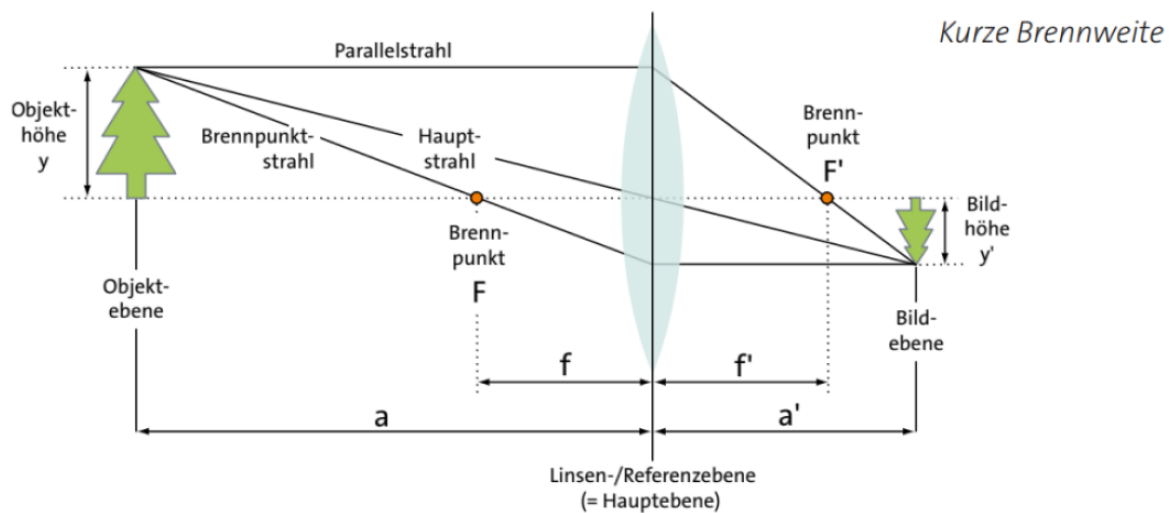


Hintergrundtexte zur Strahlenoptik 1

November 2023

Die folgenden Quellentexte stammen aus zwei verschiedenen Mittelschul-Lehrbüchern, die auch im Original vorliegen:

- [db] **Bader**, Franz, **Büchler**, Stefan, **Dorn**, Friedrich, **Limacher**, Hugo **Oberholz**, Heinz Werner: *Dorn Bader Physik in einem Band*. Westermann Schroedel, Diesterweg Braunschweig 2013.
- [imp1] **Bredthauer**, Wilhelm, **Klar**, Gunter, **Lichtfeldt**, Michael, **Reimers**, Jürgen, **Schmidt**, Martin, **Wessels**, Peter: *Impulse Physik 1*. Klett, Stuttgart 1996.



Imp1: Lichtstrahlen, Licht und Schatten

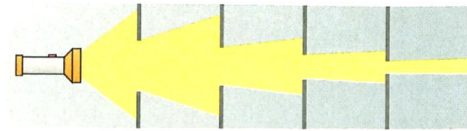
VERSUCHE

Lichtstrahlen

① Wir stellen eine Glühlampe unter eine Konservenbüchse, in die wir seitlich ein kleines Loch gebohrt haben. Die Lampe wird von außen ein- und ausgeschaltet, wobei der Schalter nicht sichtbar ist. Wie können wir von außen erkennen, ob die Lampe an oder aus ist?

Die Lampe soll leuchten: Wir drehen die Dose und untersuchen für verschiedene Stellungen, wo das Licht aus der Dose zu sehen ist.

② Wir ordnen wie in (Abb. ► 1) eine Experimentierleuchte und mehrere Platten mit runden Öffnungen in einer Reihe an,



1 Der Lichtkegel wird immer schmaler.

so dass wir einen geraden Stab durch alle Öffnungen schieben können. Wir halten ein Stück weißes Papier oder einen Belichtungsmesser als Lichtanzeiger an verschiedene Stellen. Wenn wir Rauch oder Kreidestaub zwischen die Platten bringen, erkennen wir ein Lichtbündel.

Vom Sehen

Lichtquellen wie Kerze, Sonne oder Glühlampe erzeugen Licht. **Lichtempfänger** wie Auge, Fotofilm oder Belichtungsmesser stellen Licht nur fest, wenn es direkt auf sie trifft. Gegenstände, die selbst kein Licht erzeugen, sehen wir erst, wenn sie Licht einer Lichtquelle in unser Auge umlenken (Abb. ► 2).

Wir sehen Gegenstände nur, wenn das von ihnen ausgehende Licht in unser Auge trifft.

Wir beschreiben die Ausbreitung des Lichtes

Kerze, Sonne und Glühlampe senden Licht nach allen Seiten in den Raum. Gegenstände, die kein Licht hindurchlassen, verhindern die weitere Ausbreitung des Lichtes. Durch eine Öffnung in ihnen tritt nur ein **Lichtbündel** aus.

Solche Körper heißen **Blenden**. Stellt man mehrere sehr enge Blenden hintereinander auf, gelangt Licht nur dann durch alle Blenden, wenn alle Öffnungen längs einer Geraden angeordnet sind.

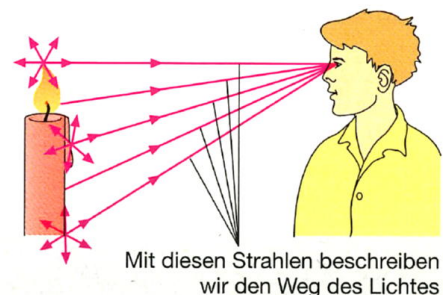
Licht breitet sich von der Lichtquelle ausgehend geradlinig im Raum aus.

Die Ausbreitung des Lichtes beschreiben wir mit Hilfe von geraden Linien, mit Strahlen (Abb. ► 3). Der Anfangspunkt eines Strahles ist ein Punkt der Lichtquelle. Die gezeichneten Strahlen heißen **Lichtstrahlen**. Mit diesem **Modell** aus der Geometrie sind Richtung und Weg des Lichtes angegeben. Bei Versuchen verwenden wir ganz schmale Lichtbündel, denn Lichtstrahlen sind geometrische Linien, sie lassen sich nicht erzeugen.



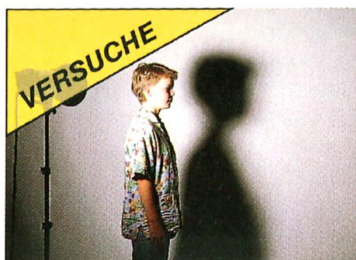
2 Wann sehen wir etwas?

Beachte: Wir schauen zum Gegenstand, aber das Licht kommt von ihm



3 Strahlen, die den Lichtweg beschreiben.

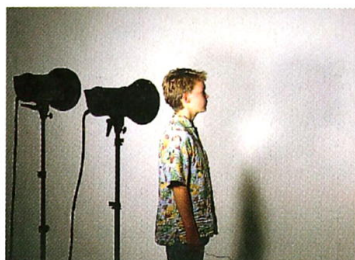
Licht und Schatten



1

① Wir beleuchten eine Wand mit einer Lampe, deren Licht von einem Punkt ausgeht. Zwischen dieser **punktförmigen Lichtquelle** und der Wand sitzt ein Schüler. Wir sehen einen scharf begrenzten Schatten des Schülers.

Wir stellen neben die erste Lichtquelle eine zweite und verändern den Abstand zwischen beiden Quellen. Wir sehen jetzt



zwei Schatten, die sich überschneiden können. Wir ersetzen die punktförmigen Lichtquellen durch eine ausgedehnte Lichtquelle, z. B. eine Neonröhre. Der Schatten ist jetzt verschwommen.

② Wir beleuchten mit einer punktförmigen Lichtquelle einen Schirm und beobachten den Schatten eines Gegenstandes auf dem Schirm. Wir verändern die Entfernungen zwischen Lichtquelle, Gegenstand und Schirm. Wir stellen fest, dass die Schattengröße von den Entfernungen abhängt.

③ Mit einer punktförmigen Lichtquelle erzeugen wir den Schatten verschiedener Gegenstände. Wir drehen die Gegenstände und betrachten dabei die Veränderung der Schatten. Nur der Schatten einer Kugel ändert sich bei allen Drehungen nicht.

Wie entsteht der Schatten?

Experiment



Modell

Das Modell des Lichtstrahles bewährt sich bei der Konstruktion von Schattenbildern.

Beleuchten wir einen undurchsichtigen Gegenstand, so entsteht hinter ihm ein Bereich, in den kein Licht gelangt. Dieser Bereich ist der **Schatten** des Gegenstandes. Auf einem Schirm können wir oft den Gegenstand an den Umrissen seines Schattens erkennen.

Wir zeichnen Lichtstrahlen für den Lichtweg und finden:

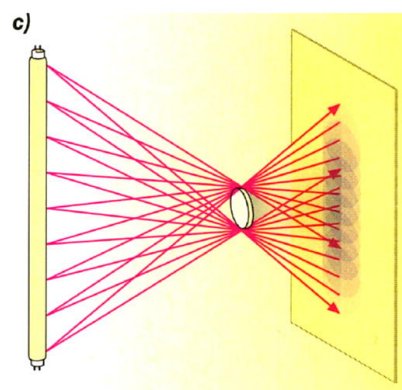
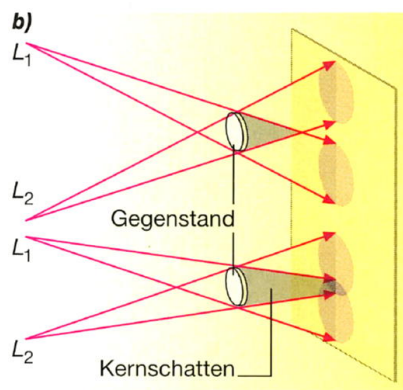
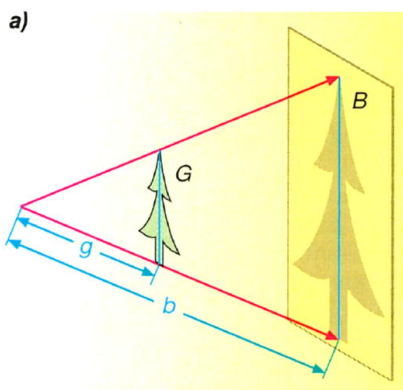
1. Jede punktförmige Lichtquelle erzeugt vom Gegenstand einen scharf begrenzten Schatten (Abb. ► 2a).
2. Zwei punktförmige Lichtquellen erzeugen zwei Schatten (Abb. ► 2b). Überschneiden sie sich, dann entste-

hen ein dunkler Bereich, der **Kernschatten**, und zwei hellere Bereiche, die **Halbschatten**, die jeweils von einer der Quellen Licht erhalten.

