

APMB - Praktikum

Grundlagen zu den Versuchen OM 1, OM 2 und FF

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):

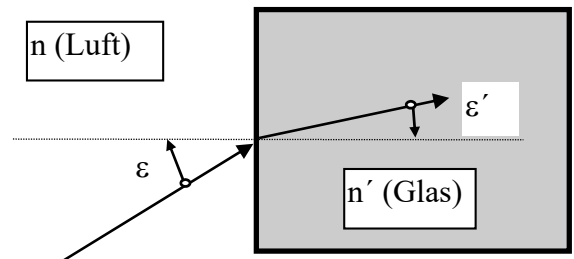
$$n \cdot \epsilon = n' \cdot \epsilon' \quad (\text{Winkel in Bogenmaß eingeben})$$

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

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

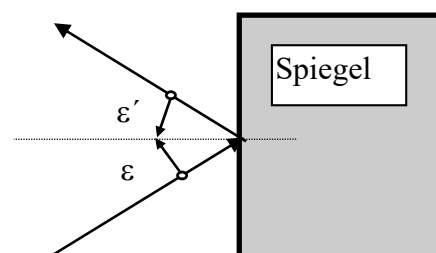
ϵ, ϵ' : Einfallswinkel und Ausfallswinkel

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**:

$$\epsilon' = -\epsilon$$



Wir betrachten im Folgenden den sehr häufigen Sonderfall von

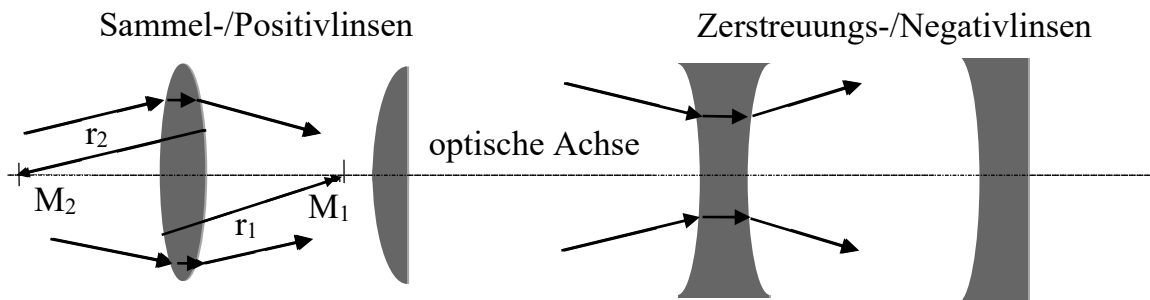
Linsen in Luft:

Linsen, die in der Mitte dicker sind als am Rande, brechen die Lichtstrahlen zur optischen Achse hin. Sie werden *Sammel- oder Positivlinsen* genannt. Die Grenzflächen sind im Allgemeinen sphärisch (also Kugelkappen), da dies einfach herzustellen sind.

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:



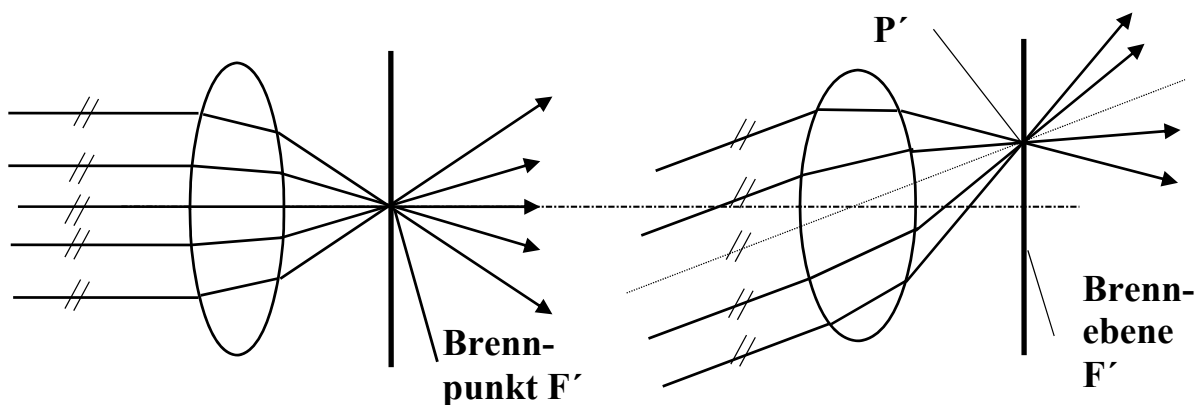
In den meisten Fällen gelingt es nicht, das Licht mit nur einer Linse so zu führen - die Lichtstrahlen in solch einen Strahlengang zu bringen -, dass die gewünschte Wirkung erzielt wird. Dann fügt man mehrere Linsen zu einem optischen System zusammen. Aus einer Kombination von Linsen können auch Abbildungsfehler,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

