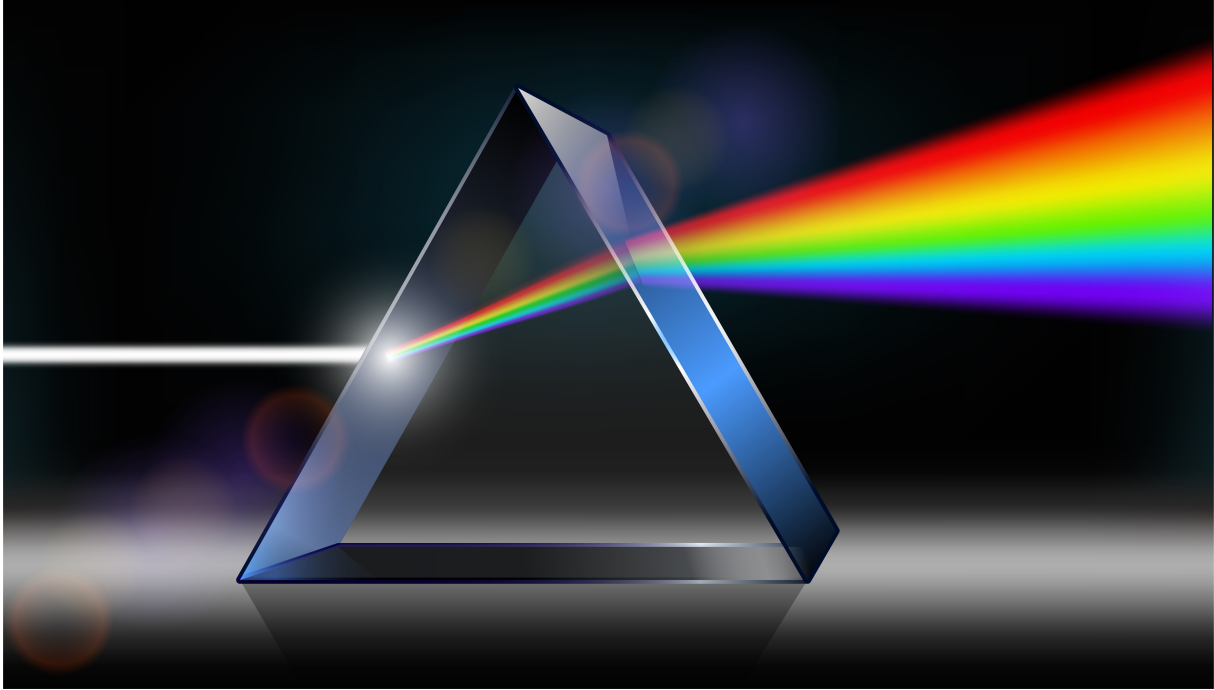


Optik



Skript 2024/2025

Physik – FMS 3

Version 2.0

Erstellt von

Krisanth Vyithiyalingam

www.vyk-mip.ch

fms | THUN

Eine Institution des Kantons Bern

Inhaltsverzeichnis

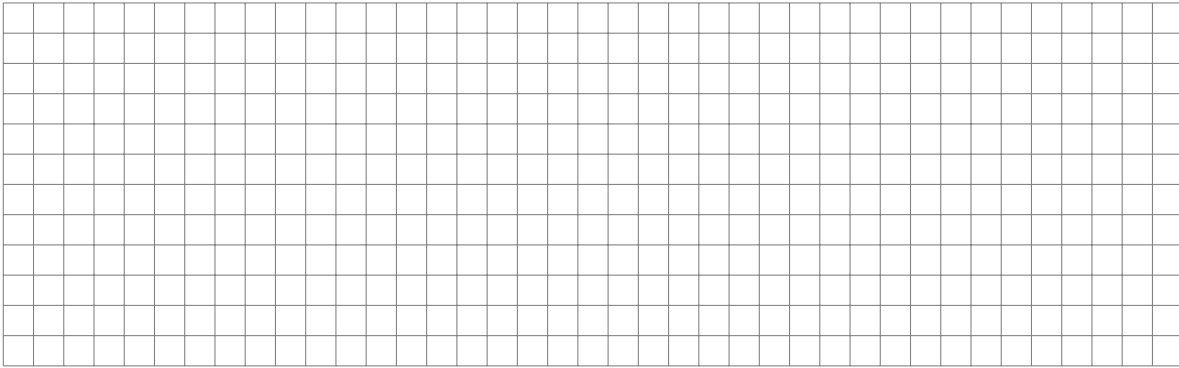
1	Optik	2
1.1	Das Licht	3
1.1.1	Was ist Licht?	3
1.1.2	Lichtstrahlen	3
1.1.3	Schatten	5
1.2	Die Reflexion des Lichts	8
1.2.1	Reflexion bei verschiedenen Materialien	8
1.2.2	Das Reflexionsgesetz	9
1.2.3	Spiegelbilder	10
1.3	Lichtbrechung und Totalreflexion	11
1.3.1	Lichtbrechung im Alltag	11
1.3.2	Brechungsgesetz von Snellius	11
1.3.3	Lichtgeschwindigkeit	15
1.3.4	Totalreflexion und Grenzwinkel	15
1.4	Optische Instrumente	16
1.4.1	Sammellinse	16
1.4.2	Zerstreuungslinse	18
1.4.3	Bildentstehung bei einer Sammellinse	20
1.4.4	Bildentstehung bei einer Zerstreuungslinse	21
1.4.5	Abbildungsmaßstab	21
1.4.6	Linsengleichung	22
1.4.7	Das Auge	23
1.4.7.1	Die optische Abbildung mit dem Auge	23
1.4.7.2	Der Sehwinkel	24
1.4.7.3	Fehlsichtigkeit	24
1.4.8	Das Mikroskop	25
1.4.9	Das Fernrohr	25
1.4.10	Die Lupe	26
1.4.11	Der Projektor	27
1.4.11.1	Der Diaprojektor	27
1.4.11.2	Der Hellraumprojektor	27
1.4.12	Der Fotoapparat	28
1.5	Aufgaben	30

Kapitel 1

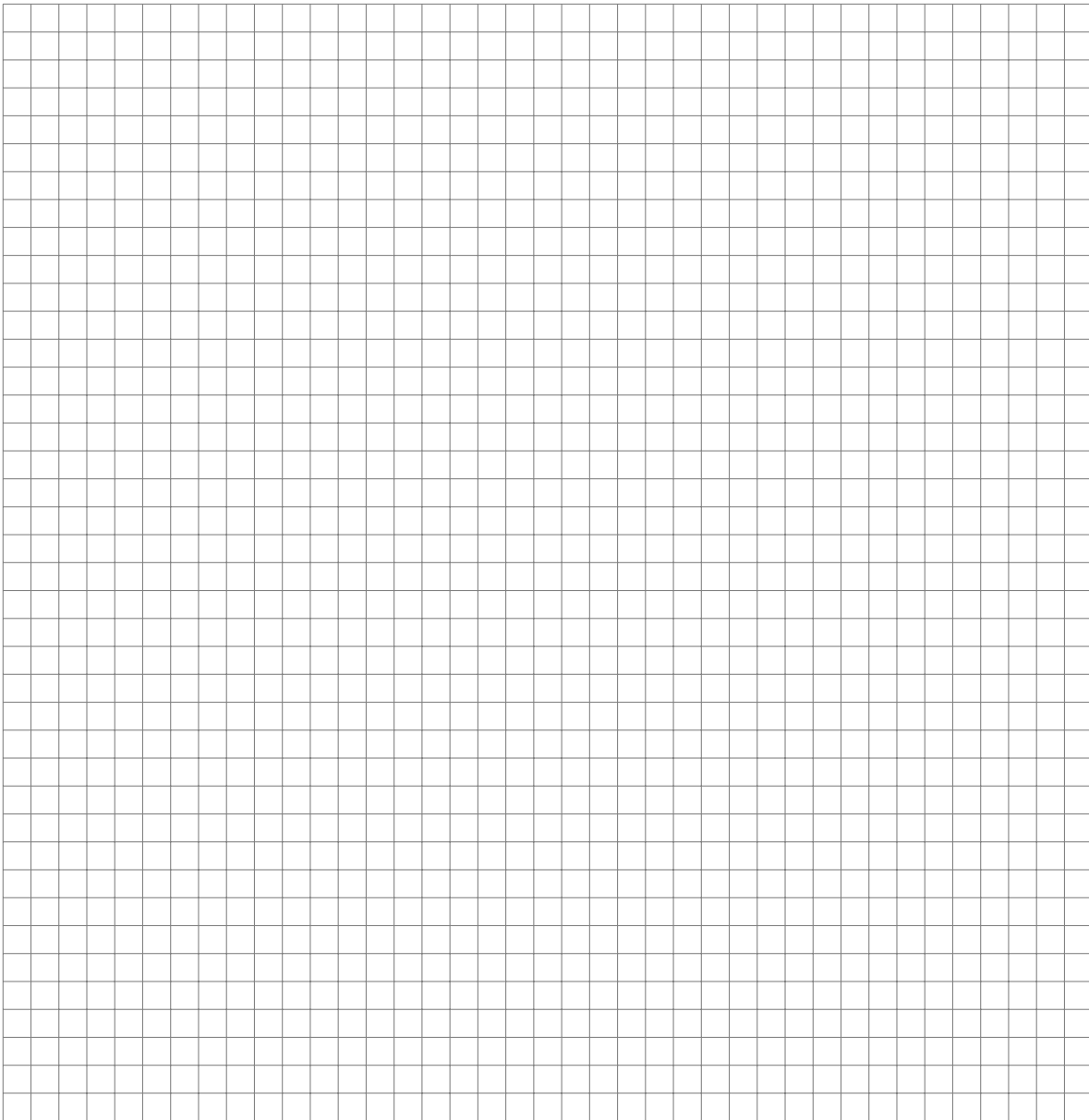
Optik

K A P I T E L Z I E L E :