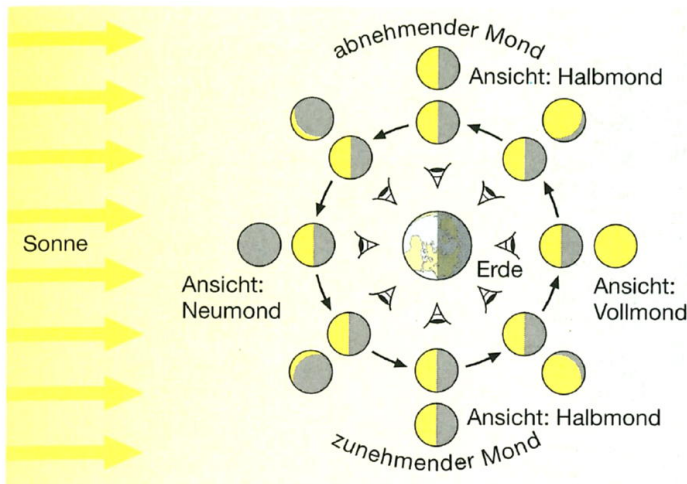
3. Eine ausgedehnte Lichtquelle denken wir uns aus vielen punktförmigen Lichtquellen zusammengesetzt. Die Überschneidung ihrer Schattenbilder führt zu einem **Übergangsschatten** mit verschiedenen Helligkeitsstufen auf dem Schirm (Abb. ► 2c).

4. Vergrößert man die Entfernung b des Schirmes von der Lichtquelle, so wächst in gleichem Maße die Größe B des Schattens. Aus Abb. ► 2a folgt:

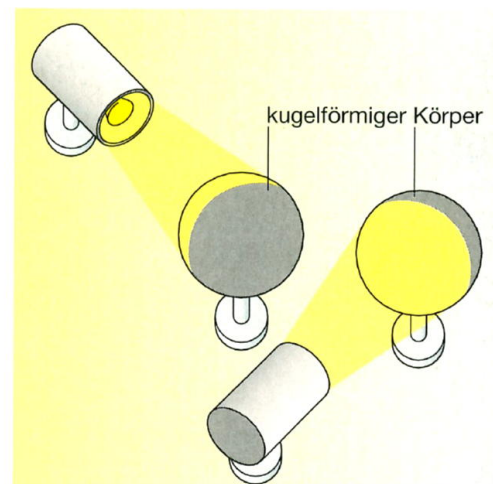
$$B : G = b : g$$



2 Lichtstrahlen begrenzen den Schatten.



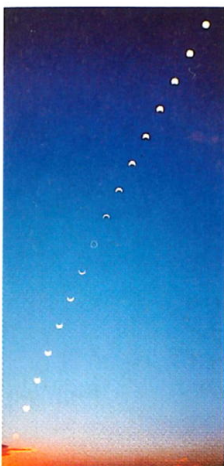
1 Die verschiedenen Mondphasen im Laufe des Monats



2 Versuch: Mondansichten

Sonne und Mond

Die Sonne erzeugt ihr Licht selbst. Der Mond leuchtet nur, weil er von der Sonne beschienen wird. Der Mond sieht während eines Monats unterschiedlich aus. Man spricht von den **Mondphasen**. Gelegentlich verfinstern sich für kurze Zeit der Mond – und seltener – die Sonne. Die Lichtstrahlen der Sonne verlaufen bei Erde und Mond parallel. Der Mond wird dauernd zur Hälfte von der Sonne beschienen, die von der Sonne abgewandte Seite erhält kein Licht. Bei seinem Umlauf um die Erde sehen wir den Mond aus verschiedenen Richtungen (Abb. ► 1). Wir sehen daher manchmal mehr, manchmal weniger von seiner hellen Seite. Beleuchten wir eine Kugel mit einem Lichtbündel (Abb. ► 2), so sieht die beleuchtete Oberfläche aus verschiedenen Richtungen wie der Mond aus. Die Grenze zwischen „hell“ und „dunkel“ ist wegen der Kugelgestalt kreisförmig.



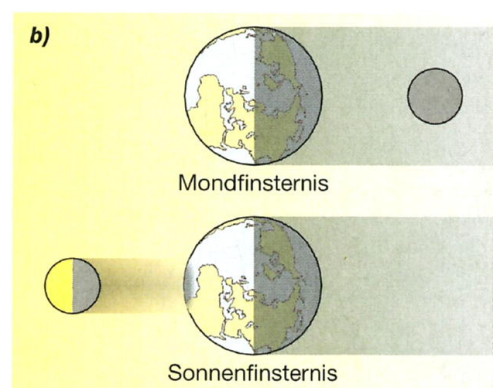
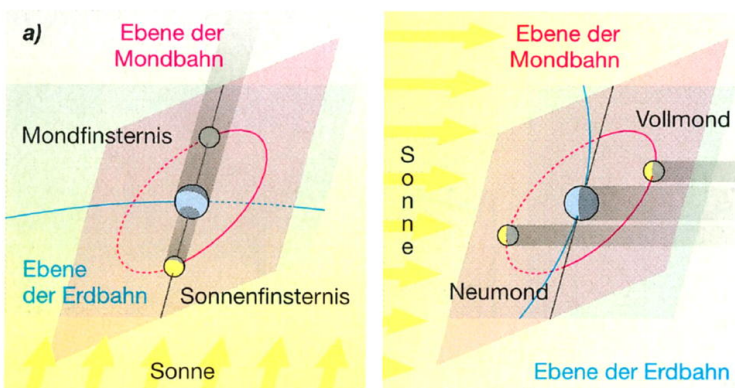
Verlauf einer Sonnenfinsternis

Finsternisse

Der Mond bewegt sich in einer anderen Ebene um die Erde als die Erde um die Sonne (Abb. ► 3a). Deshalb befindet sich der Mond meistens oberhalb oder unterhalb der Erdbahnebene. Bei Vollmond wird er daher von der Sonne an der Erde vorbei voll beleuchtet.

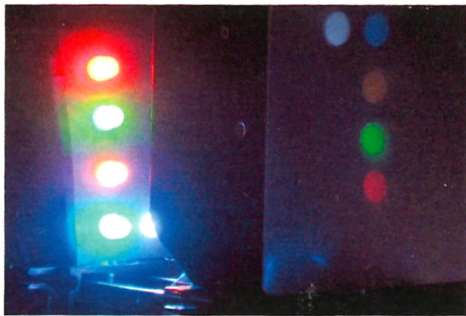
Bei seinem Umlauf kann der Mond dennoch manchmal in den Schatten der Erde geraten. Alle Menschen auf der Nachtseite der Erde, die einen Vollmond erwarten, beobachten in diesem Fall eine **Mondfinsternis** (Abb. ► 3b).

Bei Neumond ist es möglich, dass der Schatten des Mondes auf die Erde fällt (Abb. ► 3b). Da sich die Erde dreht, wandert dieser Schatten über die Erde. Im Kernschatten sieht man dann die Sonne nicht mehr, man beobachtet eine **Sonnenfinsternis**. Sie ist selten, weil der Mondschatten, trifft er einmal die Erde, dort nur ein kleines Gebiet verdunkelt.

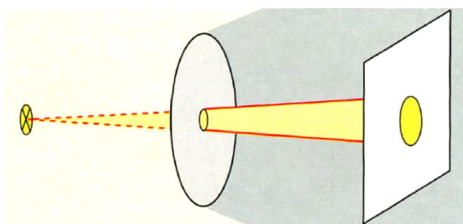


3 a) Bahnebenen von Erde und Mond, b) Lage bei Mond- und bei Sonnenfinsternis

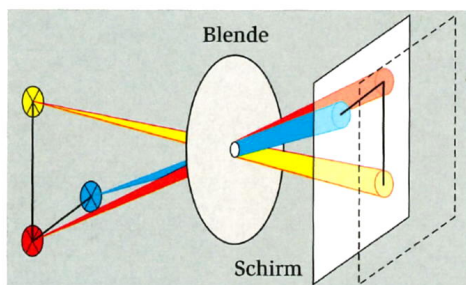
Linsen erzeugen Bilder



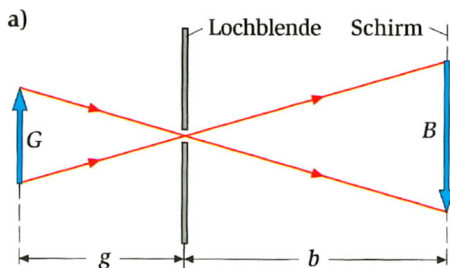
V1 Fünf farbige Lämpchen sind auf einer schwarzen Pappe montiert. Zusammen bilden sie den Buchstaben „L“. Im abgedunkelten Raum stellen wir eine Lochblende etwa im Abstand 10 cm davor. Dahinter erkennen wir auf diesem Schirm ein höhen- und seitenverkehrtes Bild.



B1 Hinter der Lochblende erkennen wir ein Lichtbündel. Begrenzt wird es durch die Randstrahlen. Auf dem Schirm entsteht ein Lichtfleck.



B2 Die Lochblende erzeugt bei drei Lämpchen drei Lichtflecke, die ein Bild zeigen. Je kleiner der Abstand Blende-Schirm, desto kleiner das Bild.



B3 Je nachdem wie weit der Gegenstand und der Schirm voneinander entfernt sind, ergibt sich eine andere Bildgröße.

1. Eine Lochblende erzeugt Bilder

Um Einzelheiten eines Gegenstands zu erkennen, genügt es nicht, dem Gehirn zu melden, ob der Gegenstand hell oder dunkel ist. Vielmehr benötigt das Gehirn Informationen von jedem einzelnen Punkt des Gegenstands. Aus den Positionen und der Farbe der Gegenstandspunkte erkennt das Gehirn dann Muster: So bilden in **→ V1** links fünf farbige Lämpchen den Buchstaben „L“ als sehr einfaches Muster. Im Auge entsteht ein Bild dieses Musters.

