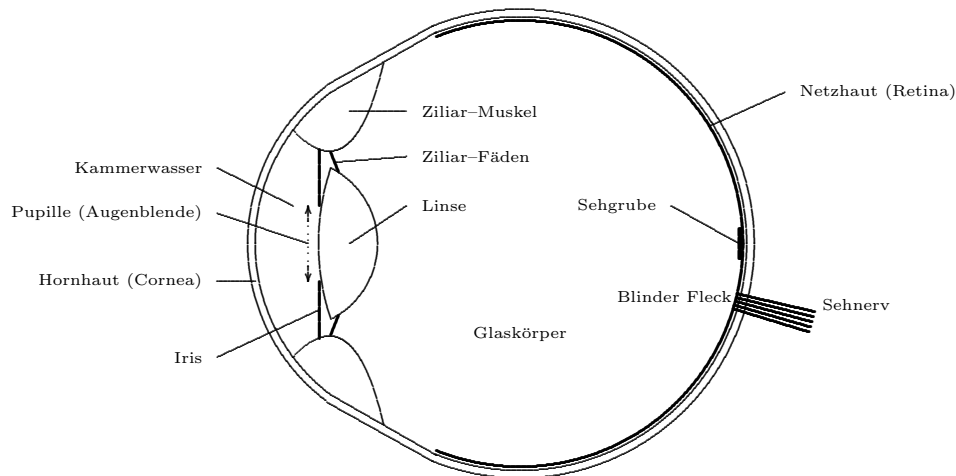
Die Erzeugung reeller Bilder bedeutet, dass ein Bild auf einem Schirm (o.ä.) entsteht. Die Benutzung einer Sammellinse als Lupe oder als Brille ist hier nicht erfasst.

Gegenstandsweite g	Bildweite b	Abbildungsmaßstab $A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$	Anwendung
$g = \infty$	$b = f$	$A = 0$	Fotografie/Filmen von Himmel oder Landschaften, Entspanntes Auge, Brennglas, Objektiv eines Fernrohrs.
$g \gg 2f$	$b \ll 2f$	$A \ll 1$	Fotografie/Filmen von nahen Situationen (Portraits), Akkommodiertes Auge.
$g > 2f$	$b < 2f$	$A < 1$	
$g = 2f$	$b = 2f$	$A = 1$	„Kopieren“ (im Fotolabor, Kopiergerät)
$g < 2f$	$b > 2f$	$A > 1$	Projektion von Dias, Filmen, TLP.
$g \ll 2f$	$b \gg 2f$	$A \gg 1$	Objektiv eines Mikroskops/Mikrofiches.
$g = f$	$b = \infty$	$A = \infty^*$	Lupe, Okular eines Mikroskops, Okular eines Kepler-Fernrohrs.
$g < f$	$b < 0$		Kein reelles Bild!

* Beachte, dass in dieser Tabelle der Abbildungsmaßstab bezüglich der Erzeugung reeller Bilder, nicht die Vergrößerung im Hinblick auf Augenbewaffnung aufgelistet ist.

- \boxed{V} Abbildung der Glühwendel einer Lampe.
- Zertreuungslinse: Die obigen Gesetze sind anwendbar, wenn die Brennweite als negative Länge eingesetzt wird.
- Fresnellinse.

5 Das Auge ⊕



Schnitt durch das Auge (stark schematisiert)

- Das Bild auf der Netzhaut kommt zustande wie bei der Abbildung durch eine Sammellinse. Das bedeutet, dass auf der Netzhaut ein kopfstehendes und seitenvertauschtes Bild entsteht.
- *Netzhaut*: Sie enthält als Rezeptoren 120 Millionen Stäbchen- und 6 Millionen Zäpfchenzellen, die einfallendes Licht in elektrische Signale wandeln.
 - Die *Zäpfchenzellen* sind farbeempfindlich. Es gibt drei Typen, deren Empfindlichkeiten in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen (mit Schwerpunkt in Rot, Grün bzw. Blau) liegen. Je nachdem, wie diese drei Typen im Verhältnis zueinander an einer Stelle der Netzhaut angeregt werden, erzeugt das Gehirn die unterschiedlichen Farbeindrücke (Farbsehen: vgl. Abschnitt 7.1).
 - Die *Stäbchenzellen* sind lediglich helligkeitsempfindlich. Aufgrund ihrer großen Zahl ermöglichen sie das Sehen bei geringen Intensitäten („In der Nacht sind alle Katzen grau“).
- *Akkommodation*: Die Einstellung auf verschieden weit entfernte Gegenstände erfolgt durch eine Verformung, d.h. Änderung der Krümmung, der Linse. Dies wiederum bewirkt eine Änderung der Brennweite der Augenlinse. Beim Betrachten eines unendlich weit entfernten Gegenstandes sind die Muskeln entspannt, die Linse ist gering gekrümmt. Bei der Betrachtung eines nahen Gegenstandes, beispielsweise beim Lesen, wird die Linse stärker gekrümmt. Mit zunehmenden Alter lässt die Fähigkeit zu einer starken Krümmung der Linse nach.
- *Adaption*: Die Netzhaut ist gegen zu hohe Lichtintensitäten empfindlich. Bei der Betrachtung hell leuchtender Gegenstände verkleinert sich die Pupille. Dadurch verringert sich der Durchmesser des von einem Leuchtpunkt eintreffenden Lichtkegels und damit die Lichtintensität.
- V Blicken Sie in das Auge Ihres Nachbarn und leuchten Sie es dann mit einer Taschenlampe an!
- Optische Täuschungen: Siehe Anhang!

5.1 Kurz- und Weitsichtigkeit ⊕

- Die Definition von Kurz- bzw. Weitsichtigkeit beruht auf der Situation, dass ein unendlich weit entfernter Gegenstand bei entspanntem Auge betrachtet wird.

- Bei einem normalsichtigen Menschen ist das Auge gerade so eingerichtet, dass

die Brennweite der entspannten Augenlinse **gleich** der Länge des Augapfels

($f = b$) ist. Das bedeutet, dass auf der Netzhaut, die sich dann genau in der Brennebene befindet, ein scharfes reelles Bild des unendlich weit entfernten Gegenstandes entsteht.

- Bei einem Kurzsichtigen ist es nun so, dass

die Brennweite der entspannten Augenlinse **kleiner als** die Länge des Augapfels

ist. Die Netzhaut ist außerhalb der Brennweite, das Bild ist nicht mehr scharf.

Dieser Augenfehler kann dadurch korrigiert werden, dass man dem Auge eine Zerstreuungslinse (in Form einer Brille für Kurzsichtige) vorschaltet.

Die Brennweite des Systems „Brille plus Augenlinse“ ist dann größer als die ursprüngliche Brennweite der entspannten Augenlinse allein.

