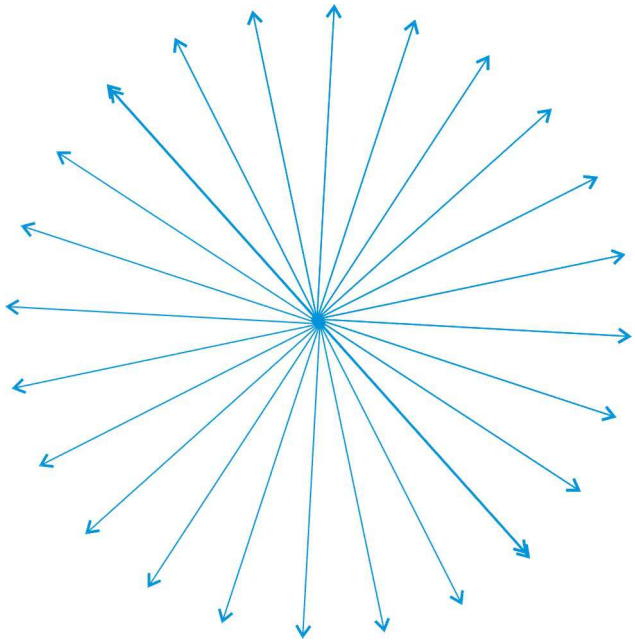
Von Lichtstrahlen, Spiegeln und Linsen

(Inhalt s. S. 32)

Dr. Wolfram Babinecz

Wir gehen von der Beobachtung aus
Der einzige Weg, in die Geheimnisse des Lichts einzudringen, geht von der Beobachtung aus.
Was beobachten wir?
Zuerst natürlich die Lichtquellen
die Sonne
den Mond
die Sterne
Lampen
ein brennendes Streichholz
glühende, glimmende Teilchen
Funken .
alle möglichen beleuchteten Gegenstände?
den blauen Himmel?
Wolken?



Manche Lichtquellen erscheinen uns als Punkte – „Lichtpunkte“
Von ihnen gehen Lichtstrahlen aus
- **auf geradem Wege** vom Lichtpunkt in unser Auge -

Das ist die zweite Beobachtung, die wir machen:
Lichtstrahlen breiten sich immer geradlinig aus.
Immer?
Es scheint jedenfalls so:
im Zimmer – das Zimmer ist wie unsere ganze direkte Umwelt von Luft erfüllt.
im luftleeren Raum des Weltalls
in der luftleer gepumpten Glocke in der Physikstunde
im Wasser
in allen durchsichtigen Körpern – Glasstücken zum Beispiel oder Kristallen

Wo wir auch stehen: **von überall her können wir einen Lichtpunkt sehen!**

Das ist die dritte Beobachtung:
Von einem Lichtpunkt breiten sich Lichtstrahlen geradlinig **nach allen Seiten** aus

Von den Lichtstrahlen haben die Menschen im Altertum abgeguckt, als sie die Geometrie erfunden haben: *Geraden und Strahlen, Senkrechte, Lot und Winkel, geometrische „Spiegelung“*.

Die vierte Beobachtung:
es gibt **durchsichtige Körper** – durch die kann das Licht hindurch gehen, und
es gibt **undurchsichtige Körper** – durch die kann es nicht hindurch.
Dann gibt es noch durchscheinende Körper, das heben wir uns für später auf!
Manche undurchsichtigen Körper spiegeln das Licht – sie werfen die Lichtstrahlen einfach zurück.
Auch die durchsichtigen glatten Fensterscheiben können Licht reflektieren .

Fünfte Beobachtung:
An glatten ebenen Oberflächen von Körpern werden Lichtstrahlen gespiegelt

A. Die Gesetze bei der Spiegelung am ebenen Spiegel

Wenn Licht auf eine glatte ebene spiegelnde Oberfläche trifft, muss es zwei Gesetzen gehorchen

Erstes Gesetz:

Du kannst es erraten, wenn Du Dich genau vor einen Spiegel stellst:

Das Licht, das senkrecht auf einen Spiegel trifft, wird „in sich selbst“ zurückgeworfen.

Diese senkrechte Richtung nennt man die **Lot-Richtung**.

Eine auf einer ebenen glatten Oberfläche senkrecht stehende Gerade ist ein Lot dieser Fläche.

Zu jedem Punkt der Oberfläche gibt es ein Lot.

Alle Lote sind zueinander parallel.

Also kann man überall auf einer solchen Oberfläche ein Lot errichten – wie in der Geometrie.

Zweites Gesetz:

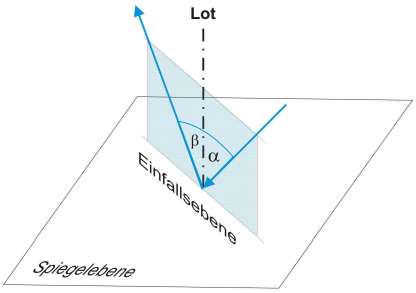
Das Licht, das schräg auf einen Spiegel trifft, wird auch schräg zurück geworfen, aber nicht in sich selbst.

Wie, das kann man nur durch genaue Beobachtung herausfinden:

Ein Beispiel:

Wir legen einen ebenen Spiegel auf den Zimmerfußboden und warten, bis es ungefähr zwölf Uhr mittags ist und ein Sonnenstrahl auf den Spiegel trifft.

Verfolgen wir einen Lichtstrahl, der von Süden her auf die Fläche trifft!



Der einfallende und der ausfallende Strahl spannen zusammen mit dem Lot eine Ebene auf, die auf dem Spiegel senkrecht steht.

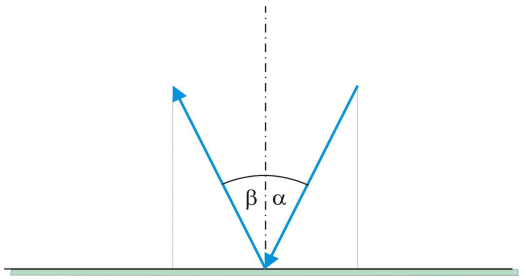
Die Südrichtung und das Lot und die Nordrichtung liegen in einer Ebene, die senkrecht auf der Spiegeloberfläche steht, genau wie dass Lot selber.

(Übrigens: Jede Ebene, die durch das Lot geht, steht auf der Spiegelebene senkrecht.)

Der einfallende Lichtstrahl und das Lot bilden also eine Ebene – die „**Einfallsebene**“.

Und nun die Beobachtung:

1. Der reflektierte Lichtstrahl, der ausfallende Strahl, geht in derselben Ebene vom Spiegel weg! – Wie oben im Bild.
2. Jeder einfallende Strahl hat einen bestimmten Winkel zum Lot – den „**Einfallswinkel**“.
3. Der ausfallende Strahl wird unter einem „**Ausfallswinkel**“ zurückgeworfen, der genau so groß ist, wie der Einfallswinkel; aber er liegt auf der anderen Seite des Lotes.



Querschnitt durch eine auf der Oberfläche versilberte ebene Glasscheibe:
Silberschicht - schwarz Glas - blaugrün

Der einfallende Strahl wird gespiegelt
Die Einfallsebene liegt in der Papierebene

$$\alpha = \beta$$

Diese Beobachtungen können wir immer machen, wenn ein Lichtstrahl auf einen Spiegel trifft, es muss kein Sonnenstrahl mittags um 12 sein, und der Spiegel muss auch nicht auf dem Fußboden liegen.

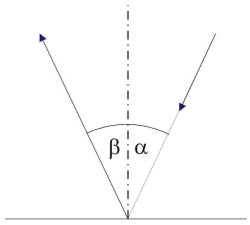
Das zweite Gesetz fassen wir nun zusammen:

Jeder Lichtstrahl, der auf einen ebenen Spiegel trifft, wird so zurückgeworfen, dass der *einfallende Strahl*, das *Lot* und der *ausfallende Strahl* in einer zum Spiegel senkrechten Ebene liegen. Der Einfalls- und der Ausfallswinkel sind gleich groß, und diese Winkel liegen auf verschiedenen Seiten zum Lot.

Man kann das erste Gesetz sogar in diesem Gesetz wiederfinden – wieso?:

Wenn der Lichtstrahl senkrecht auf den Spiegel trifft, dann ist der Einfallswinkel 0°.

Und weil er in sich selbst zurückgeworfen wird, ist auch der Ausfallswinkel 0°.



Prinzip-Skizze
$\alpha = \beta$

In einer Prinzip-Skizze werden alle überflüssigen realen Einzelheiten der Wirklichkeit weggelassen, und nur das Wesentliche wird zum Ausdruck gebracht

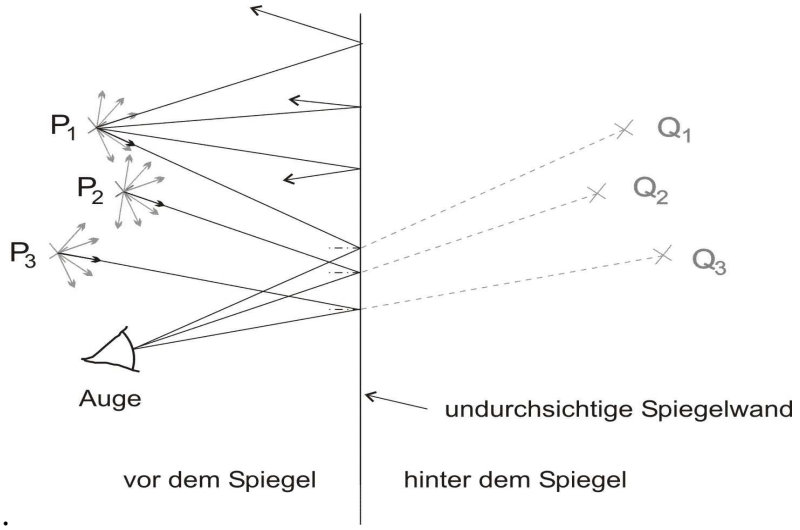
B. Wie am ebenen Spiegel das Spiegelbild entsteht

Sechste Beobachtung:
In einem dunklen Raum, wo kein Licht ist, kann man keinen Gegenstand sehen – alles ist schwarz. Dinge kann man nur sehen, wenn sie beleuchtet werden.
Auch von den beleuchteten Gegenständen gehen Lichtstrahlen in viele Richtungen aus; aber es ist nicht ihr eigenes Licht. Es ist das Licht, das sie von einer Lichtquelle bekommen haben.
Darum kann man alle Dinge unterscheiden in **selbstleuchtende** und **beleuchtete** Körper.

Wenn wir uns vor einen Spiegel stellen, gehen **von jedem Punkt** unseres Gesichtes viele Lichtstrahlen aus **in alle freien Richtungen**. Viele davon fallen auch auf den Spiegel.
Und die, die auf den Spiegel fallen, werden von ihm reflektiert.
Natürlich auch wieder in viele Richtungen.
Manche davon kommen auch in unser Auge.

In der folgenden Prinzip-Skizze sind nur drei von den vielen Punkten des Gesichts zu sehen:
P_1, P_2 und P_3, und ihre Spiegelbilder Q_1, Q_2 und Q_3.

Aus jedem der Punkte gehen nach allen freien Seiten viele Strahlen aus. Aber immer nur einer von jedem Punkt wird ins Auge reflektiert – genau: ein kleines Bündel, das in die Pupille passt.
Die anderen Strahlen gehen alle woandershin. Viele treffen auch auf den Spiegel und werden zurück geworfen, aber nicht ins Auge. Die gehen am Auge vorbei.
In der Skizze sind immer nur einige der vielen Strahlen zu sehen. Die anderen kann man sich aber leicht denken



Hinter den Spiegel kommen überhaupt keine Lichtstrahlen. Was man trotzdem da sieht, ist pure Einbildung. Es gibt dort überhaupt keine Bildpunkte. Weil man aber trotzdem welche dort zu sehen meint, nennt man sie ***virtuelle*** (= scheinbare) Punkte, und das Spiegelbild ein ***virtuelles Bild***.

Aber wie kommt das? Es sieht doch so echt aus!
Mit dem Auge sieht man die reflektierten Strahlen vom Spiegel herkommen. Wir haben aber schon als Baby gelernt, dass das Licht immer auf geradem Weg direkt von einem Gegenstand zu uns kommt. Von geknickten Spiegelstrahlen weiß unser Gehirn eigentlich nichts.
Wenn das Auge nun die Strahlen der Punkte aus dem Spiegel kommen sieht, ***denkt das Gehirn***, die Punkte ***lägen dort hinten***, genau in der Entfernung hinter dem Spiegel, in der sie in Wirklichkeit vor dem Spiegel sind. Es merkt die **optische Täuschung** gar nicht!

Aber etwas merkt man doch: **das Bild ist seitenverkehrt**! Das weiß ja jeder.

Auch in der Skizze ist es erkennbar: wenn man die drei Punkte direkt ansieht, dann liegt P_1 rechts und P_3 links. Bei den Spiegelpunkten ist es anders: da liegt Q_1 links und Q_3 rechts.

Die selbst gezeichnete Konstruktion

Du kannst das Spiegelbild der drei Punkte auch selber zeichnen – nein – **konstruieren** mit Zirkel und Lineal. *Möglichst fein und mit gut gespitztem Bleistift- um so genauer wird es!*
Zur Erinnerung: im Altertum haben die Menschen dem Licht die Geometrie abgeguckt.

Zuerst zeichnen wir eine senkrechte Gerade aufs **Zeichenpapier**.
Das soll der Spiegel sein, von der Seite gesehen – „Spur“ des Spiegels genannt.
In der Geometrie die ***Spiegelachse***. – Wir machen eine „Achsenspiegelung“, so nennt man das.

Dann zeichnen wir einen oder zwei oder drei Punkte links vor den Spiegel.
Und das Auge auch, natürlich auf dieselbe Seite der Gerade, denn rechts ist ja nix.

Nun kommt die **geometrische Spiegelung** der Punkte:
Zuerst fällen wir Lote (also Senkrechte) auf die Spiegelachse (oder den Spiegel) und verlängern sie nach rechts in die rechte Seite des Zeichenblatts. *Feine strich-punktierte Linien.*

Dann nehmen wir für jeden Punkt die Länge der Lotstrecke vom Punkt bis zur Achse und tragen sie auf der Verlängerung des Lotes ab. Dort, am Endpunkt, liegt der gespiegelte Punkt.
Damit ist die Spiegelung schon fertig.

Aber den Strahlenverlauf haben wir noch nicht konstruiert!
Dazu nutzen wir aus, was wir schon wissen:
Das Auge „sieht“ ja nicht den reellen Punkt, sondern den Spiegelpunkt, den virtuellen Punkt.
Wir können daher jeden Spiegelpunkt mit dem Auge durch eine gerade Linie verbinden – zuerst mal bei einem Punkt.
Und den Punkt, in welchem diese Linie die Spiegelachse schneidet, den verbinden wir mit dem wirklichen Punkt – *das Stück hinter dem Spiegel gestrichelt*.
Wenn wir in dem Schnittpunkt auf der Achse noch eine Senkrechte konstruieren, dann können wir mit dem Winkelmesser nachmessen: diese Senkrechte halbiert genau den Winkel, der gebildet wird vom reellen Punkt, dem Fußpunkt der Senkrechten und dem Augenpunkt.
Nun können wir es mit den anderen Punkten genauso machen, und die Konstruktion der Spiegelbilder und der Lichtstrahlen ist fertig:

C. Spiegelung an konvex gewölbten Flächen **(konvex = nach außen gewölbt)**

Am vertrautesten ist uns die Spiegelung an den Christbaumkugeln – besonders, weil es ja jetzt mächtig auf Weihnachten zugeht!
Und dann im Rückspiegel am Auto.
Dabei entstehen allerdings sehr verkleinerte Bilder.
Eine solche Kugeloberfläche ist ein **konvexer Wölbspiegel.**
Konvex bedeutet „nach außen gewölbt“.

Wir werden sehen, was die Lichtstrahlen mit so einer Spiegelfläche anfangen – eigentlich müssen wir ja sagen: „Spiegel*wölbung*“ , aber das sagt man nicht. Man nennt es Kugel*fläche*, obwohl es ja keine flache, ebene Fläche ist.
Umgekehrt: wir wollen rauskriegen, was der Wölbspiegel mit den Lichtstrahlen macht!

