

APMB - Praktikum

Grundlagen

Lernziele des APMB- Praktikums

- Verstehen von optischen Grundsystemen
- erster Einblick in das Messen geometrischer Größen mit optischen Geräten
- richtiger Umgang mit optischen Messinstrumenten
- Erkennen von Einfluss- und Fehlerquellen auf die Messung

Es wurde angestrebt, diese Versuche so zu gestalten, dass auch Studierende Nutzen aus ihnen ziehen können, die noch keine Vorlesungen am Institut für Technische Optik gehört haben.

Was erwartet Sie - und warum haben wir das so gemacht:

- Wir setzen optische Messgeräte ein, die in ihrer **Grundform dem Fernrohr und Mikroskop** nahe kommen. Diese Grundformen können mit relativ geringem Vorwissen verstanden werden und werden in der Anleitung und in der Vorbesprechung eingeführt.
- Es werden bevorzugt **visuelle Messverfahren** gewählt, weil die visuellen Verfahren im ursprünglichen Sinn des Wortes **anschaulich** sind.
- Wir untersuchen möglichst **einfache Messobjekte**, damit das Erklären und Analysieren des Messobjektes die Versuche möglichst wenig belastet und damit das Übertragen der Verfahren auf andere Messprobleme leichter fällt.
- Es werden überwiegend Versuchsaufbauten aus **einfachen Einzelgeräten, Baugruppen und Bauteilen** gezeigt, die als Elemente eines Baukastens in vielfältigen Kombinationen die Lösung vieler unterschiedlicher Messaufgaben zulassen.

Grundlagen der geometrischen Optik

Die im Praktikum eingesetzten optischen Bauelemente lassen sich durch zwei grundlegende Gesetzmäßigkeiten erklären:

- die abbildenden Bauelemente (Linsen) durch das **Brechungsgesetz**:

$$n \cdot \sin(\epsilon) = n' \cdot \sin(\epsilon')$$

oder im achsnahen Gebiet (kleine Einfallswinkel der Strahlen):

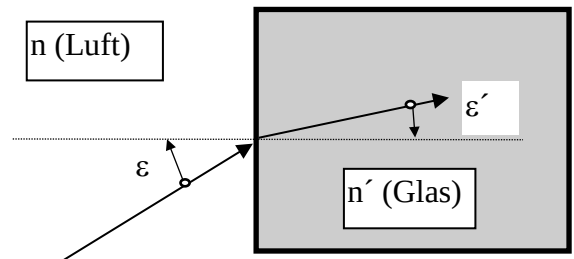
$$n \cdot \epsilon = n' \cdot \epsilon' \quad (\text{Winkel in Bogenmaß eingeben})$$

n, n' : Brechungsindex vor und nach der brechenden Fläche

n (Luft) = 1,0; n (Wasser) = 1,33; n (Glas) = 1,45 .. 1,75

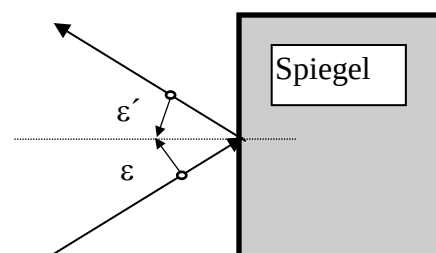
ϵ, ϵ' : Einfallswinkel und Ausfallswinkel

In Worten: Geht ein Strahl vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium (z.B. von Luft in Glas), so wird er zum Einfallslot hin gebrochen



- die ablenkenden Bauelemente (Spiegel) durch das **Reflexionsgesetz**:

$$\epsilon' = -\epsilon$$



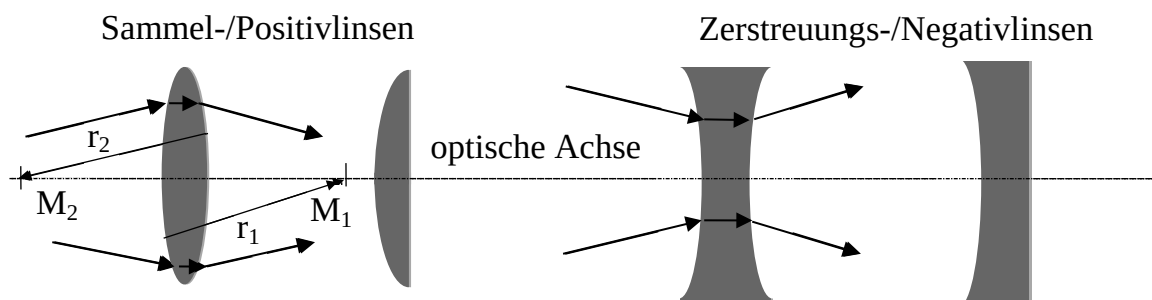
Linsen in Luft:

Linsen, die in der Mitte dicker sind als am Rande, brechen die Lichtstrahlen zur optischen Achse hin. Sie werden *Sammel- oder Positivlinsen* genannt.

Linsen, die in der Mitte dünner sind als am Rande, brechen Lichtstrahlen von der optischen Achse weg. Sie werden *Zerstreuungs- oder Negativlinsen* genannt.

Die *optische Achse* ist die Verbindungsgerade der Krümmungsmittelpunkte der brechenden Flächen.

Beispiele für Linsen:



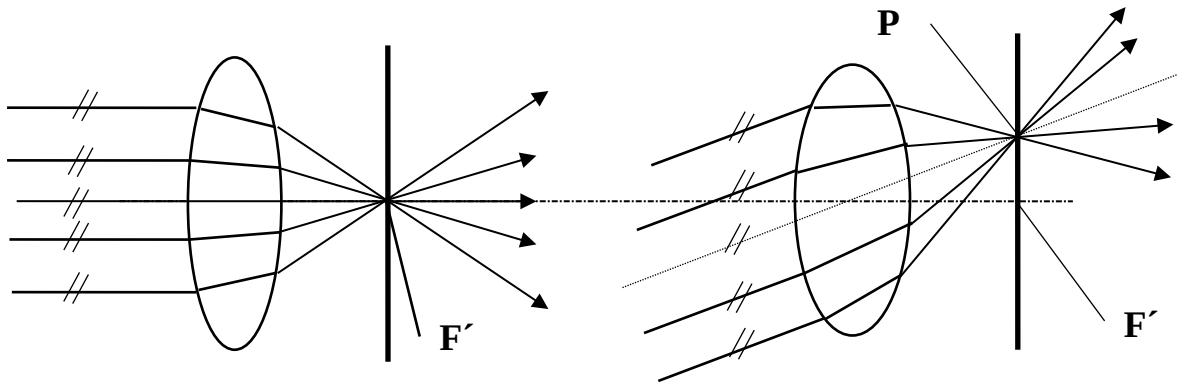
In den meisten Fällen gelingt es nicht, das Licht mit nur einer Linse so zu führen - die Lichtstrahlen in solch einen Strahlengang zu bringen -, dass die gewünschte Wirkung erzielt wird. Dann fügt man mehrere Linsen zu einem optischen System zusammen. Aus einer Kombination von Linsen können auch Abbildungsfehler, die ein teilweise unscharfes, ein verzerrtes oder ein mit Farbsäumen versehenes Bild erzeugen, verringert oder sogar behoben werden. (Vertiefung in der VL: "Menke – Einführung in das Optik-Design").