- Bei weit- (bzw. über-)sichtigen Menschen ist die Situation genau umgekehrt, das heißt, dass

die Brennweite der entspannten Augenlinse **größer als** die Länge des Augapfels

ist. Sie benötigen als Korrektur eine Sammellinse.

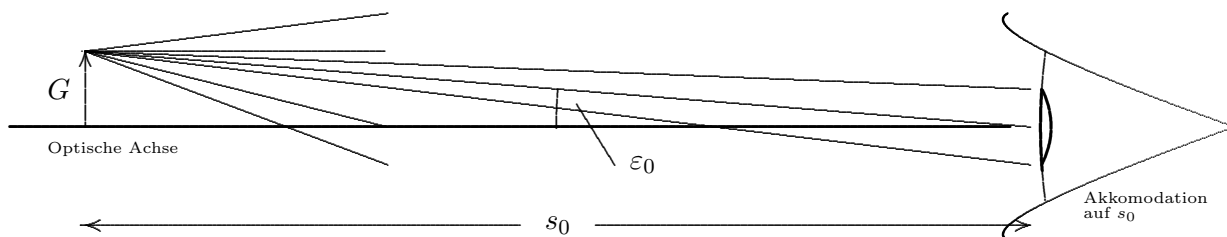
- Kleiner Hinweis: Schaut man einem Brillenträger schräg durch die Brille auf die Gesichtskante, so erscheint diese bei einem $\begin{cases} \text{Kurz-} \\ \text{Weit-} \end{cases}$ sichtigen nach $\begin{cases} \text{innen} \\ \text{außen} \end{cases}$ versetzt. Machen Sie sich diese Beobachtung anhand der Art der Brille vertraut.

6 Optische Geräte

6.1 Die Lupe \oplus

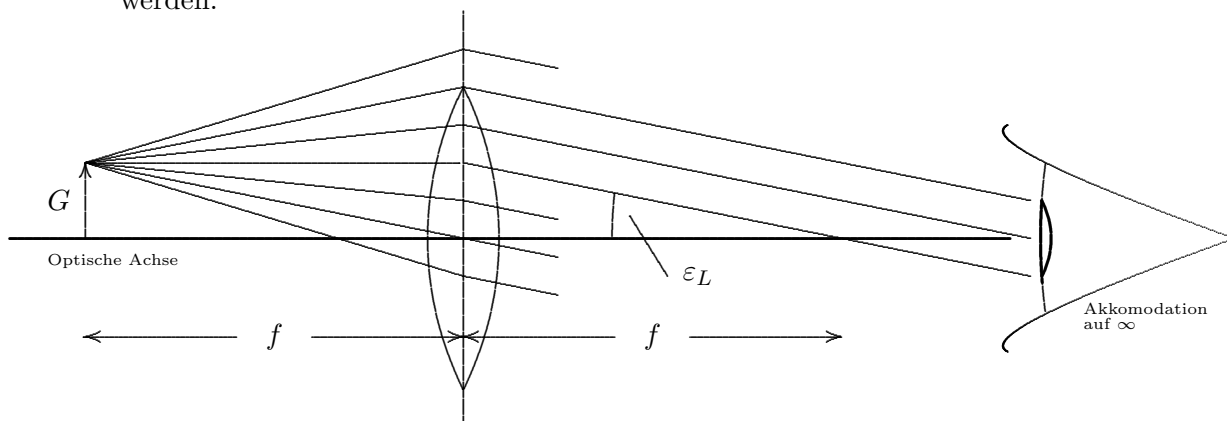
Wird eine Sammellinse als Augenbewaffung verwendet, so heißt sie in diesem Zusammenhang *Lupe*. Betrachtet man einen Gegenstand durch die Lupe, so erscheint er vergrößert. Genauer gilt:

- Normsituation der Betrachtung eines Gegenstandes mit unbewaffnetem Auge. Die Normsehweite ist festgelegt als $s_0 = 25$ cm.



$$\varepsilon_0 \approx \tan \varepsilon_0 = \frac{G}{s_0}$$

- Betrachtung des Gegenstandes mit der Lupe. Der Gegenstand befindet sich in der Brennebene. Das virtuelle Bild im Unendlichen kann mit dem entspannten Auge betrachtet werden.



$$\varepsilon_L \approx \tan \varepsilon_L = \frac{G}{f}$$

- Als Vergrößerung ergibt sich damit

$$V := \frac{\tan \varepsilon_L}{\tan \varepsilon_0} = \frac{G \cdot s_0}{f \cdot G} = \frac{s_0}{f}, \quad \text{also} \quad V = \frac{s_0}{f}$$

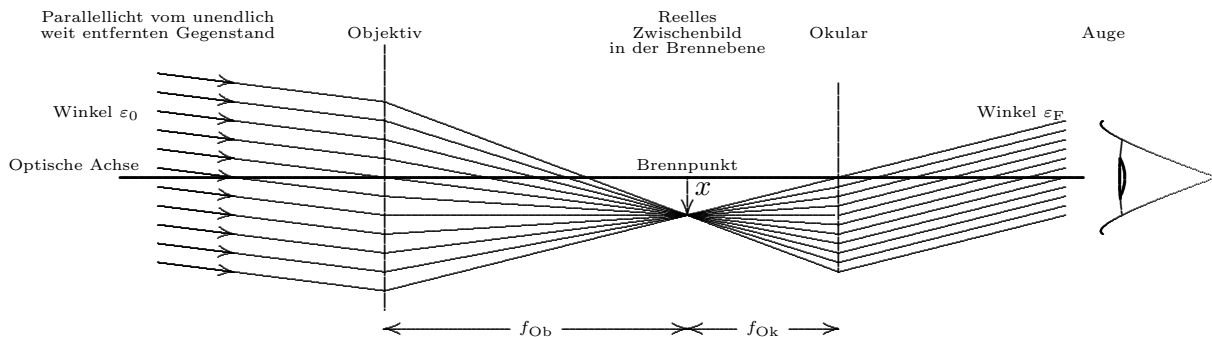
Die Vergrößerung V ist indirekt proportional zur Brennweite f .

Beispiel: Eine Sammellinse mit der Brennweite $f = 5$ cm weist als Lupe eine Vergrößerung von $V = 5$ auf.

6.2 Das astronomische Fernrohr \ominus

Das *astronomische Fernrohr* wird auch als *Kepler-Fernrohr* bezeichnet.