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

Von Brennebenen über Hauptebenen zu Brennweiten

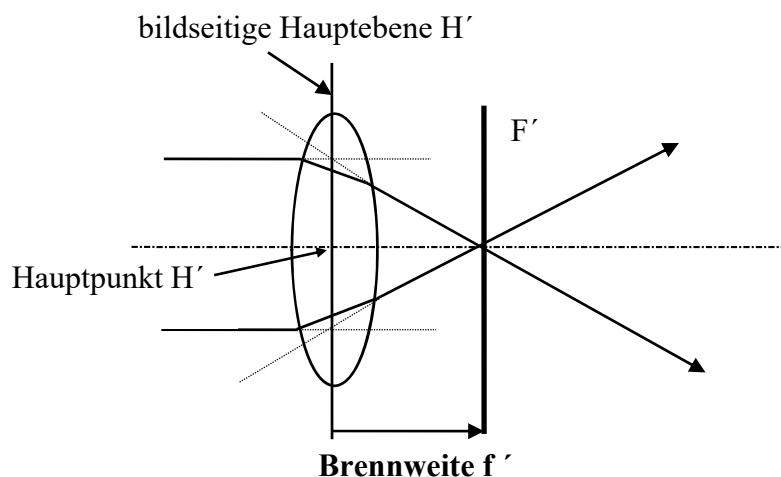
Mit Hilfe von Brennebenen und Hauptebenen lässt sich ein praktikables Ersatzschaltbild einer Linse oder eines Linsensystems zeichnen.

- 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**



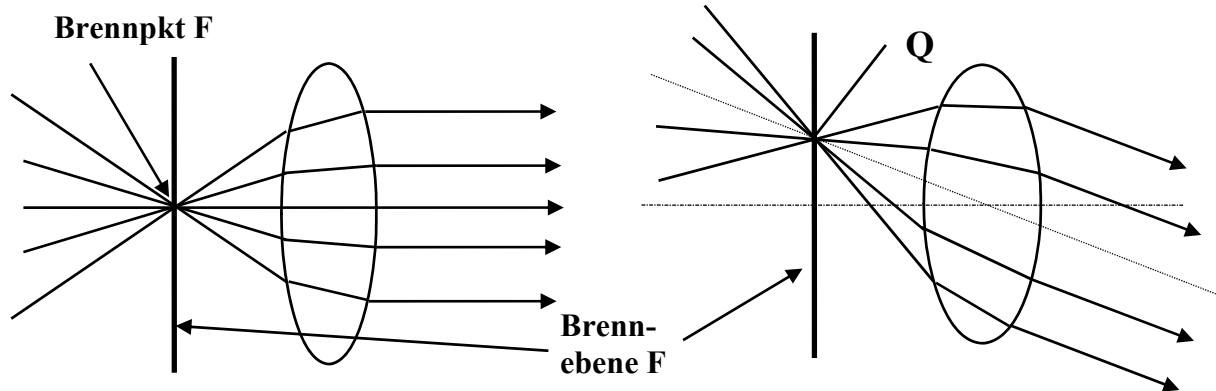
Hauptebenen

- 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' , der wichtigste Parameter einer Linse.**

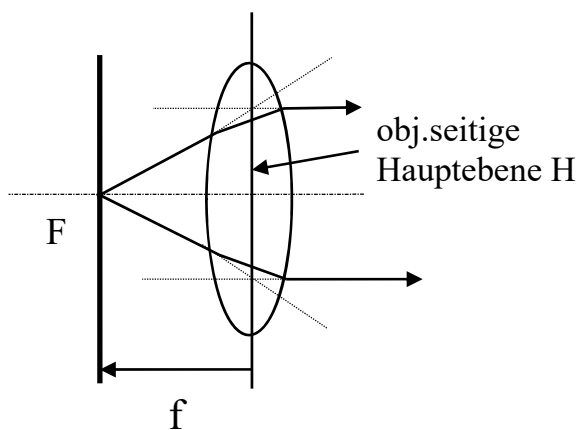


Entsprechendes gilt für die objektseitigen Kenngrößen:

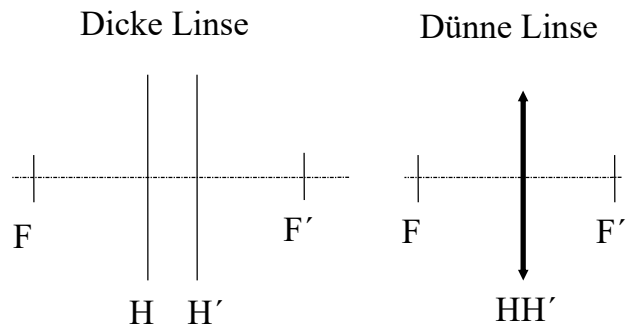
- Lichtstrahlen, die achsparallel aus einer Sammellinse austreten, kommen aus einem Punkt der optischen Achse, dem **objektseitigen Brennpunkt F**.
- Die achsenkrechte Ebene durch F ist die **objektseitige Brennebene**.
- Lichtstrahlen, die von einem Punkt Q der objektseitigen Brennebene F ausgehen, 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**)