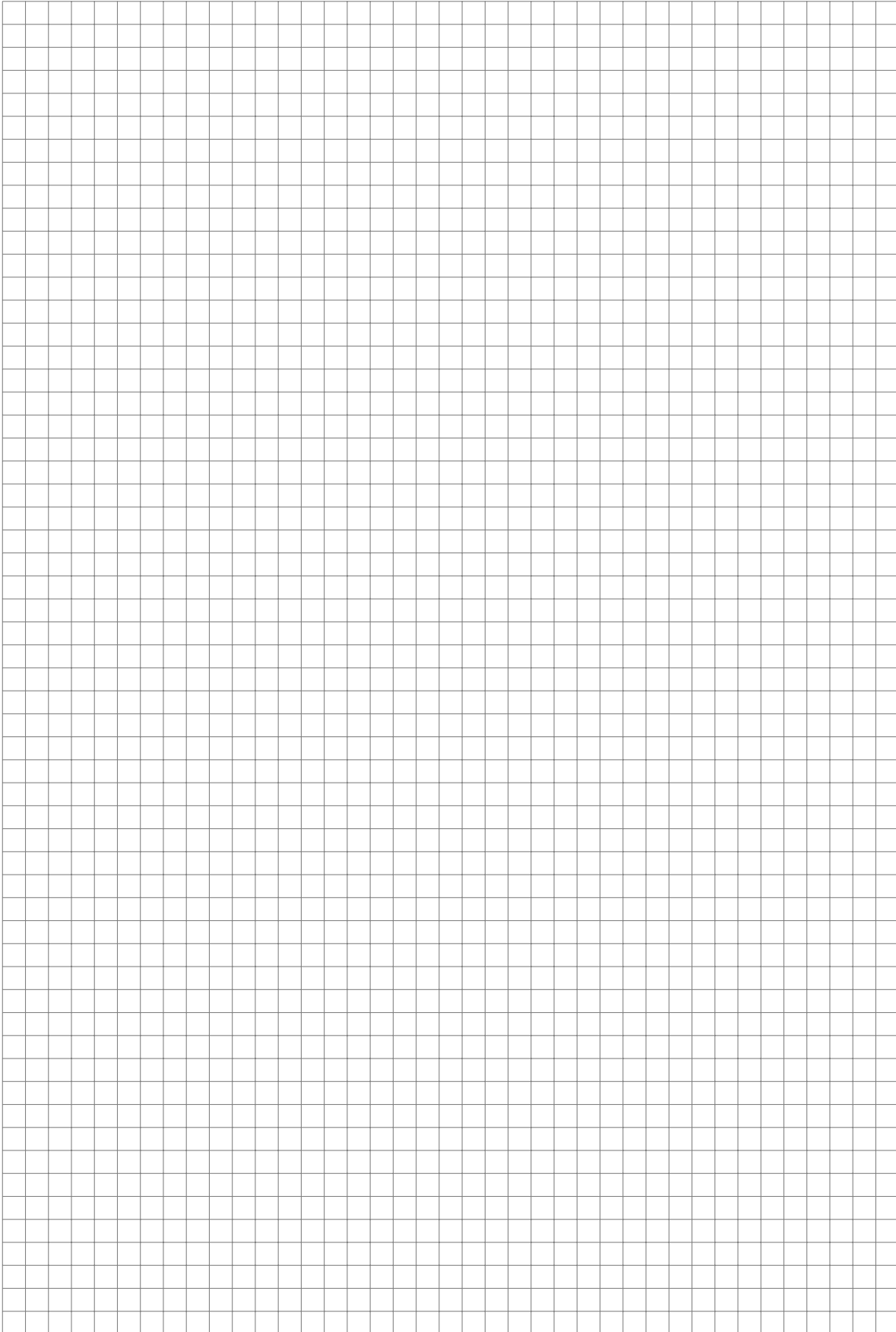
- Sie wissen, dass das Licht sich geradlinig ausbreitet und wissen, wie man ein Lichtbündel erzeugen kann.
- Sie erklären, was ein Schatten ist, kennen die Eigenschaften von der Grösse des Schattenbilds und können die Entstehung der zwei Schattenarten erklären. Sie konstruieren für verschiedene Situationen die beiden Schattenarten.
- Sie wissen die verschiedenen Reflexionsarten (und wie sie zustande kommen), können sie anhand einer Skizze erklären und je ein bis zwei Beispiele nennen.
- Sie können das Reflexionsgesetz anhand einer Skizze detailliert erklären, sind in der Lage für verschiedene Situationen Spiegelbilder zu konstruieren und können die Konstruktion anhand des Reflexionsgesetzes erklären.
- Sie können anhand einer Skizze und einer Berechnung erklären, weshalb es zu einer Brechung kommt, wenn ein Lichtstrahl von einem Medium in einen anderen Medium geht (\Rightarrow Fermat'sches Prinzip).
- Sie können anhand einer Zeichnung und der gegebenen Grössen entscheiden, ob ein Lichtstrahl zum Lot hingebrochen oder vom Lot weggebrochen wird.
- Das Brechungsgesetz von Snellius kann bei verschiedenen Problemen korrekt angewendet werden, Lichtstrahlen korrekt konstruiert werden sowie Berechnungen durchgeführt werden.
- Sie wissen, dass die Lichtgeschwindigkeit unterschiedlich ist je nach Medium.
- Sie verstehen den Zusammenhang zwischen der Brechung und der Totalreflexion und können für verschiedene Anordnungen der Medien bestimmen, wie gross der Grenzwinkel sein muss.
- Sie wissen den Unterschied zwischen einer Sammellinse und einer Zerstreuungslinse, können die Parallelstrahlen, Mittelpunktstrahlen und Brennpunktstrahlen bei einer Sammellinse und bei einer Zerstreuungslinse konstruieren und anhand der Konstruktion das Bild von einem Gegenstand einzeichnen.
- Anhand der Konstruktionen können Sie die Eigenschaften der Bildweite und der Bildgrösse erklären (für eine gegebene Gegenstandsweite) und können die entsprechenden Berechnungen durchführen.
- Sie können mit dem Abbildungsgesetz, mit dem Abbildungsmassstab und mit der Linsengleichung Berechnungen durchführen für verschiedene Problemstellungen. Sie zeigen alle algebraischen Umformungen, die Sie vornehmen.
- Sie kennen die Eigenschaften und das Funktionsprinzip der Camera Obscura und können das Abbildungsgesetz korrekt auf das Problem anwenden.

Grösse des Schattenbilds:

Bisher wurde das Schattenbild betrachtet, welches nur von einer Lichtquelle produziert wurde. Aber was passiert nun, wenn wir zwei Lichtquellen aufstellen und ein Objekt beleuchten?

Definition: Kernschatten und Halbschatten:

Kernschatten und Halbschatten sowie die Beleuchtung eines Objekts mit einer Leuchtstoffröhre:



1.2.3 Spiegelbilder

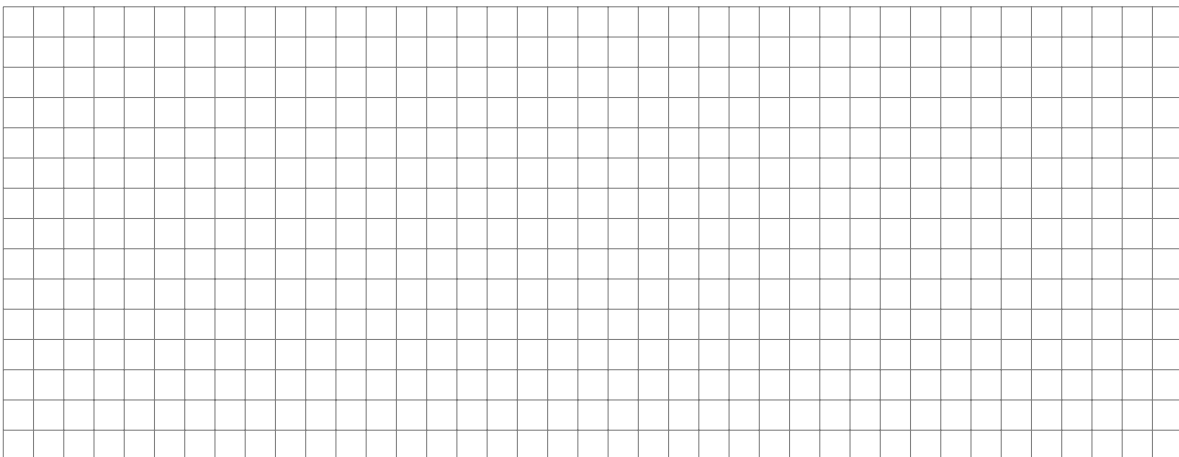
In einem Spiegel sieht man das Bild von einem Gegenstand, welcher vor dem Spiegel sich befindet. Das entstehende Bild lässt sich zeichnerisch in Abbildung 1.6 anhand des Reflexionsgesetzes (am besten mit Lineal und Winkelmesser) konstruieren.



Abbildung 1.6: Konstruktion der Spiegelbilder.

Die Lichtstrahlen, die von einem Punkt des Gegenstandes G ausgehen, treffen unter verschiedenen Einfallswinkeln auf den Spiegel und werden nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen. Ein Teil der Strahlen gelangt in das Auge des Beobachters. Verlängert man diese Strahlen geradlinig nach hinten, so schneiden sie sich in einem Bildpunkt B hinter dem Spiegel. Für den Betrachter scheint das ins Auge fallende Licht von diesem Punkt auszugehen.

Folgerung:



1.3 Lichtbrechung und Totalreflexion

1.3.1 Lichtbrechung im Alltag

Neben der Spiegelung ist die Brechung von Licht eine Erscheinung, die wir im Alltag beobachten können. Tauchen wir einen (geraden) Bleistift in ein Glas Wasser, so erscheint er an der Grenzfläche (= Mediengrenze) zwischen Luft und Wasser nach oben geknickt, siehe Abbildung 1.7. "Brechung des Lichts" heisst, dass ein Lichtstrahl beim Übergang von einem durchsichtigen Körper (z.B. Luft) in einen anderen durchsichtigen Körper (z.B. Glas oder Wasser) seine Richtung ändert. Senkrecht auftreffendes Licht ändert seine Richtung jedoch nicht.



Abbildung 1.7: Lichtbrechung: Ein in Wasser getauchter Bleistift erscheint geknickt.

1.3.2 Brechungsgesetz von Snellius

Wir untersuchen die Brechung, indem wir einen Lichtstrahl schräg auf die Mitte eines halbkreisförmigen Glaskörpers fallen lassen. Beim Eintritt in den Glaskörper wird der Strahl gebrochen, nicht aber beim Austritt. Dies deshalb, weil der Strahl beim Austritt vom Kreismittelpunkt her kommt und daher senkrecht zur Begrenzungsfläche austritt.

Den Winkel α des einfallenden Strahls zur Senkrechten (zum „Lot“) nennen wir Einfallswinkel, den Winkel β des gebrochenen Strahls zur Senkrechten nennen wir Brechungswinkel, siehe Abbildung 1.8. Wir beobachten, dass der Strahl im Glaskörper einen kleineren Winkel zum Lot hat. Der Brechungswinkel ist also in diesem Fall kleiner als der Einfallswinkel. Wir sagen, der Strahl wird „zum Lot hin gebrochen“. Zudem beobachten wir, dass ein Teil des Lichts an der Grenzfläche reflektiert wird. Es tritt also nur ein Teil des Lichts in den Glaskörper ein und wird gebrochen.

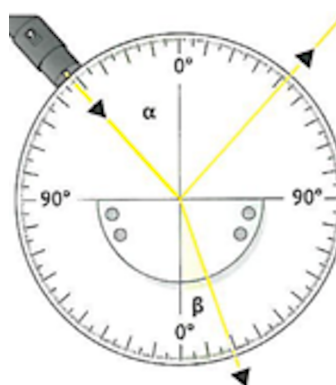


Abbildung 1.8: Untersuchung der Brechung.

Wenn wir den Glaskörper umdrehen, ergibt sich ein anderes Bild, wie in der Abbildung 1.9 zu sehen ist. Wie man in der Abbildung 1.9 sehen kann, stellen wir zwei Phänomene fest. In Abbildung 1.9(a) sehen wir, dass der Brechungswinkel stets kleiner ist als der Einfallswinkel. Man sagt, der gebrochene Strahl wird zum Lot hin gebrochen. Der Stoff, in dem der zum Lot gemessene Winkel des Lichtstrahls kleiner ist, heisst optisch dichter als der andere Stoff, der als optisch dünner bezeichnet wird. Im Unterschied zu Abbildung 1.9(a), sehen wir in (b), dass der Strahl beim Übergang von Glas zu Luft vom Lot weggebogen wird, das heisst der Brechungswinkel ist grösser als der Einfallswinkel. Was gilt für einen Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel und Brechungswinkel? Diesen Zusammenhang werden wir uns im Kommenden genauer anschauen.



(a)

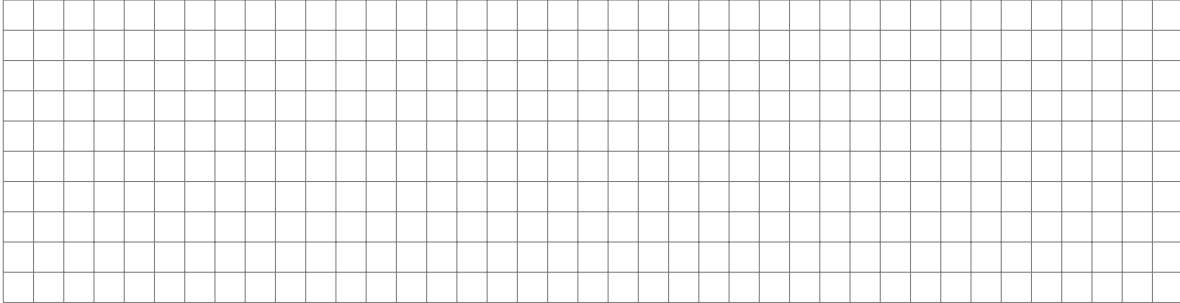


(b)

Abbildung 1.9: (a) Brechung beim Übergang von Luft zu Glas. (b) Brechung beim Übergang von Glas zu Luft.