→ V1 zeigt ein Experiment zu dieser Bildentstehung: Das aus den farbigen Lämpchen gebildete „L“ (der Gegenstand) steht vor einer Lochblende. Auf einer milchigen Glasplatte (auch Schirm genannt) erkennen wir ein Bild dieses „L“. Im Vergleich zum Gegenstand ist sein Bild höhen- und seitenverkehrt. Wir können die Größe des Bildes dadurch verändern, dass wir die Abstände zwischen Schirm und Lochblende oder zwischen Gegenstand und Lochblende variieren.

Nehmen wir die Lochblende weg, so verschwindet das höhen- und seitenverkehrte Bild. Also erzeugt erst die Lochblende das Bild. Man nennt den Aufbau aus Lochblende und Schirm Lochkamera. Die Bildentstehung in der **Lochkamera** erläutert **→ B1** mit der geradlinigen Ausbreitung des Lichts.

Betrachten wir zunächst die Verhältnisse für einen einzigen leuchtenden Punkt, auch Punktlichtquelle genannt. Die Lochblende erzeugt ein Lichtbündel. Seine Randlinien sind wie beim Schatten geradlinig begrenzt. Wir verwenden für diese Linien den Begriff (Rand-)Strahl, den du bereits aus der Mathematik kennst. Das von diesen Randstrahlen begrenzte Lichtbündel trifft auf den Schirm auf und erzeugt dort einen Lichtfleck. Der Lichtfleck hat die Farbe der Lichtquelle.

Drei Punktlichtquellen erzeugen drei Lichtbündel hinter der Lochblende und damit drei Lichtflecke auf dem Schirm, die sich zu einem Bild anordnen **→ B2**. Verschieben wir in Gedanken den Schirm **→ B3** oder den Gegenstand, so können wir uns die Änderung der Bildgröße sofort vorstellen. Je kleiner der Abstand zwischen Lochblende und Schirm, desto kleiner ist das Bild. Je kleiner der Abstand zwischen Gegenstand und Lochblende, desto größer ist das Bild.

Merksatz

Lochblenden erzeugen höhen- und seitenverkehrte Bilder.

Das Bild wird größer, wenn

- wir den Schirm weiter von der Lochblende wegschieben,
- wir den Gegenstand näher zur Lochblende schieben. □

Der Abstand des Gegenstandes von der Lochblende wird **Gegenstandsweite** g genannt, der Abstand des Bildes von der Lochblende **Bildweite** b . Mit Nachmessen oder aus dem 2. Strahlensatz **→ B3** ergibt sich

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

Multipliziert man diese Gleichung mit b und dividiert sie durch G , erhält man

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

Der Quotient aus der Gegenstands- und der Bildgröße ist der Abbildungsmaßstab A („Vergrößerung“).

Merksatz

Der **Abbildungsmaßstab** A ist das Verhältnis von Bild- zu Gegenstandsgröße. Bei der Lochkamera entspricht der Abbildungsmaßstab dem Verhältnis der Bildweite und der Gegenstandsweite

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

2. Der Nachteil der Lochkamera

In $\rightarrow$ **V2a** verwenden wir als Gegenstand eine Kerze. Auch hier entsteht in unserer Lochkamera ein Bild – diesmal das der Kerze. Wir erklären uns die Bildentstehung mithilfe vieler gedachter Punktlichtquellen in der Kerze. Jeder Lichtpunkt wird von der Lochkamera auf einen kleinen Lichtfleck in Form des Loches abgebildet. Diese Lichtflecke ordnen sich zum höhen- und seitenverkehrten Bild an.

Jeder der beteiligten Lichtflecke erhält in jeder Sekunde eine bestimmte Energiemenge von „seinem“ Gegenstandspunkt. Vergrößern wir in $\rightarrow$ **V2b** die Blendenöffnung, so werden die einzelnen Lichtflecke größer. Das Bild wird heller, da von jedem Gegenstandspunkt mehr Energie in die Lochkamera kommt. Allerdings überlappen sich alle Lichtflecke auf dem Schirm jetzt stärker als vorher, wie uns $\rightarrow$ **B4** zeigt. Dadurch wird das Bild unschärfer, wie $\rightarrow$ **V2b** bestätigt.

Merksatz

Eine Lochkamera ordnet jedem Gegenstandspunkt einen Lichtfleck zu. Kleine Öffnungen in der Blende erzeugen scharfe, aber dunkle Bilder. Große Öffnungen erzeugen helle, aber unscharfe Bilder.

Auch im Alltag beobachten wir übriges Abbildungen an kleinen Öffnungen, bei denen sich das Prinzip der Lochkamera zeigt. So erzeugt ein lichtdurchschießener Strohhut ein Lichtmuster aus kleinen runden Scheibchen, die Abbilder der Sonne darstellen. Im Wald lassen sich Sonnenkringel auf dem Boden beobachten – hier dienen die Öffnungen im Blattwerk als Lochblenden.

3. Linsenbilder sind scharf

Das Lochkamerabild ist also entweder dunkel oder unscharf. Zum Fotografieren verwenden wir heute daher keine Lochkamera.

$\rightarrow$ **B5** zeigt einen aufgeschnittenen Fotoapparat. Im Unterschied zur Lochkamera ist die Lochblende nicht leer, sondern durch einen Glaskörper gefüllt. Wegen seiner Form (innen dick und außen dünn) wird er nach einer Hülsenfrucht **Linse** genannt.

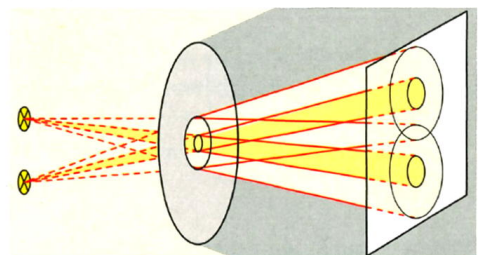
Wir bauen in $\rightarrow$ **V3** einen Modellfotoapparat und verwenden wieder als Gegenstand eine Kerze. Statt der Lochblende der Lochkamera verwenden wir diesmal eine Linse. Das Bild der Kerze wird auf einem Schirm sichtbar.

Das Versuchsergebnis ist erstaunlich. Das so erzeugte Bild ist selbst bei Tageslicht deutlich zu erkennen. Wie bei der Lochkamera ist das Bild höhen- und seitenverkehrt. Aber es ist diesmal gleichzeitig hell und scharf. Wie ist das möglich?

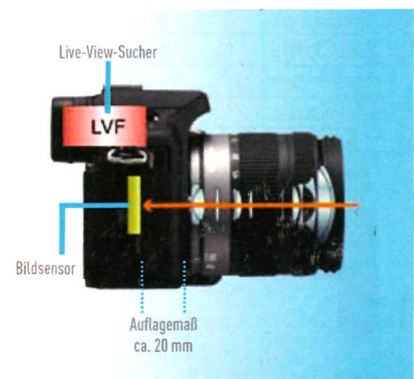


V2 a) Wir stellen eine Kerze vor eine Lochblende. Im verdunkelten Physiksaal sehen wir auf dem Schirm das Bild der Flamme. Das Bild ist ziemlich dunkel.

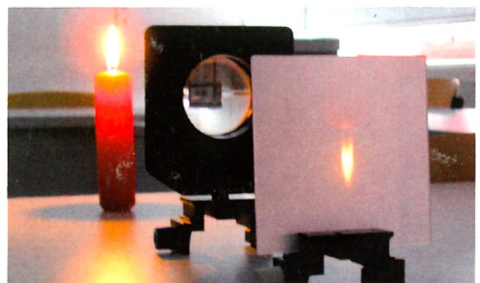
b) Wir benutzen eine größere Blendenöffnung. Das Bild der Kerze wird jetzt heller, aber auch unschärfer.



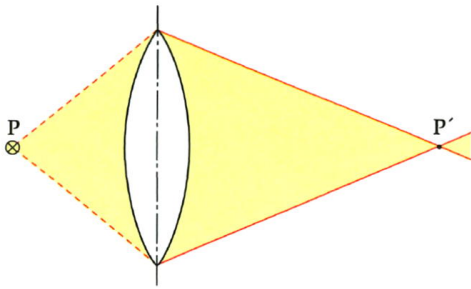
B4 Größere Blendenöffnungen erzeugen größere Lichtflecke.



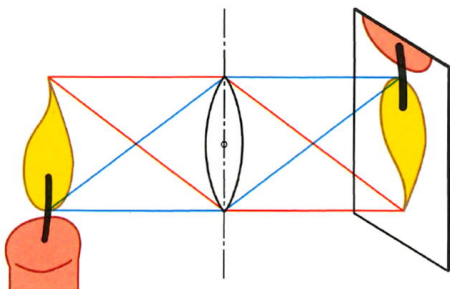
B5 Querschnitt eines Fotoapparats



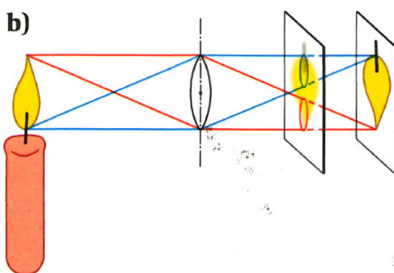
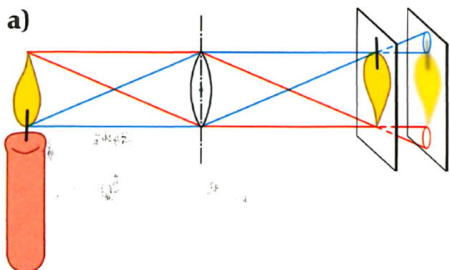
V3 Wir bauen einen Modellfotoapparat: Kerze (Gegenstand) – Linse – Schirm (Film).



V1 Ein Lämpchen (P) erzeugt Licht. Hinter der Linse hat das Lichtbündel einen besonderen Verlauf: Die Randstrahlen schneiden sich in einem Punkt P', das Lichtbündel verengt sich also, um dann wieder auseinander zu laufen.



B1 Entstehung eines Linsenbildes



V2 Wir verschieben den Schirm aus der richtigen Position. Bei a) zu großem bzw. b) bei zu kleinem Abstand zwischen Linse und Schirm entstehen Lichtflecke.