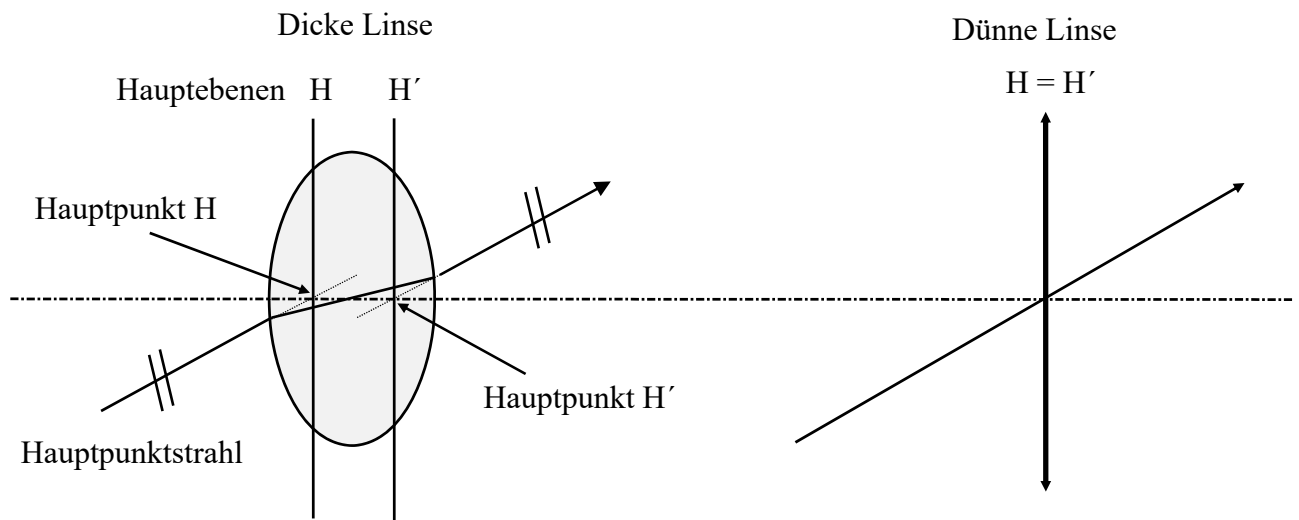
Abstrakte Darstellung eines Positivsystems



Hauptpunktstrahl

(gilt wenn Linse in Luft)

- 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.**

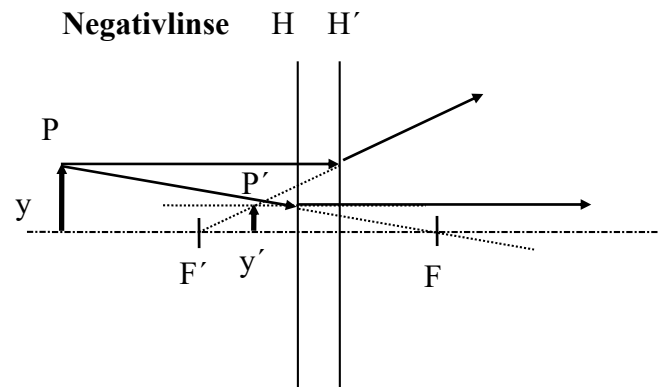
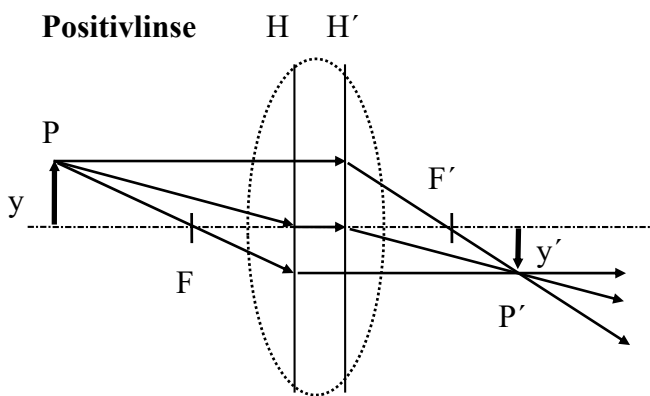


Mit Hilfe der ausgezeichneten Strahlen (Parallelstrahl, Brennpunktstrahl, Hauptpunktstrahl) lässt sich für ein beliebiges Objekt y das Bild y' **zeichnerisch ermitteln** (siehe: nächste Seite)

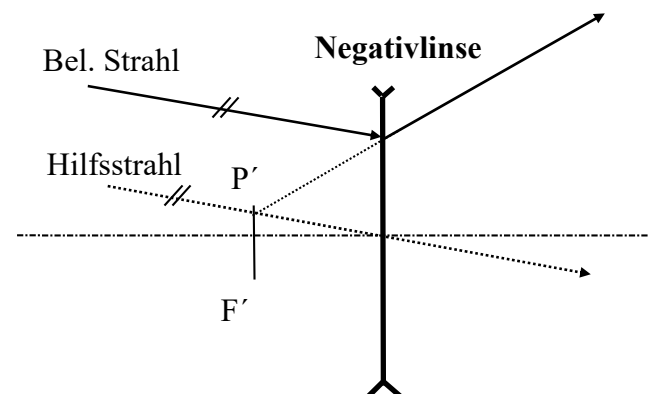
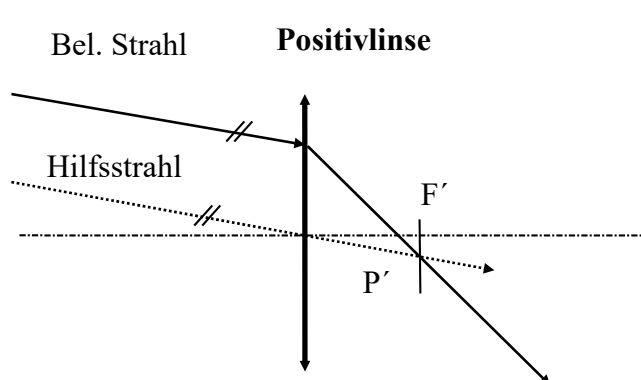
Listingsche Bildkonstruktion