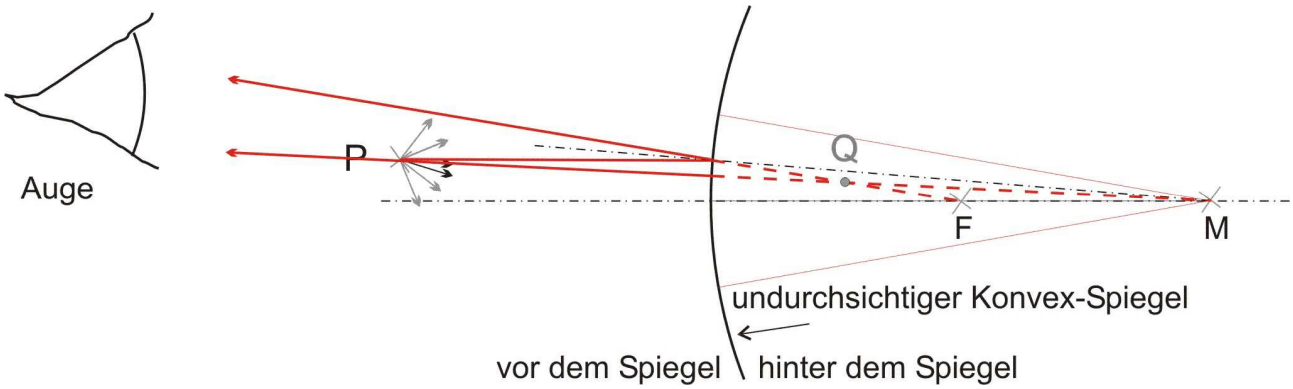
Im Querschnitt einer Skizze sieht man von so einer Kugelfläche nur den Spurkreis, zu dem auch ein Mittelpunkt gehört.
Eine einfache geometrische Spiegelung lässt sich aber nicht machen, denn es gibt ja keine Spiegelachse.

Wir halten uns wieder an unsere Beobachtungen:

<u>Siebente Beobachtung:</u>
An dem Konvex-Spiegel entsteht ein verkleinertes Bild – um so kleiner, je stärker die Kugeloberfläche gewölbt ist.
Wenn man ganz dicht an eine kleine spiegelnde Kugel herangeht, dann erscheint das Bild verzerrt.
Ein gutes Bild entsteht also nur, wenn der Spiegel nur schwach gekrümmt ist.
Das Bild ist ein virtuelles Bild; denn es scheint hinter dem Spiegel zu liegen, wo es gar nicht liegen kann.

<u>Die Tatsache, dass ein virtuelles Bild entsteht, das wir sehen können(!), zeigt uns:</u>
Zu *jedem* Punkt des wirklichen Gebildes (Gesicht, Auto) **gibt es *genau einen* virtuellen Spiegelpunkt. Die reflektierten Strahlen scheinen aus diesen Spiegelpunkten her zu kommen. Alle Strahlen aus allen Spiegelpunkten zusammen erzeugen dann das Bild.**

Aber wie entsteht ein virtueller Bildpunkt? Wie kann man ihn geometrisch konstruieren?
Dazu betrachten wir die folgende Prinzip-Skizze:



Der Punkt P sei einer von den vielen Punkten des Gegenstandes.
Zahlreiche Lichtstrahlen, die von ihm ausgehen, treffen auch auf den Spiegel.

Von dem Spiegel ist im Querschnitt nur die Spur, ein Kreisbogen, zu sehen.
Der Mittelpunkt des Kreises liegt bei M, hinter dem Spiegel (oder im Mittelpunkt der Weihnachtskugel).
Die strich-punktierte Gerade MF nennt man „optische Achse“.
Die dünnen roten Linien begrenzen einen Kreissektor, und im wirklichen Spiegel einen Kugelsektor.
Wenn nur Lichtstrahlen innerhalb dieses Sektors (Öffnungswinkel ungefähr 20°, also 10° beiderseits der optischen Achse (abgekürzt o.A.) auf den Spiegel fallen, dann ergibt sich ein gutes fast unverzerrtes Spiegelbild.
Von dem Punkt P sind nur zwei der vielen auf den Spiegel fallenden Strahlen (rot) gezeichnet:
→ 1.) der Strahl, der senkrecht auf die Oberfläche trifft – der „Mittelpunktsstrahl“ – :
Er wird in sich selbst zurück geworfen
Für den Betrachter scheint er aus dem Kugelmittelpunkt zu kommen; das deutet die Rückwärts-Verlängerung dieses Strahls als gestrichelte Linie an.

→ 2) der Strahl, der parallel zur optischen Achse auf den Spiegel trifft:
Er wird unter einem spitzen Winkel zurück geworfen:
Er hat einen spitzen Einfallswinkel zum Lot – (das Lot ist die dünne verlängerte strich-punktierte Radius-Linie von M aus);
an das Lot ist auch der gleich große Ausfallswinkel angetragen, und so ist auch dieser reflektierte Strahl bekannt.
Auch dieser Strahl scheint aus dem Raum hinter dem Spiegel zu kommen – das deutet die rückwärtige gestrichelte Verlängerung an.
Diese rückwärtige Verlängerung trifft die optische Achse im Punkt F.
Bei genügend kleinen Kreissektoren – wie hier zwischen den roten Linien – liegt dieser **Punkt F fast genau in der Mitte zwischen M und dem Kreis** (bzw. der Kugeloberfläche).

Nun kann man aber folgende Beobachtung machen:
die rückwärtigen Verlängerungen der beiden Strahlen (1.) und (2.) treffen sich in dem Punkt Q.
Das Auge meint also, dass diese beiden Strahlen aus dem Punkt Q kämen.
Dort sieht das Auge den Spiegelpunkt von P, **dort scheint der Bildpunkt zu liegen.**

Damit ein vollständiges virtuelles Bild entsteht, genügt es aber nicht, dass nur zwei Strahlen aus Q kommen!
Das Bild entsteht ja! Man sieht es ja! – Also kommen auch alle anderen von P ausgehenden und am Spiegel reflektierten Strahlen aus diesem Punkt Q ! – Meint das Gehirn**!**

Mit Hilfe des aus zwei besonderen Strahlen konstruierten Bildpunktes Q können nun leicht alle anderen reflektierten Strahlen richtig gezeichnet werden:
man braucht nur alle aus Q kommenden Linien nach außen zu zeichnen und ihre Schnittpunkte mit dem Kreis mit P zu verbinden.

Zu jedem anderen Gegenstandspunkt (P_2, P_3, P_4, … – hier nicht gezeichnet**) gibt es andere Bildpunkte (Q_2, Q_3, QP_4, …), und alle zusammen ergeben das virtuelle Bild des Gegenstandes.**

Den Punkt F in der Mitte zwischen M und dem Kreis nennt man „virtuellen Brennpunkt“

Alle parallel zur optischen Achse auf den Spiegel fallenden Strahlen werden so reflektiert, als ob sie aus dem virtuellen Brennpunkt F kämen.

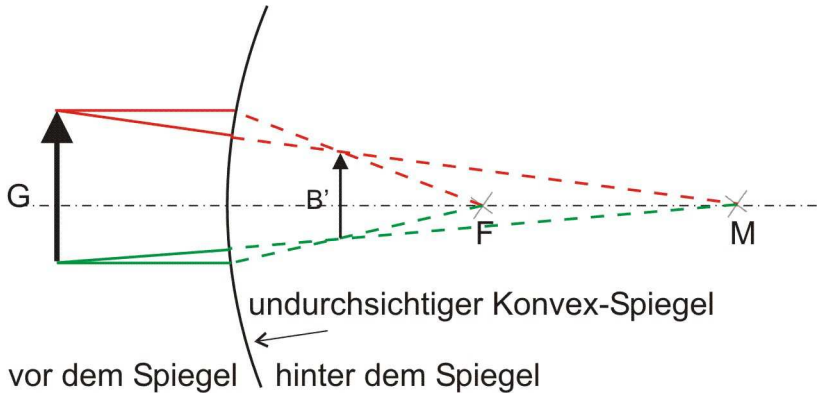
Alle senkrecht auf den Spiegel treffenden Strahlen werden in sich selbst und so reflektiert, als ob sie aus dem Kugelmittelpunkt M kämen.

Bildkonstruktion eines Gegenstandspfeils an einem Konvex-Spiegel

Man braucht für die Pfeilspitze die beiden **besonderen Strahlen**, und für das Pfeilende auch.

Diese besonderen Strahlen sind der **Parallelstrahl** und der **Mittelpunktsstrahl**
(man nennt sie daher auch „Hauptstrahlen“)

G bedeutet den Gegenstand und **B’** das virtuelle Bild,
genauer: **die Gegenstandsgröße und die** virtuelle **Bildgröße**.

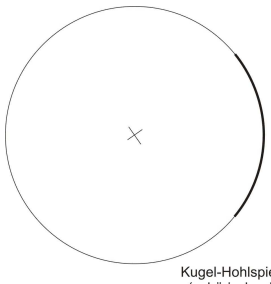


Wie man es in der Wirklichkeit an einem Konvex-Spiegel beobachten kann,
so sieht man auch in der Konstruktionszeichnung, dass das virtuelle Bild kleiner ist als der Gegenstand.

Der Konvex-Spiegel ist ein Verkleinerungsspiegel, und das Bild ist ein virtuelles Bild.

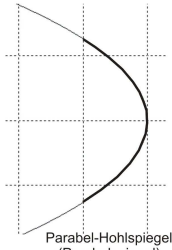
D. Spiegelung an konkav gewölbten Flächen - Hohlspiegel

Hohlspiegel sind meistens die verspiegelten Innenflächen von Hohl***kugel***-Sektoren.
Für manche Anwendungen (zum Beispiel Autoscheinwerfer) sind es auch ***Parabol***-Spiegel.



Kugel-Hohlspiegel
(sphärischer H.)

Als ***Vergrößerungsspiegel*** werden Hohlspiegel als Toiletten- und Rasierspiegel benutzt,
als ***Sammelspiegel,*** die das Sonnenlicht bündeln, können sie zum Kochen oder bei technischen Prozessen zum Erhitzen und Schmelzen von Substanzen gebraucht werden;
als ***optische Spiegel*** sind sie in astronomischen Spiegelteleskopen.

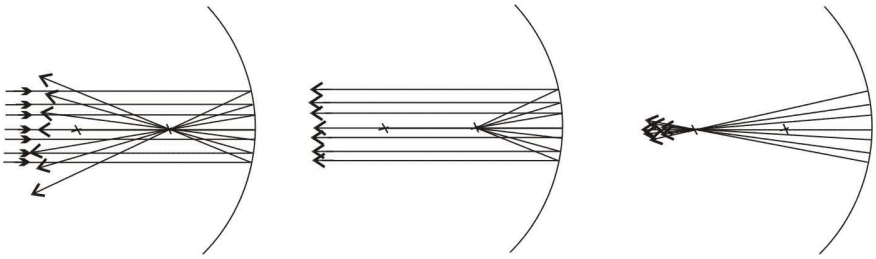


Parabel-Hohlspiegel
(Parabolspiegel)

Bei Autoscheinwerfern, Satellitenschüsseln, Solarkraftwerken, sind es Parabolspiegel.

In der Akustik kommen sie in Schalltrichtern oder „Ohr“muscheln vor.
Flüstergrotten sind ebenfalls Hohlspiegel.

Achte Beobachtung:
Wenn ein Hohlspiegel nur ein kleiner Sektor einer Kugel-Innenfläche ist, etwa 20° , wie beim Konvexspiegel, dann hat er die Eigenschaft, alle Lichtstrahlen, die parallel zur optischen Achse auf den Spiegel fallen, in einem einzigen wirklichen, reellen Punkt, dem Brennpunkt F, zu sammeln (linkes Bild). **Dieser Brennpunkt liegt fast genau in der Mitte zwischen der Kugel-Innenfläche und dem Kugelmittelpunkt**.



Umgekehrt, wenn sich im Brennpunkt eines solchen Hohlspiegels eine Punktlichtquelle befindet, dann werden alle Lichtstrahlen, die von der Lichtquelle auf den Spiegel fallen, als Parallelstrahlen parallel zur optischen Achse reflektiert (mittleres Bild).

Wenn man eine Punktlichtquelle in den Kugelmittelpunkt stellt, dann treffen die auf den Spiegel fallenden Strahlen dort ***senkrecht*** auf und wenden in sich selbst zurückgeworfen, also wieder in den Kugelmittelpunkt (rechtes Bild).

Der Hohlspiegel verwandelt also bei der Reflexion die Strahlen:

- **Parallelstrahlen werden zu Brennpunkt-Strahlen oder Brennstrahlen,**
- **Brennstrahlen werden zu Parallelstrahlen,**
- **Mittelpunkstrahlen bleiben Mittelpunktstrahlen.**

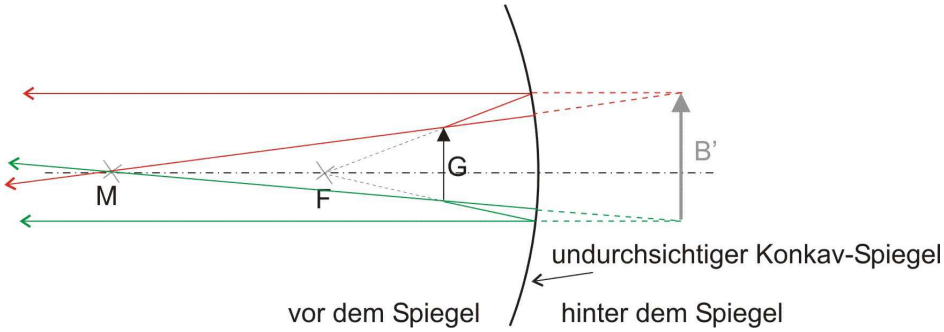
Diese drei Strahlen nennt man die „Hauptstrahlen“, weil man mit ihnen die Spiegelbilder konstruieren kann.

Auch für alle übrigen Strahlen gilt das Reflexionsgesetz „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“, aber man kann ihren Verlauf nicht allgemein vorhersagen – er hängt von der Richtung der einfallenden Strahlen ab.

I. Der Vergrößerungsspiegel

Neunte Beobachtung:
Das Spiegelbild in einem Hohlspiegel ist ein vergrößertes virtuelles Bild

Wie ein vergrößertes virtuelles Bild entsteht



Beschreibung des Bildes

Der Gegenstand G, in dieser Konstruktionsskizze ein Pfeil, steht nah vor dem Spiegel.
„Nah“ bedeutet, dass er **zwischen dem Spiegel und dem Brennpunkt F** steht.

Von allen Punkten des Pfeils gehen Lichtstrahlen in alle Richtungen aus.
Die könnte man aber gar nicht alle zeichnen.
Gezeichnet sind nur Strahlen, die von der Spitze und vom Fußende des Pfeils kommen,
und auch von denen nur je zwei.
Rot gezeichnet die beiden von der Spitze,
grün gezeichnet die beiden vom Fußende.

Der eine Strahl, der von der Pfeilspitze auf den Spiegel fällt, hat eine Richtung, als ob er aus dem Mittelpunkt M käme.
Er wird auch wieder so zurückgeworfen – es ist der Mittelpunktsstrahl.
Für den Betrachter, der weiter links steht und nicht zu sehen ist, sieht es so aus, als ob der Strahl aus dem Spiegel käme – aber hinter dem Spiegel ist ja nix.

Der andere Strahl von der Pfeilspitze hat eine Richtung, als ob er aus dem Brennpunkt F käme; es ist also der sogenannte Brennstrahl.
Wenn er auf den Spiegel fällt, wird er als Parallelstrahl reflektiert.
Für den Betrachter sieht es wieder so aus, als ob der reflektierte Strahl aus dem Spiegel käme – genau aus dem Punkt, wo sich die gestrichelten rückwärtigen Verlängerungen treffen.
Das ist der Punkt, aus dem die beiden reflektierten roten Strahlen zu kommen scheinen.
Alle Strahlen, die von der Pfeilspitze auf den Spiegel fallen, werden so reflektiert, als ob sie aus diesem virtuellen Punkt hinter dem Spiegel kämen !
– und auch alle Strahlen, die aus der Umgebung der Pfeilspitze auf den Spiegel fallen.
Darum sieht es so aus, als ob dort hinter dem Spiegel das Spiegelbild der Pfeilspitze wäre.

Mit den beiden grün gezeichneten Strahlen, die vom Fußende des Pfeils auf den Spiegel fallen, verhält es sich genau so:
der Brennstrahl wird bei der Reflexion zum Parallelstrahl, und
der Mittelpunktsstrahl wird in sich selbst zurückgeworfen, er bleibt ein Mittelpunktsstrahl.
Die beiden rückwärtigen Verlängerungen treffen sich hinter dem Spiegel, **und genau dort entsteht das virtuelle Bild des Fußendes vom Pfeil**.

Nun müsste man eigentlich auch noch einige Punkte vom Schaft des Pfeils zeichnen.
Ihre virtuellen Bildpunkte liegen zwischen den Bildern der Spitze und des Fußes.
Die sind hier weggelassen.
Die Zeichnung zeigt, dass das virtuelle Bild größer ist als der Gegenstand.
So, wie man es erlebt, wenn man sich in einem Hohlspiegel spiegelt.
Der Hohlspiegel ist ein Vergrößerungsspiegel.