Im Unterschied zur Lochkamera, in der nur ein kleines Loch Licht hindurch lässt, ist die Linsenöffnung viel größer. Von jedem Gegenstandspunkt gelangt also mehr Lichtenergie auf den Schirm. Das kennen wir schon von der Lochkamera. Wie kann es sein, dass das Bild trotzdem scharf bleibt?

In der Lochkamera wurde das Bild durch die Überlappung von Lichtflecken unscharf. Bei Linsenbildern ist dies offenbar nicht der Fall. Woran das liegt, müssen wir klären.

Wie bei der Lochkamera untersuchen wir wieder zunächst das Bild einer einzigen punktförmigen Lichtquelle → **V1**. Das Lichtbündel, das von P ausgeht durch die Linse geht, wird in einem Punkt P' gesammelt. Hier schneiden sich die Randstrahlen. Stellt man also den Schirm hinter der Linse genau an die Stelle P', so entsteht auf dem Schirm kein Lichtfleck, sondern ein heller Punkt. Ein zweites Lichtbündel eines zweiten Punktes würde einen anderen hellen Punkt auf dem Schirm erzeugen.

Damit verstehen wir die Entstehung von Linsenbildern → **B1**: Von jedem Punkt des Gegenstandes gelangt ein Lichtbündel durch die Linse. (In → **B1** sind nur die beiden von den Enden der Kerzenflamme gezeichnet). Auf dem Schirm erzeugt jedes dieser Lichtbündel jeweils einen hellen Punkt. Alle diese Punkte setzen sich zum Bild zusammen. Punkte können sich nicht überlappen – das Bild ist scharf. Die Linsenöffnung ist relativ groß – also gelangt von jedem Gegenstandspunkt viel Lichtenergie in den jeweiligen Bildpunkt. Das Linsenbild ist also gleichzeitig hell und scharf.

Merksatz

Linsen erzeugen helle und scharfe Bilder. Jedem Gegenstandspunkt wird durch die Linse ein Bildpunkt zugeordnet. □

4. Abstand von Linse zum Schirm muss passen

Wir haben beim Linsenbild den Schirm an genau die Stelle geschoben, an der die Linse die Lichtbündel jeweils in einem Punkt sammelt. Schieben wir in → **V2** den Schirm etwas weiter von der Linse weg, oder etwas näher an die Linse heran, so wird das Bild unscharf: Ist der Schirmabstand zu groß, so trifft das wieder auseinander laufende Lichtbündel als Fleck auf den Schirm. Steht der Schirm zu nah an der Linse, so trifft das noch nicht vollständig gebündelte Licht als Lichtfleck auf den Schirm.

Die meisten modernen Fotoapparate übernehmen diese Scharfstellung automatisch, bevor das Bild aufgenommen wird. Dazu wird mit einem eingebauten Motor der Linsenabstand vom Film bzw. Speicherchip verändert. Bei älteren Modellen muss man die Scharfstellung mit der Hand erledigen.

Im Auge entstehen auch Bilder. Lochkamerabilder sind entweder dunkel oder unscharf. Linsenbilder dagegen sind scharf und hell. Allerdings muss der Abstand zwischen Linse und Auffangschirm genau passen. Wie die Natur diese Probleme gelöst hat, werden wir später sehen.

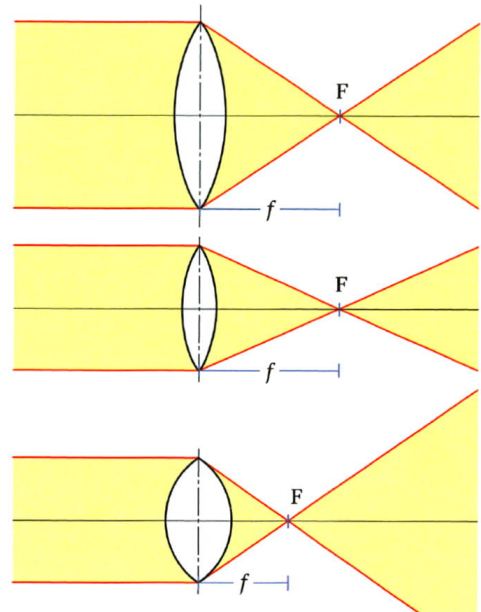
5. Die Wölbung bestimmt die Brennweite

Wie bei der Lochkamera liegt der Bildpunkt auch bei der Linsenabbildung auf dem Mittelpunktstrahl. Bei der Lochkamera spielt die Entfernung des Schirmes zur Lochblende keine Rolle. Die Linse dagegen gibt hier eine Einschränkung vor.

In → V3 verwenden wir unterschiedliche Linsen und ein achsenparalleles Lichtbündel. Das Lichtbündel wird stets auf der optischen Achse in einem Punkt F gesammelt. F heißt auch **Brennpunkt** der Linse. Die beiden ersten Linsen haben eine gleich starke Wölbung aber unterschiedlichen Durchmesser. Die untere Linse ist stärker gewölbt. Der Versuch zeigt: Die Brennweite einer Linse hängt nicht vom Durchmesser der Linse ab, wohl aber von der Stärke ihrer Wölbung. Je stärker eine Linse gewölbt ist, desto kleiner ist ihre Brennweite. Eine solche Linse kann das Licht also in kürzerer Entfernung hinter der Linse bündeln.

Merksatz

Stark gewölbte Linsen haben eine kürzere Brennweite als schwach gewölbte. ■



V3 Wir schicken ein achsenparalleles Lichtbündel durch unterschiedliche Linsen. Jeweils im Abstand der Brennweite f wird es hinter der Linse gebündelt.

6. Größere und kleinere Bilder

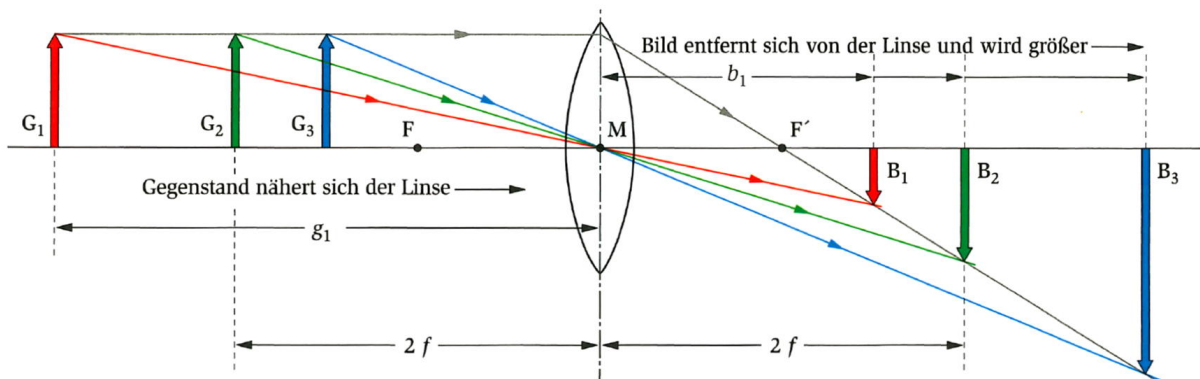
Lage und Größe des Bildes hängen von der Gegenstandsweite g ab (→ T1). Steht der Gegenstand G sehr weit links von der Linse, so treffen die von jedem Gegenstandspunkt ausgehenden Lichtstrahlen praktisch parallel bei ihr ein. Das optische Bild liegt dann in der rechten Brennebene. Nähern wir den Gegenstand der Linse, so entfernt sich das Bild B von der Linse und wird dabei immer größer (→ B2). Ist der Gegenstand schließlich bis zur linken Brennebene vorgerückt, so sind die von seinen Punkten ausgehenden Lichtstrahlen nach der Brechung parallel. Rückt der Gegenstand noch weiter vor, dann sind die Lichtstrahlen divergent. In den beiden letzten Fällen kommt kein Bild auf dem Schirm zustande.

Gegenstandsweite g	Bildweite b	Bild
sehr groß	$b \approx f$	stark verkleinert
$g > 2f$	$f < b < 2f$	verkleinert
$g = 2f$	$b = 2f$	gleich groß
$f < g < 2f$	$b > 2f$	vergrößert
$g \approx f$	sehr groß	stark vergrößert

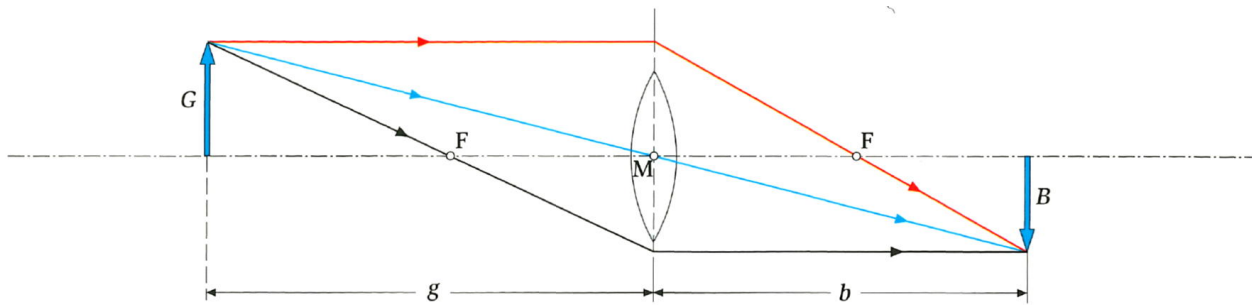
7. Konstruktion optischer Abbildungen mit Linsen

Oft ist es sinnvoll, ein optisches Experiment vor der Durchführung zu planen und zu klären: Wie muss man die Brennweite wählen? Wo muss man den Gegenstand oder den Schirm aufstellen?