Die optischen Achsen dieser Linsen sollen im Regelfall alle in ein und derselben Gerade liegen, der **optischen Achse des Systems**.

Brennpunkte, Brennweiten und andere Hauptpunkte

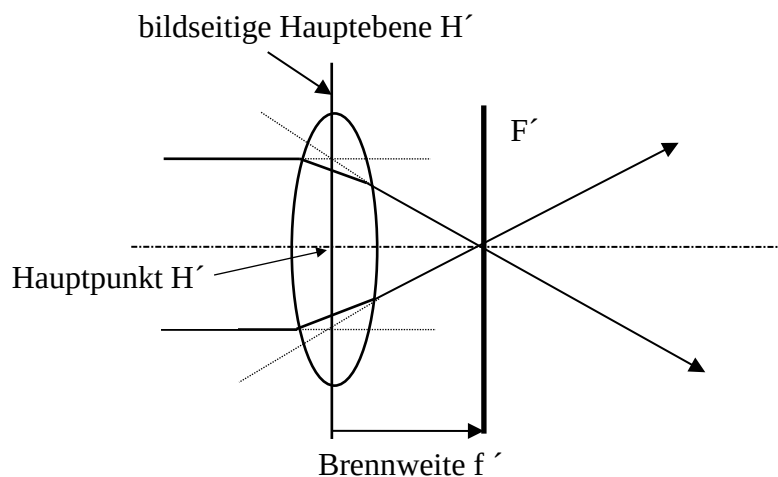
Mit Hilfe von Brennebenen und Hauptebenen lässt sich ein praktikables Ersatzschaltbild einer Linse oder eines Linsensystems zeichnen.

- parallel zur optischen Achse einfallende Strahlen treffen sich im **bildseitigen Brennpunkt F'**
- achsensenkrechte Ebene durch F' ist die **bildseitige Brennebene**
- parallele, aber zur optischen Achse geneigte Strahlen werden durch die Linse zu einem Punkt P' in der bildseitigen Brennebene gebrochen
- **je stärker das parallele Strahlenbündel geneigt ist, umso weiter ist der Schnittpunkt P' von F' entfernt**



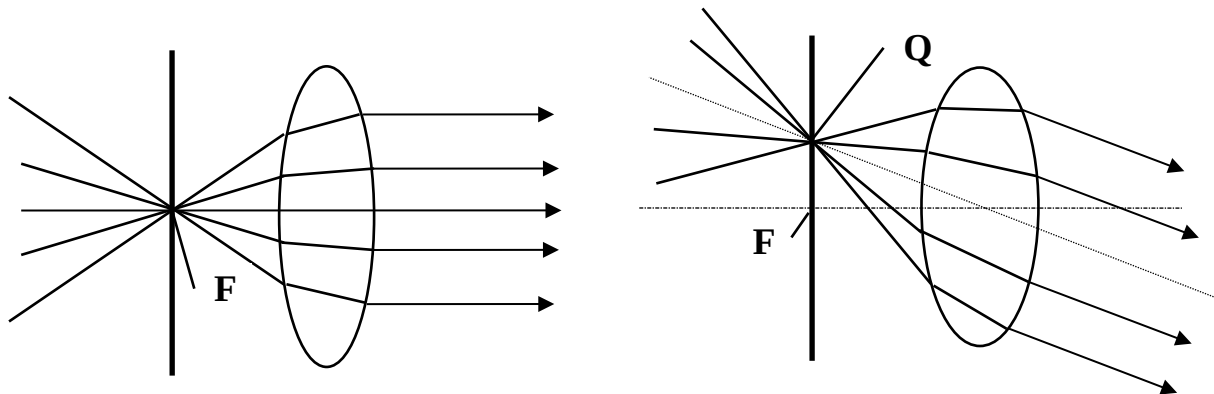
Hauptebenen

- bringt man einen achsparallelen Strahl zum Schnitt mit dem dazugehörigen Brennpunktstrahl, so ist der Schnittpunkt ein Punkt der Hauptebene H'
- die achsensenkrechte Ebene durch diesen Schnittpunkt ist die Hauptebene H'
- den Durchstoßpunkt der Hauptebene H' mit der optischen Achse nennen wir Hauptpunkt H'
- Der Abstand des Brennpunktes F' vom Hauptpunkt H' ist die *bildseitige Brennweite f'* .

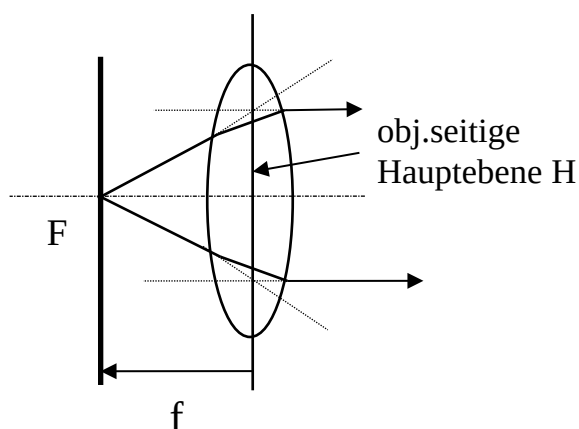


Entsprechendes gilt für die objektseitigen Kenngrößen:

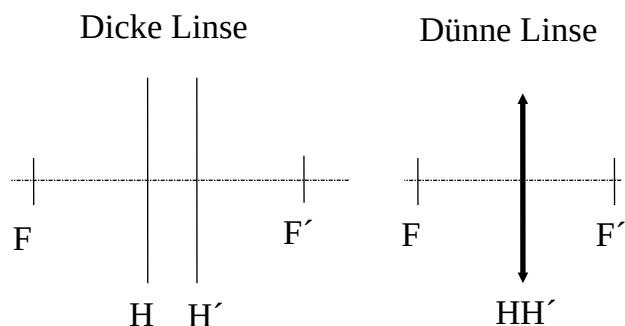
- Lichtstrahlen, die achsparallel aus einer Sammellinse austreten, kommen aus einem Punkt der optischen Achse, dem **objektseitigen Brennpunkt F**.
- Die achsenkrechte Ebene durch F ist die **objektseitige Brennebene**.
- Lichtstrahlen, die von einem Punkt Q der objektseitigen Brennebene ausgehen, werden durch die Linse zueinander parallel gerichtet. Diese Parallelstrahlen sind zur optischen Achse geneigt, wenn Q nicht in F liegt.