Nun kann das Brechungsgesetz allgemein formuliert werden. Wie stark nun ein Strahl gebrochen wird, hat Snellius experimentell herausgefunden. Das Brechungsgesetz von Snellius besagt:

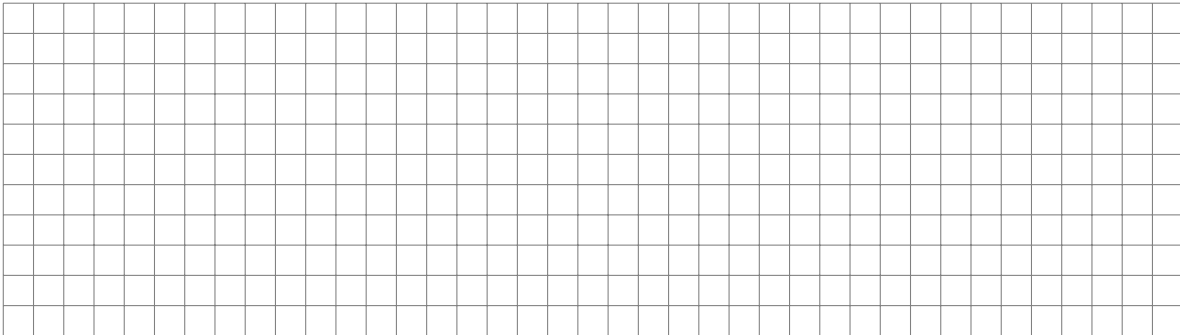
Brechungsgesetz von Snellius:



Überprüfen Sie den Brechungswinkel, den Sie erhalten haben, mit dem Brechungsgesetz von Snellius. Die Lichtgeschwindigkeit im Glas ist $c_G = 2 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ und in Luft $c_L = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien c_1/c_2 , wird als Brechzahl oder Brechungsindex n definiert. Jedes durchsichtige Material (auch "Medium" genannt) kann mit einer "Brechzahl" beschrieben werden. Diese Brechzahl gibt an, wie stark das Material das Licht brechen kann.

Es gilt:



In Tabelle 1.1 sind die Brechzahlen für verschiedene Materialien dargestellt.

Material	Brechzahl n
Vakuum	1
Luft	1.0003 (temperaturabhängig)
Eis	1.31
Wasser	1.33
Plexiglas	1.49
Fensterglas	1.52
Diamant	2.42

Tabelle 1.1: Brechzahl für verschiedene Materialien.

Ein Phänomen, das wir in unserem Alltag beobachten können, ist die Brechung in der Atmosphäre. Wenn wir am Strand sind und den Sonnenuntergang beobachten, sieht man manchmal, dass die Sonne ein bisschen oval erscheint und sie ist nicht mehr kreisrund. Diese Abplattung der Sonne hat ihre Ursache in der Lichtbrechung durch die Lufthülle der Erde. In grosser Höhe ist die Luft sehr dünn. Je näher man aber der Erdoberfläche kommt, umso dichter wird sie, weil auf ihr immer mehr darüber befindliche Luft lastet, die sie zusammenpresst. Die optische Dichte der Luft wächst, je näher man der Erdoberfläche kommt. Das von der Sonne schräg auf die Lufthülle der Erde einfallende Licht wird an den optisch immer dichter werdenden Luftschichten immer mehr zum Lot hin gebrochen. Der Lichtweg ist deshalb immer steiler auf die Erdoberfläche zu gekrümmt. Die Sonne steht deshalb nicht so hoch über dem Horizont, wie es unserer Blickrichtung erscheinen lässt, siehe Abbildung 1.12. Aus demselben Grund erscheint der untere Rand stärker angehoben als der obere.

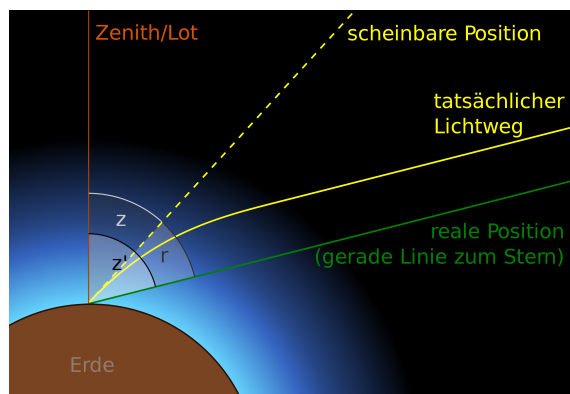


Abbildung 1.12: Astronomische Refraktion. Im Weltall beträgt der Brechungsindex $n = 1$ und am Erdboden beträgt der Brechungsindex $n = 1.00029$.

1.3.3 Lichtgeschwindigkeit

In einem optisch dichteren Medium ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als in einem optisch dünneren Medium. Dabei ist der Brechungsindex ein Mass für die Verkleinerung der Lichtgeschwindigkeit. Hat die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum den Wert $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, so beträgt sie in einem Medium mit dem Brechungsindex $n = 1.5$, z.B. Brillenglas, nur noch

$$c_M = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.5} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.3.1)$$

1.3.4 Totalreflexion und Grenzwinkel

Geht ein Lichtstrahl vom optisch dichten in ein optisch dünnes Medium über, so wird er zum einen Teil vom Lot weg gebrochen: $\alpha_2 > \alpha_1$ (Abbildung 1.13, links). Zum anderen Teil wird er an der Grenzfläche der beiden Medien reflektiert. Wird der Einfallswinkel α_1 vergrößert, so nimmt auch der Winkel α_2 des gebrochenen Strahls zu und erreicht den Wert 90° , wenn der Strahl unter dem sogenannten Grenzwinkel $\alpha_1 = \alpha_{Gr}$ einfällt (Abbildung 1.13, Mitte). Zugleich nimmt die Intensität des gebrochenen Strahls ab, und er verschwindet bei $\alpha_2 = 90^\circ$, während die Intensität des reflektierten Strahls zunimmt. Ist der Einfallswinkel grösser oder gleich dem Grenzwinkel ($\alpha_1 \geq \alpha_{Gr}$), so gibt es nur noch den reflektierten Strahl: Wir sprechen in diesem Fall von einer Totalreflexion (Abbildung 1.13, rechts). Der Grenzwinkel für die Totalreflexion $\alpha_1 = \alpha_{Gr}$ kann leicht berechnet werden. Für den Übergang von einem Medium wie das Glas mit dem Brechungsindex n_1 zu Luft bzw. Vakuum mit dem Brechungsindex n_2 gilt:

$$\frac{\sin \alpha_{Gr}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \alpha_{Gr} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3.2)$$

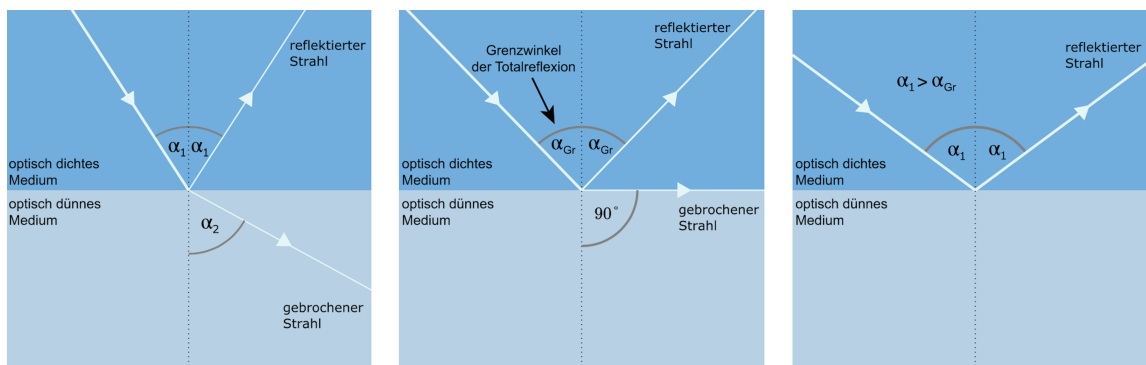
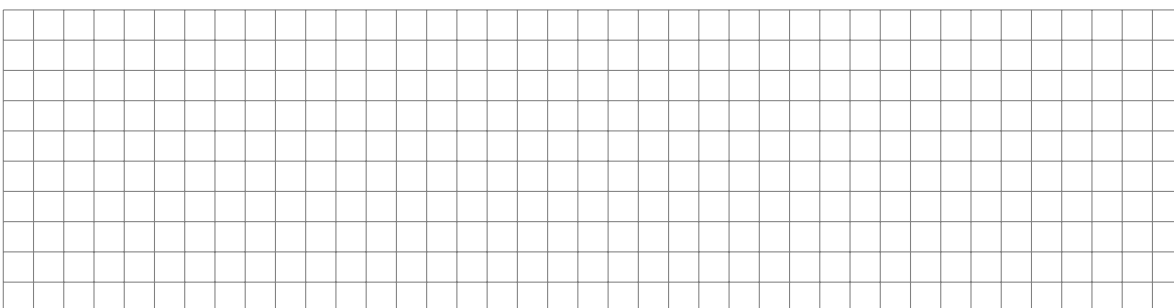


Abbildung 1.13: Totalreflexion.

Gesetz 3:



Die beiden Punkten F haben selbst bei unterschiedlichen Krümmungen der Linsenoberflächen den gleichen Abstand von der Linsenmitte. Sie heissen *Brennpunkte* F der Linse. Diese Bezeichnung rührt von der starken Wärmewirkung her, die man beim Sammeln von Sonnenlicht an diesen Punkten hervorrufen kann. Der Abstand von F zur Linsenmitte ist die *Brennweite* f der Linse.

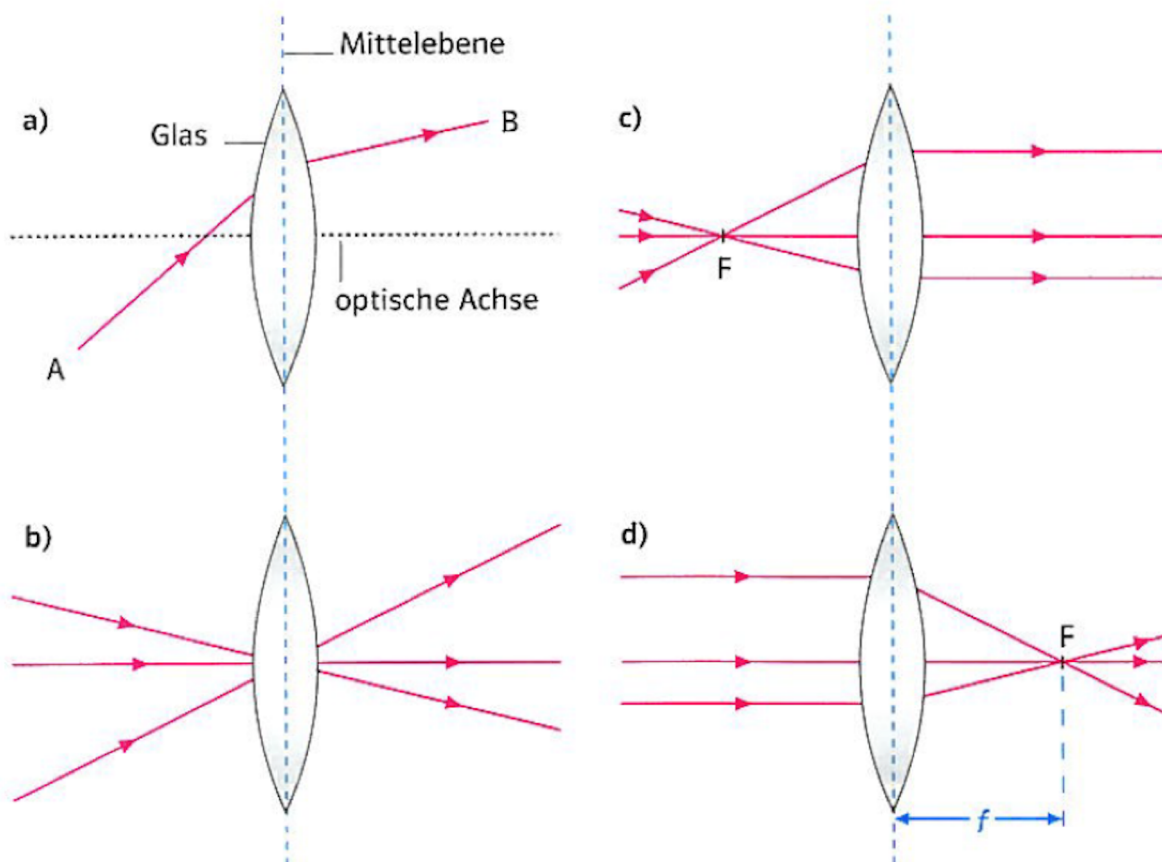


Abbildung 1.14: Nicht alle Lichtbündel werden gleich gebrochen.