Strahlengang:



Für die Berechnung der Vergrößerung beachte zunächst, dass

$$x = f_{\text{Ob}} \cdot \tan \varepsilon_0 \quad \text{und} \quad x = f_{\text{Ok}} \cdot \tan \varepsilon_{\text{F}}.$$

Daraus folgt:

$$V := \frac{\tan \varepsilon_{\text{F}}}{\tan \varepsilon_0} = \frac{f_{\text{Ob}}}{f_{\text{Ok}}}, \quad \text{d.h.} \quad \boxed{V = \frac{f_{\text{Ob}}}{f_{\text{Ok}}}}$$

Bei der Beobachtung zweier entfernter Objekte wird also der Winkelabstand vergrößert.

- Der Winkel, unter dem ein weit entfernter Fixstern von der Erde aus erscheint, ist so klein, dass dieser auch bei Fernrohrvergrößerung nicht als Scheibe aufgelöst werden kann. Das Fernrohr dient hier vielmehr dazu, die Lichtintensität zu erhöhen. Lichtschwache Sterne werden so erst sichtbar.

Dass ein Stern bei Beobachtung durch ein Fernrohr nichtsdestoweniger als flächenhaftes „Scheibchen“ erscheint, liegt an der durch die Fernrohröffnung verursachten Beugung.

- Um den Durchmesser der Scheibchen zu verringern und so ein größeres Auflösungsvermögen (Trennung von zwei Scheibchen) zu erzielen, muss man die Fernrohröffnung vergrößern. Dies hat aber technische Grenzen, es lassen sich nicht problemlos beliebig große Linsen herstellen. Die schweren Glaskörper sacken durch. Deshalb werden in der Astronomie vielfach Fernrohre mit Parabolspiegeln als „Objektiv“ verwendet.
- Wie aus dem Strahlengang ersichtlich, ist das Bild kopfstehend, so dass ein Kepler-Fernrohr für Zwecke der Beobachtung von Situationen auf der Erde ungeeignet ist.

Abhilfe schafft

- ein Umkehrprisma (\rightarrow Prismenfernrohr, Feldstecher, vgl. Beiblatt oder [?]).
oder
- eine Zerstreulinse als Okular (\rightarrow Terrestrisches Fernrohr, Holländisches Fernrohr, Galilei-Fernrohr, Opernglas.)

6.3 Das Mikroskop

Das Mikroskop besteht aus zwei durch einen *Tubus* verbundenen Linsen(-systemen). Der Prinzip-Strahlengang ist auf dem nächsten Blatt skizziert.

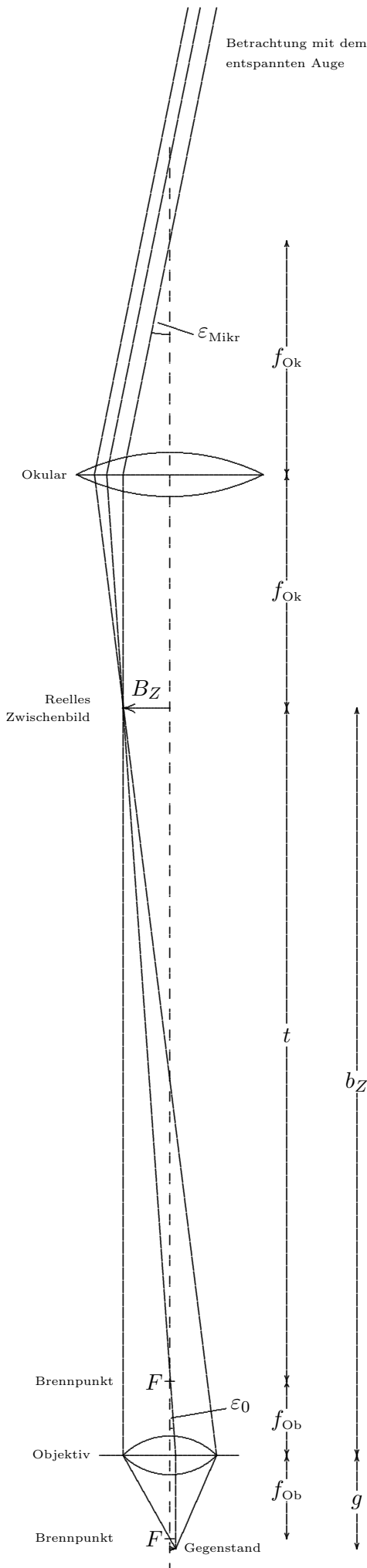
- Mit dem Objektiv (dem Objekt zugewandt) wird ein reelles Zwischenbild erzeugt. Der Gegenstand befindet sich knapp außerhalb der Brennweite: $g \gtrsim f_{\text{Ob}}$. Das bedeutet, dass die Bildweite und damit die Bildgröße vergleichsweise sehr groß werden.
- Mit dem Okular (dem Auge zugewandt) wird — wie mit einer Lupe — das reelle Zwischenbild bei entspanntem Auge betrachtet.
- Aufgrund der starken Vergrößerung ist das Bild im allgemeinen sehr lichtschwach. Der Gegenstand muß daher gut leuchten. Dies erreicht man durch
 - Durchleuchtung — bei transparenten Objekten (\rightarrow Mikrotom)
 - Beleuchtung über Lampen oder Spiegelsysteme.
- Wegen der starken Vergrößerung wirken sich optische Probleme gerade beim Mikroskop besonders stark aus:
 - *Sphärische Aberration*: Bei großen Objektivöffnungen kann das von einem Punkt des Gegenstands ausgehende Lichtbündel nicht mehr gut genug fokussiert werden.
 - *Chromatische Aberration*: Die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Farbe des Lichts, führt an Kontrastlinien zur Farbaufspaltung (Vgl. Prisma).
 - Ein mangelnder Kontrast (besonders bei biologischen Objekten) kann durch Einfärbung verstärkt werden. Alternativ kann man mit Hilfe eines sogenannten *Dunkelfeldkondensators* erreichen, das nur am Gegenstand gebrochenes Licht ins Mikroskop gelangt.
 - Beugungseffekte (\rightarrow Wellennatur des Lichts) verhindern, dass zwei helle Lichtpunkte des Gegenstandes nicht mehr optisch getrennt werden können, wenn ihr Abstand den Wert

$$d = 1,22 \frac{\lambda}{n \sin \varphi}$$

unterschreitet. Dabei ist λ : Wellenlänge des verwendeten Lichts, n Brechungsindex, φ Winkel, unter dem das Objektiv vom Gegenstand aus erscheint). Die Auflösung kann man erhöhen, wenn man

- * den Brechungsindex vergrößert (\rightarrow Ölimmersion) oder
- * die Wellenlänge des Lichts verringert (\rightarrow UV- oder Elektronenmikroskopie).
- Aufgrund der geringen Tiefenschärfe können nur ebene Schnitte (Mikrotomie) von Objekten scharf abgebildet werden.

V Betrachte eine Stück Kork mit einer Bruchkante unter dem Mikroskop.