Nun wollen wir uns noch überlegen, was passiert, wenn der Pfeil nicht so dicht vor dem Spiegel steht, sondern näher zum Brennpunkt hin:
In diesem Fall werden die beiden Strahlen der Spitze und des Fußendes viel steiler. Und die rückwärtigen Verlängerungen ihrer reflektierten Strahlen treffen sich viel weiter rechts hinter dem Spiegel und viel weiter von der optischen Achse entfernt.
Das hat zur Folge, dass **das virtuelle Bild des Pfeils viel größer** erscheint.

Zehnte Beobachtung:
Je weiter der Gegenstand vom Spiegel entfernt ist, desto größer und desto weiter hinter dem Spiegel erscheint das virtuelle Bild.

Elfte Beobachtung:
Das geht aber nicht beliebig. Plötzlich wird das Spiegelbild riesig, wird verzerrt und löst sich völlig auf.
Das passiert, wenn sich der Gegenstand **in der Entfernung des Brennpunktes** befindet.
Für Punkte, die nahe der optischen Achse liegen, gibt es gar keine Bildpunkte mehr – sie sind ins Unendliche gerutscht. Und Punkte, die weiter oberhalb oder unterhalb der optischen Achse liegen, haben nur noch verzerrte virtuelle Abbilder. **Ein klares virtuelles Bild ist nicht mehr erkennbar.**

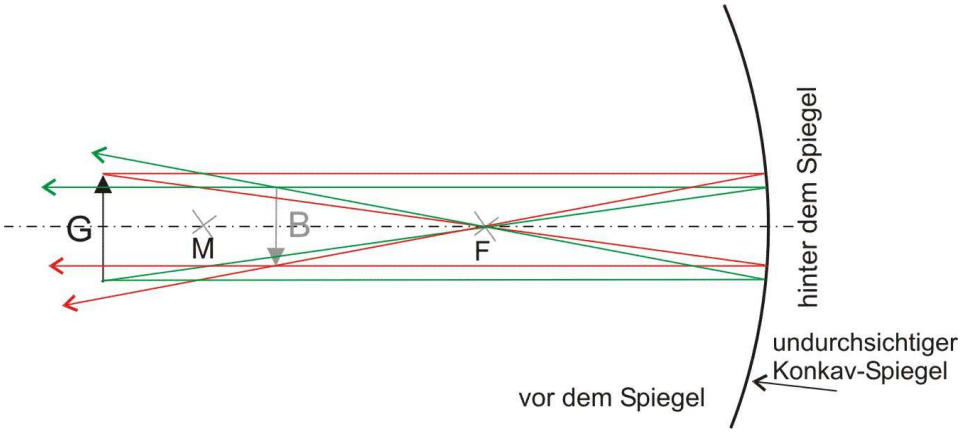
Zwölfte Beobachtung:
Und wenn der Gegenstand noch weiter weg geschoben wird, dann sieht man auf einmal ein vergrößertes Bild, das auf dem Kopfe steht.
Dieses Kopfbild wir immer kleiner, wenn der Gegenstand immer weiter vom Spiegel wegrückt.
Der Mond und die Sterne sind solche Gegenstände, die sehr weit sind vom Spiegel eines Spiegelfernrohrs.
Und noch etwas kann man bei genauem Hinsehen erkennen: **das Kopfbild „schwebt“ *vor* dem Spiegel! Man kann es auf einem kleinen Schirm auffangen – ein wirkliches, ein reelles Bild!**

II. Der Fernrohr- Spiegel

(a) Der Fall, dass der Gegenstand weiter vom Spiegel entfernt ist als der Mittelpunkt M

Dreizehnte Beobachtung:
Wenn man sich aus genügend großer Entfernung vor dem Spiegel betrachtet, dann sieht man sich auf dem Kopf und verkleinert.

Wie kommt das?
In der nachfolgenden Konstruktionsskizze ist so ein Fall gezeichnet.



Diese Konstruktion soll nun beschrieben werden.
Die beobachtete Tatsache, dass wirklich ein, wenn auch verkleinertes, getreues Bild entsteht, beweist uns, dass bei allen Punkten eines Gegenstandes jeder sein eigenes Spiegelbild hat.
Wenn wir also ein getreues Spiegelbild sehen, dann kann es nur so entstanden sein, dass – *Punkt für Punkt* - alle Strahlen, die vom Gegenstand auf den Spiegel fallen, so reflektiert werden, dass sie sich auch wieder alle in einem einzigen Punkt treffen, ehe sie weiter gehen.

Das hilft uns auch, von jedem Gegenstandspunkt den Spiegelpunkt zu finden!
Schon, wenn wir nur von zwei Strahlen eines Punktes ihren Verlauf kennen und zeichnen können, dann verrät uns ihr Schnittpunkt, wo der gesuchte Spiegelpunkt liegt.

Von drei Strahlen eines Gegenstandspunktes können wir immer ihren genauen Verkauf angeben:

- dem Parallelstrahl,
- dem Brennstrahl und
- dem Mittelpunktsstrahl.

Darum nennt man diese die „Hauptstrahlen“.
Zwei dieser Strahlen genügen schon für die Konstruktion, denn ein Punkt wird schon durch genau zwei sich kreuzende Geraden oder Strecken oder Strahlen bestimmt.
Wir haben dieses Verfahren ja schon bei der Konstruktion des vergrößerten virtuellen Bildes benutzt, dort haben uns die Brennstrahlen und die Mittelpunktstrahlen der Pfeilspitze und des Fußendes geholfen.

In der neuen Konstruktion benutzen wir den Brennstrahl und den Parallelstrahl (der Mittelpunkts-strahl geht hier außerhalb am Spiegel vorbei, deshalb können wir ihn nicht nehmen).

Wir verfolgen zuerst die beiden Strahlen von der Pfeilspitze (rot):
Der Parallelstrahl wird durch den Brennpunkt reflektiert, und
der Brennstrahl wird als Parallelstrahl zurückgeworfen.
Sie schneiden sich diesmal unterhalb der optischen Achse und nicht hinter dem Spiegel, sondern davor. Dort liegt das Bild der Pfeilspitze.

Nun kommt der Fußpunkt (grün) dran:
das gleiche Spiel; der Schnittpunkt der beiden reflektierten Strahlen liegt oberhalb der optischen Achse, Und dort liegt das Bild des Fußendes.

Alle übrigen Punkte des Pfeils liegen dazwischen, wir haben es nur nicht ausprobiert.

Das Bild des Pfeils steht auf dem Kopf und ist verkleinert.
Die Konstruktion zeigt uns genau das, was wir am Spiegel beobachtet haben.
Und dabei können wir noch ganz was Neues entdecken:

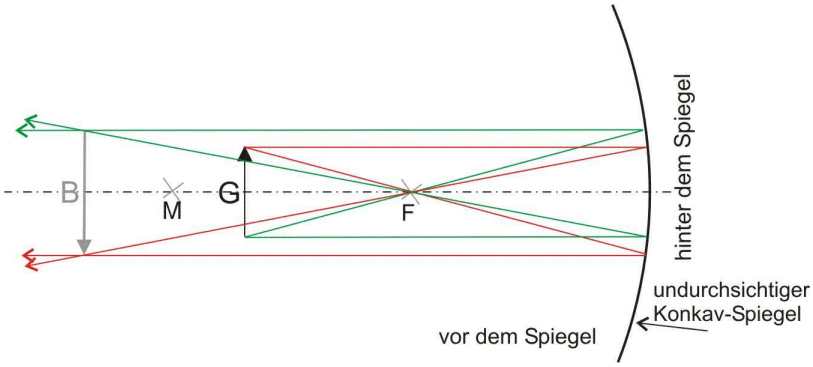
Vierzehnte Beobachtung:
Das Bild ist nicht hinter dem Spiegel, sondern schwebt **davor** im Raum!
Es ist kein virtuelles Bild, sondern ein reelles, wirkliches Bild.
Man kann es sehen! **Es steht vor dem Spiegel!** Man kann es sogar auf einem kleinen Schirm auffangen, wenn man damit nicht den ganzen Strahlengang verdeckt! Wenn man zum Beispiel als Gegenstand eine kleine Lampe nimmt, lässt sich das Bild, ein scharfer Lichtfleck, auffangen.

Fünfzehnte Beobachtung:
Je weiter der Gegenstand vom Spiegel wegrückt, desto näher rückt das Bild zum Brennpunkt hin.
Und je näher er dem Spiegel kommt, desto weiter rückt das Bild vom Brennpunkt weg.
Wenn der Gegenstand bei M steht, dann steht auch das Bild bei M und ist genau so groß wie der Gegenstand. Allerdings steht es auf dem Kopf.

Sechzehnte Beobachtung:
Wenn der Gegenstand noch näher an den Spiegel rückt, dann ist das Spiegelbild vergrößert.

(b) Der Fall, dass der Gegenstand näher am Spiegel steht als der Mittelpunkt M, aber weiter, als der Brennpunkt

Die Konstruktion wird genau so durchgeführt, wie beim Fall (a); und die Beschreibung gleicht auch der vorigen.
Darum genügt es, die Konstruktion selbst zu zeigen:



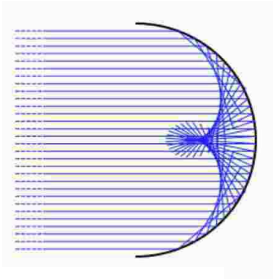
Die Konstruktion zeit, was wir erwartet haben: Das Bild ist größer als der Gegenstand.
Wenn der Gegenstand eine Lampe ist, eine Kerze vielleicht, – ganz einfach, weil das ein recht heller Gegenstand ist, dann kann man das Bild links bei B mit einem Schirm, auf einem Blatt Papier, auffangen! **Es ist ein echtes, reelles vergrößertes Bild**.

Die Konstruktion unterscheidet sich von der vorigen kaum. Die als Brennstrahlen reflektierten Parallelstrahlen haben sogar denselben Verlauf;
aber die Brennstrahlen sind wegen der größeren Nähe zum Brennpunkt steiler; und deswegen verlaufen ihre reflektierten Strahlen jetzt in einem größeren Abstand von der optischen Achse.

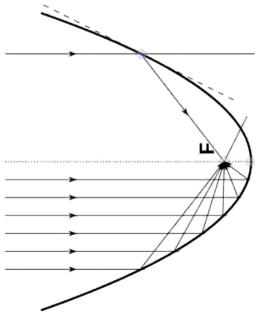
Wenn der Hohlspiegel sich in einem Fernrohr befindet, dann wird das reelle Bild dort, wo es entsteht, mit einem Okular (das ist eine Lupe) noch weiter vergrößert und beobachtet.

II. Parabol-Spiegel

Wenn man einen starken weit strahlenden Lichtkegel erzeugen will, in welchem die Lichtstrahlen alle parallel sind – also paralleles Licht - , dann ist ein parabelförmig gekrümmter Spiegel besser geeignet als ein sphärischer Spiegel.
Das liegt daran, dass beim sphärischen Spiegel die reflektierten Randstrahlen nicht mehr parallel sind. Umgekehrt wird ein Parallelbündel nicht sauber im Brennpunkt gesammelt.
Das Sonnenlicht kann für ein fast paralleles Bündel angesehen werden. Wenn es auf einen sphärischen Spiegel fällt (das kann auch die Innenwand einer Regentonne sein, ein Ring, eine Kaffeetasse, ein Edelstahltopf), dann sieht man, dass es nicht in genau einem Punkt gesammelt wird, sondern in einem gewölbten Lichtfeld. Dieses Lichtfeld heißt „Katakaustik“ , aus dem Altgriechischen übersetzt: „Brennfleck-Umgebung“



Katakaustik beim sphärischen Spiegel



Beim Parabolspiegel werden Parallelstrahlen exakt im Brennpunkt F gesammelt und erlauben die volle Licht-, Wärme- oder Schall-Ausbeute.
Umgekehrt erzeugt eine in den Brennpunkt gesetzte Strahlenquelle exakt parallele reflektierte Strahlen. [alle drei Abbildungen aus wikipedia]

E. Lichtbrechung - Optische Linsen

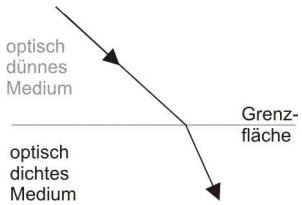
Die Lichtstrahlen durchdringen das Vakuum (den Weltraum), die Luft und alle anderen durchsichtigen Gase, das Wasser und alle anderen durchsichtigen Flüssigkeiten sowie alle durchsichtigen Körper, zum Beispiel Glas (mineralische Gläser wie Fensterglas, Gläser aus Kunststoffen (Acrylglas, PVC-Glas, biologisches Linsen usw.)) und durchsichtige Kristalle.

Im Vakuum und allen einheitlichen (homogenen) Stoffen breitet es sich gradlinig und allseitig aus.
Im Vakuum hat es die größte Geschwindigkeit: ungefähr 300.000 Kilometer pro Sekunde.
Wenn man es in einem Glasfaserkabel um die Erde leiten würde, dann würde es in einer Sekunde siebeneinhalb mal die Erde umkreisen.
Vom Mond bis zur Erde braucht es auch etwa eine Sekunde, und zurück nochmal eine,
von der Sonne zur Erde acht Minuten
und von den Sternen, den Fixsternen, mehrere bis viele, viele tausend Jahre.
In Luft ist es fast genauso schnell wie im Vakuum.
Aber in den flüssigen und festen Körpern ist es deutlich langsamer.
Wenn das Licht aus dem Vakuum in einen Stoff übergeht, dann wird es an der Grenzfläche plötzlich gebremst, umgekehrt wird es schneller.
Das macht sich dadurch bemerkbar, dass dort an der Grenzfläche der Lichtstrahl geknickt wird.
Das Licht ändert plötzlich seine Richtung.
Diese Erscheinung nennt man **Lichtbrechung**.
Das Vakuum und die durchsichtigen Stoffe nennt man „**optische Medien**“
Einen Stoff, in dem das Licht langsamer läuft, als in einem anderen, nennt man „**optisch dichter**“.
Ein optisch dichteres Medium bricht das Licht stärker als ein optisch dünneres.
Man sagt, „es hat einen höheren Brechungsindex oder eine höhere Brechzahl“.

I. Lichtbrechung an einer ebenen Grenzfläche

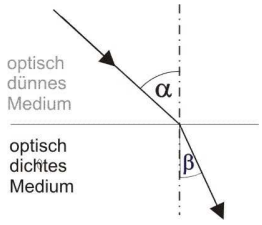
<u>Beobachtung 1:</u>
Wenn man einen Stab, einen Löffel, in einen hohen mit Wasser gefüllten Behälter stellt, und man sieht schräg darauf, dann sieht es so aus, als ob der Löffel einen Knick hätte.
Also schon wieder eine optische Täuschung!
Und wenn man Licht aus der Taschenlampe schräg auf eine Wasserfläche in einem Glasbehälter mit etwas trübem Wasser fallen lässt, dann sieht man – von de Seite her – , wie die Lichtstrahlen an der Grenzfläche geknickt - richtig gesagt: **gebrochen** – werden.

Das sieht in einer Prinzipskizze ungefähr so aus:



Wenn das Licht sehr schräg auf die Grenzfläche trifft, dann ändert sich die Richtung stärker, und wenn das Licht senkrecht von oben auftrifft, dann geht es ungebrochen ins dichtere Medium hinein.

Damit man sich besser orientieren kann, denkt man sich auf der Grenzfläche eine Senkrechte errichtet, diese wird **Lot** genannt.
Den Winkel zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und dem Lot nennt man „**Einfallswinkel**“, und den Winkel zwischen dem gebrochenen Lichtstrahl und dem Lot den „**Brechungswinkel**“.
Das ist ein bisschen willkürlich; denn wenn das Licht umgekehrt aus dem dichten Medium von unten her an die Grenzfläche kommt, müsste man diesen Winkel Einfallswinkel nennen, und den auf der Austrittsseite Ausfallswinkel (*oder „Wegbrechungswinkel“ !*).

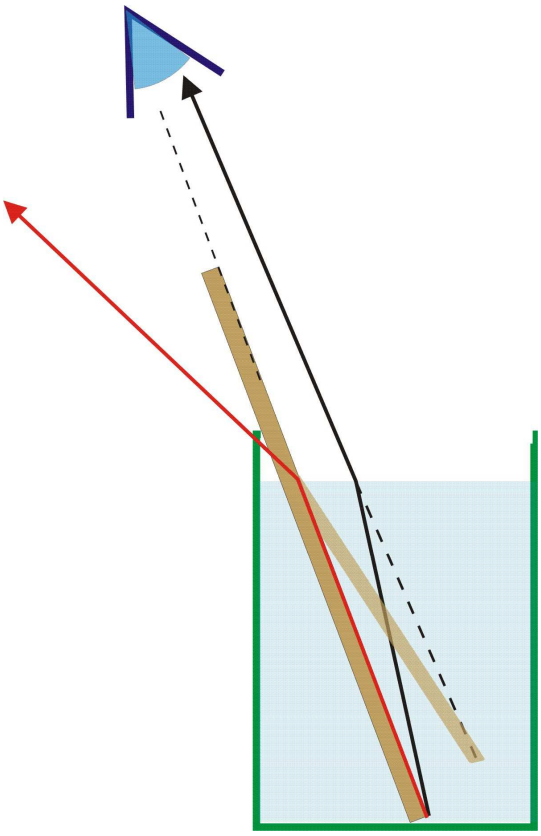


Wir können unsere Beobachtung so beschreiben:
Geht das Licht vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium, dann wird es zum Lot hin gebrochen;

Geht das Licht vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium, dann wird es vom Lot weg gebrochen.