Zusammengefasst gilt für eine Sammellinse, wie in der Tabelle 1.2 dargestellt wurde, folgendes:

Vor der Sammellinse	Nach der Sammellinse
Parallelstrahlen	Brennstrahlen/Brennpunktstrahlen
Brennstrahlen/Brennpunktstrahlen	Parallelstrahlen
Mittelpunktstrahlen	Mittelpunktstrahlen

Tabelle 1.2: Zusammenfassung: Verhalten der Lichtstrahlen vor und nach der Sammellinse.

Parallele Lichtstrahlen, die schräg zur optischen Achse verlaufen, werden von der Sammellinse auch durch einen Punkt gelenkt, wie in Abbildung 1.15 zu sehen ist. Er liegt nicht mehr auf der optischen Achse, doch sein Abstand zur Mittelebene der Linse ist ebenfalls gleich der Brennweite f .

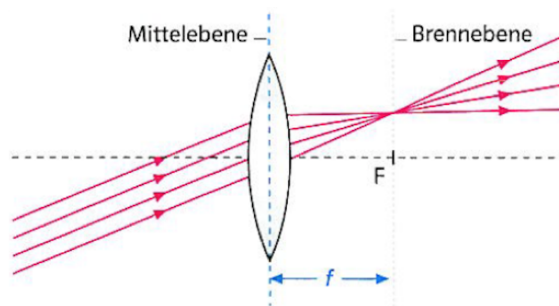
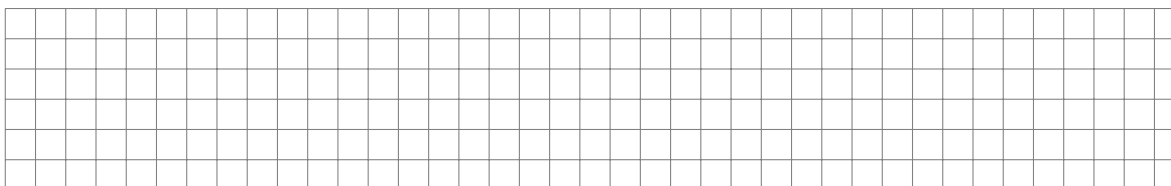


Abbildung 1.15: Parallele Lichtstrahlen schräg zur optischen Achse.

Man sagt, er befindet sich in der Brennebene der Linse. Auf Strahlen, die nahe der optischen Achse auf die Linse treffen, wirkt diese wie eine planparallele Platte. Je dünner die Linse ist, desto kleiner wird die seitliche Verschiebung der Lichtwege. Meist zeichnet man die Lichtwege solcher Strahlen ohne Richtungsänderung und ohne seitliche Versetzung.

Nun untersuchen wir, wie die Krümmung der Linsen in Abhängigkeit mit der Brennweite steht. Es gilt:

Krümmung vs. Brennweite:



Auch bei Linsen mit zwei unterschiedlich gekrümmten Oberflächen ändern die beiden Brechungen den Lichtweg stets so, dass es gleichgültig ist, welche Seite der Linse vom Licht zuerst getroffen wird. Daher ist die Brennweite auf beiden Seiten der Linse gleich. Wenn eine Linse im Verhältnis zum Durchmesser dünn ist, kann man beim Konstruieren des Lichtwegs die zweimalige Brechung durch eine Umlenkung in der Mittelebene der Linse ersetzen. Beim genaueren Betrachten des Experimentfotos, wie in Abbildung 1.16 zu sehen ist, erkennt man, dass die Lichtstrahlen, die parallel zur optischen Achse verlaufen, von der Linse nicht immer genau durch einen Punkt umgelenkt werden. Dies ist einer der Gründe, weshalb bei der Abbildung mit Linsen unscharfe Bilder entstehen können. Nur für dünne Linsen und achsennahen Strahlen erhält man fast einen Punkt, den Brennpunkt der Linse.

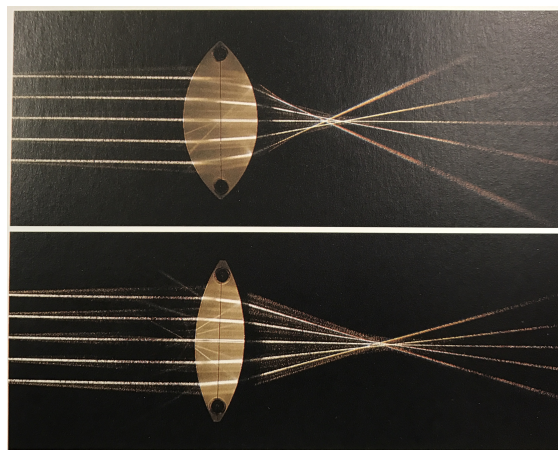


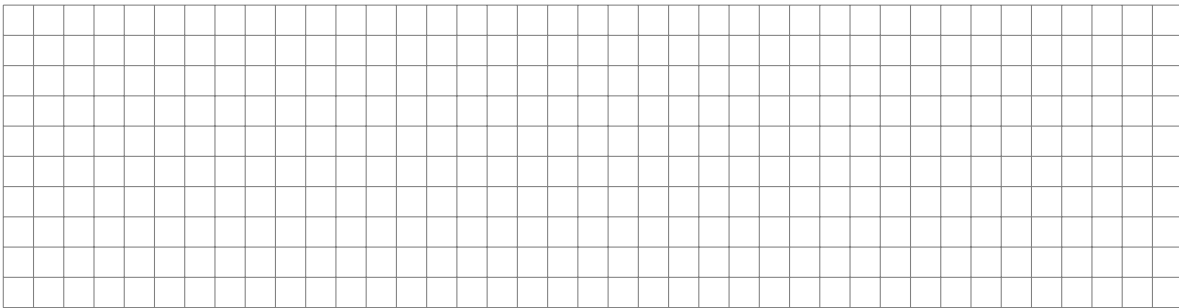
Abbildung 1.16: Unterschiede in der Brennweite von verschiedenen dicken Linsen. Betrachten Sie die Unschärfe der Brennpunkte.

1.4.2 Zerstreulinse

Es gibt Linsen, die anders als Sammellinsen, auseinander strebende Lichtstrahlen noch stärker auseinander laufen lassen. Solche Linsen heißen Zerstreulinsen. Sie sind in der Mitte stets dünner als am Rand.

Die Untersuchung der Lichtwege bei Zerstreulinsen zeigt, dass es wie bei den Sammellinsen auf jeder Seite der Linse einen ausgezeichneten Punkt F auf der optischen Achse gibt. Nur verlaufen hier nicht die Strahlen selbst durch F hindurch, sondern ihre rückwärtigen Verlängerungen vom Auftreffpunkt in der Mittelebene der Linse, siehe Abbildung 1.17 (a). Es gilt:

Gesetz 4:



Auf der anderen Seite der Linse existiert ebenfalls ein Punkt F im gleichen Abstand von der Linsenmitte, auf den die Strahlen zulaufen müssen, damit sie anschliessend die Linse parallel zur optischen Achse verlassen, siehe Abbildung 1.17 (b). Die Strahlen, die durch die Mitte einer Zerstreuungslinse gehen, ändern ihre Richtung nicht, siehe Abbildung 1.17 (c). Bei Zerstreuungslinsen spricht man ebenfalls von Brennpunkten F , obwohl sie keine Brennwirkung haben. Die für das Zeichnen des Strahlengangs massgeblichen Brennpunkte sind gegenüber der Sammellinse vertauscht. Die Brennweite f erhält ein negatives Vorzeichen!!!

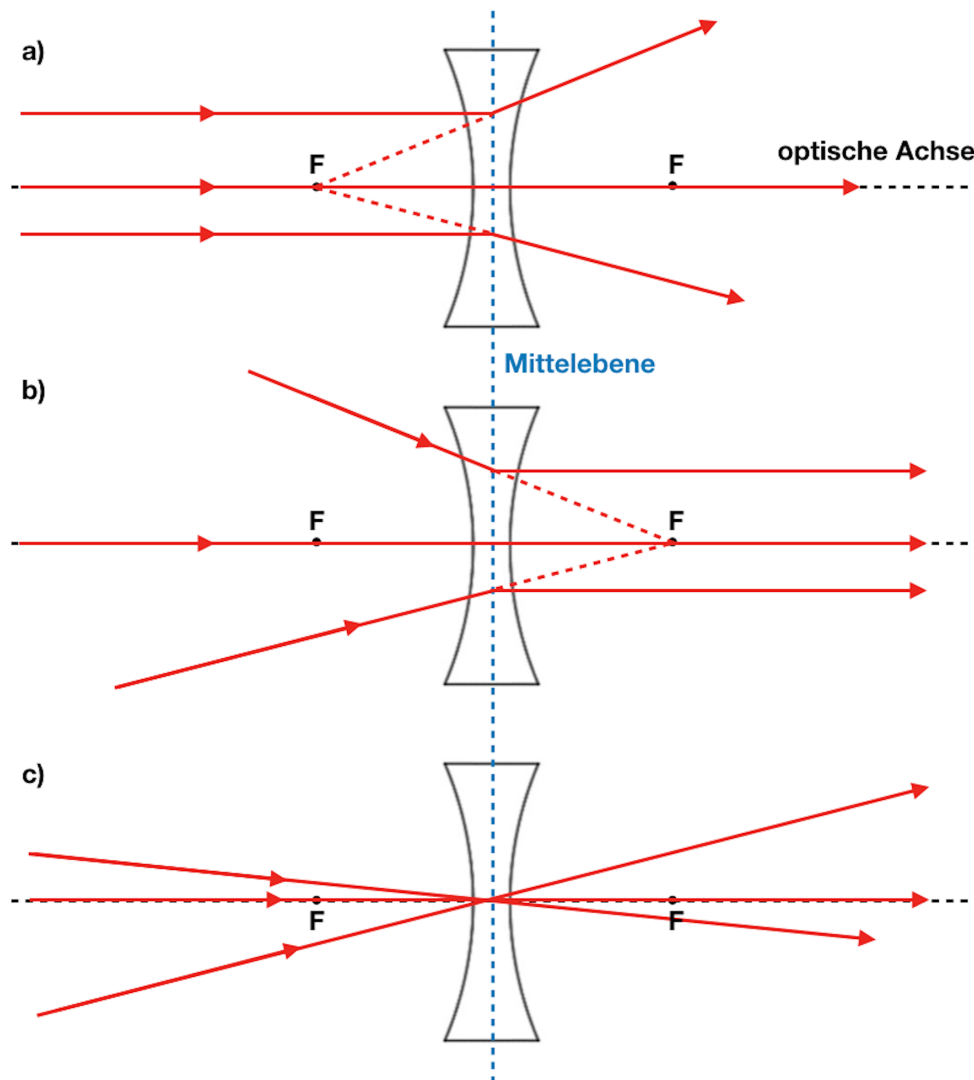


Abbildung 1.17: Lichtwege bei einer Zerstreuungslinse.