Für die Vergrößerung gilt:

$$V := \frac{\tan \epsilon_{Mikr}}{\tan \epsilon_0} = \frac{B_Z \cdot s_0}{f_{Ok} \cdot G}$$

(Oft wird hier einfach argumentiert, dass die Vergrößerung V des Mikroskops gleich dem Produkt aus dem Abbildungsmaßstab des Objektivs $A_{Ob} = \frac{B_Z}{G}$ und der Vergrößerung des Okulars $V_{Ok} = \frac{s_0}{f_{Ok}}$ ist:

$$V = A_{Ob} \cdot V_{Ok} = \frac{B_Z \cdot s_0}{G \cdot f_{Ok}}$$

Dies führt also auf die gleiche Formel.)

Mit Hilfe der 1. Abbildungsgleichung können wir diesen Ausdruck weiter vereinfachen und dann als Näherung benutzen, dass die

- Bildweite b_Z in etwa gleich der Tubuslänge t und
- die Gegenstandsweite g in etwa gleich der Objektivbrennweite f_{Ob}

ist.

$$\frac{G \cdot \frac{b_Z}{g} \cdot s_0}{f_{Ok} \cdot G} = \frac{b_Z \cdot s_0}{g \cdot f_{Ok}} \approx \frac{t \cdot s_0}{f_{Ob} \cdot f_{Ok}}$$

Insgesamt gilt also:

$$V := \frac{t \cdot s_0}{f_{Ob} \cdot f_{Ok}} = V_{Ob} \cdot V_{Ok}$$

7 Farben \oplus

7.1 Wir sehen Farben

Das Farbensehen ist — zumindest für uns Menschen — unabdingbar mit dem Sehen verbunden. Ab einem Alter von drei bis vier Jahren kann jedes Kind zustimmen, dass

- der Himmel an einem Tag mit schönem Wetter blau ist,
- die Blätter von vielen Pflanzen, Bäumen, Gräsern grün sind,
- die Sonne am Morgen oder Abend rot ist (erscheint?),
- die Blütenblätter eines Löwenzahns oder einer Sonnenblume gelb sind,
- der Mond weiß,
- der Nachthimmel schwarz ist, ...

Überlegen Sie:

- Wie könnte man einem Kind, einem anderen Menschen, einem Blinden, einem Außerirdischen beschreiben, was Farben sind?
- Der „Physiker“ ist gewohnt, bestimmte Wahrnehmungen mit Hilfe von Messinstrumenten durch Zahlen zu erfassen. Kann man den Farben Zahlen zuordnen, kann man sie durch Zahlen beschreiben?
- Kann man Farben irgendwie in eine Reihenfolge bringen, auf einer Skala anordnen?

7.2 Farben lassen sich anordnen: Das Farbspektrum

Gitter-Spektroskopie Wir betrachten das Licht einer Leuchtstofflampe (oder Kerze, Glühlampe, aus der Sonne) mit verschiedenen „Gitter-Geräten“

- durch einen transparenten feingewebten Stoff (Prinzessinnenkleid),
- durch einen sehr engen Spalt, (evtl. zwei Finger),
- durch ein Gitter(-Taschenspektroskop),

Wir nehmen dabei eine Aufspaltung des weißen Lichts in die sogenannten *Spektralfarben* wahr. Es tritt in etwa die Reihenfolge

violett – blau – indigo – laubgrün – zitrongelb – orange – rot

auf.

Die Ursache für die Aufspaltung ist die *Beugung* des Lichts. Ganz allgemein tritt Beugung auf, wenn Wellen (Wasser, Schall, Licht) — wegen eines Hindernisses — begrenzt werden.

Weitere Beobachtungen:

- Bringe ein Stück Karton in den Strahlengang des Tageslichtprojektors.
- Betrachte ein Haar unter einem Billig-Mikroskop!
- Betrachte das Farbspiel auf einer CD!

Prismen–Spektroskopie Die gleiche Aufspaltung mit der gleichen Reihenfolge kann man auch sehen, wenn man das Licht durch ein Prisma bzw. im Prismenspektroskop betrachtet. Hier liegt die Ursache in der *Dispersion* bei der *Brechung* (vgl. Abschnitt 3.4).

Auch das Farbspiel von Edelsteinen, beispielsweise Diamanten, beruht auf diesem Effekt.

Interferenz–Erscheinungen Es gibt noch viele weitere Beobachtungen in Natur und Alltag, bei denen man die obigen (*irisiierenden*) Farberscheinungen in gleicher Reihenfolge feststellen kann.

- auf einem Ölfilm,
- auf Seifenblasen,
- auf Oberflächen von Metallen,
- bei Luftspalten zwischen durchsichtigen Körpern (Newton–Ringe).
- Der Regenbogen zeigt die gleiche Farbreihenfolge, aber nicht die reinen Spektralfarben (vgl. später).

Diese Phänomene beruhen auf einem Verstärken bzw. Auslöschen bestimmter Wellenlängenbereiche durch die so genannte *Interferenz*.

7.3 Spektralfarben und Frequenz

In etwa um 1870 konnte geklärt werden (J.C. Maxwell), dass Licht als eine elektromagnetische Welle anzusehen ist. Dabei kann man einer Welle — im Prinzip — eine Frequenz f und eine Wellenlänge λ zuordnen, die über die Gleichung

$$c = \lambda \cdot f$$

mit der Lichtgeschwindigkeit c zusammenhängen. Es stellt sich heraus, dass die Spektralfarben des Lichts gerade bestimmten Frequenzen dieser Wellen entsprechen. Die Tabelle unten zeigt den Zusammenhang zwischen Farbe, Frequenz und Wellenlänge auf. Es ist außerdem zu sehen, dass viele der uns bekannten Typen von elektromagnetischen Wellen auch bestimmten Wellenlängen-Bereichen zuzuordnen sind. Diese Wellen sind lediglich für das Auge unsichtbar.