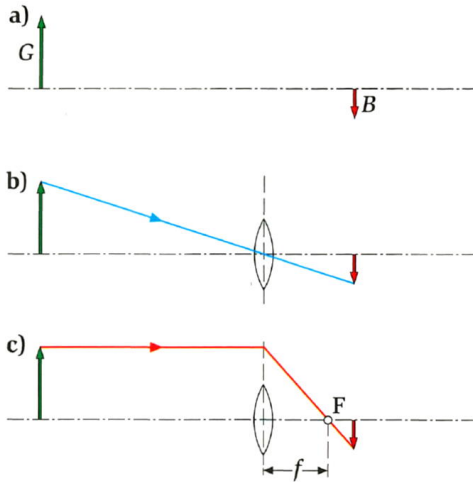
T1 Größenverhältnisse



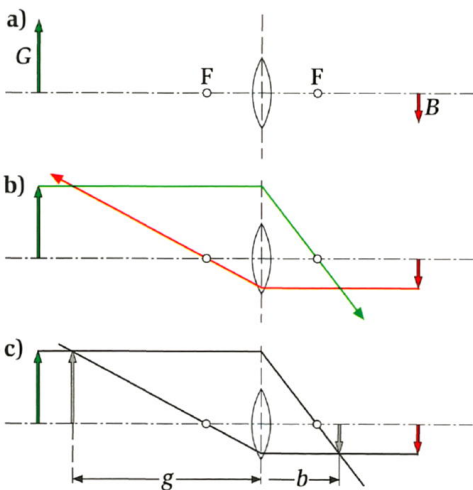
B2 Konstruktion des optischen Bildes an der Sammellinse für verschiedene Gegenstandsweiten



B1 So werden die optischen Bilder konstruiert.



B2 Wenn der Abstand von Gegenstand und Bild sowie die Gegenstands- und die Bildgröße bekannt sind, dann kann man auf die dargestellte Weise die Position der Linse und deren Brennweite konstruieren.



B3 Konstruktion von Bildweite und Gegenstandsweite, wenn Gegenstands- und Bildgröße und Brennweite der Linse bekannt sind.

Zum Beispiel:

a) Der Abstand des Gegenstands vom Schirm sei 20 cm. Die Gegenstandshöhe sei 8 cm, die Bildhöhe soll 3 cm sein. Wo muss ich den Standort der Sammellinse wählen und wie groß muss deren Brennweite sein?

- In einer maßstäblichen Abbildung zeichnen wir die optische Achse, den Gegenstandsfeil und den Bildfeil ein (→ **B2a**).
- Der Mittelpunktstrahl durch die Pfeilspitzen liefert die gesuchte Position der Linse (→ **B2b**).
- Der achsenparallele Strahl der Gegenstandsspitze wird zum Brennpunktstrahl und liefert nicht nur den Brennpunkt F, sondern auch die gesuchte Brennweite f (→ **B2c**).

b) Die Gegenstandshöhe sei 8 cm. Der Gegenstand soll mit einer Sammellinse so abgebildet werden, dass das Bild 3 cm hoch wird. Die verfügbare Linse habe eine Brennweite von 5 cm. Wo müssen Gegenstand und Schirm aufgestellt werden?

- Wir zeichnen die optische Achse und die Mittelebene der Linse. In beliebigem Abstand dazu zeichnen wir den Gegenstandsfeil (grün) und den Bildfeil (rot) ein (→ **B3a**).
- Der von der Spitze des Gegenstandsfeils ausgehende achsenparallele Strahl wird nach der Mittelebene zum Brennpunktstrahl (grün). Ebenso können wir von der Spitze des Bildfeils einen achsenparallelen Strahl zeichnen, der nach der Mittelebene ebenfalls zum Brennpunktstrahl wird (rot) (→ **B3b**).
- Die Schnittpunkte von rotem und grünem Strahl rechts und links der Linse zeigen uns, wo die Pfeilspitzen von Gegenstand und Bild liegen. Nun verschieben wir den Gegenstandsfeil und den Bildfeil an die beiden entstandenen Schnittpunkte. Dann lesen wir die Gegenstandsweite g und die Bildweite b einfach ab (→ **B3c**).

8. Abbildungsmaßstab und Linsengleichung

Zeichnen wir eine Linse und dazu die Gegenstandshöhe G , Gegenstandsweite g , Bildhöhe B und die Bildweite b ein, dann sieht die Zeichnung ähnlich wie bei der Lochkamera aus (→ **B4**).

Die Bildweite (Entfernung des Schirms von der Linse) kann im Gegensatz zur Lochkamera nicht beliebig gewählt werden.

In der Figur → B4 bilden die Gegenstandshöhe G , die Bildhöhe B , die Gegenstandsweite g und Bildweite b eine Strahlensatzfigur. Mit dem 2. Strahlensatz erhalten wir:

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

Merksatz

Auch bei der **Abbildung mit Linsen** gilt die von der Lochkamera bekannte Beziehung:

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

Für den Abbildungsmaßstab von Linsen gilt:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g}.$$

Außerdem liefert der 2. Strahlensatz für die gelb hervorgehobene X-Figur → B5 :

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

Führt man die beiden Gleichungen zusammen, dann erhält man eine Gleichung, die nur noch die Größen Gegenstandsweite g , Bildweite b und Brennweite f enthält:

$$\frac{b}{g} = \frac{b-f}{f}.$$

Da diese Gleichung sich schlecht merken lässt, zerlegt man den rechten Bruch in zwei Teilbrüche und dividiert die Gleichung durch b . Damit erhält man

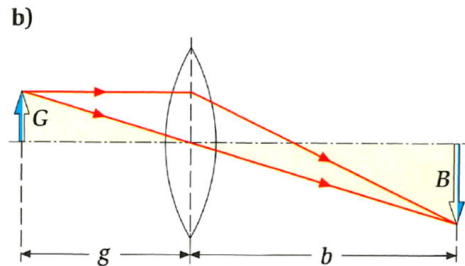
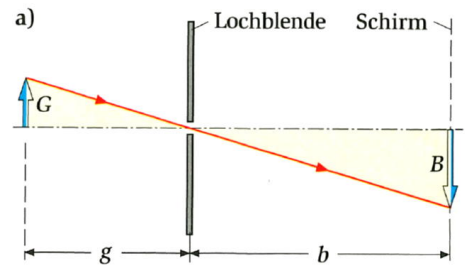
$$\frac{1}{g} = \frac{1}{f} - \frac{1}{b} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Dies ist die sogenannte Linsengleichung. Sind zwei Größen gegeben, dann lässt sich damit die dritte Größe ausrechnen.

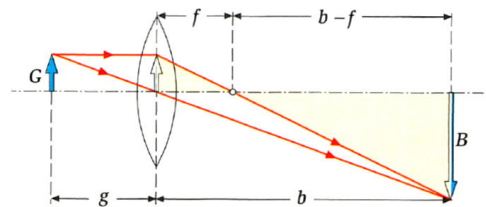
Merksatz

Die **Linsengleichung** lautet:

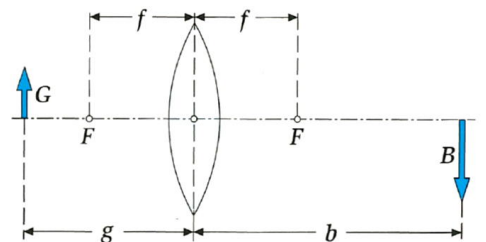
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$



B4 a) Abbildung bei der Lochkamera b) Abbildung mit einer Linse: Beziehung zwischen B , G , b und g .



B5 Zur Herleitung der Linsengleichung



B6 Mit der Linsengleichung wird der Zusammenhang von der Gegenstands- und der Bildweite zur Brennweite der Linse beschrieben.

A1 a) Erläutere anhand einer Skizze die Überlegungen, die zum Modell „Lichtstrahl“ führten.

b) Diskutiere, ob es Vorteile hat, Lichtstrahlen statt Lichtbündel zu verwenden. Betrachte dabei die Konstruktion von Strahlengängen bei Abbildungen.

A2 Ein 4 cm hoher Gegenstand soll mit Linsen unterschiedlicher Brennweite $f = 2$ cm, 5 cm, 8 cm, 10 cm, oder 12 cm abgebildet wer-

den. Die Gegenstandsweite beträgt jeweils 10 cm.

a) Konstruiere, wenn möglich, den Aufstellungsort des Schirms und die Bildgröße.

b) Berechne die Bildweite und vergleiche sie mit den konstruktiven Ergebnissen von a). Welche Werte ergeben sich, wenn keine Konstruktion möglich war?.

c) Bestimme die Bildgröße und den Abbildungsmaßstab! Wie erreicht

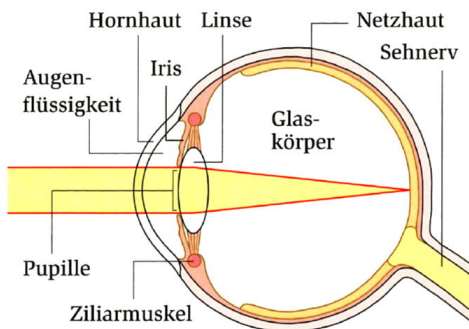
man einen besonders großen Abbildungsmaßstab?

A3 Ein 5 cm hoher Gegenstand soll auf einem 18 cm entfernten Schirm ein 7 cm großes Bild erzeugen.

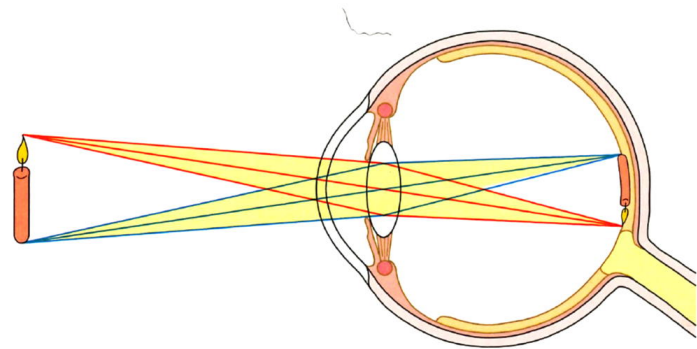
a) Konstruiere zunächst die Position der Linse. Lies dann die Gegenstandsweite, die Bildweite und die Brennweite ab.

b) Berechne die in a) konstruierten Längen und vergleiche die Ergebnisse.

Das Auge



B1 Schnitt durch das menschliche Auge



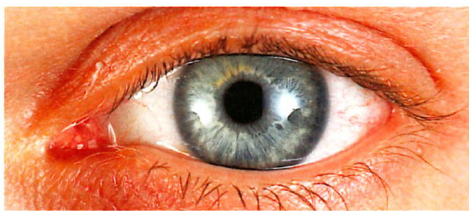
B2 Bildentstehung im Auge

Anstoß

A1 Unter der „Augenfarbe“ eines Menschen versteht man die Farbe der Iris. Notiere die Augenfarbe deiner Familienmitglieder und deiner Freunde.