“Dünnes Medium = großer Winkel / dichtes Medium = kleiner Winkel“ zwischen Lot und Strahl**!**

Der scheinbar geknickte Stab

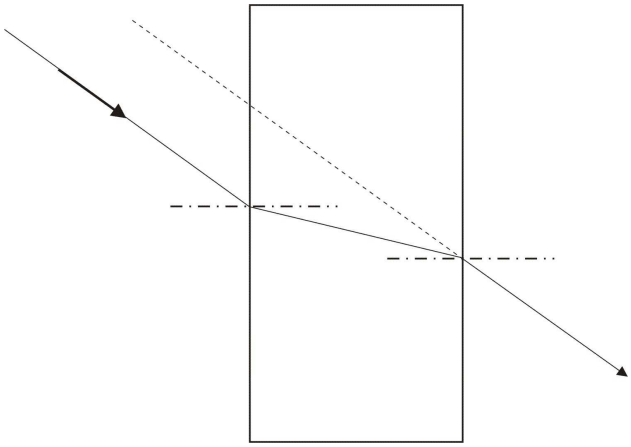


In einem mit Wasser gefüllten Glas steht schräg ein Holzstab.
Wenn wir am Stab entlang sehen, scheint er an der Grenzfläche Luft–Wasser ***nach oben*** geknickt zu sein. Wie kommt das?

Wir verfolgen einen Lichtstrahl (rot), der vom Stabende dicht am Stab entlang läuft: er wird an der Wasseroberfläche nach außen gebrochen – er geht ja vom dichteren Medium Wasser in das dünnere Medium Luft.
Der kommt aber gar nicht in unser Auge!

Von dem Stab-Ende gehen aber noch viele andere Lichtstrahlen aus. Und einer von ihnen wird an der Grenzfläche so nach außen gebrochen, dass er gerade in unser Auge trifft.
Das Auge merkt nichts von dieser Brechung, und unser Gehirn denkt, der Lichtstrahl kommt auf dem geraden Weg aus dem Wasser.
Das Stab-Ende scheint bei der rückwärtigen Verlängerung dieses Lichtstrahls zu liegen, an einer Stelle, wo der Stab in Wirklichkeit gar nicht ist.

II. Lichtbrechung an einer planparallelen Glasplatte



Glas ist ein optisch dichteres Medium als Luft.

Fensterscheiben können als planparallel angesehen werden, wenn auch nicht ganz präzise.

Ein Lichtstrahl, der aus der Luft **schräg** auf eine solche Platte trifft, wird beim Eintritt in das Glas zum Lot hin gebrochen.
Der Winkel zwischen dem gebrochenen Strahl und dem Lot ist kleiner als der Einfallswinkel.

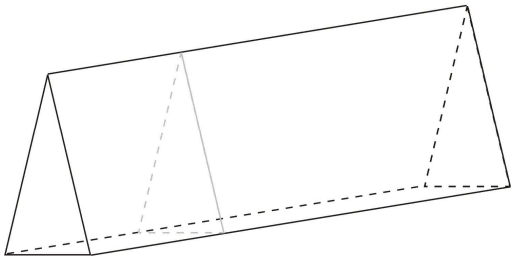
Wenn der Strahl auf der anderen Seite wieder das Glas verlässt, trifft es dort unter dem gleichen Brechungswinkel Winkel auf, wird aber nun
beim Übertritt in die Luft vom Lot weg gebrochen,

und zwar unter dem einem Winkel, der genau so groß ist,
wie der Einfallswinkel am Anfang. Daher setzt er seinen Weg in der gleichen Richtung fort, aus der er am Anfang gekommen war. Nur ist er jetzt seitlich verschoben.

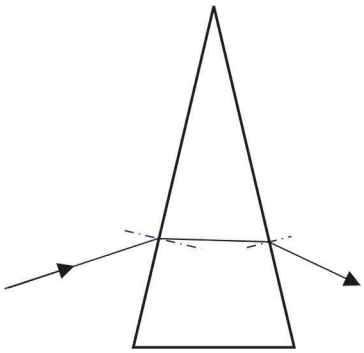
Wenn die Platten so dünn sind, wie Fensterscheiben oder Bildergläser, dann ist diese seitliche Verschiebung nur ganz gering und fällt nicht auf.

III. Lichtbrechung an einem spitzen dreiseitigen optischen Prisma

Man kann es sich als einen Abschnitt von einem dreikantigen Glasstab mit glatt polierten ebenen Flächen vorstellen, wie im Bild:



Im Querschnitt sieht man nur das spitz-winklige Dreieck.



Wenn ein Lichtstrahl von der Seite durch ein solches Prisma hindurchgeht, dann wird es zweimal aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt.

Zuerst wird der aus der Luft auftreffende Lichtstrahl beim Eintritt in das Glas an der linken Prismenfläche zum Lot hin gebrochen.
Wenn der Strahl im Innern des Prismas an die rechte Grenzfläche kommt, wird er beim Übergang in die Luft vom Lot der rechten Prismenfläche weg gebrochen.

Prismen werden zur Umlenkung von Lichtstrahlen in Prismenfeldstechern und Scherenfernrohren, in Spiegelreflex-Kameras und vielen anderen optischen Geräten gebraucht.

Außerdem in Spektroskopen zur Zerlegung des Lichts in seine farbigen Bestandteile.

Abhängig vom Verwendungszweck werden spitzwinklige, stumpfwinklige und rechtwinklige Prismen verwendet.

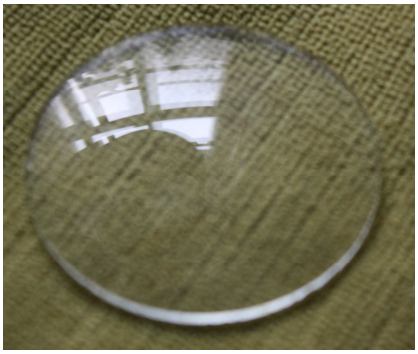
IV. Linsen

Ich meine nicht jene Linsen, die in einer leckeren Linsensuppe oder einem Linsensalat zu finden sind. – Ich meine die **optischen Linsen**.

Wenn man durch Linsen hindurchblickt, dann sieht man die Wirklichkeit vergrößert, verkleinert, auf dem Kopf oder richtig herum – je nach dem, wie weit man die Linse vor das Auge hält.

Auch Linsen bilden also die Wirklichkeit einigermaßen wahrheitsgetreu ab, sie erzeugen Bilder wie die konkaven und konvexen Spiegel.

Solche Linsen kann man in fast allen optischen Geräten finden. Beispielsweise als Objektive von Photoapparaten, als Objektive und Okulare von Fernrohren und Mikroskopen, als Türspione, Lupen und in Brillen. Meist **runde gewölbte Glasscheiben** aus mineralischem Glas oder Kunststoff. Und im Auge? Ein „Glaskörper“ aus Eiweiß.
Auch in unseren Augen sind Linsen.



Je nach ihrer Form sammeln oder zerstreuen sie das Licht beim Durchgang durch das Glas.

Ihre Oberfläche ist nach außen (konvex) oder nach innen (konkav) gewölbt.

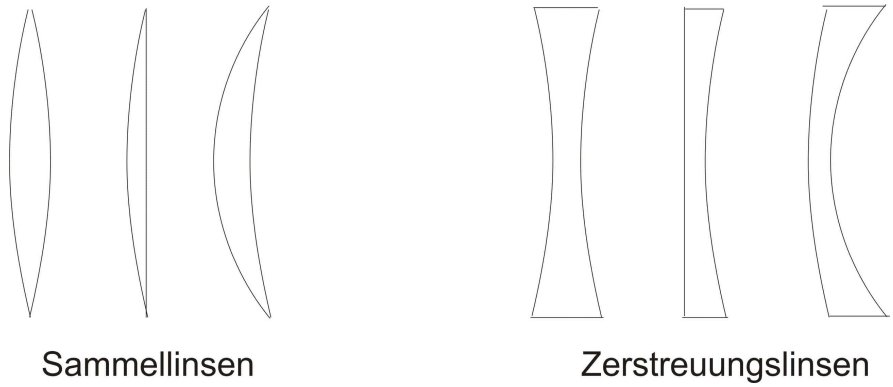
Meisterns ist diese Wölbung ein Stück einer Kugeloberfläche. Im Querschnitt sieht man daher immer ein Stück eines Kreises.

Es gibt **zwei Sorten von Linsen**:

1. Solche, die in der Mitte dicker sind als am Rand (so wie Linsen-Früchte).
Sie heißen **Konvex-Linsen** oder **Sammellinsen**; denn sie sammeln das Licht.

2. Und solche, die in der Mitte dünner sind als am Rand.
Sie heißen **Konkav-Linsen** oder **Zerstreuungslinsen**; denn sie zerstreuen das Licht.

Im Querschnitt kann man sofort erkennen, um welche Sorte es sich handelt



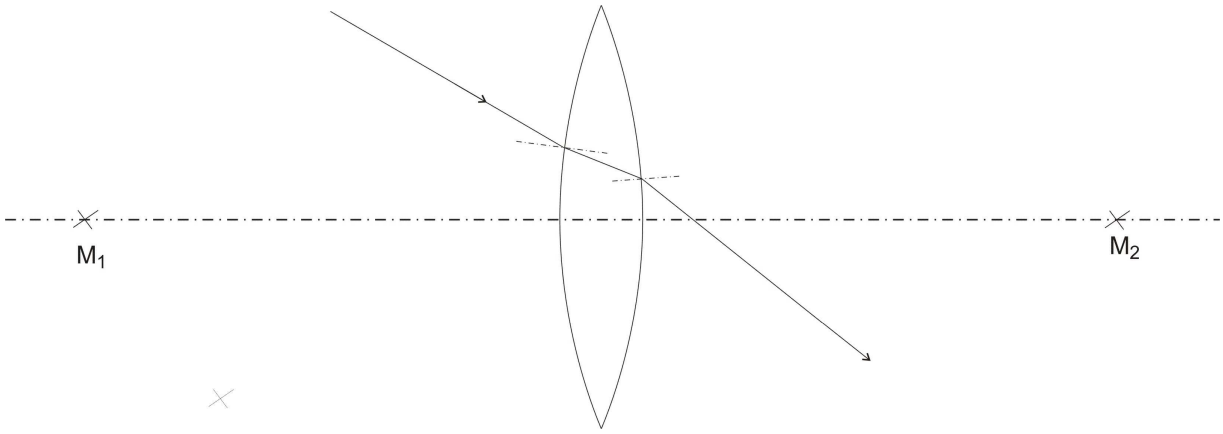
1. Wenn Lichtstrahlen durch Sammellinsen hindurch gehen …

Weil auch Linsen, wie die Spiegel, Bilder erzeugen, werden wir uns genau ansehen, wie die Linsen mit den Lichtstrahlen umgehen.

Aus der Luft ins Glas – vom optisch dünnen ins optisch dichte Medium:

Wenn sie schräg auf die Überfläche treffen, werden sie zum Lot hin gebrochen;
und beim Austritt vom Glas in die Luft vom Lot weg!

Wir wollen es uns an einer Bi-Konvex-Linse ansehen:



Die Sammellinse ist hier im Querschnitt dargestellt. Darin erscheinen die Kugeloberflächen als Kreisbögen. Die Mittelpunkte dieser Kreisbögen – und damit auch der Kugelflächen – sind die Punkte M_1 und M_2 . Durch diese beiden Punkte und durch den Linsenmittelpunkt verläuft die optische Achse.

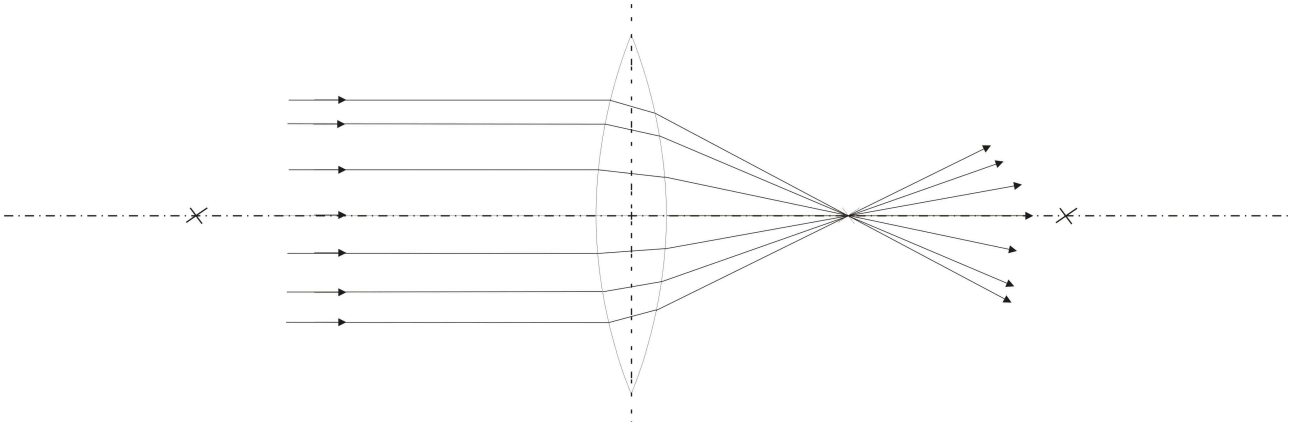
Ein Lichtstrahl kommt schräg von links oben auf die Linse. Das Lot auf dieser Fläche ist eine Gerade, die durch den rechten Mittelpunkt M_2 geht.
Der Brechungswinkel ist kleiner als der Einfallswinkel des Lichtstrahls.

Dann trifft dieser auf die rechte Grenzfläche und wird dort vom Lot weg gebrochen. Dieses Lot ist eine Gerade, die durch den links liegenden Mittelpunkt M_1geht.

Im Prinzip erfolgt die Brechung genau so wie beim Prisma.
Wie der Strahl gebrochen wird, hängt nur von der Richtung der Strahlen und von der Neigung der Grenzflächen ab.

Wie laufen nun durch dieselbe Linse Strahlen, die aus anderen Richtungen kommen?

Stahlen, die parallel zur optischen Achse auf die Linse fallen:



Beobachtung 2:

Das Bündel aus parallelen Strahlen, das in der Richtung der optischen Achse auf die Linse fällt, wird so gebrochen, dass alle Strahlen in einem gemeinsamen Punkt zusammen laufen.

Von dort aus laufen sie weiter, wie ein Bündel, das aus einer Punktlichtquelle kommt.

Nun kann man verstehen, wieso solche Linsen „Sammellinsen“ heißen.

Wenn das Parallellicht von der Sonne kommt, dann ist es in dem Sammelpunkt sehr heiß, so dass man sich darin den Finger verbrennen kann.

Der Sammelpunkt heißt daher „Brennpunkt“. Meistens kennzeichnet man ihn mit dem Buchstaben F (lateinisch: focus).

Schon die Menschen im Altertum (antikes Griechenland) haben große Sammellinsen hergestellt. Damit konnten sie soviel Sonnenenergie sammeln, das es möglich war, damit die Holzschiffe ihrer Feinde anzustecken.

Vor dreihundert Jahren, als es noch keinen Strom gab und keine Bunsenbrenner oder Schweißbrenner, habe die Alchimisten (so hießen die Leute, die sich schon damals mit der chemischen Umwandlung der Stoffe beschäftigten – besonders versuchten sie, Gold zu machen - , die Vorläufer der Chemiker) schon mit großen Brenngläsern und Sonnenlicht sehr heiße Temperaturen erzeugt und konnten Metalle und Gläser, sogar Ton, schmelzen.

Die oben im Schema gezeigte Sammellinse ist symmetrisch: man kann sie genauso gut auch anders herum drehen. Sie hat also nicht nur zwei Krümmungsmittelpunkte – für jede Fläche einen – sondern auch zwei Brennpunkte, auf jeder Seite einen.

Beobachtung 3:

Dieser Fokus liegt genau in der Mitte zwischen dem Linsenmittelpunkt und dem rechten Krümmungsmittelpunkt M_2

In der Konstruktionsskizze stimmt das.