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 H zielende Hauptpunktstrahl ändert seine Richtung nicht, sondern tritt nur parallel verschoben aus H' wieder aus



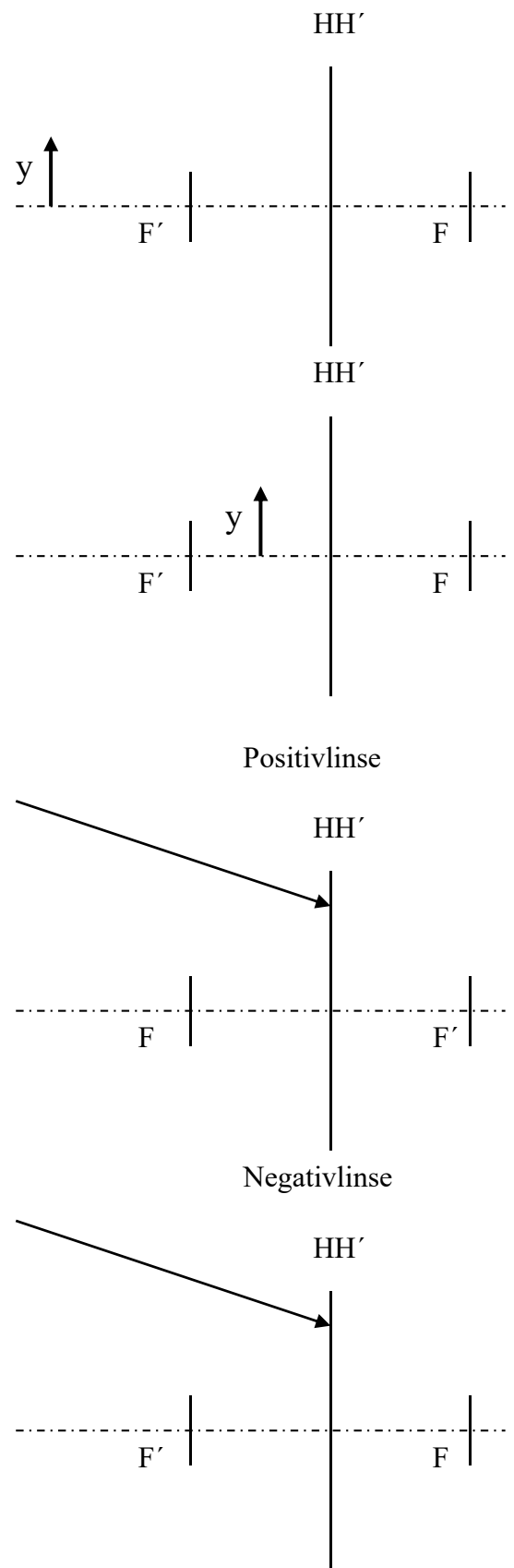
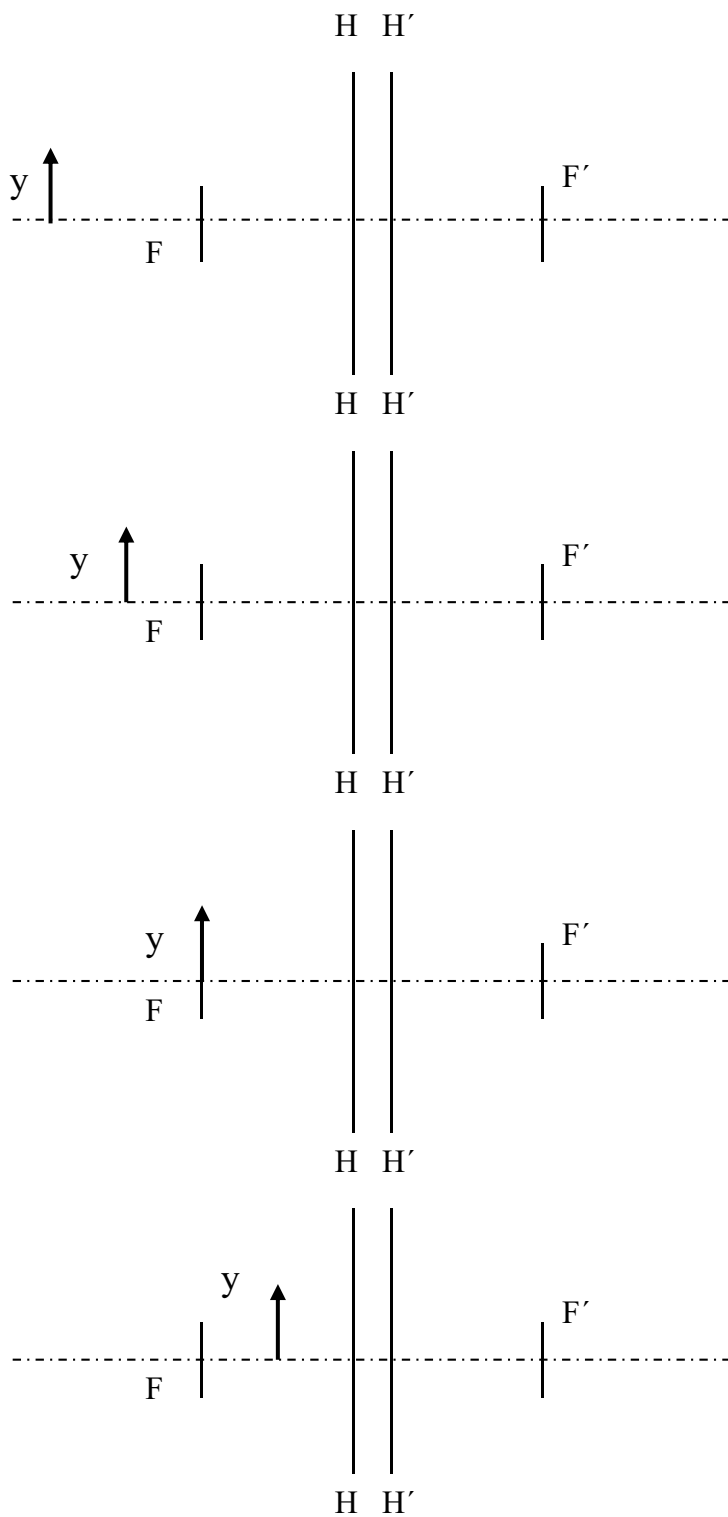
Mit der oben genannten Regel lässt sich auch für einen beliebig einfallenden Strahl der an der Linse gebrochene Strahl konstruieren. Man benutzt dazu als Hilfsstrahl den parallel zum betrachteten Strahl einfallenden Hauptpunktstrahl. Beiden Strahlen kann ein gemeinsamer Objektpunkt im Unendlichen zugeordnet werden. Der zugehörige Bildpunkt ist der Schnittpunkt des gebrochenen Strahles (bzw. seiner rückwärtigen Verlängerung bei der Zerstreuungslinse) mit dem Hauptpunktstrahl; 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 ($f' = 20 \text{ mm}$)