A2 Von außen betrachtet sieht man vom Auge: Augenbraue, Augenlid (mit Wimpern), Lederhaut, Iris und Pupille. Informiere dich über den biologischen Sinn dieser Bestandteile.

A3 Das Auge wird oft als das wichtigste Sinnesorgan des Menschen bezeichnet. Nimm zu dieser Aussage Stellung.



V1 Betrachte die Pupille eines Mitschülers. Sie ist zunächst nur wenig geöffnet. Bitte nun deinen Mitschüler ein Auge mit der hohlen Hand etwa eine Minute lang zuzuhalten. Nachdem er die Hand entfernt hat, betrachtest du wieder seine Pupille – sie ist jetzt weit geöffnet. Über einen Muskel wurde die Pupillenöffnung gesteuert. Das Gehirn versucht so, mehr Licht auf die Netzhaut zu lassen, damit die Netzhautbilder möglichst hell werden.

1. Die Optik des menschlichen Auges

Du kennst den Aufbau des menschlichen Auges vielleicht schon aus dem Biologieunterricht. → **B1** zeigt die wichtigsten Bestandteile in vereinfachter Form. Das Auge des Menschen ist nicht so aufgebaut wie die einfachere Lochkamera, sondern verwendet Linsenbilder. Unser Auge ähnelt aus physikalischer Sicht eher einem Fotoapparat.

Das Licht durchdringt beim Eintritt ins Auge die Hornhaut, die Augentränenflüssigkeit, die Linse und den Glaskörper. Diese vier einzelnen, durchsichtigen Bestandteile wirken zusammen wie *eine einzige* Linse. Diese bündelt Licht eines weit entfernten Gegenstandes im Abstand von etwa 23 mm hinter der Hornhaut, wo sich die Netzhaut befindet. Auf ihr entsteht das optische Bild des Gegenstandes → **B2**.

Die **Netzhaut** oder **Retina** besteht aus einer Vielzahl lichtempfindlicher Elemente, den Stäbchen und Zäpfchen. Die Stäbchen reagieren schon auf sehr schwache Lichtsignale und ermöglichen das Sehen in der Dämmerung. Allerdings können sie keine Farbinformationen verarbeiten. Dafür sind die Zäpfchen zuständig. Sie reagieren unterschiedlich stark auf verschiedenfarbiges Licht. Stäbchen und Zäpfchen empfangen das Licht und leiten die Information über viele Verästelungen zum **Sehnerv**, der sie zum Gehirn weiterleitet.

Je nachdem, ob wir bei Sonnenschein oder in der Dämmerung unsere Umwelt betrachten, gelangt viel oder wenig Licht ins Auge. Die Bilder sind also unterschiedlich hell. Diese verschiedenen Helligkeiten kann das Auge mithilfe der Pupillenöffnung etwas ausgleichen → **V1**.

Die Pupille ist eine kreisförmige Öffnung, gebildet von einer farbigen Haut, der Iris. Mit einem Muskel kann die Pupille verkleinert werden. Das Gehirn steuert mit ihr also die Lichtmenge, die pro Sekunde auf die Netzhaut fällt.

Bei Kameras ist dies ähnlich: Vor die Linse ist hier eine Lochblende eingebaut, dessen Durchmesser verändert werden kann.

Merksatz

Im menschlichen Auge werden Linsenbilder auf der Netzhaut erzeugt. Über die Iris steuert das Gehirn die Lichtmenge, die pro Sekunde ins Auge fällt.

2. Das Scharfstellen beim Auge

→ **V2** zeigt: Das Auge kann nahe und ferne Gegenstände nicht gleichzeitig scharf erkennen. Das wissen wir eigentlich schon von der Linsenabbildung. In Versuchen hatten wir festgestellt: Rückt ein Gegenstand näher an die Linse, müssen wir den Schirm weiter weg-schieben, um scharfe Bilder zu erhalten. Das Auge kann dies nicht tun, weil die Netzhaut fest im Augapfel sitzt und damit der Abstand zwischen Hornhaut und Netzhaut unveränderbar ist.

Das Auge muss das Scharfstellen also auf anderem Wege erreichen. Wir wissen bereits, dass der Abstand des Bildes von der Linse auch von der Brennweite der Linse abhängt. In → **V3** wechseln wir die Linsen aus. Steht der Gegenstand in großer Entfernung, so erzeugt eine Linse mit großer Brennweite ein scharfes Bild auf dem Schirm. Bei gleichem Schirmabstand gelingt dies der Linse bei einem nahen Gegenstand nicht. Eine Linse mit kleinerer Brennweite kann dies allerdings leisten.

In unserem Auge wird beim Scharfstellen aber nicht wirklich die Linse ausgetauscht. Wie hat die Natur dieses Problem bewältigt?

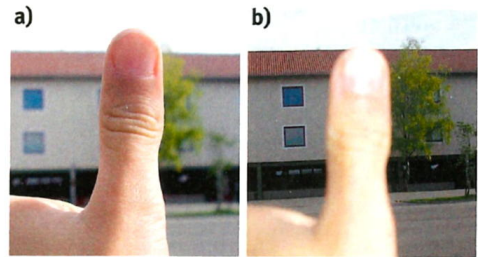
Eine Linse mit *veränderlicher* Brennweite ist die geniale Lösung. Dazu muss die Augenlinse aus einem elastischen Stoff bestehen. Diese elastische Linse will sich stets von selbst wie ein Gummiband zusammenziehen. Dem wirken die Aufhängebänder entgegen, die sie flach ziehen, gesteuert von einem Ziliarmuskel. Ist dieser Muskel entspannt, so ziehen die Aufhängebänder die Augenlinse flach → **B3a**. Sie ist wenig gewölbt, hat also eine große Brennweite. Das Auge kann weit entfernte Gegenstände scharf sehen.

Ist der Ziliarmuskel dagegen angespannt, so sind die Aufhängebänder gelockert, die Linse wölbt sich, die Brennweite ist klein → **B3b**. Das Auge kann nahe Gegenstände scharf sehen. Dieser Anpassungsvorgang heißt **Akkommodation**. Wechselt das Auge von Fern- auf Naheinstellung, spricht man von Nahakkommodation, der umgekehrte Fall von Nah auf Fern wird als Fernakkommodation bezeichnet. Die Akkommodation läuft, vom Gehirn gesteuert, aber unbewusst ab. Mit zunehmendem Alter geht die Fähigkeit zur Akkommodation verloren, es kommt zur Alterssichtigkeit.

Das Auge kann nicht in jede beliebige Nähe scharf stellen. Bei einem Abstand zum Gegenstand von ca. 10 cm, dem so genannten **Nahpunkt**, ist die Grenze erreicht. So nahe Gegenstände zu betrachten ist sehr anstrengend, man ermüdet dabei rasch. Ohne merkliche Anstrengung kann man Gegenstände ab einer Entfernung von etwa 25 cm betrachten.

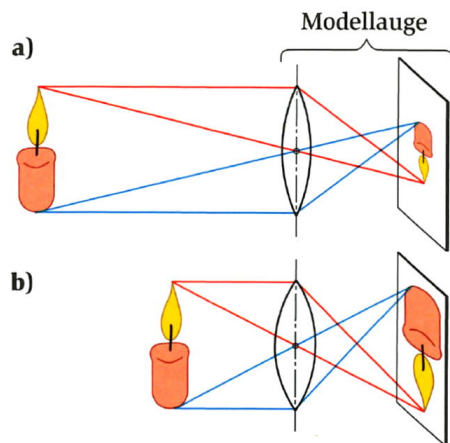
Merksatz

Die Augenlinse ist elastisch und kann ihre Brennweite mithilfe von Muskeln verändern und damit das Bild auf der Netzhaut scharf stellen. Das Auge kann Gegenstände ab einer Entfernung von 25 cm ohne Anspannung scharf betrachten. □



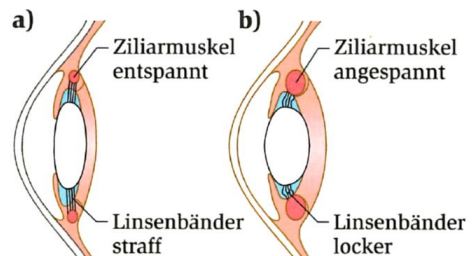
V2 Schließe ein Auge. Halte einen Daumen mit angewinkeltem Arm etwa 30 cm vor dein anderes, geöffnetes Auge.

a) Betrachte deinen Daumen. Du siehst den Hintergrund unscharf. **b)** Betrachte nun den Hintergrund. Dabei stellst du fest, dass nun der Daumen unscharf erscheint.



V3 a) Eine Linse der Brennweite 15 cm und ein Schirm ersetzen unser Auge. Eine Kerze wird in großer Entfernung (etwa 4 m) vor das „Modellauge“ gestellt. Auf dem Schirm entsteht ein scharfes Bild der Flamme. „Unser Modellauge blickt entspannt in die Ferne.“

b) Wir schieben nun die Kerze bis auf 30 cm an die Linse heran, das Bild wird unscharf. Ersetzen wir die Linse durch eine andere mit der Brennweite 10 cm, so erhalten wir wieder ein scharfes Bild, ohne den Schirm zu verschieben.



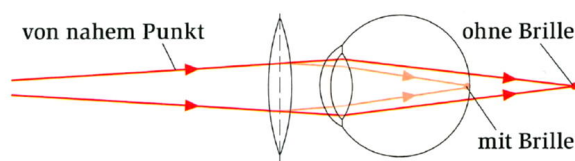
B3 a) Der Ziliarmuskel ist entspannt.

b) Der Ziliarmuskel zieht sich zusammen.

Die Brille

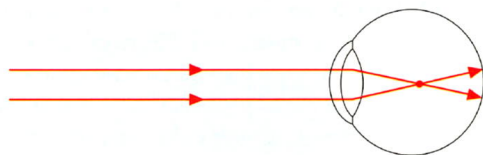
Viele Menschen haben Augenfehler. Sie tragen eine Brille, weil diese die Augenfehler ausgleicht. Die häufigsten Augenfehler sind **Kurzsichtigkeit** und **Übersichtigkeit**.