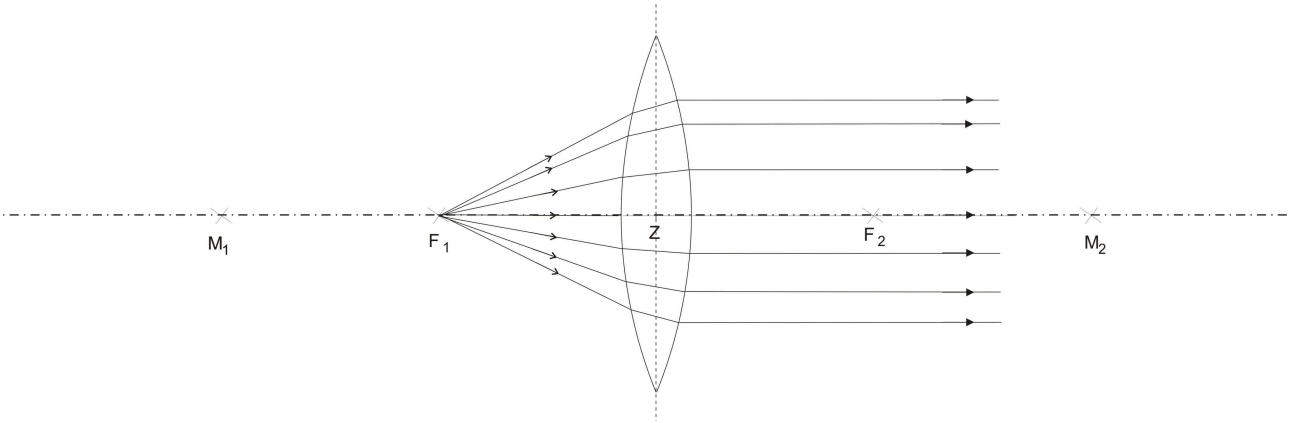
Aber es ist ein etwas idealisiertes Bild!

In der Wirklichkeit treffen sich nicht alle Strahlen genau in einem Punkt; ***besonders die Randstrahlen sind „ungenaue Brüder“. Darum werden sie in optischen Geräten meistens ausgeblendet, oder sie müssen mit optischen Tricks korrigiert werden.***
Auch stimmt es nicht, dass der Brennpunkt **genau** in der beschriebenen Mitte liegt; nur, wenn die Linsen nicht besonders dick sind, stimmt es.

Nun kann man sich schon denken, was passiert, wenn wir die Strahlen genau anders herum zu der Linse schicken – wenn wir also die Strahlen rückwärts laufen lassen, den Lichtweg umkehren!

Wenn wir in den Brennpunkt F_2 eine Punktlampe (z.B. eine ganz kleine Kerzenflamme) setzen und die Strahlen verfolgen, die auf die Linse treffen?! – Und wenn wir die Kerze in den Brennpunkt F_1 bringen? – Vermutlich werden sie so gebrochen, dass sie als paralleles Lichtbündel entlang der optischen Achse auf der anderen Seite herauskommen!

Das können wir in einem Versuch überprüfen: Und es ist so, wie es das nächste Bild zeigt:



Beobachtung 4:

Ein divergentes Bündel, das aus einem Brennpunkt der Linse kommt und auf die Linse fällt, wird so gebrochen, dass das Licht als Bündel paralleler Strahlen die Linse auf der anderen Seite in der Richtung parallel zur optischen Achse verlässt.

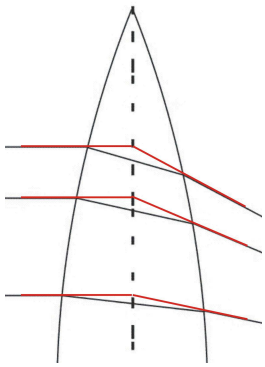
Genau so gut hätten wir die Punktlichtquelle in den Brennpunkt F_2 stellen können, dann wären die Parallelstrahlen nach links aus der Linse gekommen.

Wir wissen nun schon:
Aus Parallelstrahlen werden Brennstrahlen. Und

aus Brennstrahlen werden Parallelstrahlen.

Wie beim Hohlspiegel.

Was wir an einer symmetrischen Sammellinse gefunden haben, findet man bei allen Sammellinsen
Wir können mit diesen besonderen Strahlen also auch die Bilder konstruieren, die eine Sammellinse erzeugt!



Wir können uns bei den Konstruktionsskizzen sogar die Arbeit etwas leichter machen, wenn wir **von der Linse nur die Spur der Mittelebene zeichnen und so tun, als ob die zweimalige Brechung dort in einem stattfände.**
Wir schieben also schematisch die brechenden Grenzflächen zusammen.

Dass wir dabei keinen großen Fehler machen, zeigt uns die kleine Neben-Skizze: schwarz gezeichnet der wirkliche Strahlenverlauf

und rot gezeichnet das schematische Verfahren.

Bildkonstruktionen eines Gegenstandspfeils an einer Sammellinse

Beobachtung 5:
Wenn wir eine etwas dickere Linse weit vom Auge entfernt halten und hindurch sehen, dann sehen wir die Welt auf dem Kopf.
Halten wir sie aber dicht vors Auge, dann erscheinen die Gegenstände, die wir betrachten, richtig herum und mehr oder weniger vergrößert.

Das ist der Sinn der Lupe, die uns damit hilft, sehr kleine Gegenstände oder das berüchtigte „Kleingedruckte“ zu lesen. Besonders, wenn man im Supermarkt die Inhaltstoffe lesen will, muss man meistens eine Lupe dabei haben!

2. Die Sammellinse als Lupe

Wir sehen mit der Lupe ein vergrößertes Bild, das hinter dem wirklichen Bild zu sein scheint und dort aber gar nicht sein kann!

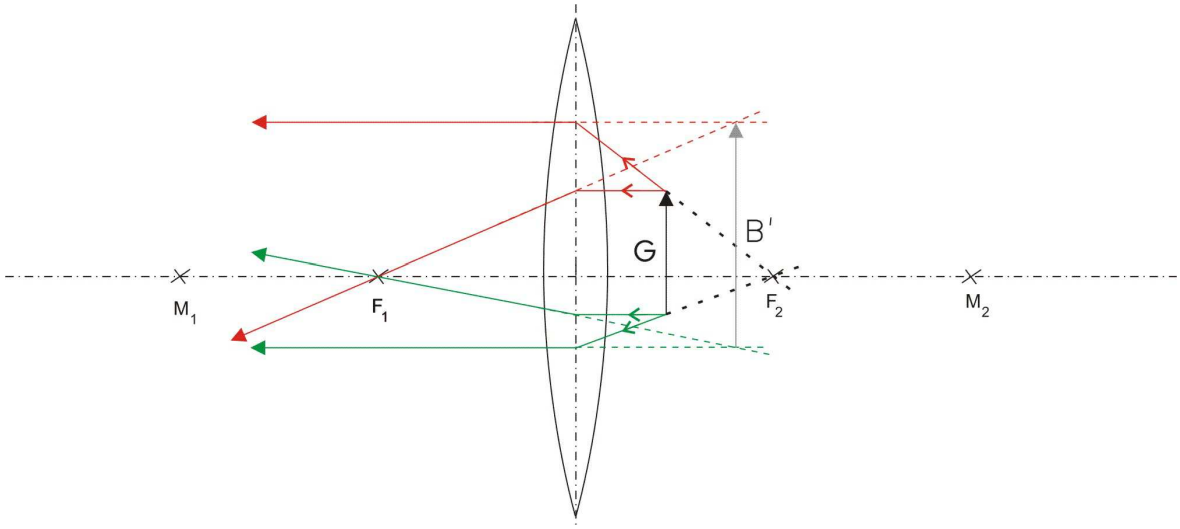
Es handelt sich wieder einmal um eine *optische Täuschung*, und das Bild, das wir sehen, ist ein virtuelles (unwirkliches) Bild.

Wie entsteht das bei der Linse?

Erstmal müssen wir uns erinnern, dass das virtuelle Bild ein getreues Bild des wirklichen Gegenstandes ist.
Strahlen, die von den Gegenstandspunkten ausgehen, werden von der Lupe in Bildpunkten gesammelt – anders kann es gar nicht sein, denn sonst käme ja kein Bild zustande!

Die Lichtstrahlen, die unser Auge treffen, scheinen von den Bildpunkten des virtuellen Bildes zu kommen und nicht vom betrachteten Gegenstand selber. Wie in der nächsten Skizze.

Von den vielen Strahlen, die von jedem Gegenstandspunkt ausgehen, brauchen wir wieder (wie beim Spiegel) nur die besonderen Strahlen für die Konstruktion. Sie heißen auch bei den Linsen „Hauptstrahlen“: wir nehmen den **Parallelstrahl** und den **Brennstrahl**.



Die zwei ausgewählten Strahlen aus dem Licht, das von der Spitze ausgeht, sind wider rot gezeichnet, und die aus dem Fußpunkt des Pfeils grün.

Der rote Parallelstrahl wird in der Linse zum Brennstrahl gebrochen, so dass er durch F_1 geht.

Sofern er in unser Auge (das man sich links außerhalb des Bildes denken muss) fällt, meinen wir, er käme wirklich aus dieser Richtung, aus der gestrichelt gezeichneten rückwärtigen Verlängerung!

Der von der Pfeilspitze nach oben abgehende Strahl hat die *Richtung* vom Brennpunkt F_2 her, ist also der Brennstrahl, auch wenn er nur von der Spitze und nicht aus dem Brennpunkt direkt kommt. Er wird in der Linse zum Parallelstrahl gebrochen. Als solcher wird er vom Auge auch wahrgenommen, keine Ahnung kommt dem Gehirn, dass er ursprünglich gar nicht aus dieser Richtung kommt!

Da, wo sich rückwärts die roten Strahlen treffen. vermutet unser Verstand die Spitze des Pfeils, ganz wo anders, als in Wirklichkeit.

Auch alle anderen, hier nicht eingezeichneten Strahlen, die von der Pfeilspitze aus auf die Linse treffen, scheinen infolge der Brechung aus diesem vermuteten Punkt zu kommen.

Es ist der erste Bildpunkt des wirklichen Pfeils – nicht vorhanden, aber dort gesehen.

Genau so muss man sich die Verwandlung der Strahlen vorstellen, die von den sämtlichen Punkten des Pfeil-Schaftes ausgehen.

Nur vom Fußpunkt sind nochmal zwei gezeichnet – wieder der Parallel- und der Brennstrahl.

Auch sie (und alle anderen nicht gezeichneten Strahlen) treffen sich rückwärts, scheinen aus diesem links liegenden virtuellen Punkt zu kommen und bilden das virtuelle Bild des Fußpunktes.

Durch die Verbindung von Spitzenbild und Fußbild zeigt sich der ganze virtuelle Pfeil, **das vergrößerte aufrecht stehende virtuelle Bild** der Wirklichkeit – das scheinbare, nur auf optischer Täuschung beruhende **Lupenbild**.

(Bei der Skizze habe ich von der Vereinfachung Gebrauch gemacht, statt der tatsächlichen beiden Brechungen an der Linse die schematische „Knickung“ an der Mittelebene der Linse zu nehmen, wie in der Nebenskizze auf der vorigen Seite gezeigt ward.)

Das Lupenbild ist immer ein vergrößertes aufrecht stehendes virtuelles Bild des Gegenstandes.

Seiner virtuellen, unwirklichen Natur nach, kann man es natürlich auf einem Schirm nicht auffangen – wo nichts ist, kann man nichts auffangen!

Auch Brillengläser, die eine Weitsichtigkeit ausgleichen sollen, sind Lupen.

3. Die Sammellinse als Projektionslinse in der Optik von Diaprojektoren, Beamern und als Objektiv in Mikroskopen[1]

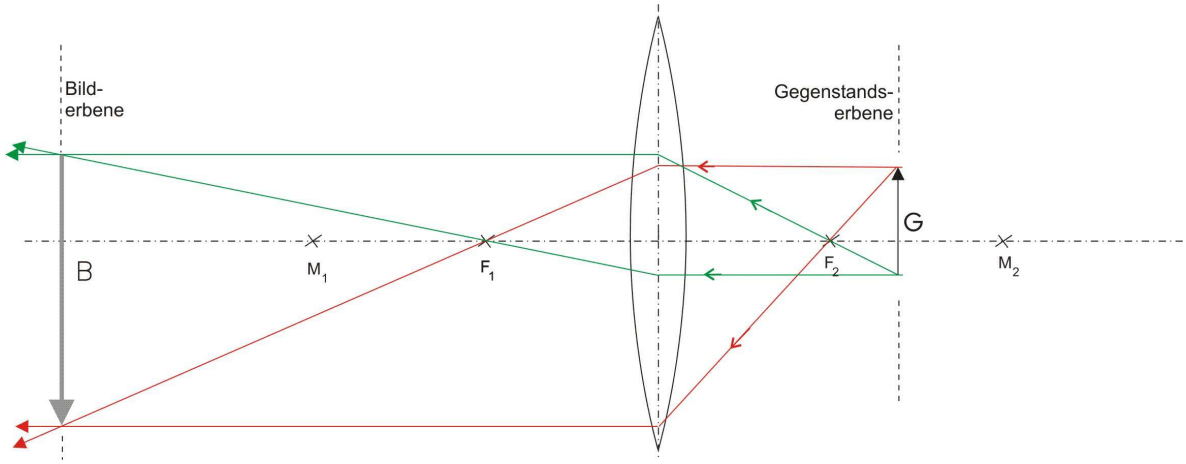
Beobachtung 6:

Einen **Diaprojektor** kennt fast jeder noch, auch wenn die Dia-Zeit schon beinahe Vergangenheit ist. Da wird ein Dia verkehrt herum in den Apparat geschoben, und an der weit entfernten Leinwand entsteht ein echtes aufrechtes, riesig vergrößertes Bild.

Und vom **Beamer** wird auch ein „Dia“, aber ein digitales vom PC oder Laptop erzeugtes, projiziert.

Auch die alten Kinomaschinen, in denen ganze lange Filmrollen abgespielt werden oder wurden, sind oder waren riesenhafte Projektionsmaschinen.

Wie macht die Sammellinse in diesen Geräten das nun aber?



Das ganze Geheimnis liegt darin, dass der Gegenstand nicht mehr zwischen Linse und Brennpunkt sich befindet, sondern jenseits des Brennpunktes zwischen F_2 und M_2 .

Was macht aber dabei den Unterschied aus?

Am besten, wir vergleichen beide Skizzen nochmal genau:

[1] In der optischen Praxis sind es nicht einfache Linsen, sondern aufwendig berechnete, aus mehren Linsen verschiedener Brechkraft zusammengekittete Linsensysteme – das macht **gute** Optik so teuer

Bei der Lupe, wenn der Gegenstand zwischen Brennpunkt und Linse steht – „innerhalb oder in der einfachen Brennweite“, wie die Optiker das nennen - dann laufen die Strahlen nach der Brechung auseinander.

Der Gegenstand steht zu dicht, und die Linse schafft es daher nicht, die Strahlen durch die Brechung zu bündeln, zu sammeln.

Wenn der Gegenstand aber außerhalb der einfachen Brennweite steht, dann werden die Strahlen von der Linse gesammelt, und dann kann auch ein richtiges, **reelles Bild** entstehen.

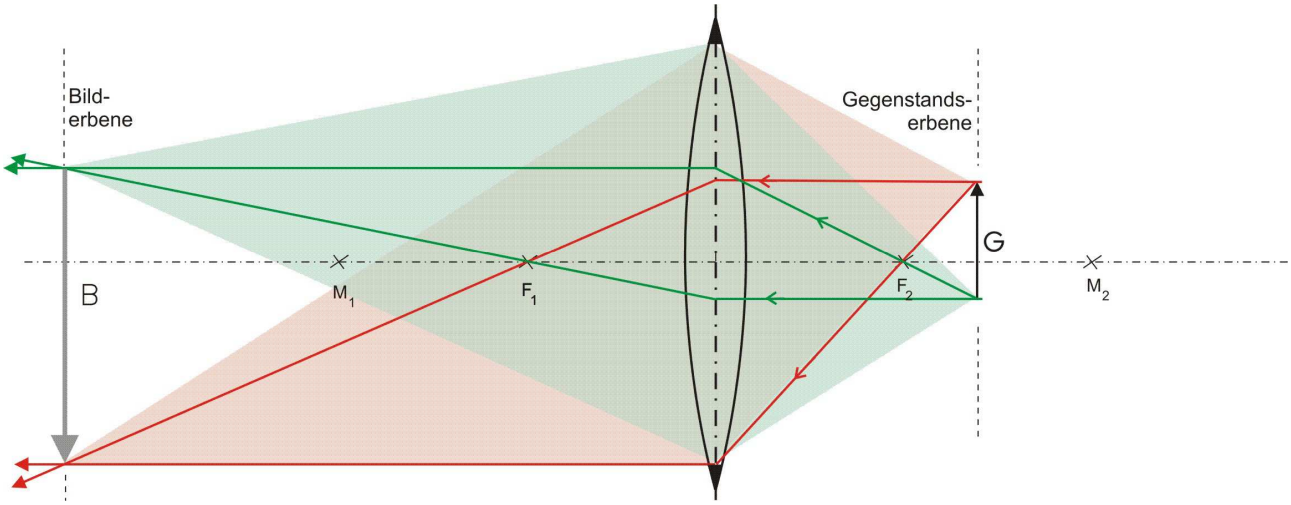
In der Skizze steht der Gegenstand zwischen dem Brennpunkt F_2 und dem Krümmungsmittelpunkt M_2 – man sagt: „**der Gegenstand steht *innerhalb der doppelten Brennweite***“

Das ist so ein Fachausdruck! Was meint: „innerhalb der Brennweite (der einfachen!) steht er nicht, ***aber noch*** innerhalb des doppelten Abstandes“. Das heißt: **zwischen F und M**.