- Bringt man die von F ausgehenden Lichtstrahlen mit den zugehörigen achsparallel gerichteten Lichtstrahlen zum Schnitt, so ist die achsenkrechte Ebene durch die Schnittpunkte die **objektseitige Hauptebene H**.
- Der Durchstoßpunkt der optischen Achse durch diese Hauptebene ist der objektseitige **Hauptpunkt H**.
- Der Abstand des Brennpunktes F vom Hauptpunkt H ist die **objektseitige Brennweite f**.
- Befindet sich vor und hinter einer Linse das gleiche Medium (z.B. Luft), so sind die **Brennweiten f und f' gleich groß und haben entgegengesetztes Vorzeichen**. Oft kann der Abstand zwischen H und H' vernachlässigt werden gegenüber den Brennweiten. (-> dünne Linse)

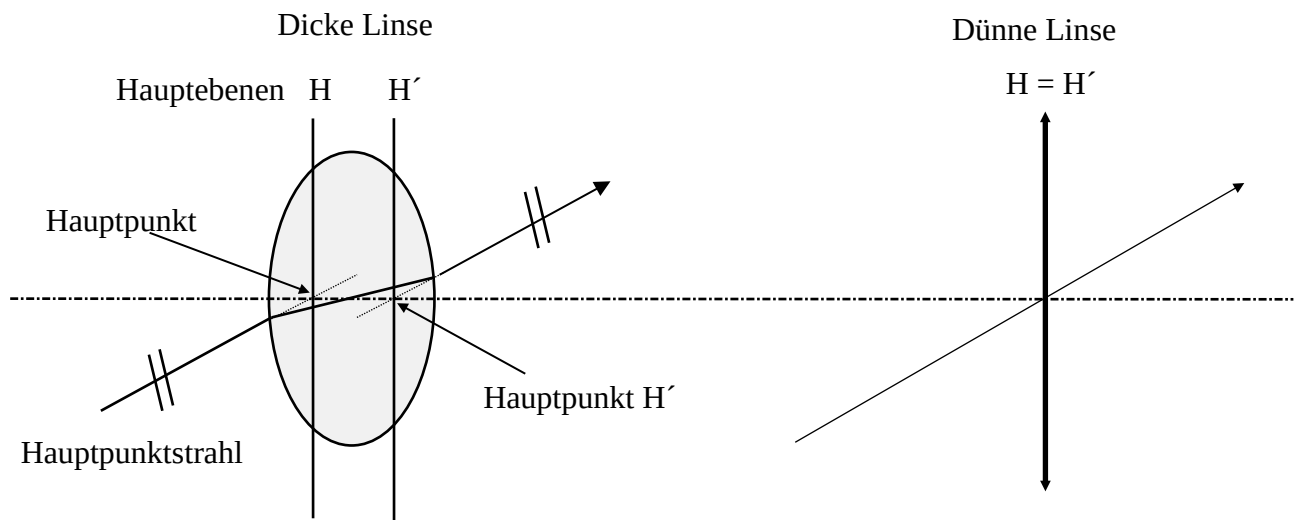


Abstrakte Darstellung eines Positivsystems



Hauptpunktstrahl

- Ein Lichtstrahl, der auf den objektseitigen Hauptpunkt H zuläuft, tritt aus der Linse oder dem System so aus, als käme er aus dem bildseitigen Hauptpunkt H' . **Der austretende Lichtstrahl hat die gleiche Richtung wie der einfallende Lichtstrahl.**
- Der ganze Lichtstrahl wird **Hauptpunktstrahl** genannt. Bei einer dünnen Linse verläuft also dieser Strahl scheinbar ungebrochen und ohne Versatz durch die Linse.

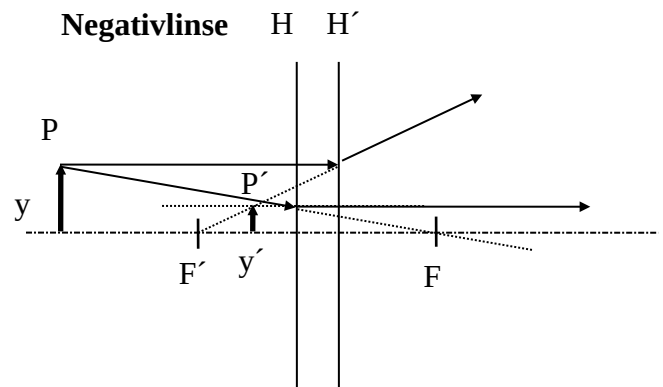
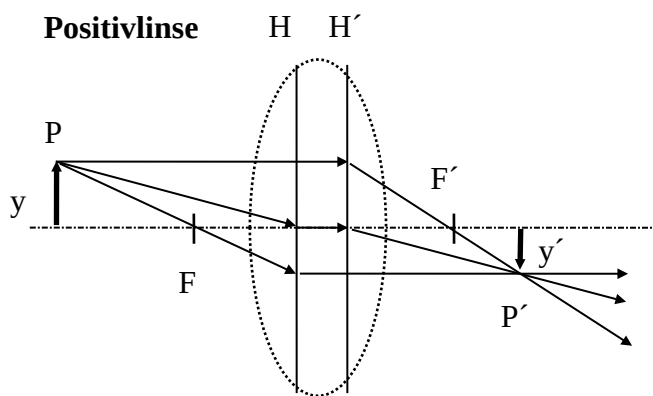


Mit Hilfe der ausgezeichneten Strahlen (Parallelstrahl, Brennpunktstrahl, Hauptpunktstrahl) lässt sich für ein beliebiges Objekt y das Bild y' **zeichnerisch ermitteln** (siehe: nächste Seite)

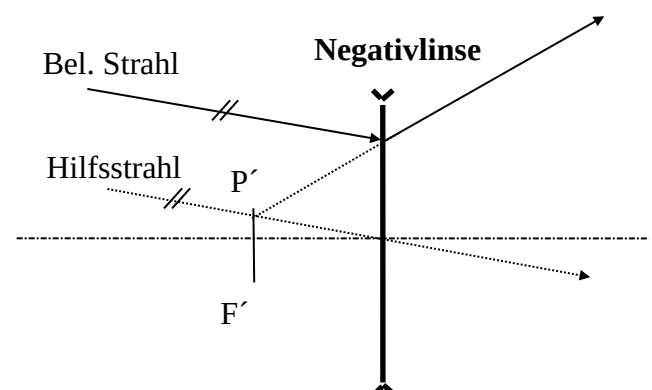
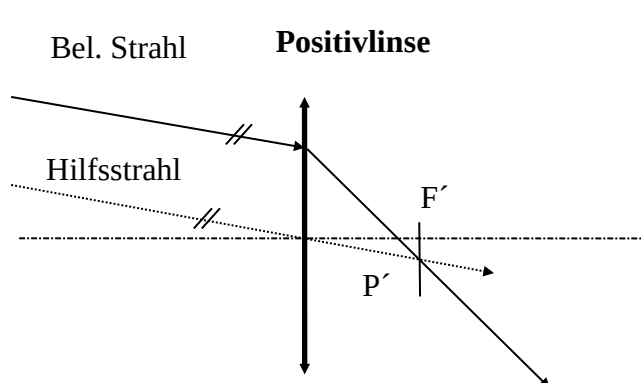
Listingsche Bildkonstruktion

Zur Abbildung einer achsensenkrechten Strecke y genügt die Abbildung eines nicht auf der Achse liegenden Punktes P zu konstruieren. Die Genauigkeit nimmt mit der Entfernung des Punktes P von der optischen Achse zu. Aus den unendlich vielen von Punkt P ausgehenden Strahlen verwendet man die, deren weiteren Verlauf man kennt.