Beim *übersichtigen* Auge ist die Netzhaut zu nah an der Linse. Das scharfe Bild würde selbst bei sehr weit entfernten Gegenständen noch hinter der Netzhaut entstehen. Also muss der Ziliarmuskel schon jetzt die Linse etwas wölben. Bei nahen Gegenständen entsteht selbst bei der stärksten Linsenwölbung noch kein scharfes Bild auf der Netzhaut. Das Bild bleibt verschwommen. Eine zusätzliche Sammellinse vor dem Auge korrigiert diese Fehlsichtigkeit.

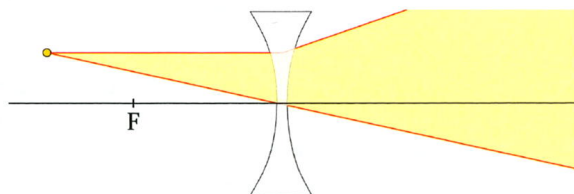


Die Linse der Brille und die Augenlinse zusammen haben eine kürzere Brennweite als die Augenlinse allein. So gelingt die Lichtbündelung besser. Auch nahe Gegenstände werden damit im übersichtigen Auge scharf abgebildet.

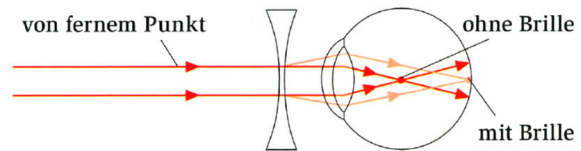
Beim *kurzsichtigen* Auge ist die Netzhaut zu weit von der Hornhaut entfernt. Nahe Gegenstände können mit einer geringeren Wölbung der Linse als beim normalen Auge scharf gesehen werden. Aber die Linse bündelt Licht ferner Gegenstände etwas vor der Netzhaut. D. h., die Bilder sind wie bei einem zu weit entfernten Schirm unscharf.



Eine zusätzliche Linse müsste also die Brennweite insgesamt verlängern. Unsere bisher besprochenen Linsen verengen jedes Lichtbündel und bewirken das Gegenteil. Linsen, deren Wölbung nach innen gerichtet ist, weiten das Lichtbündel auf – wie gewünscht.



Benutzt man eine solche **Zerstreuungslinse** mit der entsprechenden Wölbung in der Brille, so kann der Augenfehler behoben werden.



Das schmale Lichtbündel eines weit entfernten Gegenstandes wird von der Zerstreuungslinse etwas aufgeweitet, dadurch bündelt das Auge das Licht jetzt genau auf der Netzhaut.

Die Aufgabe einer Brille kann auch durch Kontaktlinsen erfüllt werden. Diese Linsen sitzen dicht vor der Pupille und sind deshalb für Außenstehende kaum sichtbar.

Mit steigendem Alter verringert sich die Elastizität der Augenlinse. Der Nahpunkt des Auges entfernt sich, die Anpassungsfähigkeit des Auges mithilfe der Akkommodation lässt nach. Insbesondere beim Lesen macht sich diese „**Altersweitsichtigkeit**“ bemerkbar. (Der Prozess der nachlassenden Anpassungsfähigkeit beginnt übrigens schon in jungen Jahren, macht sich zu diesem Zeitpunkt aber in der Regel noch nicht bemerkbar.) Um scharfe Bilder zu erhalten, muss man den Abstand zum Buch vergrößern. Dadurch werden die Linsenbilder kleiner und damit Texte unlesbar. Eine Lesebrille mit Sammellinse wie beim übersichtigen Auge hilft. Die Brennweite wird kürzer, auch ohne dass die Augenlinse sich selbst sehr stark wölben muss.

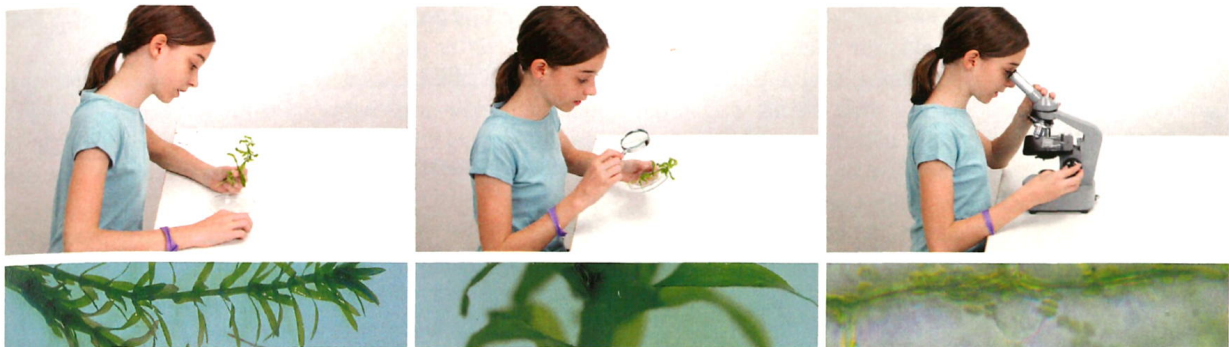
Brillengläser unterscheiden sich also. Es gibt Sammellinsen, die das Licht stärker bündeln, und Zerstreuungslinsen, die das Lichtbündel aufweiten – jeweils mit unterschiedlicher Wölbung. Optiker beschreiben die Eigenschaft einer Linse meist nicht durch ihre Brennweite, sondern durch die Angabe **Dioptrie D**. Berechnet wird D aus der Brennweite f durch Kehrwertbildung, dabei wird f in m angegeben. $D = 1/f$ bekommt die Einheit $1 \text{ dpt} = 1/\text{m}$.

Beispiel einer Linse mit der Brennweite $f = 0,5 \text{ m}$:

$$D = \frac{1}{0,5 \text{ m}} = 2 \text{ dpt.}$$

Bei Zerstreuungslinsen ergänzt man die Angabe durch ein Minuszeichen.

Lupe, Fernrohr und Mikroskop



B1 Lupe und Mikroskop erzeugen größere Netzhautbilder.

Willst du eine kleine Schrift etwa auf einer Briefmarke entziffern, so hältst du die Briefmarke möglichst nahe vor dein Auge. Wie du weißt, wird dadurch das Netzhautbild ziemlich groß. Es überdeckt jetzt mehr Sehzellen, sodass man mehr Einzelheiten der Briefmarke erkennt. Oft reicht diese Methode aber nicht aus.

1. Die Lupe

25 cm ist die kürzeste Entfernung, in der wir ohne Anstrengung einen Gegenstand über längere Zeit betrachten können. (Bei diesem Abstand muss das Auge nur schwach akkommodieren.) → **V1a** zeigt ein „Netzhautbild“ des Lineals für unser Modellauge. Ein größeres Bild als bei einer Gegenstandsweite von 25 cm gelingt ohne Hilfe nicht.

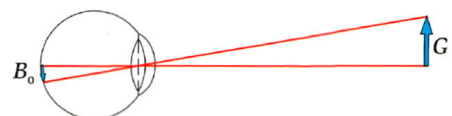
Mit einer **Lupe** aber können wir die Gegenstandsweite weiter verringern und so ein größeres Netzhautbild erhalten (→ **V1b**). Dazu stellen wir jetzt den Gegenstand in die Brennebene der Lupe. Alle Lichtstrahlen, die dann vom Gegenstand ausgehen, verlaufen hinter der Lupe parallel. Ein solches paralleles Bündel trifft sonst nur von weit entfernten Objekten ins Auge. Dieses kann jetzt entspannt, ganz ohne Akkommodation das Lineal betrachten.

Haben wir ohne Lupe in → **V1a** auf dem Bildschirm eine Bildhöhe $B_o = 2$ mm gemessen, so finden wir in → **V1b** mit Lupe $B_m = 12$ mm. Die **Vergrößerung** durch die Lupe ist also $V = B_m/B_o = 6$. Das Lineal erscheint also dem entspannten Modellauge mit Lupe 6-mal so hoch und 6-mal so breit wie ohne Lupe. Wir erkennen also 36-mal so viele Einzelheiten.

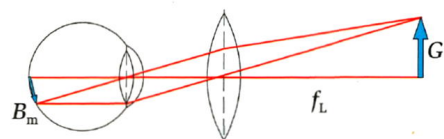
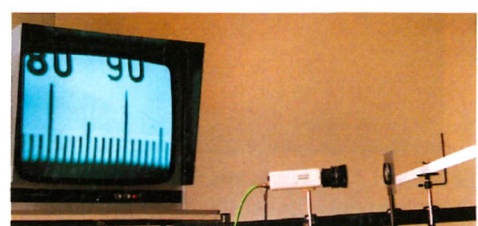
Merksatz

Liegt das Objekt in der Brennebene der Lupe mit $f_L < 25$ cm, so wird das Netzhautbild größer. Unter der **Vergrößerung** V durch ein optisches Instrument versteht man den Quotienten

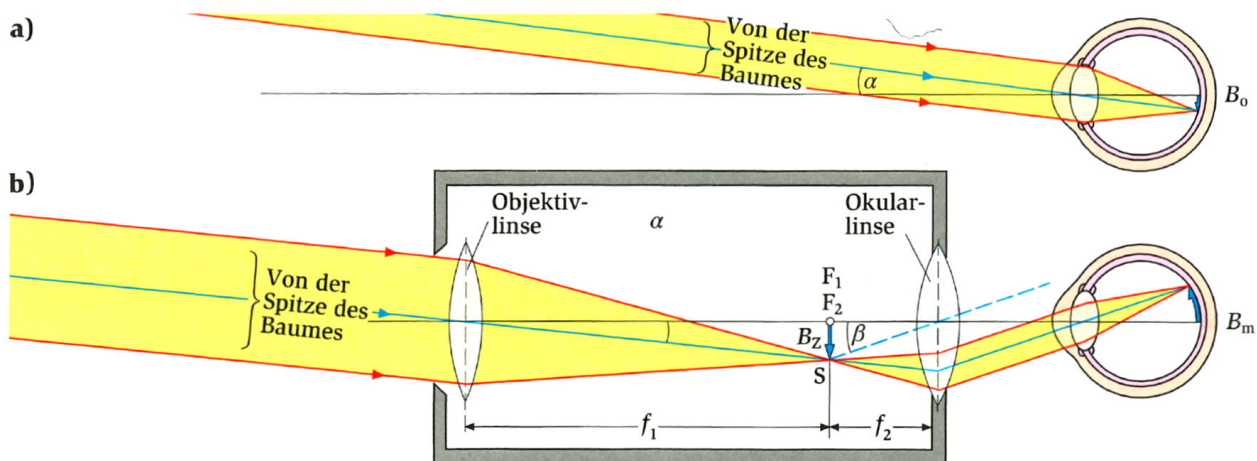
$$V = \frac{\text{Höhe des Netzhautbildes mit Instrument}}{\text{Höhe des Netzhautbildes ohne Instrument}} = \frac{B_m}{B_o} \quad \square$$



V1 a) Eine Videokamera dient als Modellauge. Wir nähern die Kamera dem Gegenstand (Lineal) bis auf 60 cm und stellen am Kameraobjektiv das Fernsehbild scharf. Auf dem Bildschirm erkennen wir das „Netzhautbild“ des Lineals.