Der Gegenstand steht aber noch so nah bei der Linse, dass ihre Sammelkraft noch nicht sehr stark ist; deswegen treffen sich die Strahlen eines Punktes erst weit hinter der Linse, jenseits der linken doppelten Brennweite. Und ***je weiter außen sie sich treffen***, desto größer werden die Abstände, und ***desto größer wird das Bild.***

Ein innerhalb der doppelten Brennweite stehender Gegenstand hat ein reelles vergrößertes auf dem Kopf stehendes Bild.

Wie sieht denn das Bild aus, wenn wir von der Pfeilspitze und dem Fußende alle Strahlen, die auf die Linse fallen, darstellen – die ganze Lichtflut, die beiden vollen Kegel?

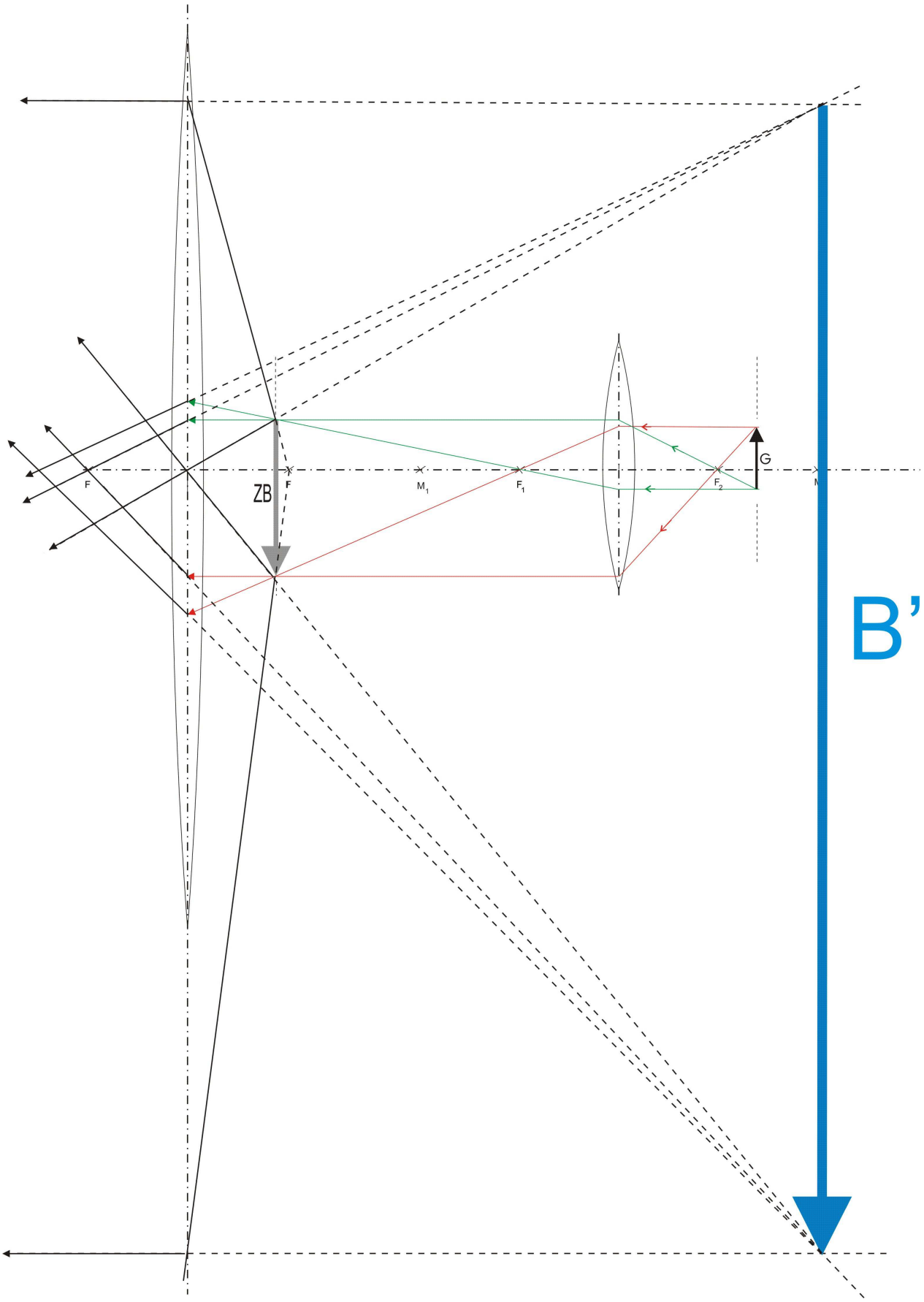


Wenn wir nun auch die Lichtkegel zeichnen wollten, die genau so von den anderen Punkten allen ausgehen, dann könnte man vor lauter „Licht“ die Einzelheiten gar nicht mehr erkennen – also ist es besser, man lässt sie in der Skizze weg!

Wir könnten aber an der Spitze und am Fußende des Pfeils je einen Scheinwerfer anbringen und die Linse beleuchten: das sähe dann so aus, wie im Bild. Allerdings nur, wenn die Luft dazwischen voll Rauch ist, denn in der klaren Luft sieht man das Licht ja gar nicht, man sieht nur die beleuchteten Gegenstände!

Beim **Mikroskop** möchte man natürlich an Vergrößerung alles herausholen, was möglich ist. Da geht man mit einer möglichst stark brechenden Sammellinse, dem Objektiv, möglichst nahe an den Gegenstand – das „Präparat“ – heran – fast bis an die Brennweite.

Das vergrößerte reelle Bild fängt man aber nicht auf einem Schirm auf, sondern betrachtet dieses - – „Zwischenbild“ (ZB) genannte – reelle Bild noch im Rohr des Mikroskops, dem „Tubus“, mit einer Lupe – dem Okular. Dadurch wird eine weitere Vergrößerung gewonnen. – Im Prinzip so, wie in der folgenden Konstruktion:



Hier in dieser Prinzip-Zeichnung kann man sehen, was im Mikroskop passiert.
Neben das von der Objektiv-Linse (rechts) erzeugte reelle Bild ZB (links) des Gegenstandes G wird von links die Okularlinse als Lupe so dicht herangestellt, dass das ZB innerhalb der einfachen Brennweite der Lupe. aber ziemlich dicht bei deren Brennpunkt ist.

Es sind wieder nur Strahlen von den beiden Pfeilenden gezeichnet, und zwar die Hauptstrahlen die vom ZB weiter zur Lupe gehen:

zunächst die Parallelstrahlen, die in den linken Brennpunkt der Lupe gebrochen werden;
dann die Brennstrahlen, die (aus dem rechten Brennpunkt der Lupe kommen würden!) durch die Brechung zu Parallelstrahlen werden.

Dort, wo die rückwärtigen Verlängerungen dieser gebrochenen Strahlen sich schneiden, liegt das virtuelle Lupenbild B'.

Einer der Parallelstrahlen fällt in Wirklichkeit unter den Tisch, weil die Lupenlinse nicht groß genug ist. Für das Prinzip ist das aber nicht schlimm. (Alle Strahlen tragen zur Bildentstehung bei!) Aber zur Absicherung der Konstruktion sind zwei weitere **Hauptstrahlen** eingezeichnet – die **Mittelpunktsstrahlen**. Sie haben die Eigenschaft, dass sie fast ungebrochen durch die Linse gehen.
Sie ändern beim Durchgang durch den Linsenmittelpunkt ihre Richtungen nicht. (Nur eine gewisse Parallelverschiebung, wie bei der planparallelen Platte findet statt.)

Die beiden Strahlen, die aus dem linken Brennpunkt F_1 der Objektivlinse kommen, treffen auch die Lupe; sie können jedoch für die Konstruktion des Lupenbildes nicht genutzt werden, weil es für die Lupe keine Hauptstraheln sind, man ihren Verlauf also nicht vorhersagen kann..

Ihr Verlauf konnte nur gezeichnet werden, weil die Bildpunkte der Spitze und des Fußes schon mit Hilfe der Hauptstrahlen gefunden waren.

Im Ganzen zeigt die Prinzipskizze sehr deutlich, wie von dem sehr kleinen Gegenstand G ein sehr großes Bild B' entstehen kann.

Wenn der Benutzer des Mikroskops von links in das Okular hinein sieht, dann sieht er nur das riesig vergrößerte Bild. ohne irgendwelche Teile des Mikroskops selbst. Das virtuelle Bild „schwebt" gewissermaßen, abgeschirmt vom Außenlicht, vor ihm im Raum.

In der Praxis haben Mikroskope nicht so breite Linsen, wie es in der Prinzipskizze gezeichnet ist.

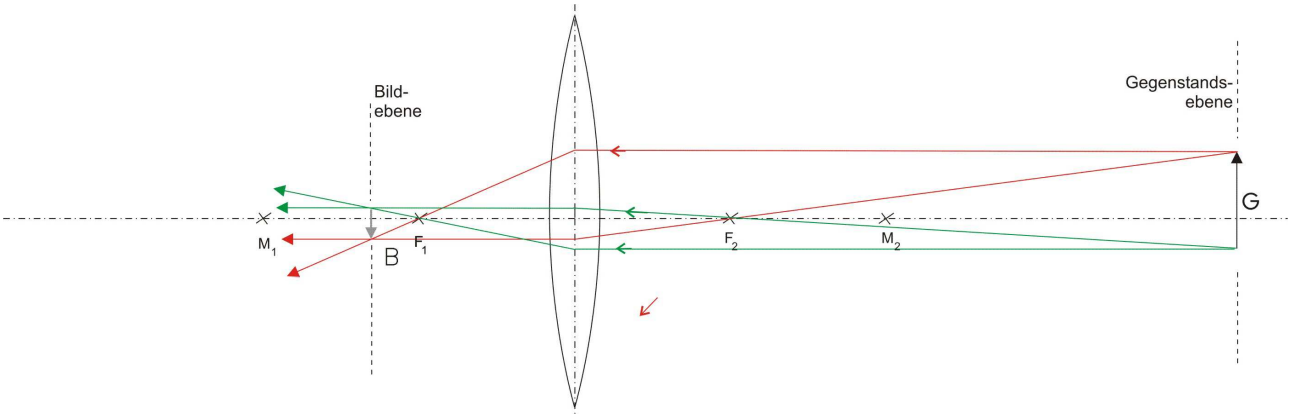
Die Okular-Linsen haben Durchmesser von ungefähr einem Zentimeter, die Objektive sind noch kleiner. Für die Brechung und Bilderzeugung reichen die mittleren Teile der Linsen völlig aus. Randstrahlen würden nur stören.

Die Sammellinse als Objektiv beim Photoapparat – und im Auge

<u>Beobachtung 7:</u>

Anders als beim Mikroskop sind die Gegenstände, die der Photoapparat betrachtet, meist sehr weit entfernt, sie stehen außerhalb der doppelten Brennweite. Nur in besonderen Fällen, für Nahaufnahmen, ist die Optik so eingerichtet, dass der Gegenstand innerhalb der doppelten Bennweite stehen kann. Allerdings nicht so extrem nah, wie beim Mikroskop.

Meistens sind die Verhältnisse aber so, wie prinzipiell in der folgenden Skizze.



Das Bild ist ein verkleinertes reelles umgekehrtes Bild. in der Bildebene wird es aufgefangen.

Dort befindet sich der Film oder die digitale Pixel-Sensor-Platte – oder die Netzhaut des Auges.

Die Schnittpunkte der Parallel- und der Brennstrahlen nach der Brechung geben uns die Lage und die Größe des Bildes an.

Die Objektive der guten Photoapparate haben berühmte Namen. Eines von ihnen war das jahrzehntelang beste Normalobjektiv von ZEISS, das „Zeiss-Tessar“ mit einer Brennweite von 50 Millimeter (in dem zu DDR-Zeiten enteigneten Jenaer Stammwerk wurde es als „Jena-T“ weitergebaut).

Wenn man mit diesem Objektiv einen 10 Meter entfernten Gegenstand photographiert, dann entsteht das Bild im Abstand von **50**,***25126*** Millimeter vom opt. Linsenmittelpunkt, also nur etwas mehr als ein Viertel Millimeter neben dem Brennpunkt innerhalb der doppelten Brennweite.

Und das Bild eines 1 Kilometer entfernten Turmes entsteht nur **0,0035** mm neben dem Brennpunkt! Das entspricht etwa $^{1}/_{10}$ Haardurchmesser!

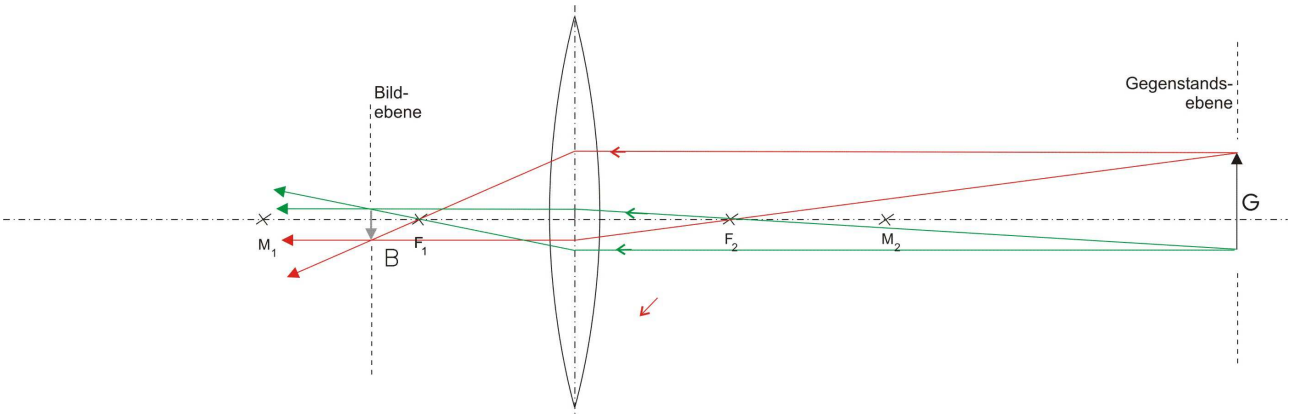
Wie präzise muss die optische Feinmechanik gearbeitet sein für ein genaues und scharfes Bild **!**

5. Die Sammellinse als Objektiv von Fernrohren

Die Ferne, die man mit einem Feldstecher betrachten will, liegt, wie meist beim Photoapparat, so weit weg, dass der Gegenstand, der ferne Baum zum Beispiel, sich weit außerhalb der doppelten Brennweite der Objektiv-Linse befindet.

Schon wenn man durch eine einfache Sammellinse einer Lupe die Ferne betrachtet, sieht man sie verkleinert auf dem Kopf stehen.

Wo entsteht das Bild? – Und wieso ***vergrößert*** das Fernrohr?



Die Schnittpunkte der Parallel- und der Brennstrahlen nach der Brechung geben uns die Lage und die Größe des Bildes an. Es ist wieder ein reelles umgekehrtes Bild, **aber sehr verkleinert!**

Wie soll ein Apparat, der ein verkleinertes Bild erzeugt, die ferne Wirklichkeit näher und größer erscheinen lassen???