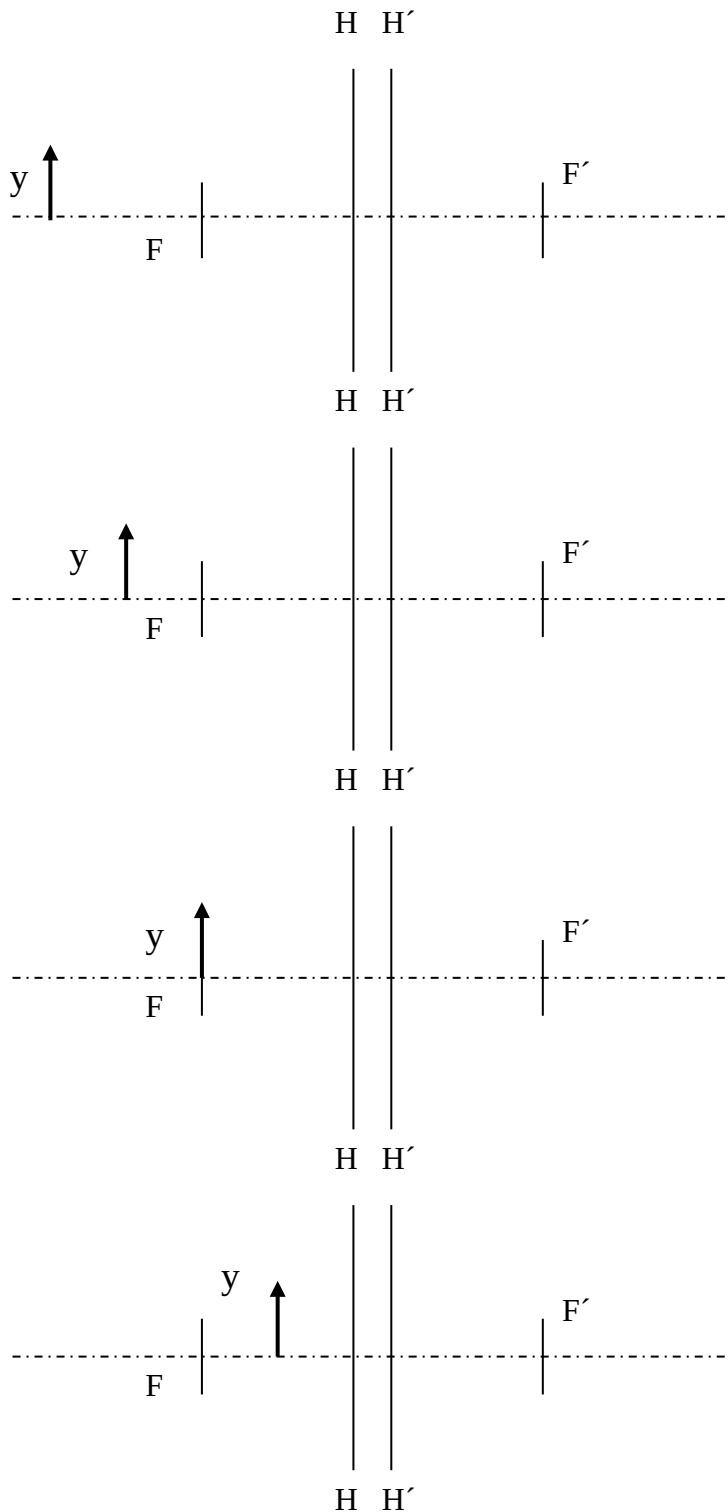
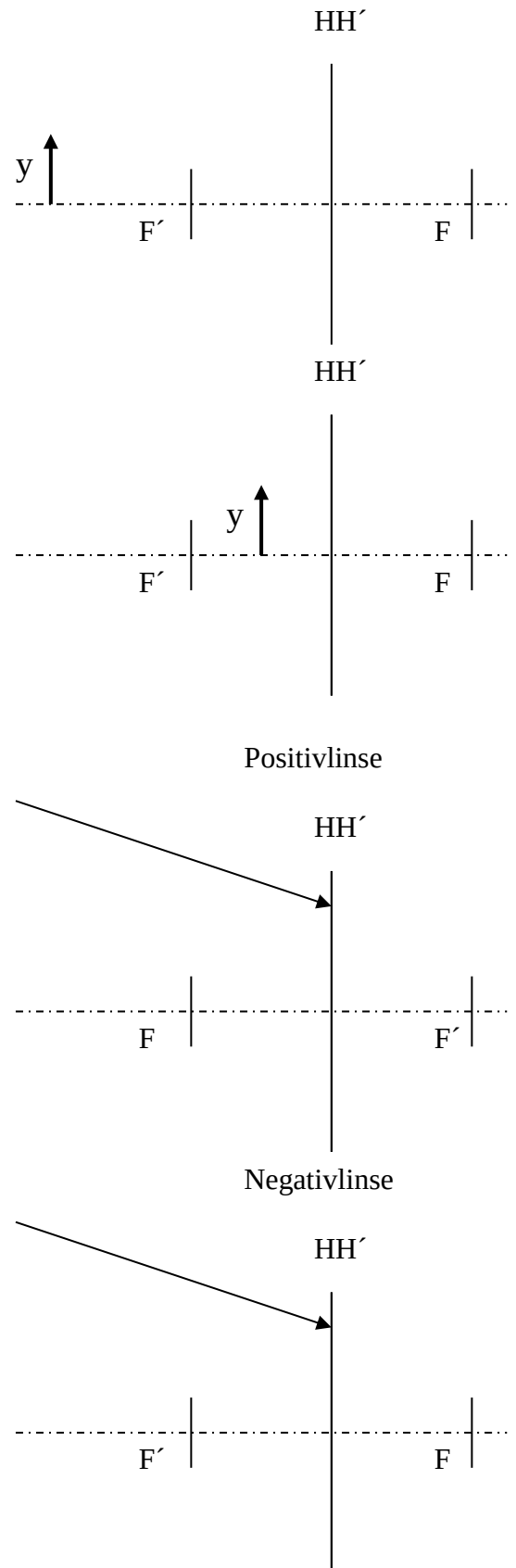
1. der objektseitige Brennpunktstrahl durch F wird an H zum Parallelstrahl
2. der objektseitige Parallelstrahl wird an H' zum Brennpunktstrahl durch F'
3. der auf $K(H)$ zielende Knotenpunktstrahl ändert seine Richtung nicht, sondern tritt nur parallel verschoben aus K' (H') wieder aus



Mit der oben genannten Regel lässt sich auch für einen beliebig einfallenden Strahl der an der Linse gebrochene Strahl konstruieren. Man benutzt dazu als Hilfsstrahl den parallel zum betrachteten Strahl einfallenden Knotenpunktsstrahl. Beiden Strahlen kann ein gemeinsamer Objektpunkt im Unendlichen zugeordnet werden. Der zugehörige Bildpunkt ist der Schnittpunkt des gebrochenen Strahles (bzw. seiner rückwärtigen Verlängerung bei der Zerstreuungslinse) mit dem Knotenpunktsstrahl; dieser Schnittpunkt liegt in der bildseitigen Brennebene.