Typ der Wellen	Frequenz f in Hz	Wellenlänge λ in m	Bemerkungen	
			Erzeugung	Nachweis
Technischer Wechselstrom	30 ... 300	$10^7 \dots 10^6$	Wechselstrom-Maschinen	Induktions-Spule
Tonfrequenter Wechselstrom	$3 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^4$	$10^5 \dots 10^4$	Röhrengenerator	Oszillograph
Hertz'sche Wellen:			Schwingkreis (Sender)	Resonanzschwingkreis (Empfänger)
Langwelle (LF)	$3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^5$	$10^4 \dots 10^3$		Telegraphie Radar Fernsehen, Rundfunk
Mittelwelle (MF)	$3 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^6$	$10^3 \dots 10^2$		
Kurzwelle (HF)	$3 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^7$	$10^2 \dots 10^1$		
Ultrakurzwelle (UKW, VHF, UHF)	$3 \cdot 10^7 \dots 3 \cdot 10^9$	$10^1 \dots 10^{-1}$		
Mikrowellen	$3 \cdot 10^9 \dots 10^{13}$	$10^{-1} \dots 3 \cdot 10^{-5}$	Mikrowellenherd, -therapie	
Infrarot-Licht (IR)	$10^{13} \dots 3,8 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-5} \dots 7,8 \cdot 10^{-7}$	Wärmequelle	IR-Kamera
Sichtbares Licht:			Sonne, ...	Auge, Film
Rotes Licht	$3,8 \cdot 10^{14} \dots 4,8 \cdot 10^{14}$	$780 \cdot 10^{-9} \dots 620 \cdot 10^{-9}$		
Oranges Licht	$4,8 \cdot 10^{14} \dots 5,0 \cdot 10^{14}$	$620 \cdot 10^{-9} \dots 600 \cdot 10^{-9}$		
Gelbes Licht	$5,0 \cdot 10^{14} \dots 5,3 \cdot 10^{14}$	$600 \cdot 10^{-9} \dots 570 \cdot 10^{-9}$		
Grünes Licht	$5,3 \cdot 10^{14} \dots 6,1 \cdot 10^{14}$	$570 \cdot 10^{-9} \dots 490 \cdot 10^{-9}$		
Blaues Licht	$6,1 \cdot 10^{14} \dots 7,0 \cdot 10^{14}$	$490 \cdot 10^{-9} \dots 430 \cdot 10^{-9}$		
Violettes Licht	$7,0 \cdot 10^{14} \dots 7,7 \cdot 10^{14}$	$430 \cdot 10^{-9} \dots 390 \cdot 10^{-9}$		
Ultraviolett-Licht (UV)	$7,7 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$	$390 \cdot 10^{-9} \dots 10^{-8}$	Sonne, UV-Röhren	Fluoreszenz, Leuchtstoffe, Hautbräunung
Röntgenstrahlung	$3 \cdot 10^{16} \dots 5 \cdot 10^{21}$	$10^{-8} \dots 6 \cdot 10^{-14}$	Röntgenröhre	Photoplatte, Fluoreszenz, Ionisation
(γ) Gammastrahlung	$3 \cdot 10^{16} \dots 5 \cdot 10^{21}$	$10^{-8} \dots 6 \cdot 10^{-14}$	Kernprozesse (B: Kosmos)	Ionisation

(Vgl. auch die Farbdarstellung in: Formeln, Tabellen, Wissenswertes, Paetec-Verlag, S. 61.)

7.4 Die Wahrnehmung von Farben durch den Menschen \oplus

Es bleibt die Frage bestehen, warum wir Farben wie „Braun, Rosa, Weinrot, Giftgrün, Weiß, Purpur“ wahrnehmen. Sie sind doch gar nicht im Spektrum enthalten.

Die Netzhaut des menschlichen Auges enthält drei Typen von Farbrezeptoren (Zäpfchenzellen):

- R Rot: Empfindung im Bereich um 600 nm,
- G Grün: Empfindung im Bereich um 520 nm,
- B Blau: Empfindung im Bereich um 470 nm.

„Empfindung im Bereich“ heißt dabei, dass diese Rezeptortypen auf Wellenlängen in einem Intervall um den angegebenen Wert reagieren. Sie reagieren umso stärker, je näher die Wellenlänge bei dem angegebenen Wert liegt.

Je nach dem, in welcher Gewichtung zueinander diese drei Rezeptortypen auf einfallendes Licht reagieren, entsteht ein *physiologischer* Farbeindruck.

Es kommt nicht vor, dass nur ein Rezeptortyp reagiert, es kann aber sein, dass ein Typ sehr stark (dominierend) reagiert.

- Rot–Grün–Blindheit.

7.4.1 Additive Farbmischung

Die Idee der *additiven Farbmischung* beruht darauf, dass ins Auge fallendes Licht verschiedener Farben auch verschiedene Rezeptortypen anspricht. Die Mischung der Farben geschieht dadurch, dass das Auge die räumliche oder zeitliche Überlagerung der Farben nicht auflösen kann.

Es handelt sich um einen **augen–physiologischen** Prozess.

Räumliche Überlagerung:

- Farbfernseher, Computermonitor ([?, S. 110]).
- RGB–Projektoren.
- Betrachtung eines Pixel–Bildes aus ausreichender Entfernung. Die Farben der Pixel können nicht mehr getrennt wahrgenommen werden und erscheinen additiv gemischt (B: Pop–Art, Titanic–Bild).

Zeitliche Überlagerung:

- Maxwell–Farbkreis: Antrieb durch Kurbel und Riemen.
- Spielzeug–Flach–Kreis.

Beispiel: Mit Hilfe des in Windows integrierten Programms „Farben definieren“ können beliebige Farben durch Farb–Gewichtungsfaktoren definiert werden. Das Programm wird beispielsweise in MS–Paint durch „Farben — Palette bearbeiten“ aufgerufen.

Jede der drei augenphysiologischen Grundfarben kann mit einem Gewichtungsfaktor im Bereich $0 \dots 255$ versehen werden. Es können also

$$256^3 = (2^8)^3 = 2^{24} = 16\,777\,216 = 16^6$$

verschiedene Farben für jedes Farbpixel durch Farbaddition erzeugt werden. In vielen Programmiersprachen (Beispiel HTML) wird eine Zahl zwischen 0 und 255 durch eine zweistellige Hexadezimalzahl (16er System) dargestellt. Das bedeutet, dass eine Farbe durch eine sechsstellige Hexadezimalzahl kodiert wird. Ihr Informationsgehalt ist 24 Bit.

Der Windows-Taschenrechner (Programme/Zubehör/Rechner, auf Ansicht „Wissenschaftlich“ umstellen) ermöglicht ein leichtes Umwandeln der Zahldarstellungen zu den Basen 2,8,10,16.

Beispiele für Farben:

Rot	Grün	Blau	Hex-Kode	Ergebnisfarbe
0	0	0	00	Schwarz
255	255	255	FF FF FF	Weiß
128	128	128	80 80 80	Grau
255	0	0	FF 00 00	Rot
0	255	0	00 FF 00	Grün
0	0	255	00 00 FF	Blau
0	255	255	00 FF FF	Türkis (Cyan)
255	0	255	FF 00 FF	Purpur (Magenta)
255	255	0	FF FF 00	Gelb (Yellow)
255	128	255	FF 80 FF	Rosa
255	128	0	FF 80 00	Orange
128	64	0	80 40 00	Braun

Übung: Ermitteln Sie die Kodierung Ihrer Lieblingsfarbe!

Die drei Farben **Cyan**, **Magenta** und **Yellow** sind die Grundfarben beim Farbdruck (Tintenstrahl-Drucker, Offset-Vier-Farben-Druck, vgl. verdeckte Laschen von Verpackungen oder Schokoladenpapier).