1.4.3 Bildentstehung bei einer Sammellinse

Bei der Abbildung eines Gegenstands durch eine Sammellinse hängen die Lage und die Grösse des Bilds von der Entfernung g des Gegenstands zur Linse und von deren Brennweite f ab. Nähert man einen Gegenstand aus grosser Entfernung einer Sammellinse, so entfernt sich auch das Bild von der Sammellinse. Die Sammellinsen erzeugen umgekehrte, seitenvertauschte Bilder von Gegenständen, wenn sich diese ausserhalb der Brennweite befinden, siehe Abbildung 1.18. Zur Konstruktion des Bilds genügen wiederum die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Brennpunkt- und Parallelstrahlen, die durch die Sammellinse wiederum auf Parallel- bzw. Brennpunktstrahlen abgebildet werden. Der Schnittpunkt der gebrochenen Strahlen entspricht der Lage des Bilds.

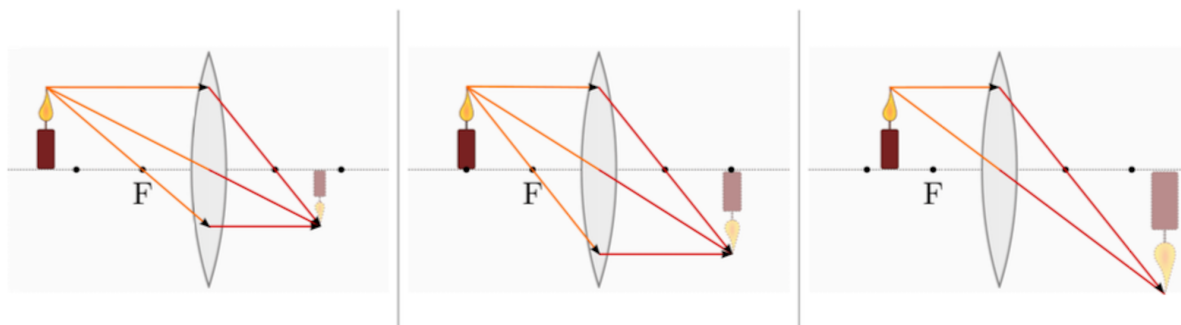


Abbildung 1.18: Bildentstehung an einer Sammellinse, wenn der Gegenstand ausserhalb der Brennweite liegt.

Nähert man einen Gegenstand vom Brennpunkt her einer Sammellinse, so nähert sich auch das Bild der Sammellinse. Die Sammellinsen erzeugen vergrösserte und aufrechte Bilder der Gegenstände, wenn sie sich innerhalb der Brennweite befinden (Lupeneffekt), siehe Abbildung 1.19. Zur Konstruktion des Bilds zeichnet man die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Bildstrahlen hinter der Sammellinse weiter. Dabei ist zu beachten, dass die Brennpunktstrahlen zu Parallelstrahlen werden und die Mittelpunktstrahlen stets senkrecht auf die Linse treffen und diese somit ohne Lichtbrechung durchlaufen. Die Lage des Bilds entspricht dem Schnittpunkt der so verlängerten Parallel- bzw. Mittelpunktstrahlen hinter dem Gegenstand.

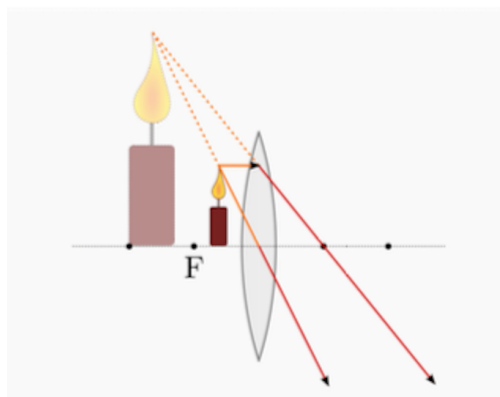


Abbildung 1.19: Bildentstehung an einer Sammellinse, wenn der Gegenstand innerhalb der Brennweite liegt.

Zusammengefasst können wir folgendes sagen, wie in Tabelle 1.3 dargestellt wurde:

Gegenstandsweite g	Bildweite b	Eigenschaften des Bilds
$g > 2f$	$f < b < 2f$	reell, umgekehrt, verkleinert
$g = 2f$	$b = 2f$	reell, umgekehrt, gleich gross
$f < g < 2f$	$b > 2f$	reell, umgekehrt, vergrössert
$g = f$	-	kein Bild auf dem Schirm
$g < f$	$b > g$	virtuell, aufrecht, vergrössert

Tabelle 1.3: Eigenschaften des Bilds bei unterschiedlichen Gegenstandsweite und Bildweite.

1.4.4 Bildentstehung bei einer Zerstreuungslinse

Untersucht man die Abbildungseigenschaften bei einer Zerstreuungslinse, so beobachtet man, dass mit ihr, gleichgültig in welcher Entfernung sich der Gegenstand zu ihr befindet, keine reellen Bilder auf dem Schirm zu erzeugen sind. Die Lichtstrahlen der Gegenstandspunkte schneiden sich nie in Bildpunkten hinter der Linse. Ein Betrachter sieht allerdings beim Blick durch die Linse virtuelle Bilder, die sich innerhalb der Brennweite auf der Seite des Gegenstands befinden. Sie entstehen beim Betrachten durch Verlängerung der Lichtstrahlen, die die Linse verlassen. Die Aufweitung der Lichtbündel durch die Zerstreuungslinse liefert stets verkleinerte Bilder des Gegenstands in gleicher Lage, wie in Abbildung 1.20 zu sehen ist. Zur Konstruktion des Bilds zeichnet man zu einem Gegenstandspunkt wiederum einen Parallel- und einen Brennpunktstrahl ein. Der Parallelstrahl wird durch die Zerstreuungslinse so gebrochen, dass die nach hinten gerichtete Verlängerung des Strahls durch den Brennpunkt verläuft. Das (stets verkleinerte) Bild befindet sich am Schnittpunkt des so verlängerten Parallelstrahls mit dem Mittelpunktstrahl zwischen dem Gegenstand und der Linse.

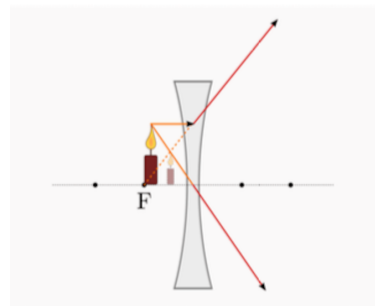


Abbildung 1.20: Bildentstehung an einer Zerstreuungslinse, wenn der Gegenstand innerhalb der Brennweite liegt.

1.4.5 Abbildungsmaßstab

Wie wir bis jetzt gesehen haben, mithilfe einer Sammellinse kann eine Abbildung eines hellen Gegenstands auf einem weissen Karton (Schirm) erzeugt werden. Das Gleiche geschieht auch beim Fotoapparat (Abbildung auf dem Sensor), beim Beamer oder Hellraumprojektor (Abbildung auf der Leinwand) oder beim Auge (Abbildung auf der Netzhaut). Das vergrößerte beziehungsweise verkleinerte Bild, das sich bei einer Abbildung durch eine optische Linse ergibt, kann nicht nur durch geometrische Konstruktion sondern auch rechnerisch bestimmt werden. Dazu betrachten wir die Abbildung 1.21.

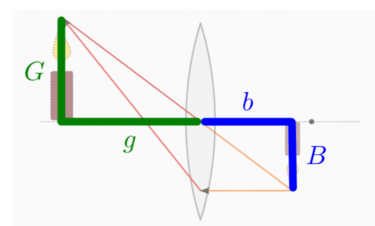


Abbildung 1.21: Herleitung der Abbildungsgleichung.

Wendet man den 2. Strahlensatz auf die obige Abbildung an, so erkennt man, dass die Grösse G des Gegenstands im gleichen Verhältnis zur Entfernung g des Gegenstands von der Linse steht wie die Grösse des Bilds B zu seiner Entfernung b von der Linse:

Abbildungsgesetz:



Das Verhältnis B/G zwischen der Grösse des reellen Bilds und derjenigen des Gegenstands bezeichnen wir als den *Abbildungsmaßstab*. Der Abbildungsmaßstab hat keine Einheit, sondern ist ein reines Zahlenverhältnis. Sein Wert ist kleiner als Eins im Fall einer Verkleinerung und grösser als Eins im Fall einer Vergrößerung.

1.4.6 Linsengleichung

Häufig lassen sich im praktischen Anwendungsfall die Gegenstandsgrösse G sowie die Gegenstandsweite g durch eine gewöhnliche Längenmessung ermitteln. Um damit jedoch mit dem Abbildungsgesetz auf die Bildgrösse B und die Bildweite b schliessen zu können, ist eine zusätzliche Gleichung nötig. Nun werden wir die Linsengleichung herleiten.

Linsengleichung:

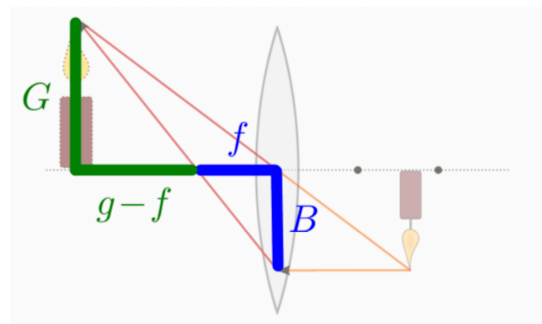
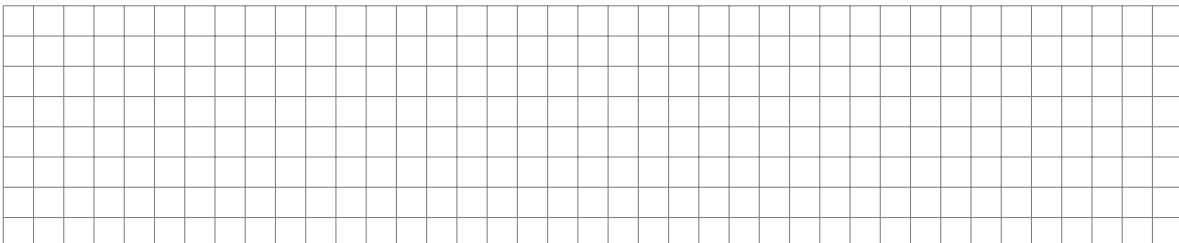


Abbildung 1.22: Herleitung der Linsengleichung.

Die Linsengleichung sowie das Abbildungsgesetz können auch für die Berechnung der Bildweite b und der Bildgrösse B von virtuellen Bildern verwendet werden. Die Bildweite und die Bildgrösse werden dann *negativ*.

Beispiel 9: Gegeben: $f = 6 \text{ cm}$, $g = 2.5 \text{ cm}$, $G = 1.5 \text{ cm}$. Gesucht: b , B



In Tabelle 1.4 wurde noch eine Zusammenfassung dargestellt.