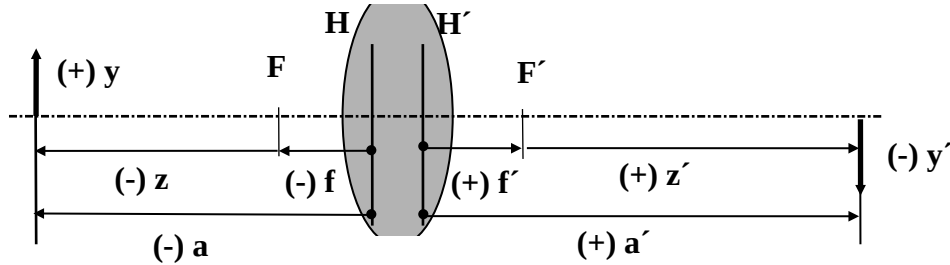


Aufgabe: Drucken Sie sich bitte die folgende Seite aus, und versuchen Sie aus den gegebenen Objektpositionen das jeweilige Bild zu konstruieren bzw. den weiteren Strahlverlauf zu ermitteln. (Bitte Ergebnis zum Praktikum mitnehmen.)

Positivlinse ($f' = 20 \text{ mm}$)**Negativlinse ($f' = -20 \text{ mm}$)**

Grundformeln der optischen Abbildung:

Skizze zeigt wichtigste Abbildungsgrößen:



Bestimmung der Bildweite durch:

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{f'} : \text{allgemeine (oder hauptpunktsbezogene) Abbildungsgleichung}$$

$$z \cdot z' = -f'^2 : \text{Newtonsche (oder brennpunktsbezogene) Abbildungsgleichung}$$

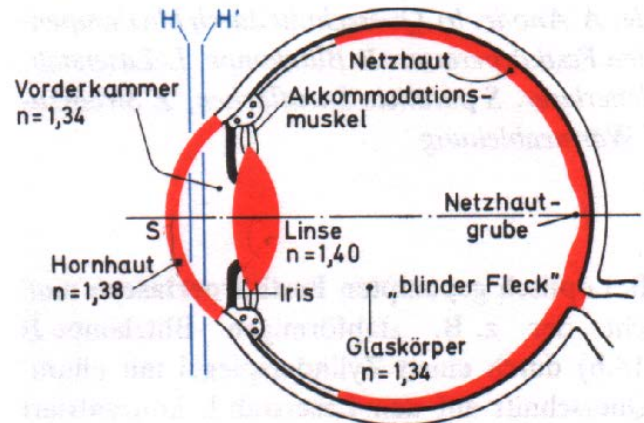
Abbildungsmaßstab β' / Ermittlung der Bildhöhe y' durch:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{f}{z}$$

Optische Instrumente

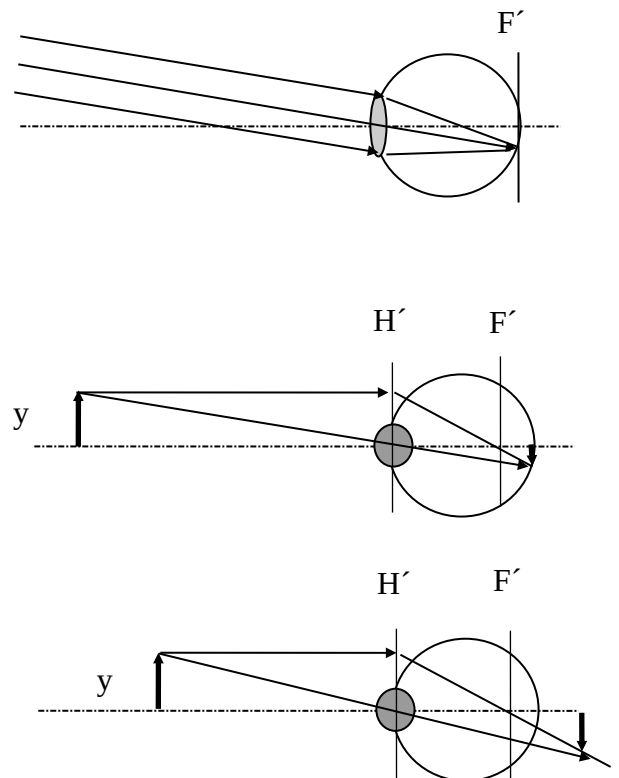
Das Auge

- die optische Abbildung wird durch die gekrümmte Hornhaut und die verformbare Positivlinse erreicht
- das Scharfstellen des Bildes bei veränderter Objektweite geschieht durch Verändern der Brennweite der Augenlinse bei festem Abstand Linse - Netzhaut (Akkommodation)

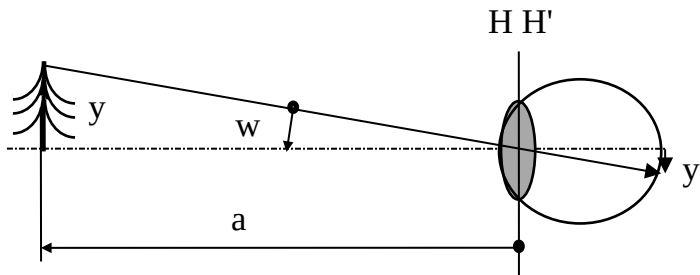


Akkommodation:

1. Gegenstand sehr weit entfernt:
Akkommodationsmuskel entspannt $\Rightarrow$
Krümmungsradien der Linse groß, deren Brechungsindex niedrig $\Rightarrow$ Brennweite groß, Brennebene in der Netzhautenebene
2. Gegenstand rückt näher: Akkommodationsmuskel wird (unbewusst) angespannt $\Rightarrow$ Linsenradien werden kleiner, Brechungsindex steigt etwas an $\Rightarrow f'$ wird kleiner $\Rightarrow$ Bild entsteht noch auf der Netzhaut, dieses Scharfstellen gelingt bis zum Nahpunkt (ca. 8-10 cm vor dem Auge / altersabhängig)
3. rückt das Objekt noch näher $\Rightarrow$ Bild hinter der Netzhaut $\Rightarrow$ unscharfes Bild auf der Netzhaut, da von den einzelnen Bildpunkten nur Unschärfescheibchen abgebildet werden



Beim **Auge** ist also die Größe y' des wahrgenommenen Bildes auf der Netzhaut ist proportional zum Sehwinkel w



Bei endlicher
Objektentfernung gilt:

$$\tan w = \frac{y}{-a} = w \quad (\text{nach Gau\ss})$$

Zwei-Punkt-Auflösung des Auges

Zwei leuchtende Punkte können nur dann getrennt wahrgenommen werden, wenn ihre beiden Bildpunkte auf zwei verschiedenen Zapfen (oder Stäbchen) fallen.