7.4.2 Subtraktive Farbmischung

Fällt Licht einer bestimmten Spektralzusammensetzung auf einen Körper, so wird — abhängig von der atomaren Struktur der Oberfläche bzw. der Substanz des Körpers — ein Teil des Lichts absorbiert, der andere Teil wird

- reflektiert (undurchsichtiger Körper) bzw.
- durchgelassen (transparenter Körper).

Meist fällt weißes Licht (Sonne, Glühlampe,...) auf einen Körper. Das Spektrum des „herauskommenden“ Lichts ist dann charakteristisch für den Körper, wir nehmen es als die Farbe des Körpers wahr. Man spricht naheliegend von *subtraktiver Farbmischung*. Es handelt sich um einen **atomphysikalisch-optischen** Prozess.

Beispiele:

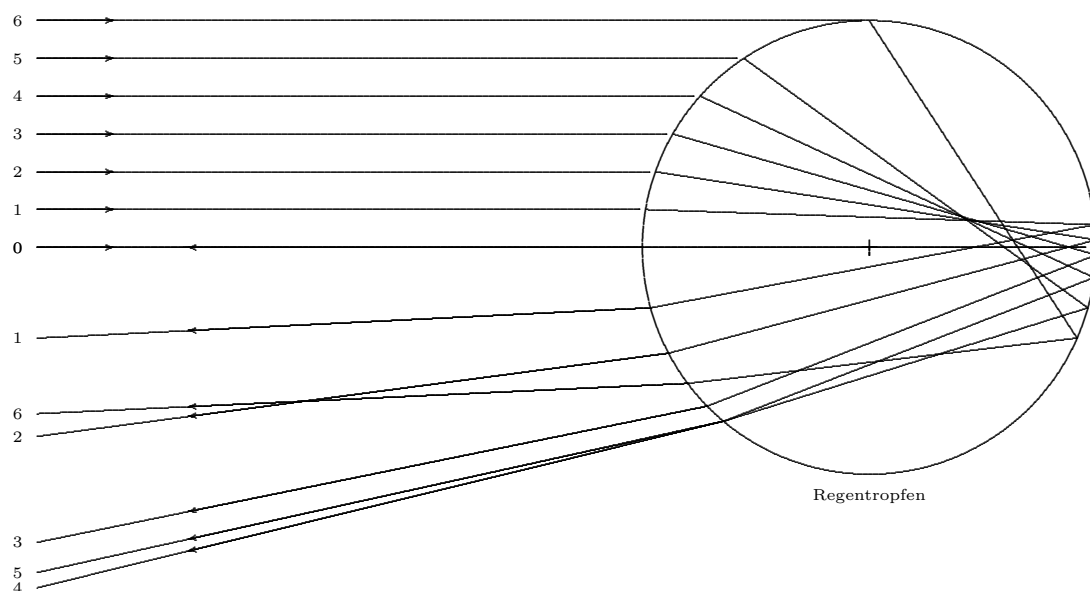
- Chlorophyll: Das Chlorophyll in den Pflanzen absorbiert sehr stark die Rotanteile (660 nm) aus dem Sonnenlicht. Pflanzen erscheinen uns grün.
- Transparente Folien,
- Pigmentierung von Malerfarben,
- Subtraktiver Dreifarbendruck,
- Vierfarbendruck: Mit Hilfe von drei Grundfarben werden alle Farben subtraktiv gemischt. Als vierte „Farbe“ wird Schwarz benutzt, damit können Kontraste verstärkt werden, es entsteht eine größere plastische Wirkung (vgl. [?, S. 948], [?, S. 142], Milka-Verpackung).
- B: Phywe Basiskatalog 1997/99: S. 191 Fehldruck.
- Abbildung in KnoffHoff.
- Farbstoffchemie (Organische Chemie).
- Farbfotografie [?, S. 549, 2. Spalte].

7.5 Der Regenbogen

1. Wasser zeigt eine geringfügige Dispersion, d.h. Abhängigkeit der Brechzahl von der Frequenz (Farbe) des auftreffenden Lichts.

Farbe	Wellenlänge	Brechzahl	Regenbogenwinkel
violett	400	1,3431	40 °38'
blau	450	1,3396	41 °08'
grasgrün	500	1,3365	41 °34'
grün	550	1,3343	41 °53'
hell-orange	600	1,3328	42 °06'
orange-rot	650	1,3313	42 °19'
rot	700	1,3303	42 °28'
dunkel-rot	750	1,3293	42 °37'

2. Trifft paralleles (Sonnen-)Licht auf einen kugelförmigen Wassertropfen, so wird es gemäß Reflexionsgesetz und Brechungsgesetz mehrfach gebrochen und reflektiert. Das Diagramm gibt die Verhältnisse qualitativ wieder:



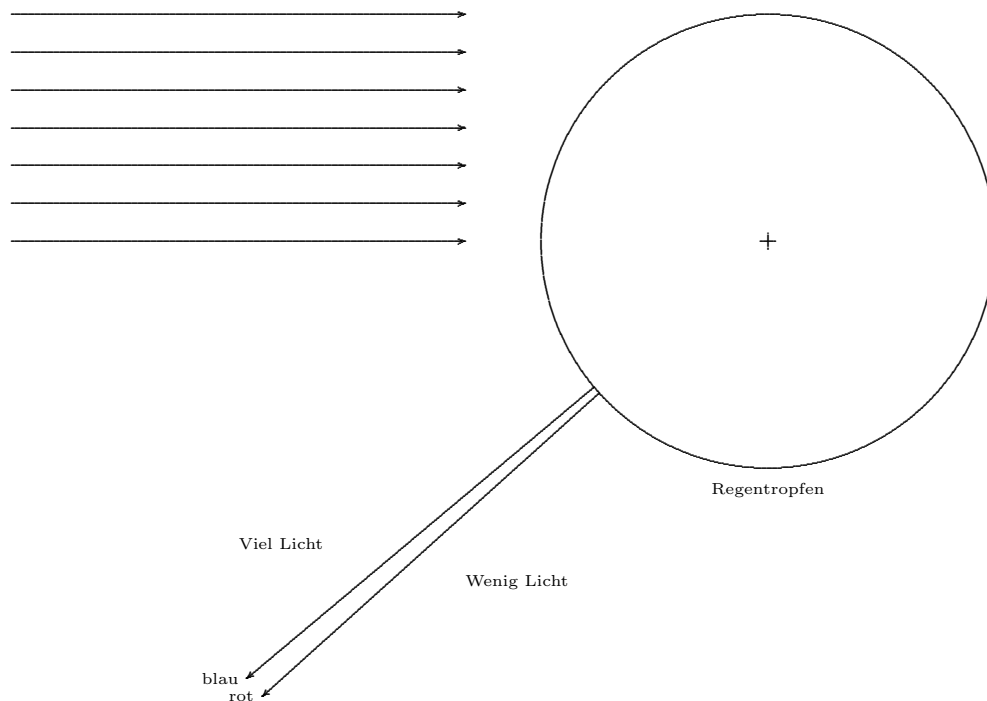
Beachte, dass immer auch ein Teil des Lichts reflektiert bzw. brechend durchgelassen wird.