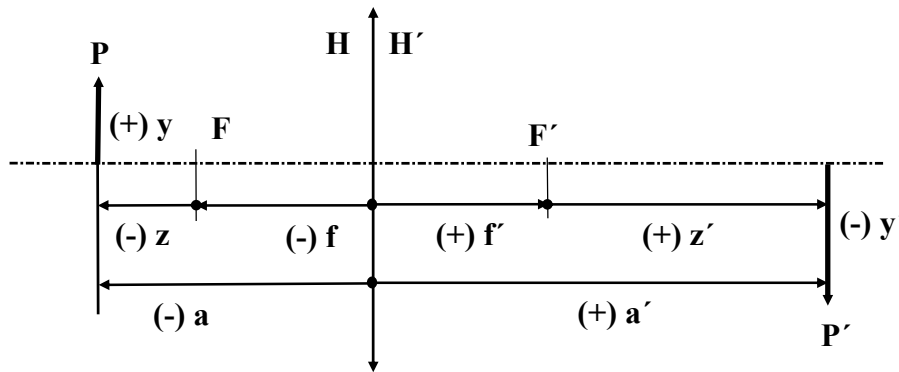
Negativlinse ($f' = -20 \text{ mm}$)



Rechnerische Bestimmung der Bildlage und der Bildhöhe am Beispiel einer dünnen Positivlinse -

Wichtige Grundformeln der optischen Abbildung

Skizze zeigt wichtigste Abbildungsgrößen:



Die Bestimmung der Bildweite **a'** oder **z'** erfolgt durch:

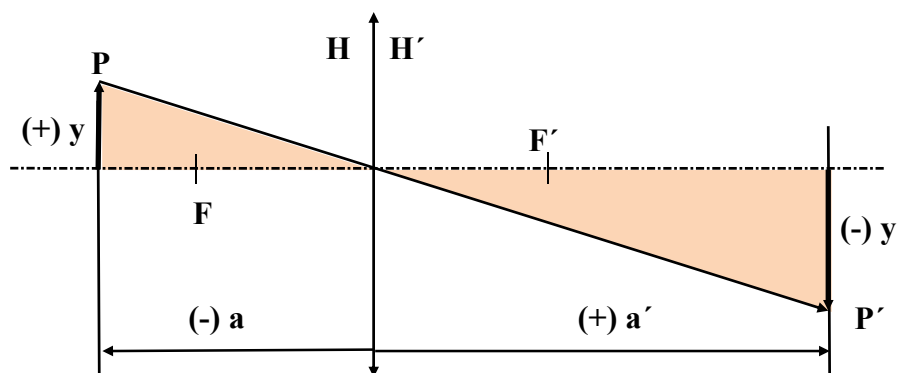
$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{f'} \quad \text{: allgemeine (oder hauptpunktsbezogene) Abbildungsgleichung}$$

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

Abbildungsmaßstab β' / Ermittlung der Bildhöhe y' durch:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad \text{(in Worten: Bildhöhe zu Objekthöhe wie Bildweite zu Objektweite)}$$