Lage des Gegenstands (Gegenstandsweite g)	Lage des Bilds (Bildweite b)	Eigenschaften des Bilds	Abbildungsmaßstab
$g = 2f$ in doppelter Brennweite von der Linse entfernt	$b = g = 2f$ in doppelter Brennweite von der Linse entfernt	umgekehrt, seitenvertauscht, reell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} = 1$
$g = f$ im Brennpunkt der Linse	$b \rightarrow \infty$	Im Endlichen entsteht kein Bild	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \rightarrow \infty$
$2f < g < \infty$	$b = \frac{fg}{g-f}$ zwischen einfacher und doppelter Brennweite der Linse	umgekehrt, seitenvertauscht, verkleinert, reell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} < 1$
$f < g < 2f$ zwischen einfacher und doppelter Brennweite der Linse	$b = \frac{fg}{g-f}$ ausserhalb der doppelten Brennweite der Linse	umgekehrt, seitenvertauscht, vergrössert, reell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} > 1$
$0 < g < f$ zwischen der Linse und dem Brennpunkt	$b = \frac{fg}{g-f}$ (negativ) auf der Gegenstandsseite	aufrecht, seitenrichtig, vergrössert, virtuell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} > -\infty$ und < -1

Tabelle 1.4: Zusammenfassung

1.4.7 Das Auge

1.4.7.1 Die optische Abbildung mit dem Auge

Das Auge erzeugt, ähnlich wie eine Kamera, Bilder auf einer lichtempfindlichen Schicht, der Netzhaut. Der Augapfel hat einen Durchmesser von etwa 25 mm und kann in der Augenhöhle durch 6 Muskeln bewegt werden. Die Linse bildet zusammen mit der Hornhaut, der Flüssigkeit in der vorderen Augenkammer und dem Glaskörper das optische System des Auges (siehe Abbildung 1.23).

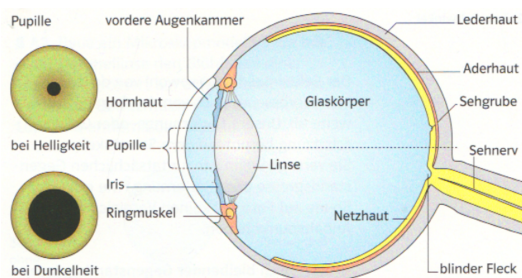


Abbildung 1.23: Horizontalschnitt (also Blick von oben) durch das rechte Auge.

Die von der farbigen Iris umgebene Pupille begrenzt die Helligkeit auf der Netzhaut, indem sie den Durchmesser der Lichtbündel von 64 mm^2 bei wenig Licht auf 4 mm^2 bei viel Licht ändern kann.

Diese Anpassung an die Lichtverhältnisse nennt man Adaption. Die Brennweite des optischen Systems beträgt etwa 17 mm. Die Netzhaut befindet sich also zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite. Es entsteht ein reelles, verkleinertes und umgekehrtes Bild. Ein bewusstes Zusammenwirken von Auge und Gehirn lässt uns die Umwelt lagerichtig wahrnehmen. Das Bild entsteht auf der Netzhaut mit über 130 Millionen Sehzellen, die einen Abstand von etwa 0.007 mm haben. Am Ausgang der Sehnerven sind im Auge keine Sinneszellen vorhanden. Man bezeichnet diese Stelle als blinder Fleck. Entfernen oder nähern sich Gegenstände, so muss wegen der konstanten Bildweite im Auge die Brennweite durch die elastische Augenlinse verändert werden. Sie wird von einem Ringmuskel in gestreckter Form festgehalten. Zieht sich dieser zusammen, so krümmt sich die Linse stärker und die Brennweite wird kleiner.

Die Brennweite kann auf diese Weise zwischen 13 mm und 18 mm verändert werden (siehe Abbildung 1.24). Diese Anpassung heisst Akkommodation.

Die Gegenstände in 25 cm Entfernung lassen sich besonders klar und deutlich erkennen. Völlig entspannt ist das Auge, wenn die Lichtstrahlen nahezu parallel eintreffen. Unter 10 cm Abstand kann ein Gegenstand selbst mit Anstrengung nicht mehr deutlich gesehen werden.

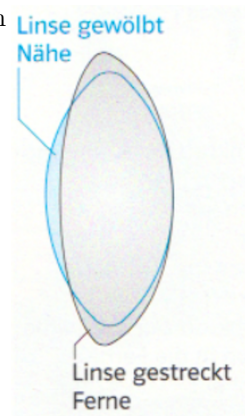


Abbildung 1.24: Veränderung der Brennweite zwischen 13 mm und 18 mm.

1.4.7.2 Der Sehwinkel

Mit einer Münze am ausgestreckten Arm lässt sich die Vollmondscheibe völlig verdecken. Das Flugzeug kann grösser erscheinen als die Sonne. Wenn wir einen Gegenstand genau betrachten wollen, dann bringen wir ihn näher ans Auge. Die Bildgrösse auf der Netzhaut ist durch den Sehwinkel bestimmt (siehe Abbildung 1.25), unter dem man den Gegenstand sieht.

Der Sehwinkel bestimmt die Bildgrösse. Je grösser der Sehwinkel, desto grösser wird das Bild auf der Netzhaut.

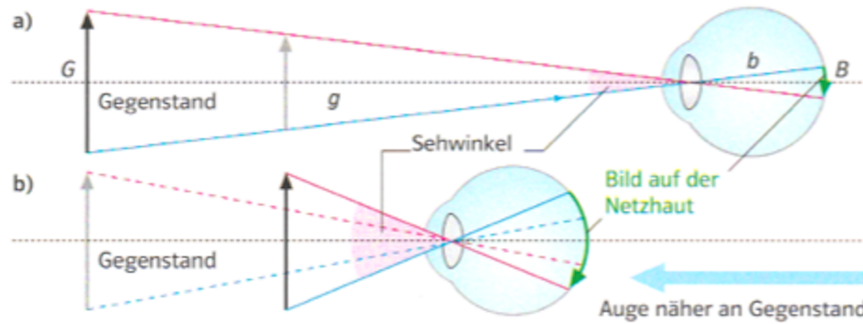


Abbildung 1.25: Der Sehwinkel.

Der Sehwinkel hängt sowohl von der Gegenstandsgrösse als auch von der Gegenstandsweite ab. Unsere Entfernungs- oder Grössenschätzung beruht auf dem Sehwinkel. Sie versagt, wenn wir zur tatsächlichen Gegenstandsgrösse oder Entfernung keinen Vergleich oder Anhaltspunkt haben. Bei gleich bleibender Gegenstandsgrösse wird der Sehwinkel mit wachsender Gegenstandsweite (Entfernung) kleiner.

Erscheinen zwei entfernte, verschieden grosse Gegenstände unter gleichen Sehwinkel, so sind die jeweiligen Quotienten von Gegenstandsgrösse G zu Gegenstandsweite g gleich. Es gilt: $G_1 : g_1 = G_2 : g_2 = \dots$

Für kleine Sehwinkel sind Gegenstandsgrösse und Gegenstandsweite annähernd proportional.

1.4.7.3 Fehlsichtigkeit

Durch Akkommodation können Gegenstände aus unterschiedlichen Entfernungen scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Oft gelingt dies nicht, weil die Strahlen nicht hinreichend stark gebrochen werden oder der Augapfel zu kurz ist, so dass ein Bildpunkt erst hinter der Netzhaut entstehen würde. Das Bild auf der Netzhaut wird unscharf. Dieser Sehfehler heisst Weitsichtigkeit (siehe Abbildung 1.26).

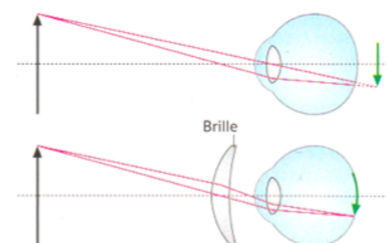


Abbildung 1.26: Weitsichtiges Auge.

Eine Sammellinse als Brille verkürzt durch zusätzliche Brechung die Bildweite, so dass eine scharfe Abbildung auf der Netzhaut entsteht.

Im Alter lässt sich wegen der nachlassenden Elastizität der Linse die Brennweite des Auges oft nicht mehr genügend verringern, so dass auch hier eine Sammellinse als Brille erforderlich wird. Man spricht dann von Altersweitsichtigkeit. Werden dagegen die Strahlen im Auge zu stark gebrochen oder ist der Augapfel zu lang (siehe Abbildung 1.27), so liegen die Bildpunkte vor der Netzhaut. Diesen Sehfehler nennt man Kurzsichtigkeit. Hier lässt sich die Gesamtbrechung durch Brillen mit Zerstreuungslinsen abschwächen.

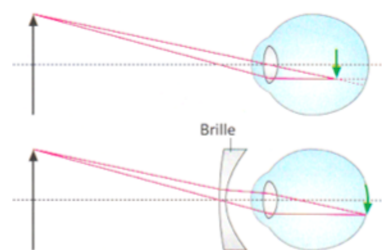


Abbildung 1.27: Kurzsichtiges Auge.

Bei Brillengläsern gibt man meist nicht die Brennweite f , sondern die Brechkraft $D = 1/f$ an. D wird in Dioptrien (dpt) gemessen. Es ist 1 Dioptrie = 1 dpt = 1/m.

1.4.8 Das Mikroskop

Mit einem Lichtmikroskop kann man sehr grosse Vergrößerungen (bis zu 1600-fach) erzielen. Es besteht aus mindestens zwei Linsen. Die eine befindet sich im Objektiv (lat. objectum, d.h. dem Gegenstand zugewandt), die andere im Okular (lat. oculus, d.h. dem Auge zugewandt). Die Linse im Objektiv ist eine stark brechende Sammellinse. Ihre Brennweite beträgt nur einige Millimeter. Das ist nötig, damit man das zu beobachtende Objekt möglichst nahe an das Objektiv rücken kann.

Das Objektiv erzeugt im Mikroskop ein stark vergrössertes Zwischenbild (siehe Abbildung 1.28). Dieses wird nun durch die zweite Linse im Okular wie mit einer Lupe betrachtet und erscheint dadurch noch mehr vergrössert. Das Mikroskop vergrössert für sehr nahe Gegenstände den Sehwinkel erheblich.

Die meisten Mikroskope haben mehrere Objektive. Das Okular steckt lose im oberen Teil des Mikroskops und kann auch durch ein anderes ersetzt werden. Durch die Auswahl von Objektiv und Okular kann man die Vergrößerung festlegen. Steht z.B. auf dem Objektiv "25x" und auf dem Okular "8x", dann vergrössert das Mikroskop $25 \times 8 = 200$ -fach.

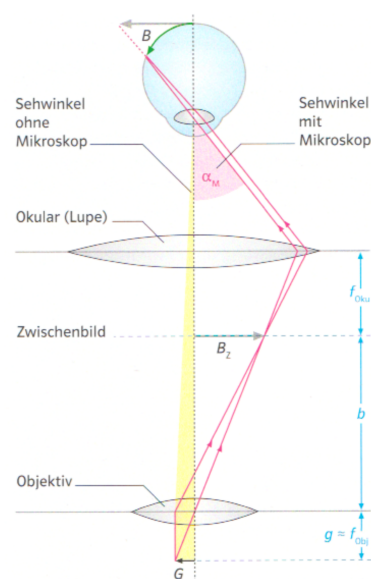


Abbildung 1.28: Bildentstehung beim Mikroskop.

Die Vergrößerung des Mikroskops ist das Produkt aus dem Objektiv- und der Okularvergrößerung.

Je stärker ein Mikroskop vergrössert, desto weniger Licht kommt von der Lichtquelle durch das Mikroskop in unser Auge. Meistens werden deshalb die dünnen, durchsichtigen Untersuchungsobjekte von unten durchleuchtet.

Dicke, undurchsichtige Objekte werden durch eine im Mikroskop eingebaute Lampe von oben oder von der Seite beleuchtet.

1.4.9 Das Fernrohr

Die Wirkungsweise eines Fernrohrs kann mit der eines Mikroskops verglichen werden. Auch hier entsteht zunächst ein Zwischenbild, das aber aufgrund der grossen Gegenstandsweite stark verkleinert wird (siehe Abbildung 1.29). Das Zwischenbild wird durch das Okular betrachtet, welches als Lupe wirkt. Insgesamt erscheint der Gegenstand dem Auge unter einem grösseren Sehwinkel, das Fernrohr vergrössert den Gegenstand. Verwendet man ein Objektiv mit längerer Brennweite, so wird das Zwischenbild grösser.