Die unterhalb des Tropfenmittelpunkts einfallenden Strahlen werden entsprechend — horizontal-achsensymmetrisch — nach schräg oben reflektiert.

Wird der Abstand des auftreffenden Strahls zum Mittelpunkt des Wassertropfens immer größer, so wird der Ablenkwinkel zunächst größer, erreicht dann ein Maximum und wird dann wieder kleiner. Der maximale Ablenk-Winkel wird auch *Regenbogenwinkel* genannt.

3. In Richtung des Regenbogenwinkels wird besonders viel Licht abgelenkt.
Frage: Lässt sich das in einem Versuch demonstrieren?
4. Trifft ein Parallelbündel weißen Lichts auf den Wassertropfen, so wird farblich zerlegtes Licht in Richtung des zugehörigen Regenbogenwinkels zurückgeworfen. Blickt man unter

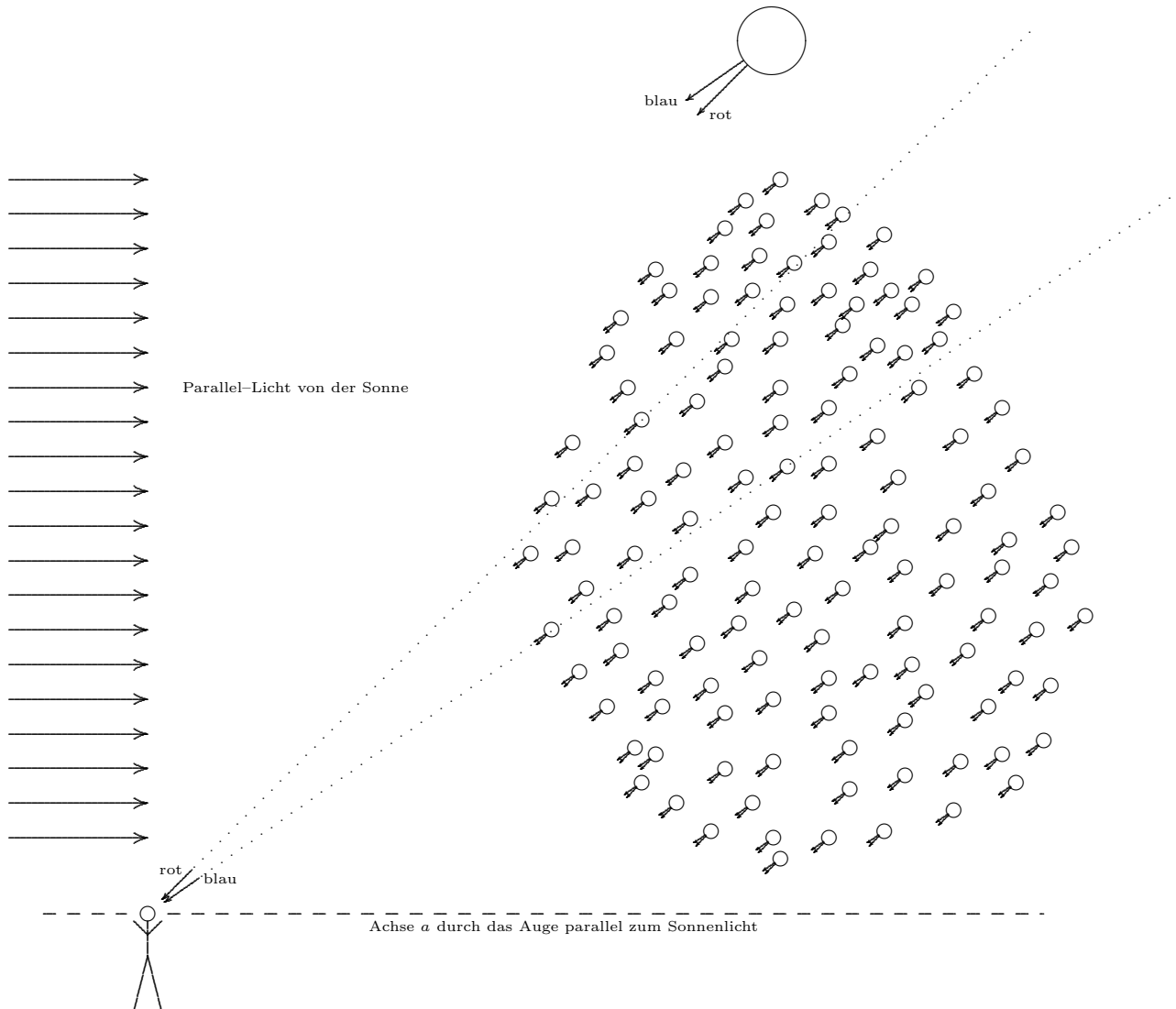
diesem Winkel in den Wassertropfen, so sieht man besonders intensives Licht der zugehörigen Farbe.



5. Schaut der Beobachter in eine feste Richtung, so sieht er in einen „Kanal“ von Regentropfen, die in diese Richtung Licht der zugehörigen Farbe aussenden.

Lässt man gedanklich die gesamte Situation um die Achse a rotieren, so wird klar, dass die zur gleichen Farbe gehörenden „Kanäle“ einen Kegelmantel bilden. Ein Beobachter nimmt diesen Kegelmantel aber eigentlich nur im Querschnitt wahr, eben als Teil eines Kreises. Er sieht einen Bogen. (vgl. LeopoldZins, 8II, S. 91).

Es kommt dabei natürlich nicht darauf an, dass das Sonnenlicht parallel zum Erdboden einfällt. Die Symmetrie-Achse des Kegelmantels bzw. des Kreisbogens ist parallel zum einfallenden Sonnenlicht, sie geht durch das Auge des Beobachters. Bewegt sich der Beobachter, so bewegt sich die Achse und damit der Regenbogen mit.