Dies entspricht in der Netzhautgrube (Bereich des „schärfsten Sehens“) einem Sehwinkel von einer Bogenminute ($1 \text{ bmin} \approx 3 \cdot 10^{-4}$).

Dies ist erstaunlicherweise nahe an der beugungsbegrenzten Auflösung des Auges:

$$\Delta\alpha_{\min} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot d_{\text{EP}}} = 1,22 \cdot \frac{550 \text{ nm}}{1,33 \cdot 3 \text{ mm}} = 1,7 \cdot 10^{-4}$$

In der deutlichen Sehweite entspricht die Winkelauflösung der Zwei-Punkt-Trennung einer Ortsauflösung von:

$$\Delta y = \delta \cdot /s/;$$

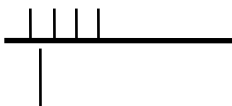
Beispiel:

Zwei-Punkt-Auflösung:

$$\Delta y = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 250 \text{ mm} = \underline{75 \mu\text{m}}$$

Winkelauflösung des Auges bei

Noniuseinfang: (15 bsec)



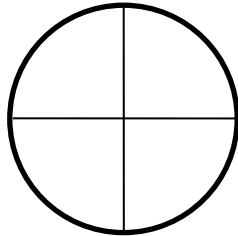
Symmetrieeinfang: (5 bsec)



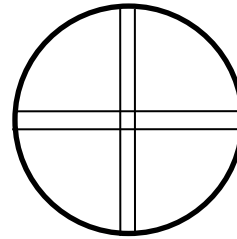
Strichmarke
symmetrisch zum
Doppelstrich (fett)

Messtechnisches Beispiel für Symmetrieeinfang:

a) *Fadenkreuz* wird abgebildet auf das Doppelfadenkreuz



b) *Doppel-Fadenkreuz* zum Symmetrieeinfang von a) in x- und y-Richtung



Merke: Durch optische Instrumente wird die Winkelauflösung (des Auges) um den Faktor der Vergrößerung des Instruments verbessert.

Funktion der optischen Instrumente

Will man von einem Gegenstand mehr Details erkennen, muß er näher ans Auge gebracht werden. Dadurch nimmt der Sehwinkel bzw. die scheinbare Größe des Gegenstandes zu. Bei Unterschreiten des Nahpunktes wird das Netzhautbild wegen mangelnder Akkommodationsfähigkeit unscharf.

Eine weitere Vergrößerung ist nur möglich, wenn optische Instrumente (Lupe, Mikroskop) zu Hilfe genommen werden:

Die Aufgabe der optischen Instrumente besteht darin, den Sehwinkel zu vergrößern.

Die Vergrößerung eines Instruments ist definiert durch das Verhältnis des Tangens des Sehwinkels mit Instrument zum Tangens des Sehwinkels ohne Instrument (unbewaffnetes Auge):

$$\Gamma = \frac{\tan w_M}{\tan w_O} = \frac{w_M}{w_O}$$

Der Tangens des Sehwinkels ohne Instrument wird dabei bezogen auf die deutliche Sehweite von 250 mm. Somit gilt:

$$\tan w_O = \frac{y}{250} \quad (w_O > 0)$$

Lupe/ Okular

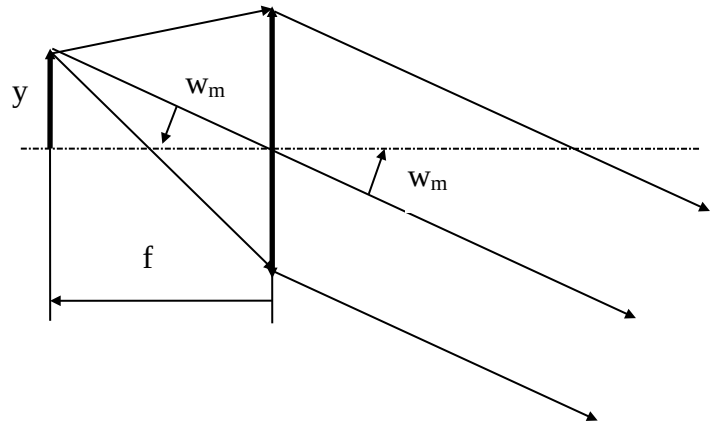
- Spezialfall zur Normung: der Gegenstand steht in der Brennebene der Linse steht $\Rightarrow$ bildseitig parallele Strahlen $\Rightarrow$ das Auge ist auf Unendlich akkommodiert (entspanntes Beobachten)

$\Rightarrow$ Normalvergrößerung:

$$\Gamma_L = \frac{\tan w_M}{\tan w_O} = \frac{-y}{f} \cdot \frac{250}{y}$$

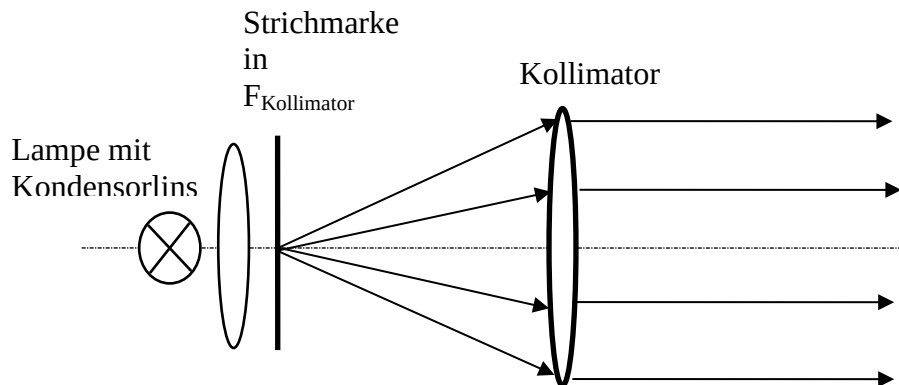
mit $f = -f'$ folgt:

$$\Gamma_L = \frac{250 \text{ mm}}{f'_{\text{Lupe}}}$$



Kollimatoren (Versuch: OM I und II)

- Projektor, der eine beleuchtete Marke (Strichkreuz, Strichplatte) nach unendlich abbildet