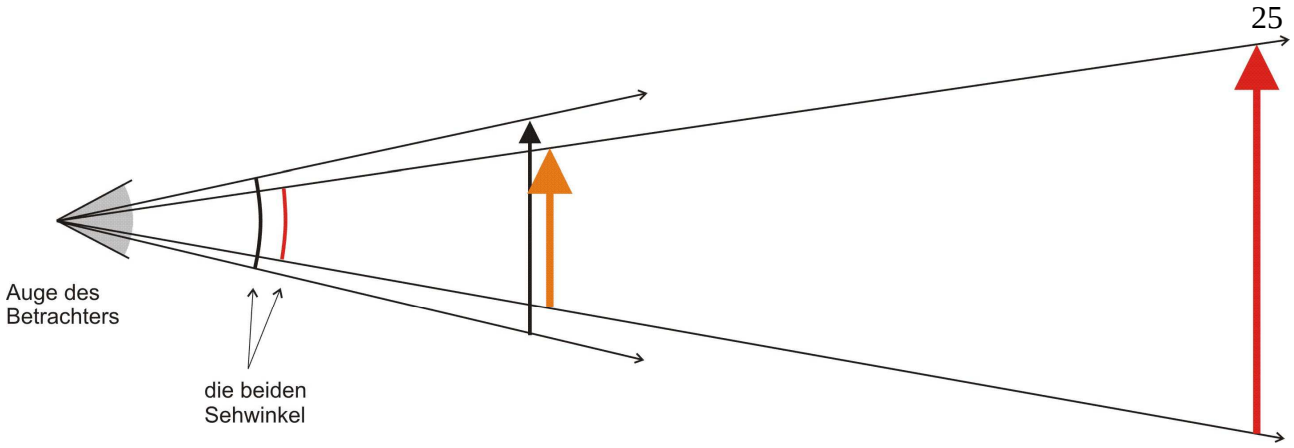
Der Gegenstand liegt weit außerhalb der doppelten Brennweite, weit jenseits von M_2.
Und das viel kleinere Bild liegt zwischen dem Brennpunkt F_1 und dem Krümmungsmittelpnkt M_1, also in der doppelten Brennweite.

Je weiter außerhalb der Gegenstand steht, desto näher rückt das Bild an den Brennpunkt heran und um so kleiner ist es. (Wie beim Photoapparat.)

Für den Eindruck, das Gefühl, ob ein Gegenstand als größer oder kleiner empfunden wird, kommt noch eine weitere optische Größe ins Spiel, die wir bis jetzt noch gar nicht beachtet haben:

der Sehwinkel .

Egal, welchen Gegenstand wir auch betrachten, immer erscheint er uns unter einem bestimmten Sehwinkel. Was damit gemeint ist, das kann man aus der folgenden Skizze lernen:



Der nahe kleinere schwarze Pfeil erscheint unter einem kleineren Sehwinkel als der entferntere größere rote Pfeil.

Beobachtung 8:

Wenn der nahe Gegenstand beispielsweise ein Haus und der ferne Gegenstand ein hoher Berg ist, dann verschwindet der Berg hinter dem Haus, obwohl der Berg viel größer ist als das Haus..
Das haben wir alle bestimmt schon mal mit Bewußtsein gesehen.

Aus Erfahrung wissen wir, dass der Berg viel größer ist, als das Haus. Unser Gehirn sagt uns automatisch, dass der Berg in diesem Fall eben weit entfernt ist.

Ein kleinerer Sehwinkel kann für das Gehirn einen kleineren Gegenstand oder einen entfernteren großen Gegenstand bedeuten. Welche Entscheidung es ***unbewusst*** trifft, hängt von der Erfahrung und vom Umfeld ab. Beim Haus und dem Berg wird automatisch des Haus als nah und der Berg als fern empfunden.

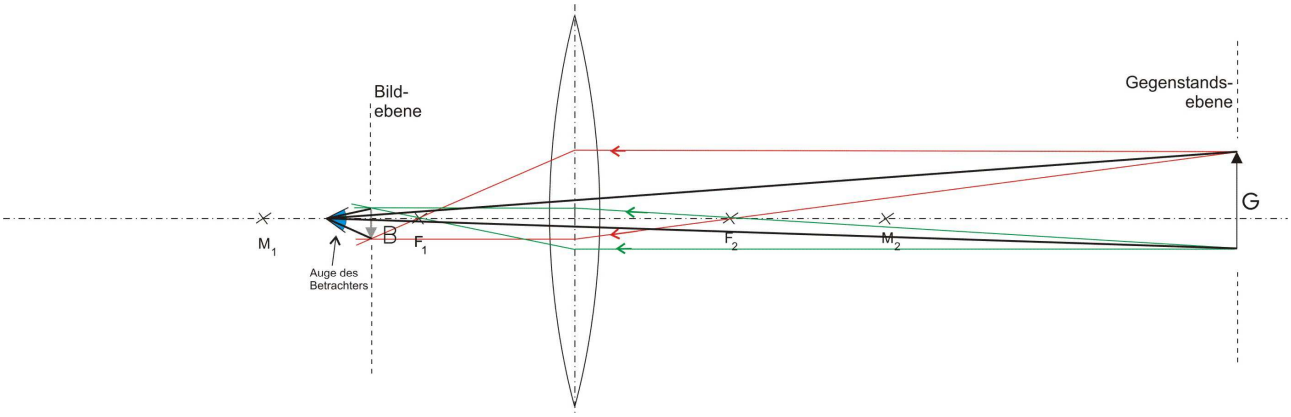
Wenn wir keine Anhaltspunkte für die Entfernung zweier Gegenstände haben, werden wir den für größer halten, dessen Sehwinkel größer ist.
In der Abbildung ist das der schwarze Pfeil.

Ein und derselbe Gegenstand, den wir einmal unter einem kleineren, ein andermal unter einem größeren Sehwinkel erblicken, scheint uns ferner oder näher zu sein. Und da stimmt es auch.

Wenn wir ein kleines und ein großes Bild von einem bestimmten unbekannten Gegenstand haben (oder in der Landschaft aufgestellte Attrappen), ohne Anhaltspunkte über die Entfernung und die Größe, dann werden wir die Bilder möglicherweise für gleich groß aber unterschiedlich weit entfernt halten.

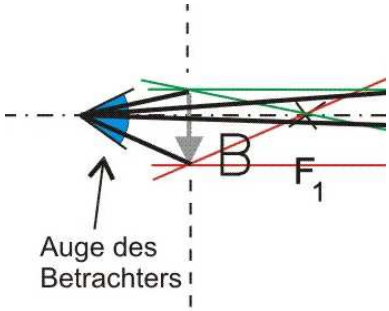
Bei der Betrachtung von Gegenständen mit und ohne Feldstecher haben wir den Eindruck, dass sie durch den Feldstecher näher gerückt werden. Dabei ist nur der Sehwinkel größer geworden.

Und nun bei der Fernrohrlinse:



Wenn man nur mit dem Auge nah genug an das Bild B herankommt, dann erscheint selbst das verkleinerte Bild des entfernten Gegenstandes G unter einem größeren Sehwinkel, als der Gegenstand ohne Fernrohrlinse erscheint.

Das zeigen die aus dem Auge hervorkommenden schwarz gezeichneten Seh-Strahlen, die einmal das Bild B und zum andern den Gegenstand G erfassen. Hier noch einmal im Detail: →



Das Bild erscheint größer als der Gegenstand, obwohl es viel kleiner ist („subjektive Vergrößerung“)**.**

Möglicherweise kann man aber wegen der großen Nähe das Bild nicht mehr scharf erkennen. Dann müssen wir eine Lupe nehmen, so wie wir es ja auch gewöhnlich tun, wenn eine Schrift oder ein kleiner Gegenstand zu klein ist. Und wirklich ist an einem Fernrohr dort, wo oben das Auge eingezeichnet ist, eine Lupe angebracht – sie heißt nur nicht so; sondern wird „Okular“ genannt.

Außer der Nähe bewirkt die Lupenvergrößerung eine zusätzliche Aufweitung des Sehwinkels.

Der Strahlengang im Okular ist prinzipiell der gleiche wie beim Mikroskop. Das reelle Bild B der Fernrohrlinse ist also genau so ein Zwischenbild ZB, das mit einer Okularlupe betrachtet wird.

Das Fernrohr, das ein umgekehrtes Bild erzeugt, heißt Kepler’sches Fernrohr. Der Astronom Johannes Kepler hat es als Erster 1611 gebaut.[2]
Es wird besonders in astronomischen Linsen-Teleskopen benutzt, wo es nicht stört, wenn man den Himmelskörper „verkehrt herum“ sieht – „oben“ und „unten“ sind am Himmel ohnehin relativ.

6. Das Auge

Das eine große Wunder ist, wie in unseren biologischen Zellen ein Programm verborgen ist, das in den kleinen werdenden Wesen zwei optische Instrumente heranwachsen lässt! Und was für gute!

Das andere Wunder, dass „sich“ in den Milliarden Jahren der Entwicklung des Lebens auf der Erde aus biologischen Grundbausteinen überhaupt ein solches Programm „schreiben“ konnte – sich selbst? – Wo wäre aber der „Schreiber“ sonst, als im Kosmos!
Hier schiebt sich in die Gedanken das Wort „Gott“. „Weltgeist“ sagen manche Leute, die dieses Wort als „kritische Geister“ nicht mögen, und manche lassen sogar nur den „Zufall“ wirken. Hinter allen steckt dasselbe Geheimnis.

Im Kosmos sind die Gesetze „aufgeschrieben“, die alle Wunder der Natur und des Lebens bewirken! Längst schon, ehe der menschliche Geist – und auch der ist ein Wunder – nacherfinden konnte, was längst vor ihm bereits entstanden war.

Das Material, mit dem die Natur arbeitet: Eiweißzellen, die lichtdurchlässig sind, durchsichtig und optisch rein und klar, woraus im ungestörten(!) Wachstumsprogramm der Natur Sammellinsen wachsen und uns befähigen, zu **sehen** ! – Und sogar Zoom-Linsen sind es! Längst vor deren technischer Erfindung

Nicht genug damit – auch die Bildempfänger, Millionen von Stäbchen und Zäpfchen, sind seit Millionen Jahren früher da, als die modernen Pixel-Sensoren der Digitalkameras.

Optische Geräte sind es, und gleich zwei, die in unseren Köpfen stecken.

Die wesentlichen Teile: die Sammellinse vorn im Auge und der „Bildschirm“, die Netzhaut hinten.

Und vor der Linse unter der durchsichtigen schützenden Hornhaut eine Irisblende, die je nach Helligkeit und Lichtstrom die Pupille, die Öffnung für die bildbringenden Lichtstrahlen, kleiner oder größer macht – alles ***vollautomatisch*** und ohne Akku oder Batterien.

Die Bilderzeugung ist die gleiche wie beim Photoapparat.

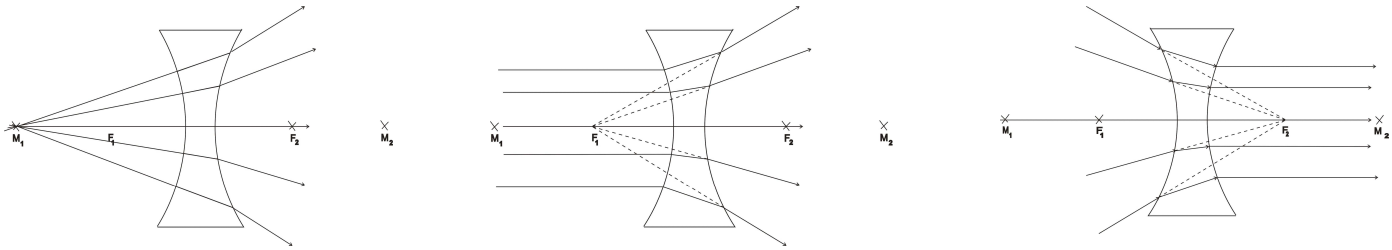
Und entsprechend fein muss das Auge gebaut sein, um sich auf die wechselnden, bald nahen, bald fernen, bald hellen und bald lichtschwachen Gegenstände einzustellen.

[2] Die ersten Fernrohre überhaupt wurden 1608 von Hans Lipperhey (geboren in Wesel, Brillenmacher in Middelburg) und 1609 von Galileo Galilei gebaut – holländische oder Galilei’sche Fernrohre genannt. Sie haben konvexe Objektive und konkave Okulare, erzeugen daher aufrechte Bilder

7. Verkehrte Welt - wenn Lichtstrahlen durch Zerstreuungslinsen hindurchgehen

Hält man eine Konkavlinse vor eine Punkt-Lichtquelle, dann sammelt sie nicht das Licht, sondern sie zerstreue es.

Das sieht in der Prinzipskizze ungefähr so aus (linkes Bild):



Ein Prallel-Lichtbündel ***von links*** entlang der optischen Achse wird so gebrochen, ***als ob*** es nicht aus dem Unendlichen, sondern aus dem diesseitigen, ***linken*** virtuellen „Brennpunkt“ – dem Zerstreuungspunkt – F_1 ***käme*** (mittleres Bild).

Umgekehrt: Ein Bündel von Lichtstrahlen, das ***von links nach rechts*** auf den gemeinsamen ***rechten*** Zerstreuungspunkt F_2 zuläuft, wird so gebrochen, dass es als Parallelbündel *nach rechts* die Linse verlässt (rechtes Bild).

Strahlen, die durch den Linsenmittelpunkt laufen, werden außer einer geringen Parallelverschiebung nicht aus ihrer Richtung gebrochen.

Das sind die drei Hauptstrahlen:

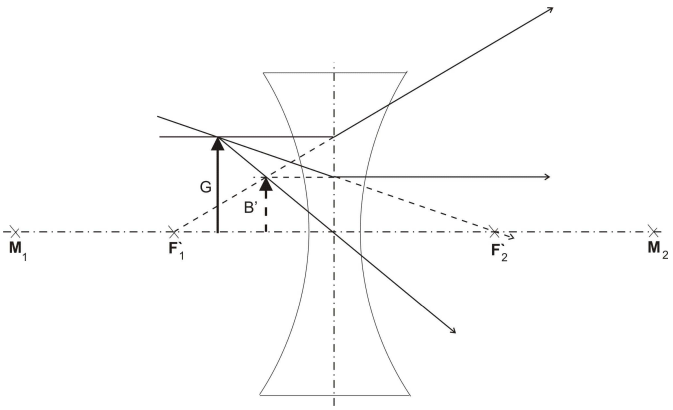
1. der Parallelstrahl, der zum Streustrahl aus dem Brennpunkt wird
2. der auf einen hinter der Linse liegenden Brennpunkt zulaufende Strahl, der zu einem Parallelstrahl wird;
3. der Mittelpunktstrahl, der ohne Richtungsänderung durch die Linse läuft.

<u>Beobachtung 9:</u>

Blickt man durch so eine Linse, sieht man die hinter ihr liegenden Gegenstände **verkleinert**.

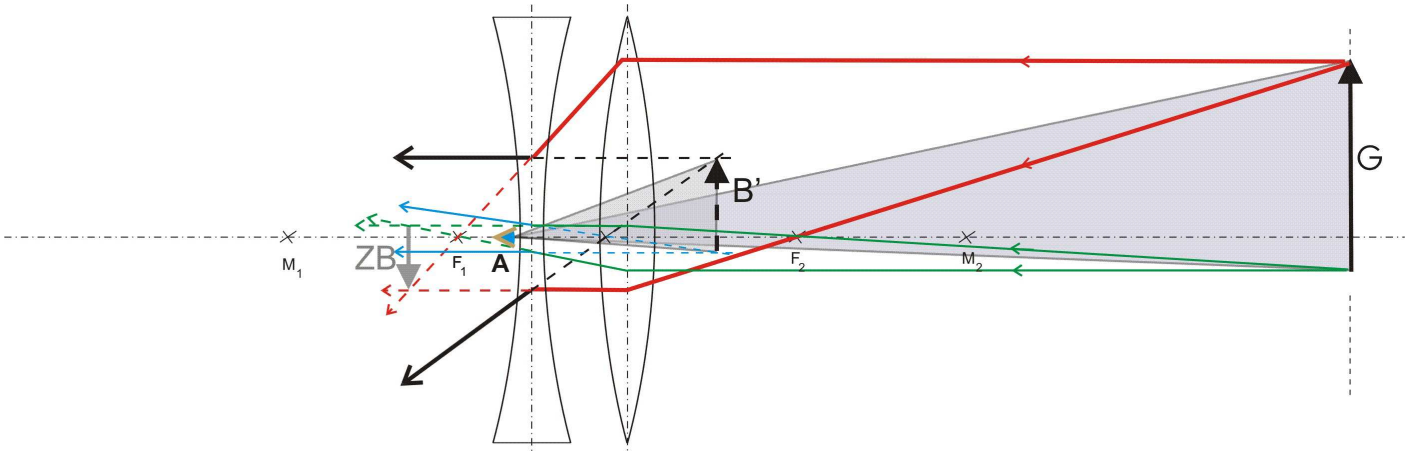
Man erblickt ein aufrechtes Bild, **das es gar nicht gibt** – ein virtuelles verkleinertes aufrechtes Bild – eine optische Täuschung.

Mit den drei Hauptstrahlen (zwei genügen schon) kann man dieses Bild konstruieren.



Das Bild zeigt den Strahlengang wieder schematisch ohne die zweifache Brechung in der Linse.