Demgegenüber nimmt die Vergrößerung durch das Okular zu, wenn man dessen Brennweite verringert.

Die Vergrößerung des Fernrohrs beträgt:

$$V_F = \frac{f_{Obj}}{f_{Oku}} \quad (1.4.1)$$

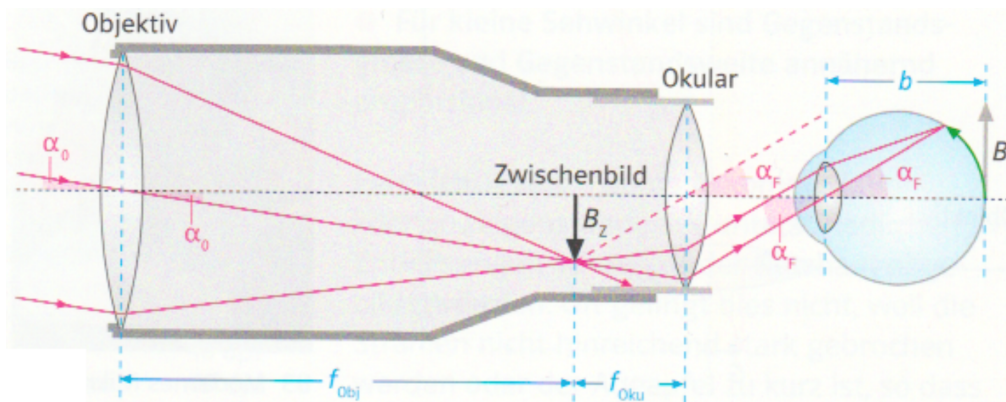


Abbildung 1.29: Der Strahlengang am Fernrohr.

Das Fernrohr nach Abbildung 1.29 hat einen Nachteil: Das Bild erscheint gegenüber dem Gegenstand kopfstehend. Das stört nicht, wenn man das Fernrohr bei astronomischen Beobachtungen einsetzt. Man verwendet daher auch die Bezeichnung astronomisches Fernrohr. Es wurde von den Astronomen und Mathematiker Johannes Kepler (1571 – 1630) entwickelt.

Möchte man das Prinzip des astronomischen Fernrohrs bei irdischen Beobachtungen einsetzen, muss das Bild aufrecht erscheinen. Dazu kann eine weitere Sammellinse zwischen Objektiv und Okular gebracht werden. Solche terrestrischen Fernrohre sind wegen ihrer grossen Länge allerdings recht unhandlich. Dieser Nachteil wird bei Prismengläsern umgegangen (siehe Abbildung 1.30), Die Prismen kehren das Bild um und bewirken gleichzeitig eine Verkürzung der Baulänge.

Bereits vor Kepler entwickelten holländische Brillenmacher Fernrohre, die aus einer Sammell- und einer Zerstreuungslinse bestanden. Diese Holländischen bzw. Galilei'schen Fernrohre erzeugen ein aufrechtes Bild.

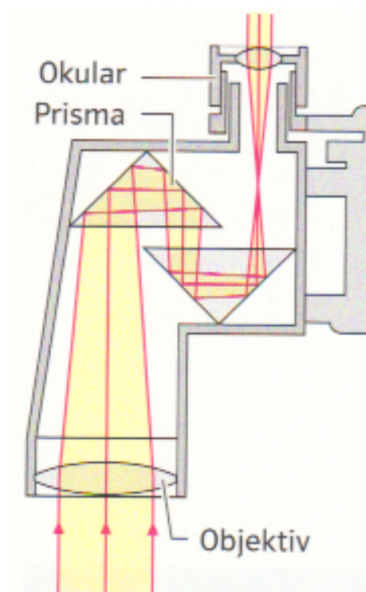
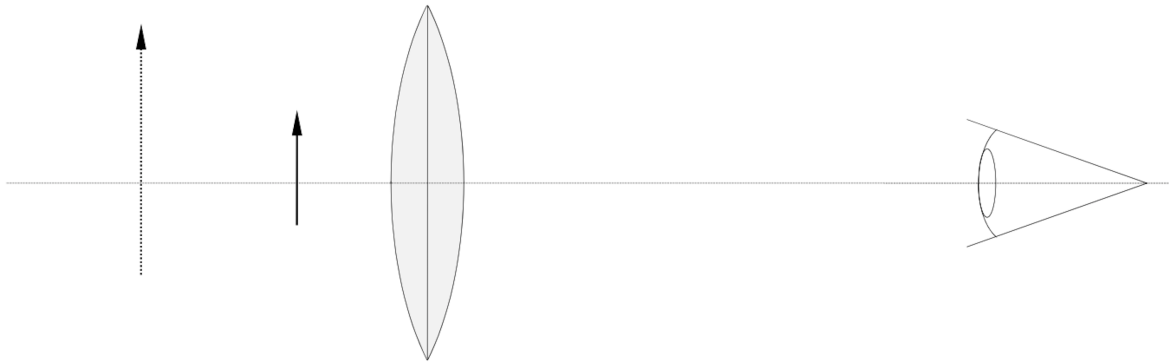


Abbildung 1.30: Prismenglas.

1.4.10 Die Lupe

Will man sich einen kleinen Gegenstand ansehen, hält man ihn möglichst dicht vor das Auge. So vergrößert sich das Bild auf der Netzhaut, das heisst der Sehwinkel wird grösser. Ein kleinerer Abstand als etwa 10 cm ist aber nicht möglich, weil dann die Grenzen der Akkommodation erreicht sind.

Abhilfe verschafft man sich mit einer Lupe: Steht der Gegenstand innerhalb der Brennweite einer Sammellinse ($g < f$), so wird gegenstandsseitig ein vergrößertes, aufrechtes und virtuelles Bild erzeugt. Nun kann man dieses vergrößerte Bild betrachten. Es erscheint unter einem grösseren Sehwinkel.



α : Sehwinkel ohne Lupe
 β : Sehwinkel mit Lupe

Abbildung 1.31: Die Lupe.

Verwendet man also eine einzelne Sammellinse zum vergrößernden Betrachten, so spricht man von einer Lupe.

1.4.11 Der Projektor

1.4.11.1 Der Diaprojektor

Die Kondensorlinse sammelt das Licht der Lampe auf das Dia und leuchtet es gleichmässig aus. Genau genommen, sammelt sie das gesamte auftreffende Licht in das Objektiv (die Lichtquelle wird ins Objektiv abgebildet). Das Dia (also der Gegenstand) wird durch das Objektiv auf die Leinwand abgebildet. Es muss seitenverkehrt und auf dem Kopf in den Diahalter geschoben werden.

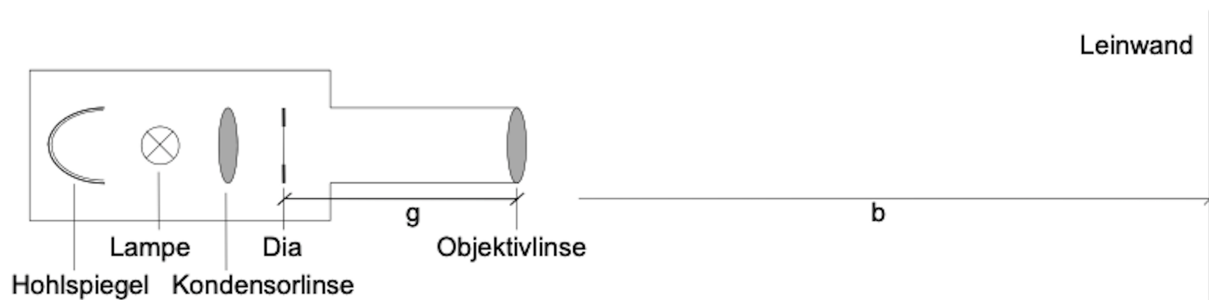


Abbildung 1.32: Der Diaprojektor.

1.4.11.2 Der Hellraumprojektor

Der Spiegel projiziert das Bild, das die Sammellinse erzeugt, an die Wand und dreht es um; man muss somit nicht in Spiegelschrift auf die Folie schreiben.

Die sehr grosse Kondensorlinse wäre in der üblichen Ausführung zu dick und wird daher durch eine Fresnellinse ersetzt.

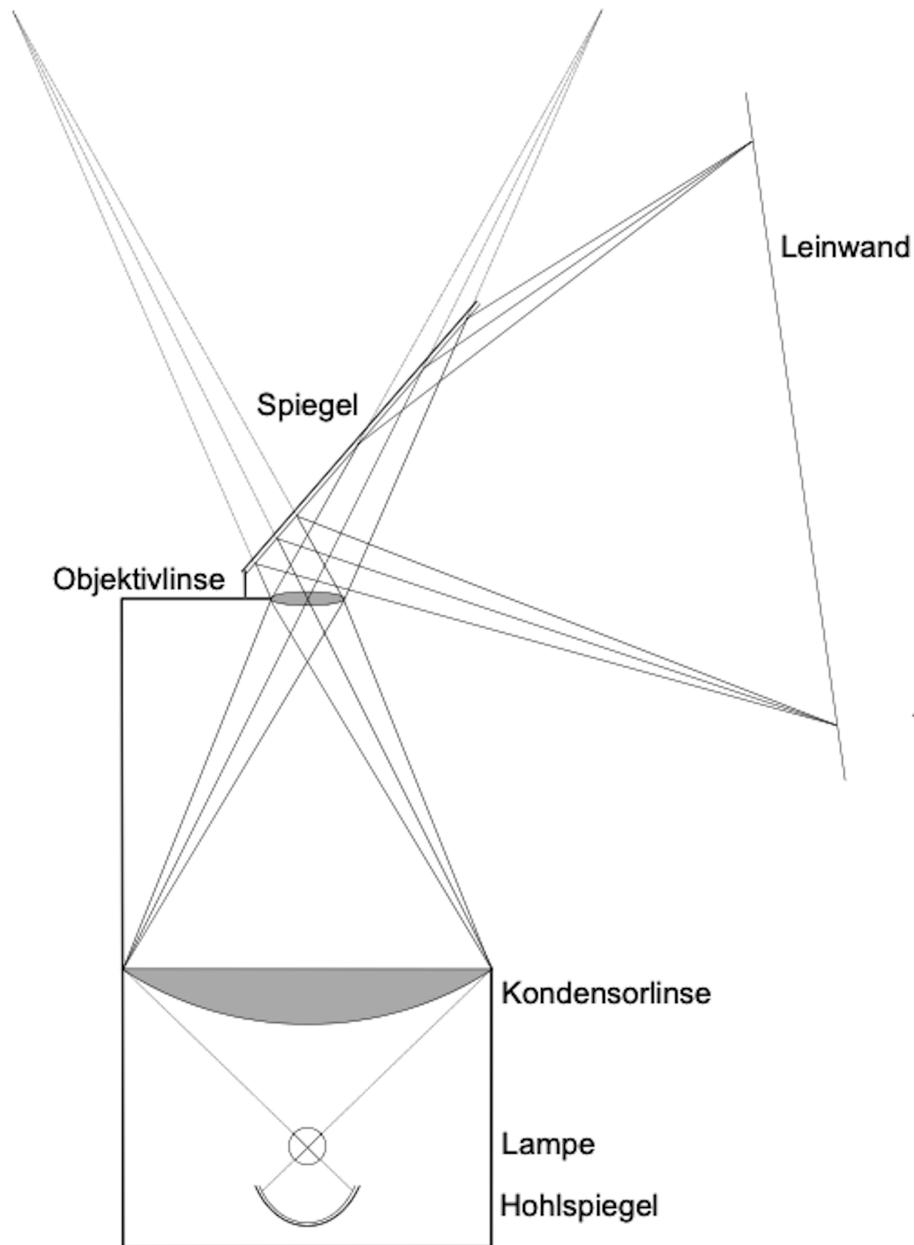


Abbildung 1.33: Der Hellraumprojektor.