V1 b) Als Lupe stellen wir eine Sammellinse der Brennweite $f_L = 10$ cm direkt vor das Modellauge. Wir schieben nun das Lineal in die Brennebene der Lupe. Damit ein scharfes Bild entsteht, müssen wir an der Kamera das Objektiv auf „ ∞ “ stellen. Auf dem Bildschirm entsteht jetzt ein viel größeres „Netzhautbild“ des Lineals als ohne Lupe.



B1 Das von einer Baumspitze ausgehenden Lichtbündel fällt **a)** unmittelbar, **b)** durch ein Fernrohr ins Auge.



V1 a) Eine Linse mit der Brennweite 30 cm erzeugt etwa im Abstand der Brennweite auf einem Schirm ein Bild des weit entfernten Baumes. Wir betrachten dieses Bild hinter dem durchscheinenden Schirm durch eine Lupe mit der Brennweite 10 cm. Die optimale Vergrößerung erzielen wir, wenn wir dazu die Linse 10 cm weit hinter den Schirm stellen – also im Abstand ihrer Brennweite.

b) Uns stört beim Beobachten der milchige Schirm. Wir entfernen ihn. Das Bild wird dadurch klarer. Wir sehen den Baum jetzt ungetrübt. Unser Fernrohr besteht jetzt nur aus zwei Linsen. Wir erhalten ein scharfes Bild, wenn ihr Abstand etwa so groß ist wie die Summe ihrer Brennweiten.

2. Das Fernrohr

Du willst dir den Mond genauer anschauen. Weil er zu weit weg ist, kannst du mit bloßem Auge keine Einzelheiten erkennen. Betrachtetest du ihn dagegen mit einem Fernrohr oder einem Fernglas, so erkennst du viele Krater, Berge und Täler. Das ist möglich, weil du beim Blick durchs Fernrohr den Eindruck hast, dass der Mond näher herangerückt sei. Er erzeugt nun ein größeres Netzhautbild. Dadurch werden mehr Sehzellen überdeckt, wir erkennen mehr Einzelheiten.

Wie ist das möglich? Ein Fernrohr besteht im Prinzip aus zwei Bestandteilen: einem **Fotoapparat** und einer **Lupe**. In **→ V1a** bauen wir das nach. In **→ B1b** ist gezeigt, wie die Sammellinse mit der Brennweite f_1 das Bild (der Spitze des Baumes) erzeugt. Dieser Teil des Fernrohrs ist physikalisch gesehen der entscheidende Teil eines Fotoapparats. Das Bild des Baumes B_Z ist umso größer, je größer die Brennweite f_1 ist.

Wir schauen uns das Bild („Zwischenbild“) B_Z nun mit einer Lupe an (Brennweite f_2). Jetzt ist der Sehwinkel β im Vergleich zum ursprünglichen Sehwinkel α größer. Statt B_o entsteht mit Fernrohr also ein größeres Netzhautbild B_m .

Das Bild ist in **→ V1a** durch den milchigen Schirm gestört. In **→ V1b** lassen wir ihn einfach weg. Die Bildgröße bleibt unverändert, das Bild ist jetzt aber klar. In **→ B1b** erkennen wir: Das Lichtbündel in S des Bildes B_Z läuft hinter dem Sammelpunkt wieder auseinander, als wenn es von einem selbst leuchtenden Punkt käme. Das Bild verhält sich also wie ein leuchtender Gegenstand, der Schirm ist nicht nötig.

Merksatz

Das Fernrohr besteht aus zwei Linsen. Eine Linse mit großer Brennweite erzeugt ein Zwischenbild. Dieses wird durch eine Linse mit kleiner Brennweite wie mit einer Lupe betrachtet. Die Fernrohrvergrößerung beträgt $V = f_1/f_2$. □

3. Das Mikroskop (Diaprojektor plus Lupe)

Der Vergrößerungsfaktor durch Lupen ist höchstens 20. Um kleine Gegenstände noch stärker zu vergrößern, verwendet man Mikroskope. Sehr kleine Gegenstände können mit einem Mikroskop bis zu 800-mal vergrößert werden.

Mit einem **Mikroskop** betrachtet man meist durchsichtige Objekte auf einer Glasplatte. Diese Objektträger erinnern an Dias. Wir wissen bereits, dass ein Diaprojektor vergrößert. Das optische Bild an der Leinwand ist viel größer als das Original. Betrachtet man dieses vergrößerte Bild zusätzlich durch eine Lupe, so erscheint es im Auge nochmals vergrößert. Nach diesem Prinzip der zweimaligen Vergrößerung arbeitet das Mikroskop.

In → V2a setzen wir diese Überlegung um. Das vergrößerte Bild auf dem Schirm kennen wir bereits vom Diaprojektor. Entfernen wir den Schirm, so bleibt das Bild trotzdem erhalten. Es schwebt frei im Raum. Wie ist das möglich?

Die Sammellinse konzentriert die von den Objektpunkten ausgehenden Lichtbündel in Punkten eines *Zwischenbildes*. Ohne Schirm laufen diese Bündel geradlinig und ungeschwächt auseinander. Es ist so, als stünde in der Ebene des Zwischenbildes ein Gegenstand, von dem Licht ausgeht und in unser Auge (in die Kamera) trifft. Man kann dann das helle, *im Raum schwebende Zwischenbild* mit einer Lupe nochmals vergrößert betrachten (→ V2b). Auf den Schirm in der Bildebene können wir verzichten. Dies bringt den Vorteil, dass das Lupenbild deutlicher und heller erscheint.

→ B3 zeigt die uns bereits bekannten Bauteile des Diaprojektors: Lampe, Kondensor, Dia (Objekt auf Glas), *Objektivlinse* und das Bild (Zwischenbild). Die Lupe heißt beim Mikroskop *Okularlinse*. Das Gehäuse (*Tubus*) dient als Halter der Linsen und verhindert einen seitlichen Lichteinfall.

Um beim Mikroskop ein möglichst großes Zwischenbild zu erzeugen, wird das Objekt nur wenig außerhalb der Brennebene der Objektivlinse gebracht. Die Bildweite für das Zwischenbild ist dadurch recht groß.

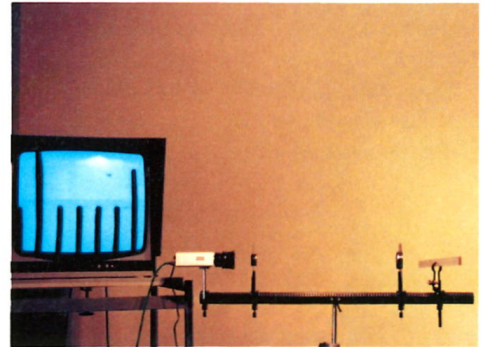
Von der Lupe wissen wir: Stellen wir die Okularlinse so, dass das Zwischenbild in ihrer Brennebene liegt, dann wird die optimale Vergrößerung der Lupe erreicht. Außerdem erzeugt sie so parallele Lichtbündel, sodass der Betrachter mit entspanntem Auge beobachten kann. Ein Scharfstellen des Mikroskops ist erforderlich, damit das Zwischenbild immer am gleichen Platz im Tubus liegt. Dazu wird der Abstand zwischen Objekt und Objektivlinse mit Tubus verändert.

Merksatz

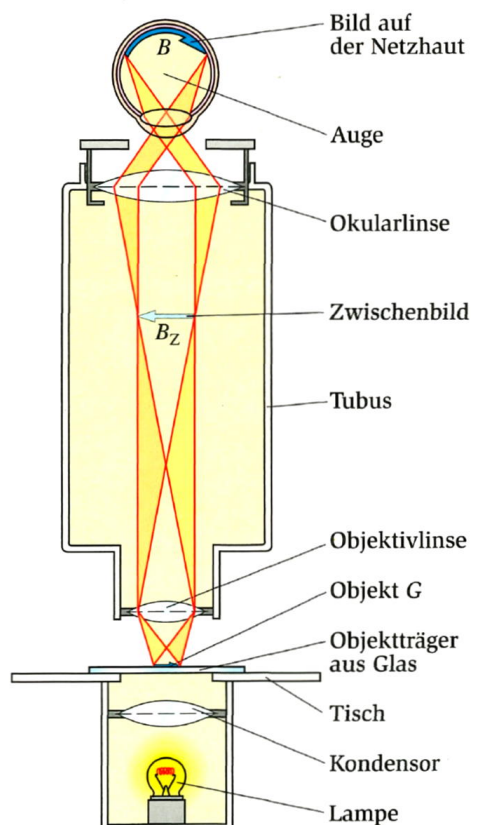
Beim Mikroskop befindet sich das Objekt ein wenig außerhalb der Brennebene des Objektivs. Dieses erzeugt durch optische Abbildung ein vergrößertes Zwischenbild, das durch eine Lupe (Okular) betrachtet wird. Dabei wird es nochmals vergrößert. ■

V2 a) Das Objekt (ein leuchtendes „F“) wird 5,5 cm vor eine große Sammellinse mit $f = 5$ cm gestellt. 55 cm hinter der Linse befindet sich ein durchscheinender Schirm. Dort entsteht ein rund 10-fach vergrößertes Bild. Entfernen wir den Schirm und setzen an seine Stelle einen Ring, so erkennen wir, dass das Bild frei im Ring schwebt.

b) Hinter dem Ring wird eine Lupe im Abstand ihrer Brennweite aufgestellt. Schauen wir durch die Lupe, so sehen wir ein nochmals vergrößertes Bild.



B2 Mikroskopmodell mit Kamera



B3 Strahlengang in einem Mikroskop