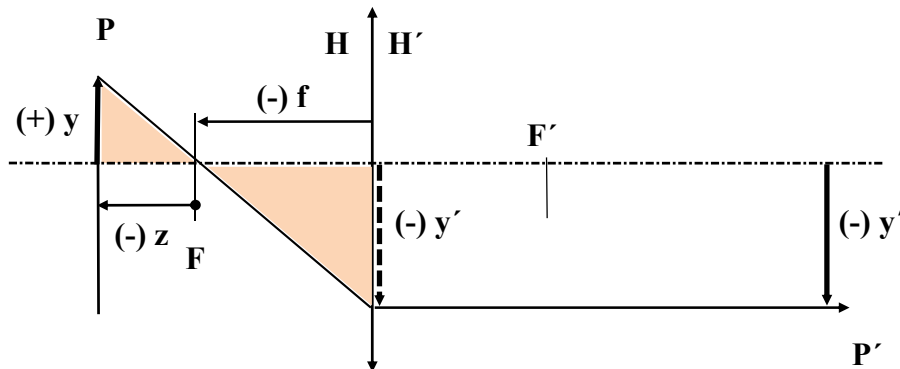
Veranschaulichung durch Einzeichnen des Hauptpunktstrahls in obiger Skizze



Abbildungsmaßstab β' / Ermittlung der **Bildhöhe y'** mit Newtonschen Größen z oder z' :

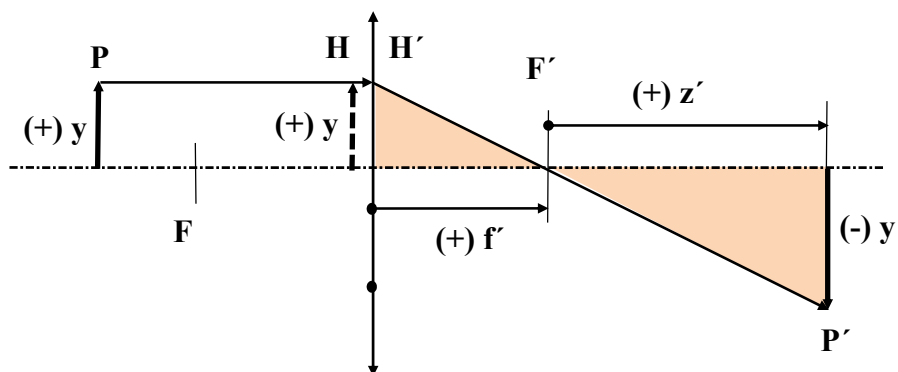
$$\beta' = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z}$$

Veranschaulichung durch Einzeichnen des **objektseitigen Brennpunktstrahls** in obige Skizze



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

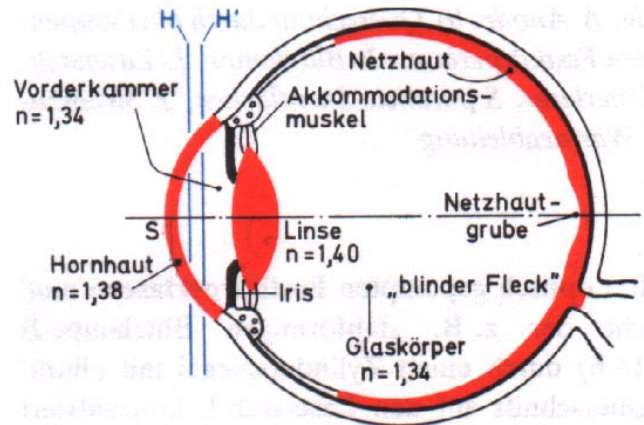
Veranschaulichung durch Einzeichnen des **bildseitigen Brennpunktstrahls** in obige Skizze



Optische Instrumente

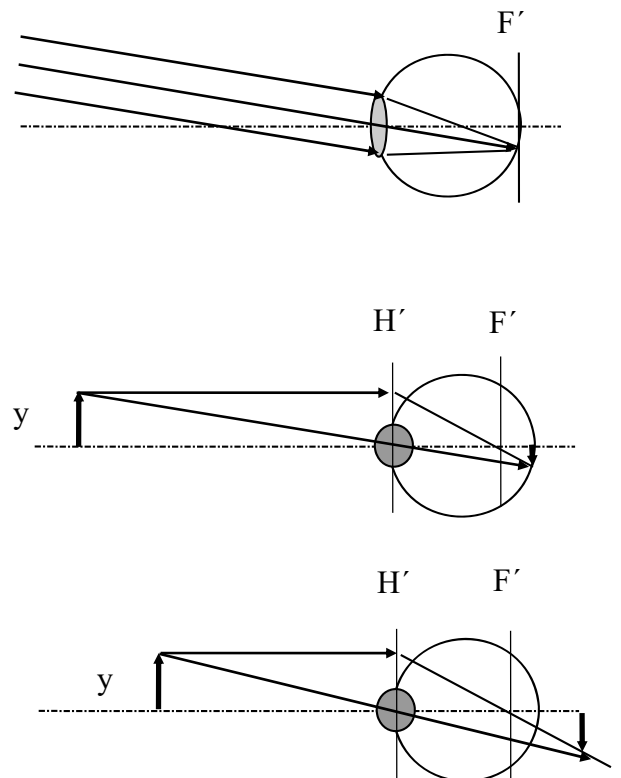
Das Auge

- 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)