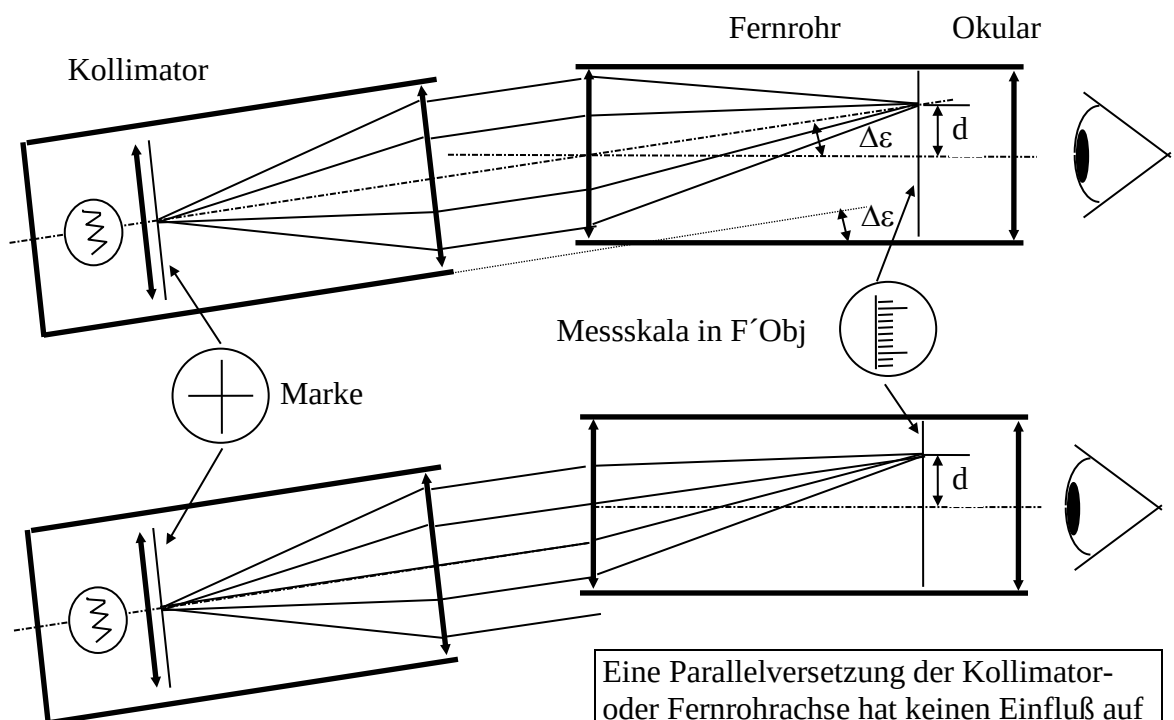
Messaufgabe:

- Justier- und Kontrollarbeiten erfordern die Feststellung von Winkeldifferenzen zwischen Achsen oder Flächen, d.h. eine *Richtungsprüfung*
- berührungsloses Erfassen von Winkelabweichungen und Verkipnungen
- hohe Auflösung ($< 1''$)
- große Entfernung (bis 30 m)
- (kein Augenschutz nötig)

Lösung mit Kollimatoren und Fernrohren.

Ergebnis: Damit kann man Richtungs-differenzen zwischen Kollimator- und Fernrohrachse aus der *Bildverschiebung* bestimmen:

Liegt bei einem Winkel δ zwischen beiden Achsen das Fadenkreuzbild um d vom Skalenmittelpunkt weg, so ist $\Delta\epsilon = d/f'_{\text{Obj}}$.



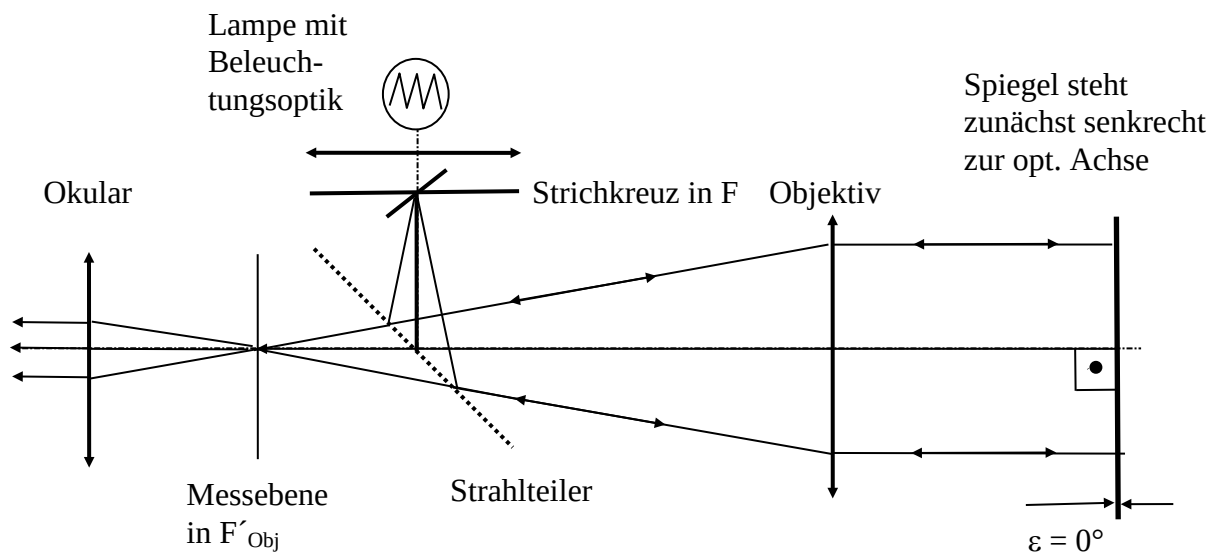
Eine Parallelversetzung der Kollimator- oder Fernrohrachse hat keinen Einfluß auf die Winkelmessung. Die Messanordnung ist gegenüber "Fluchtungs-differenzen" unempfindlich; sie zeigt nur Richtungs-differenzen.

Autokollimationsfernrohr (Versuch: OM I und II)

Im Autokollimationsfernrohr sind Kollimator (Beleuchtung) und Fernrohr (Abbildung) in einem Gerät zusammengefasst. Dies lässt sich durch einen Strahlteiler erreichen, welcher die Hälfte der auftreffenden Strahlungsenergie reflektiert und die andere transmittieren lässt.