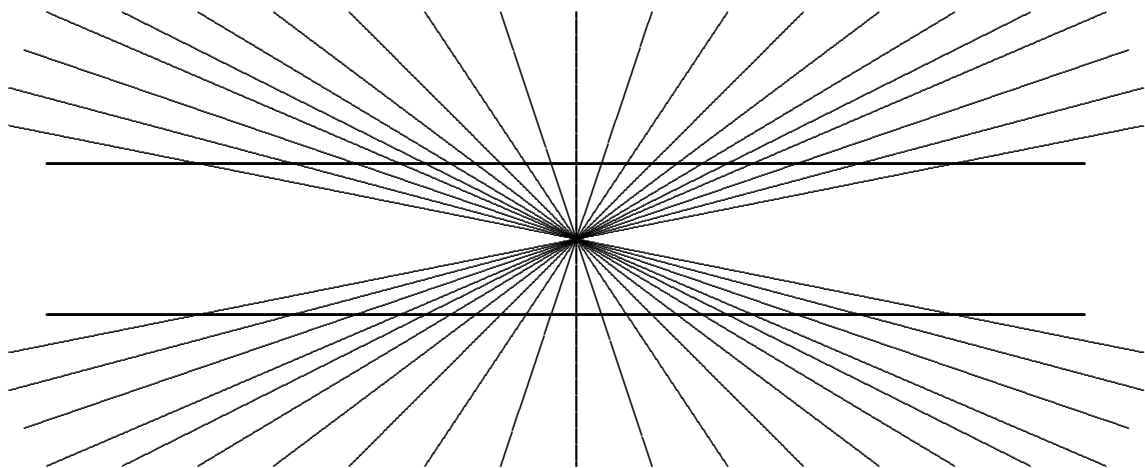
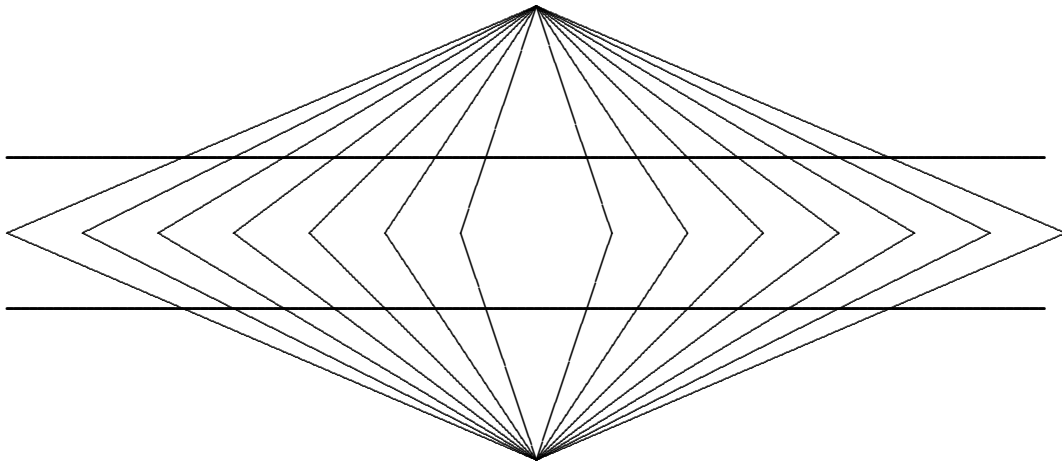
6. Durch Brechungen und Reflexionen höherer Ordnung entsteht noch ein (zweiter oder Neben-)Regenbogen, der etwas höher am Himmel entsteht.

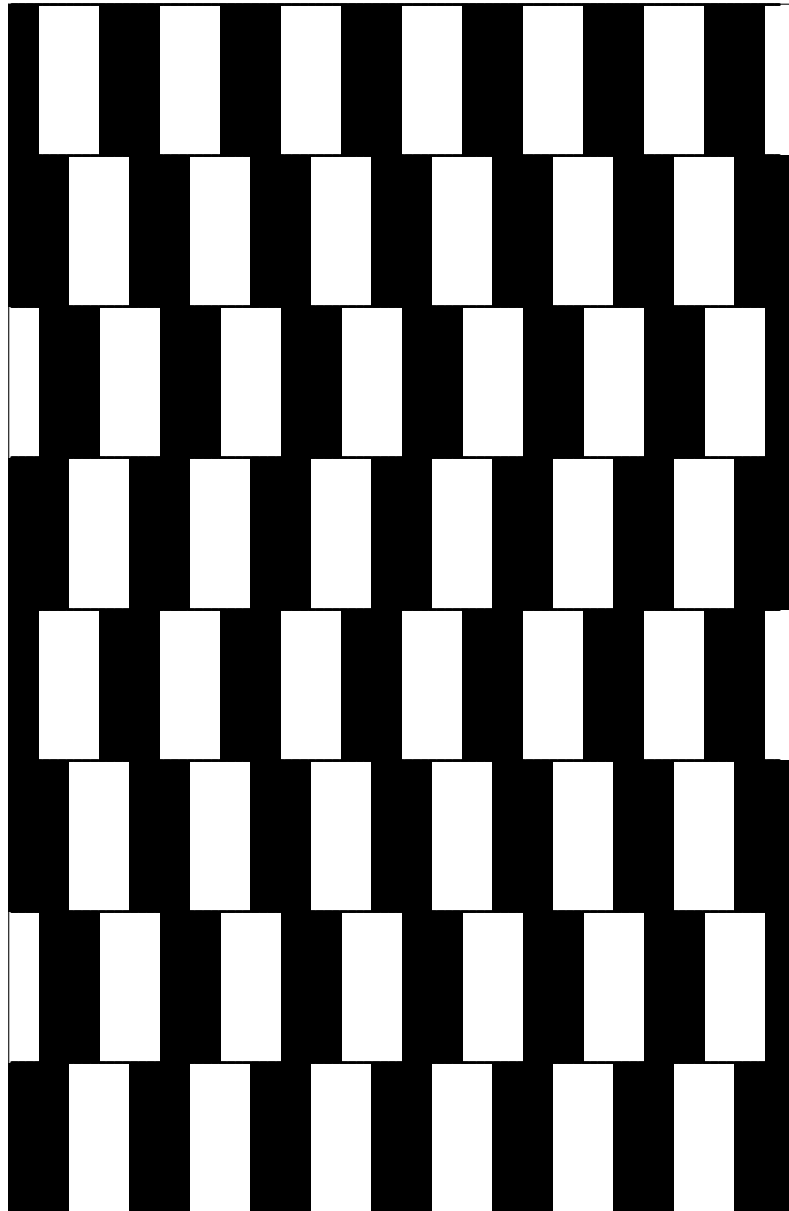
Zwischen den beiden Bögen wird weniger Licht von den Regentropfen ausgesandt. Die so entstehende Zone nennt man das Alexander-Dunkelband (Bild: HKK 9B, S. 63).

Beachte, dass die Regenbogenfarben in etwa, nicht aber genau, mit den Spektralfarben übereinstimmen.

7.6 Anhang

7.7 Optische Illusionen





Kachelmuster in einem Cafe in Bristol