1.4.12 Der Fotoapparat

Jeder Fotoapparat hat die folgenden Bauteile:

- Das Objektiv besteht aus einem Linsensystem mit mehreren hintereinanderliegenden Linsen, die Abbildungsfehler korrigieren und wie eine einzige Sammellinse wirken. Bei gewöhnlichen Objektiven beträgt die Brennweite meist 50 mm.
- Die Blende ist ein kreisrundes Loch, dessen Durchmesser eingestellt werden kann; sie befindet sich zwischen den Linsen des Objektivs. Mit ihr können die Durchmesser der Lichtbündel verändert werden, die in die Kamera fallen.
- Der Verschluss ist eine Klappe; er verhindert, dass das Licht durch das Objektiv auf den Film gelangt. Er kann für einstellbare Zeiten geöffnet werden, so dass der Film genau während dieser Zeitspanne belichtet wird; gewöhnlich für $1/125$ s.

- Der Film oder der Bildsensor (CCD, APS oder CMOS) sind lichtempfindlich und befinden sich vor der Rückwand der lichtdicht verschlossenen Kamera. Sie halten das Bild chemisch, respektive elektronisch fest.

Um gute Bilder zu bekommen, muss man die Bildweite so einstellen, dass auf dem Film ein scharfes Bild entsteht. Bei sehr fernen Gegenständen (Einstellung unendlich) ist die Bildweite so gross wie die Brennweite. Bei nahen Gegenständen ist sie grösser. Um sowohl ferne wie auch nahe Gegenstände fotografieren zu können, kann das Objektiv verschoben werden. Das geschieht durch Drehen in einem Gewinde. Die Entfernungsskala auf der Objektivfassung hilft, die richtige Bildweite einzustellen (siehe Abbildung 1.34). Die Einstellung ∞ gilt etwa bis zur hundertfachen Brennweite.



Abbildung 1.34: Einstellungen bei einem Fotoapparat: Entfernung ca. 1.2 m, Blende 11, Schärfentiefe von ca. 0.8 m bis 5 m.

Um den Film richtig zu belichten, benötigt man eine ganz bestimmte Lichtmenge. Diese lässt sich sowohl mit der Blende als auch mit dem Verschluss regeln: Viel Licht trifft auf den Film, wenn man die Blende ganz weit (kleiner Zahlenwert auf dem Einstellring; vgl. Abbildung 1.34) und dem Verschluss lange (ebenfalls kleiner Einstellwert) öffnet. Weniger Licht kommt auf den Film bei umgekehrten Einstellungen. Wie viel Licht für ein gutes Foto nötig ist, muss man abschätzen oder mit einem Belichtungsmesser messen. Ein solcher ist heute in der Regel in jeder Kamera eingebaut. Ob man dann die Lichtmenge mit der Blende oder mit der Verschlusszeit regelt, hängt vom Motiv und der gewünschten Bildgestaltung ab: Für schnellbewegte Objekte sind kurze Verschlusszeiten nötig.

Wenn man eine bestimmte Entfernung an der Kamera eingestellt hat, dann werden auf dem Film nicht nur die Gegenstände scharf erscheinen, die sich genau in dieser Entfernung befinden. Auch Gegenstände in einem etwas geringeren oder etwas grösseren Abstand erscheinen auf dem Foto in ausreichender Schärfe.

Diesen Entfernungsbereich, aus dem scharf abgebildet wird, nennt man die Schärfentiefe. Er hängt direkt von der Grösse der Blende, also vom Durchmesser des in die Kamera eintretenden Lichtbündels ab. Bei vielen Fotoapparaten kann der Bereich der Schärfentiefe für einen fest eingestellten Blendenwert auf dem Entfernungseinstellring abgelesen werden (siehe Abbildung 1.34).

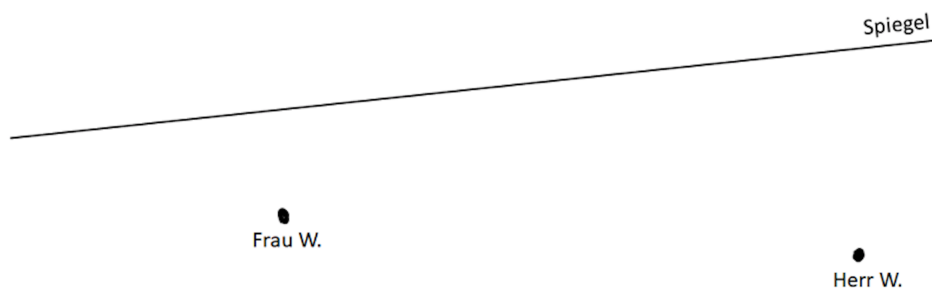
1.5 Aufgaben

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.1 *Das Licht*.

- 1) Weshalb trifft nur ein kleiner Anteil des Sonnenlichts auf die Erde? Weshalb erscheint uns das Weltall als dunkel?
- 2) Weshalb kann das Licht nicht – ähnlich wie das Wasser – in einem Behälter eingefangen und aufbewahrt werden?

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.2 *Die Reflexion des Lichts*.

- 3) Welche der Stoffe aus der folgenden Liste eignen sich dazu, das Licht direkt (wie ein Spiegel) zu reflektieren? Welche Eigenschaften müssen die Oberflächen dafür besitzen?
Fensterglas, Kalkstein, Mehl, Eis, Mattglas, Granit, Kochsalz, Schnee, Kunststoff, Diamant, Zucker, Wasser, Holz, Metall, Sirup, Nebel
- 4) Weshalb können wir nachts Sterne sehen, die unvorstellbar weit entfernt sind, aber auf der Erde eine Lichtquelle kaum 50 km weit sehen?
- 5) Frau und Herr W. stehen vor einem Spiegel. An welchem Punkt auf der Spiegelfläche sieht Frau W. ihren Mann, an welchem Punkt auf der Spiegelfläche sieht er seine Frau? Lösen Sie die Aufgabe durch eine Zeichnung.



Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.3 *Lichtbrechung und Totalreflexion*.

- 6) Ein Lichtstrahl trifft unter dem Einfallswinkel von 45° , 60° , 80° auf eine Wasseroberfläche (Brechzahl $n = \frac{4}{3}$). Bestimmen Sie durch Rechnung den Brechungswinkel.
- 7) Ein Lichtstrahl fällt, von Luft ($n = 1$) her kommend, auf die Grenzfläche eines Mediums. Einfallswinkel = 50° , Ausfallswinkel = 30° .
 - a) Bestimmen Sie durch Zeichnung die Brechzahl des Mediums.
 - b) Berechnen Sie die Brechzahl.
- 8) Ein junger Südseeinsulaner wirft einen Speer in die Richtung, in der er einen Fisch sieht. Geht der Speer über oder unter dem Fisch vorbei?
- 9) Ein Lichtstrahl trifft unter dem Einfallswinkel von 60° auf eine 5 cm dicke, planparallele Platte aus Kronglas ($n = 1.5$).
 - a) Konstruieren Sie den durchgehenden Strahl und bestimmen Sie aus der Zeichnung die seitliche Verschiebung des Strahls.
 - b) Berechnen Sie die seitliche Verschiebung.

- 10) Die Brechzahl von Wasser beträgt $n = \frac{4}{3}$. Berechnen Sie hieraus die Lichtgeschwindigkeit im Wasser, wenn sie im Vakuum $300000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ist!
- 11) Bestimmen Sie durch Rechnung den Grenzwinkel der Totalreflexion beim Übergang eines Lichtstrahls von Kronglas ($n = 1.5$) ins Vakuum.
- 12) Bestimmen Sie durch Rechnung den Grenzwinkel der Totalreflexion von der Aufgabe 7).

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.4 *Optische Instrumente*.

- 13) Berechnen Sie in der folgenden Tabelle die fehlenden Größen:

	Gegenstandsweite	Bildweite	Brennweite
a)	80 cm	40 cm	???
b)	5 m	???	20 cm
c)	35 cm	???	-20 cm
d)	10 cm	???	50 cm
e)	???	3 m	10 cm

- 14) Ein Gegenstand der Grösse 4 cm befindet sich vor einer Linse mit der Brennweite von 10 cm. Berechnen Sie die Bildgrösse und die Bildweite für die folgenden Abstände zwischen dem Gegenstand und der Linse:
- a) 15 cm
b) 10 cm
c) 5 cm.

Erstellen Sie (auf einem zusätzlichen Blatt im Massstab 1:2) eine Skizze des Strahlenverlaufs für die Fälle (b) und (c).

- 15) In 5 m Entfernung von einer Wand befindet sich ein 10 cm hoher leuchtender Gegenstand. In welcher Entfernung von diesem muss eine Sammellinse mit der Brennweite $f = 19.2 \text{ cm}$ aufgestellt werden, damit an der Wand ein scharfes Bild entsteht? Wie gross wird es?
- 16) Wie beeinflusst die Krümmung der Linsenoberfläche die Brennweite einer Sammellinse?
- 17) Wo ungefähr liegen bei einer Sammellinse die Bilder von weit entfernten Gegenständen?
- 18) Ein 2 cm hoher Gegenstand steht in 2 cm Abstand von der Linsenmitte senkrecht auf der optischen Achse einer Sammellinse mit der Brennweite von $f = 5 \text{ cm}$. Konstruieren Sie das Bild.
- 19) Gegeben sind zwei Sammellinsen L1, mit der Brennweite von $f_1 = 20 \text{ cm}$, und L2, mit der Brennweite von $f_2 = 10 \text{ cm}$. Der Abstand zwischen den beiden Linsen beträgt 60 cm. Berechnen Sie den Ort, an dem eine Lampe stehen muss, damit 20 cm hinter L2 und 15 cm unter der optischen Achse ein reelles Bild entsteht.
- 20) Das Bild eines Gegenstands soll auf dem 30 cm von der Linse entfernten Schirm doppelt so gross sein.
- a) Wo muss der Gegenstand stehen?
b) Welche Brennweite muss die Linse haben?

Konstruieren und berechnen Sie!

- 21) Betrachten Sie eine Sammellinse mit der Brennweite 3 cm. Gegeben sind die Gegenstände (vereinfacht: Pfeile) mit der Gegenstandsweite: 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 7.5 cm und 9 cm. Die Grösse des Gegenstands beträgt 2.5 cm.
- Berechnen Sie mit der Linsengleichung die jeweiligen Bildweiten und Bildgrössen, tragen Sie sie in eine Tabelle ein und vergleichen Sie mit der Konstruktion.
 - Erstellen Sie mit den in Teilaufgabe a) ermittelten b - und g -Werten ein sogenanntes $b - g$ -Diagramm. Tragen Sie dazu einen g -Wert auf der g -Achse und den dazugehörigen b -Wert auf der b -Achse ein. Verbinden Sie dann die beiden Punkte. Verfahren Sie analog mit den weiteren $g - b$ -Wertepaaren. Erläutern Sie, welche Besonderheit Sie in dem Diagramm feststellen. Geben Sie an, welche Grösse man aus dem Schnittpunkt der Strecken ablesen kann.
- 22) Bei unseren Augen ist die Bildweite, d.h. der Abstand von der Linse zur Netzhaut, konstant und beträgt etwa 1.8 cm.
- Was verändert sich im Auge, wenn man zuerst einen sehr weit entfernten Gegenstand betrachtet und dann einen im Abstand von 25 cm (mit Rechnung)?
 - Ein Gegenstand der Grösse 10 cm befindet sich im Abstand von 25 cm vor der Augenlinse. Wie gross ist das Bild, das auf der Netzhaut entsteht?
 - Der Abstand zwischen zwei lichtempfindlichen Zellen auf der Netzhaut beträgt etwa 0.007 mm. Wie gross muss der Abstand zwischen zwei Punkten sein, damit man sie im Abstand von 25 cm noch als getrennt wahrnimmt?