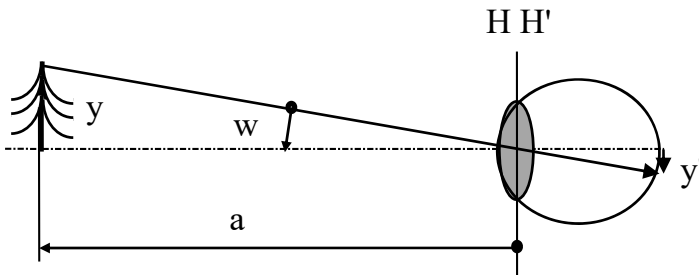


Akkommodation:

1. Gegenstand sehr weit entfernt: Akkomodationsmuskel entspannt \Rightarrow Krümmungsradien der Linse groß, deren Brechungsindex niedrig \Rightarrow Brennweite groß, Brennebene in der Netzhautenebene
2. Gegenstand rückt näher: Akkomodationsmuskel 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 Schinkel 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 Schinkel von einer Bogenminute ($1 \text{ bmin} \approx 3 \cdot 10^{-4}$).

Dies ist erstaunlicherweise nahe an der beugungsbegrenzten Auflösung des Auges:

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

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

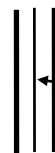
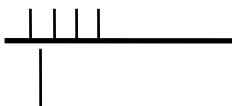
$$\Delta y = \delta \cdot /s/;$$

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)

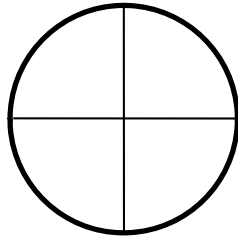
Symmetrieeinfang: (5 bsec)



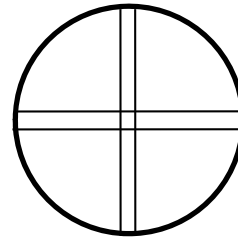
Strichmarke
symmetrisch zum
Doppelstrich (fett)

Messtechnisches Beispiel für Symmetrieein角度:

a) *Fadenkreuz* wird abgebildet auf das Doppelfadenkreuz



b) *Doppelfadenkreuz* zum Symmetrieein角度 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

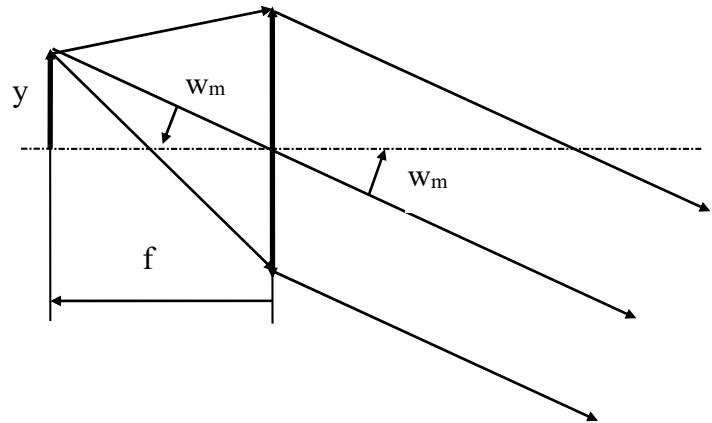
- Spezialfall zur Normung: der Gegenstand steht in der Brennebene der Linse steht \Rightarrow bildseitig parallele Strahlen \Rightarrow das Auge ist auf Unendlich akkommodiert (entspanntes Beobachten)

\Rightarrow Normalvergrößerung:

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

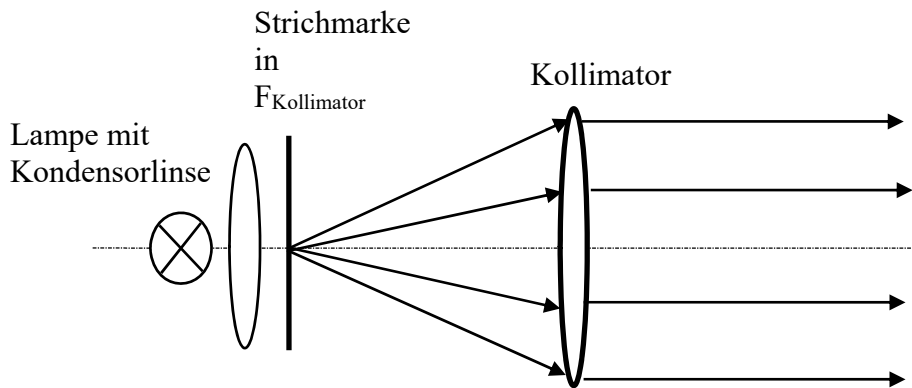
mit $f = -f'$ folgt:

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



Kollimatoren (werden vorgestellt beim Versuch: FF)