8. Verkehrte Welt – das holländische oder Galilei'sche Fernrohr



Wir wollen dieses Strahlen- und Liniengewirr Schritt für Schritt aufdröseln.

Zunächst zur Orientierung:

Rechts in der Ferne steht ein **Gegenstand G**, von dem Lichtstrahlen auf eine Sammellinse fallen, und von da aus auf eine Zerstreuungslinse.
Links von dieser Zerstreuungslinse, dicht davor, befindet sich **bei A der Beobachter**.

Eingebaut in ein Fernrohr, ist die Sammellinse das Objektiv, die Zerstreuungslinse das Okular.

Von der Sammellinse wird ein verkleinertes umgekehrtes **reelles Zwischenbild ZB** erzeugt.

Durch das Okular sieht man aber nicht dieses, sondern ein aufrechtes **virtuelles Bild B'**

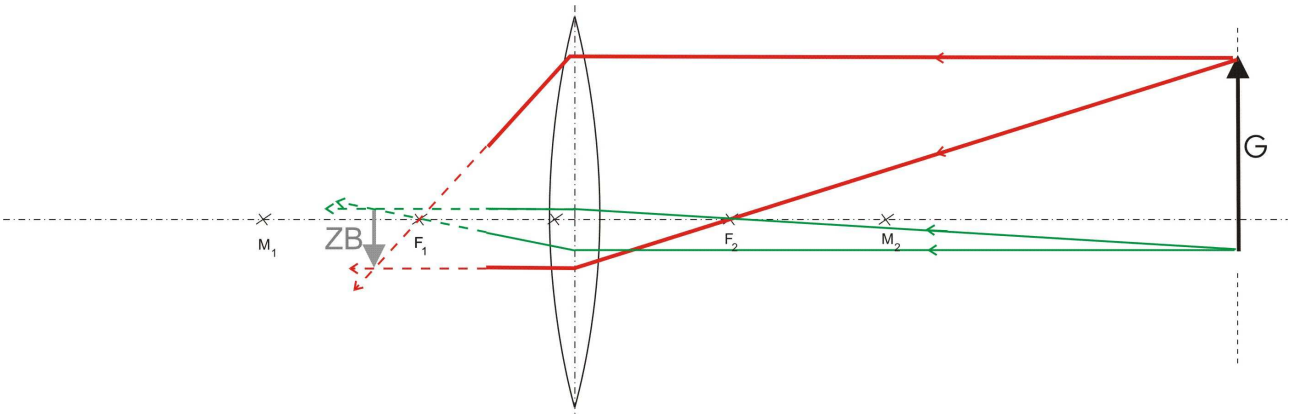
Soweit der Überblick.

<u>Nun zu den Einzelheiten:</u>
Nur von der Gegenstandsspitze und dessen Fußpunkt sind Strahlen gezeichnet.
Rot von der Spitze, grün vom Fußpunkt.

Jedesmal nur der Parallelstrahl und der Brennpunktstrahl, zwei Hauptstrahlen also jedesmal.

<u>Was passiert in der Sammellinse?</u>

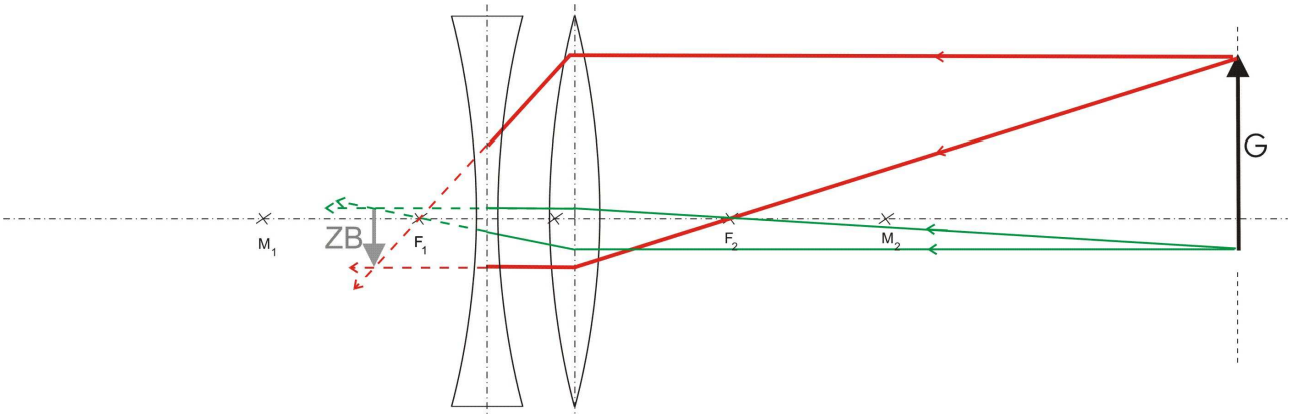
Die Parallelstrahlen werden infolge der Brechung durch den Brennpunkt F_1 der Sammellinse gelenkt, die durch den Brennpunkt F_2 gehenden Strahlen werden zu Parallelstrahlen.
Wäre die Zerstreuungslinse nicht da, würde im Schnittpunkt der gebrochenen roten Strahlen die Pfeilspitze, und im Schnittpunkt der gebrochenen grünen Strahlen das Pfeilende abgebildet sein.
Das würde das Zwischenbild ZB ergeben, so, wie wir es vom reellen Bild der Sammellinse her schon kennen.



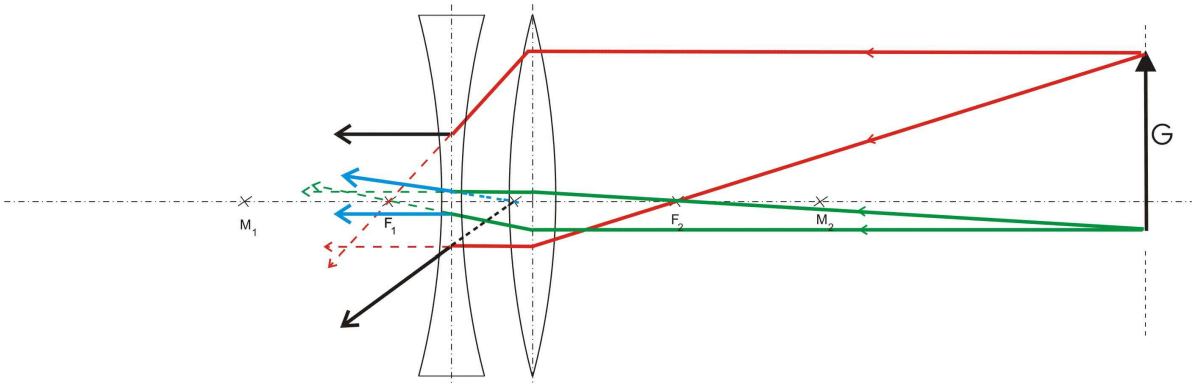
Dieser vertraute Vorgang wird durch das Hinzusetzen der Zerstreuungslinse gestört.

<u>Wohin wird die **Zerstreuungslinse** gestellt, und was passiert mit den eintreffenden Strahlen?</u>

Sie wird zwischen den Brennpunkt F_1 der Sammellinse und diese Linse selbst gestellt;
und zwar so, dass **ihr linker „Brennpunkt“ mit dem linken Brennpunkt der Sammellinse zusammenfällt.**
Die Zerstreuungslinse hat eine kleinere „Brennweite“ als die Sammellinse. Ihr rechter „Brennpunkt“ liegt bei dieser Skizze im Innern der Sammellinse, an deren linkem Rand ist er als Kreuzchen zu erkennen.



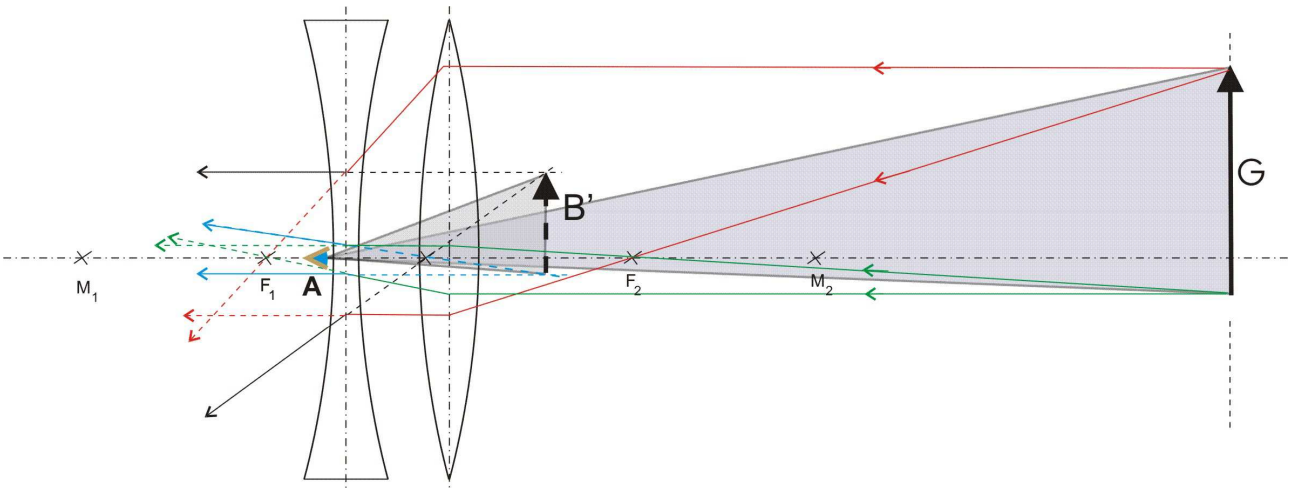
Die Zerstreuungslinse stört den Strahlenverlauf.
Der rote und der grüne Strahl, die von der Sammellinse durch den Brennpunkt F_1 laufen, kommen nur bis zur Zerstreuungslinse und werden dort nach außen gebrochen,
und zwar so, dass sie **die Zerstreuungslinse als Parallelstrahlen verlassen**.
Und die von der Sammellinse kommenden Parallelstrahlen werden in Richtungen gebrochen, **als ob sie aus dem rechten „Brennpunkt“ der Zerstreuungslinse kämen**.



Die rot und die grün gezeichneten Strahlen sind in der Fortsetzung schwarz und blau gezeichnet.
Das Zwischenbild ZB ist nun nicht mehr vorhanden.
Aber wenn man als Beobachter mit dem Auge **A** in die Zerstreuungslinse hineinsieht (nächste Skizze!), dann sieht man die austretenden Strahlen scheinbar aus den Richtungen ihrer rückwärtigen Verlängerungen kommen.
Dort wo die schwarzen Strahlen rechts im Hintergrund scheinbar zusammentreffen, erblickt man die Pfeilspitze; und dort, woher die blauen Strahlen zu kommen scheinen, sieht man den Fußpunkt, und dazwischen liegen alle anderen nicht gezeichneten Punkte.
Man sieht das virtuelle Bild B’.

Obwohl dieses kleiner ist, als der Gegenstand, sieht man es vergrößert!
Ist das wieder eine optische Täuschung?

Ja und Nein:
Das virtuelle Bild B’ erscheint unter einem größeren Sehwinkel, als der wirkliche ferne Gegenstand, und darum sieht man die Gegenstand auch scheinbar größer oder näher.



Je kleiner die „Brennweite“ der Okularlinse ist, desto stärker wird der Sehwinkel aufgeweitet.

∞|∞

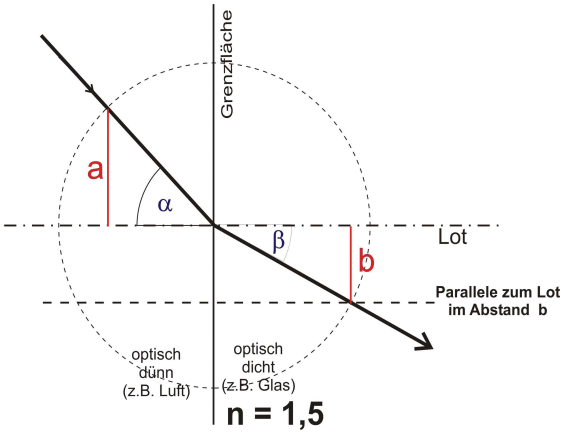
Anhang

Wie man die Richtung gebrochener Strahlen konstruieren kann

Jeder optisch aktive Stoff hat eine bestimmte Brechkraft, die man durch eine Zahl, die **Brechzahl** oder den **Brechungskoeffizienten n** ausdrückt.

Wasser hat beispielsweise die Brechzahl n = 4/3 ≈ 1,3, und Glas (je nach Glassorte) eine Brechzahl um n = 1,5 , Luft fast genau eins und das Vakuum exakt n = 1 .

Was das bedeutet, und wie es sich auf die Richtungsänderung der Strahlen bei der Brechung auswirkt, soll anhand der folgenden Skizze erläutert werden.



Radius des Hilfskreises r = 1 LE

Man muss an der Knickstelle, dort, wo der Strahl an der Grenzfläche aus dem optisch dünneren in das optisch dichtere Medium eintritt, einen Hilfskreis zeichnen, dessen Radius eine Längeneinheit (1 LE) lang ist.

Als nächstes zeichnet man an dieser Stelle das optische **Lot** und den Einfalls- sowie den Brechungswinkel.

Da, wo der einfallende Strahl links den Hilfskreis schneidet, zieht man eine Linie (rot) parallel zur Grenzfläche und senkrecht zum Lot.
Die Länge dieser Senkrechten ist im Bild „**a**“ genannt.

Entsprechend muss dort, wo der gebrochene Strahl rechts den Hilfskreis schneidet, auch eine zum Lot senkrechte Linie vom Strahl zum Lot gezeichnet werden.

Diese Länge dieser Senkrechten ist im Bild mit „**b**“ bezeichnet.

Die Brechzahl 1,5 verlangt, das a 1,5 mal so groß ist wie b. [Allgemein: a = n·b; b = a/n]

Damit b in der Konstruktionsskizze die richtige Länge erhält, zeichnet man eine Parallele zum Lot im Abstand der berechneten Länge von b und bringt sie mit dem Hilfskreis zum Schnitt.

Durch diesen Schnittpunkt (im dichten Medium) muss der gebrochene Strahl gezeichnet werden.

Wenn man die Brechung vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium richtig zeichnen will, muss man umgekehrt verfahren – zuerst b zeichnen, seine Länge messen, a berechnen und aus einer Parallele zum Lot im Abstand a den Punkt bestimmen, in dem der ausgetretene Strahl den Hilfskreis schneidet.

In der beschriebenen Konstruktion steckt das Snellius'sche Brechungsgesetz **a : b = sinα : sinβ = n**

Denn beim Radius r = 1 LE ist die Maßzahl von **a** der Sinus von α und die Maßzahl von **b** der Sinus von β .

Inhaltsverzeichnis und Gliederung

	Seite
Körper Lichtstrahlen, Lichtpunkte, durchsichtige und undurchsichtige Körper, spiegelnde Flächen	1
A. Gesetze bei de Spiegelung an ebenen Spiegeln	2
B. Wie am ebenen Spiegel das Spiegelbild entsteht	3
C. Spiegelung an konvex gewölbten Flächen Bildkonstruktion eines Gegenstandspfeils an einem Konvex-Spiegel	5 7
D. Spiegelung an konkav gewölbten Flächen – Hohlspiegel	7
I. Der Vergrößerungsspiegel	8
II. Der Fernrohr-Spiegel	10
(a) Der Fall, dass der Gegenstand weiter vom Spiegel entfernt ist, als der Mittelpunkt M (b) Der Fall, dass der Gegenstand näher am Spiegel steht, als der Mittelpunkt M, aber weiter als der Brennpunkt	10 11
III. Parabol-Spiegel	12
E. Lichtbrechung – optische Linsen	12
I. Lichtbrechung an einer ebenen Grenzfläche	13
II. Lichtbrechung an einer planparallelen Glasplatte	14
III. Lichtbrechung an einem spitzen dreiseitigen optischen Prisma	15
IV. Linsen	15
1. Wenn Lichtstrahlen durch Sammellinsen hindurch gehen … Bildkonstruktion eines Gegenstandspfeils an einer Sammellinse	16 18
2. Die Sammellinse als Lupe	19
3. Die Sammellinse als Projektionslinse in Diaprojektoren, Beamern und als Objektiv in Mikroskopen Strahlengang im Mikroskop	20 22
4. Die Sammellinse als Objektiv beim Photoapparat	23
5. Die Sammellinse als Objektiv von Fernrohren Der Seh-Winkel	24 24
6. Das Auge	26
7. Verkehrte Welt – wenn Lichtstrahlen durch Zerstreuungslinsen hindurchgehen	27
8. Verkehrte Welt – das holländische oder Galilei'sche Fernrohr	28
Anhang – Wie man die Richtung gebrochener Strahlen konstruieren kann	31
Inhaltsverzeichnis und Gliederung	32