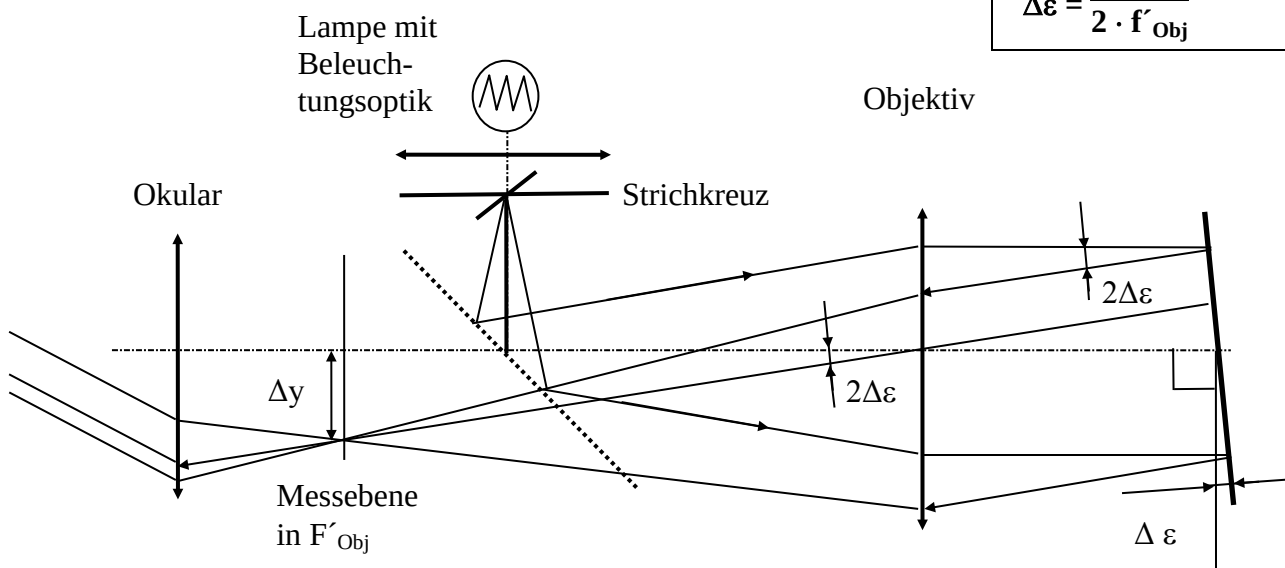
Die Marke M wird aus dem Brennpunkt F des Objektivs über die teildurchlässige Platte T nach Unendlich projiziert. Der am Messobjekt befestigte Spiegel reflektiert das Strahlenbündel in das Objektiv, in dessen Brennebene F' es in die Messskala abgebildet wird.

Prinzipskizze:



AKF-Grundgleichung:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta y}{2 \cdot f'_{\text{Obj}}}$$



Beispiel eines AKF:



visuelle Messgenauigkeit

hohe Messgenauigkeit wird erreicht durch

- **große Objektivbrennweiten** (z.B. $f' = 500 \text{ mm}$)
dies ergibt bei kleinen Winkelauslenkungen bereits großen Markenversatz in der Bildebene
 $\Delta y = \Delta \varepsilon \cdot 2 f' \Leftrightarrow$
(bei **einer Winkelsekunde** $= 5 \cdot 10^{-6}$ (in Bogenmaß) und $f' = 500 \text{ mm}$)
 $\Delta y = 5 \text{ }\mu\text{m}$
- beim **Symmetrieeinfang** (reflektiertes Markenkreuz wird mit Doppelstrichkreuz in der Bildebene symmetrisch eingefangen) kann das Auge in der **deutlichen Sehweite (25 cm)** eine **Auslenkung von 7 μm** erkennen
- Zwischenbild wird **mit dem Okular vergrößert** betrachtet
Faktor 7 bedeutet, das noch **Auslenkungen von 1 μm** erkannt werden können, dem entspricht **Winkeländerung des Spiegels von 0,2 Winkelsekunden**
- Parallelversetzungen des Spiegels spielen keine Rolle
- **Richtungsmessbereich $< 1^\circ$**

Das Endlichfernrohr (Versuch: FF)

Beim Endlichfernrohr wird das Objektiv durch axiales Verschieben auf Gegenstände im Endlichen eingestellt. Das Bild y' eines Gegenstandes y liegt deshalb nicht in der Brennebene F' des Objektivs, sondern im Abstand z' dahinter. Dagegen wird der objektseitige Brennpunkt F_2 auch in das Bild y' gelegt (Bild wird nach **Unendlich projiziert**, entspanntes Beobachten).

Das Objektiv bildet den Gegenstand y mit dem

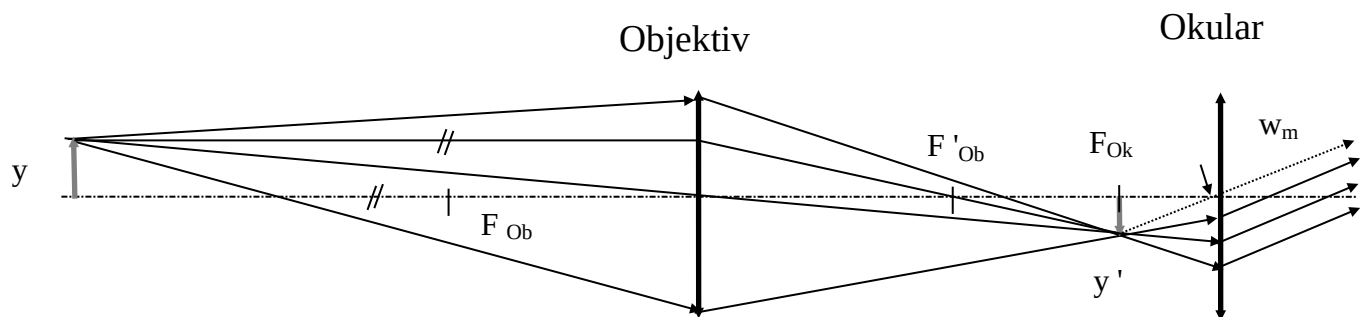
Abbildungsmaßstab $\beta' (= -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'})$ ab.

Das Bild y' wird bei größeren Objektabständen kleiner als das Objekt y sein, liegt aber nahe beim Auge und wird durch das Okular noch stark vergrößert.

Vom prinzipiellen Aufbau her, kann das Endlichfernrohr auch als „entartetes“ Mikroskop betrachtet werden. „Entartet“, da aufgrund der meist großen Objektweite das Objektiv zunächst mit $\beta' < 1$ abbildet.

Als sog. „Mikroskop - Vergrößerung“ des Endlich-Fernrohrs ergibt sich:

$$\Gamma_{\text{M-Endl.fernr.}} = \beta_{\text{Ob}}' \cdot \Gamma_{\text{Ok}} = -\frac{f_{\text{Ob}}}{z_1} \cdot \frac{250 \text{ mm}}{f'_{\text{Ok}}} = \frac{f'_{\text{Ob}}}{f'_{\text{Ok}}} \cdot \frac{250 \text{ mm}}{z_1}$$



Messtechnische Anwendung des Endlichfernrohrs (Versuch: FF)

Eine messtechnische Grundaufgabe ist die Fluchtungsmessung. Hierbei gilt es, kleine Verschiebungen gegenüber einer vorgegebenen Achse (Fluchtgeraden) zu ermitteln. Hierfür muß das Fluchtfernrohr unmittelbar auf eine in endlicher Entfernung liegende, beleuchtete Messmarke (beispielsweise ein Fadenkreuz) eingestellt werden. Der Versatz y' des Messmarkenbildes zur Vergleichsmarke (Doppelstrickkreuz) im Fernrohr kann bestimmt werden. Ist der Abbildungsmaßstab β' konstant, so kann der Markenversatz y des Messpunktes berechnet werden.

Häufig wird auch die Kompensationsmethode angewandt:

eine zusätzlich vor dem Objektiv angebrachte Planparallelplatte wird so stark verkippt, bis durch den Parallelversatz des Hauptstrahls das Strichkreuzbild symmetrisch zum Doppelstrickkreuz im Fernrohr liegt. Dieser Versatz y kann dann an der betreffenden Stellschraube nach einer Kalibrierung abgelesen werden.