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



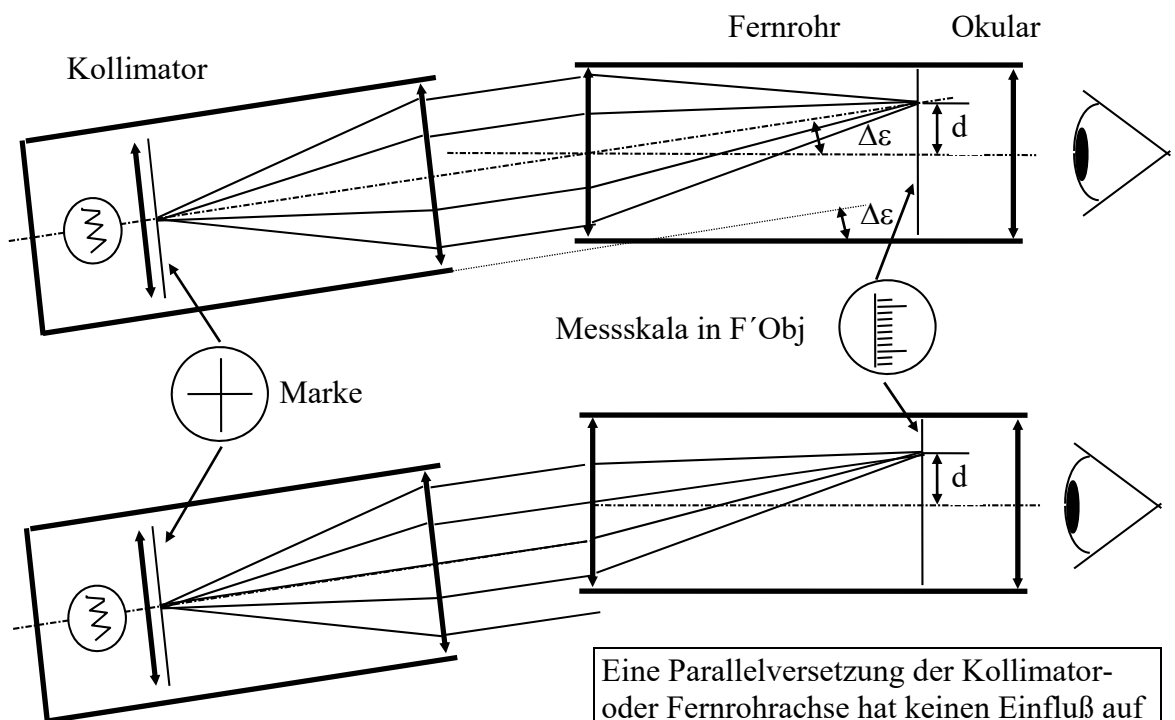
Messaufgabe:

- Justier- und Kontrollarbeiten erfordern die Feststellung von Winkeldifferenzen zwischen Achsen oder Flächen, d.h. eine *Richtungsprüfung*
- berührungsloses Erfassen von Winkelabweichungen und Verkippungen
- 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 $\Delta\varepsilon = d/f'_{\text{Obj}}$.

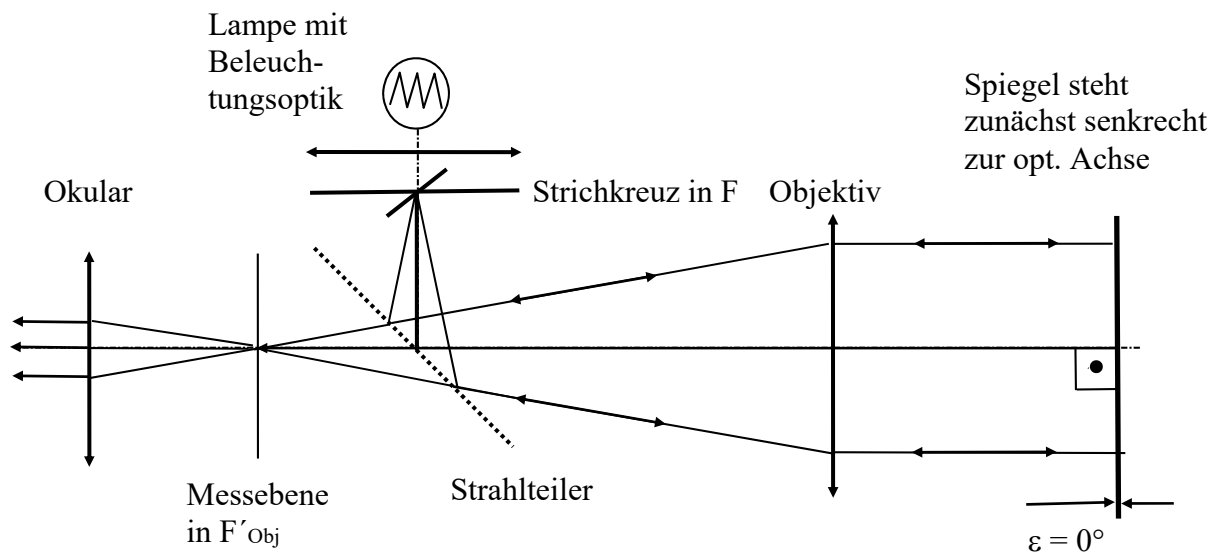


Eine Parallelversetzung der Kollimator- oder Fernrohrachse hat keinen Einfluß auf die Winkelmessung. Die Messanordnung ist gegenüber "Fluchtungs-differenzen" unempfindlich; sie zeigt nur Richtungs-differenzen.

Autokollimationsfernrohr (Versuch: OM I und II)

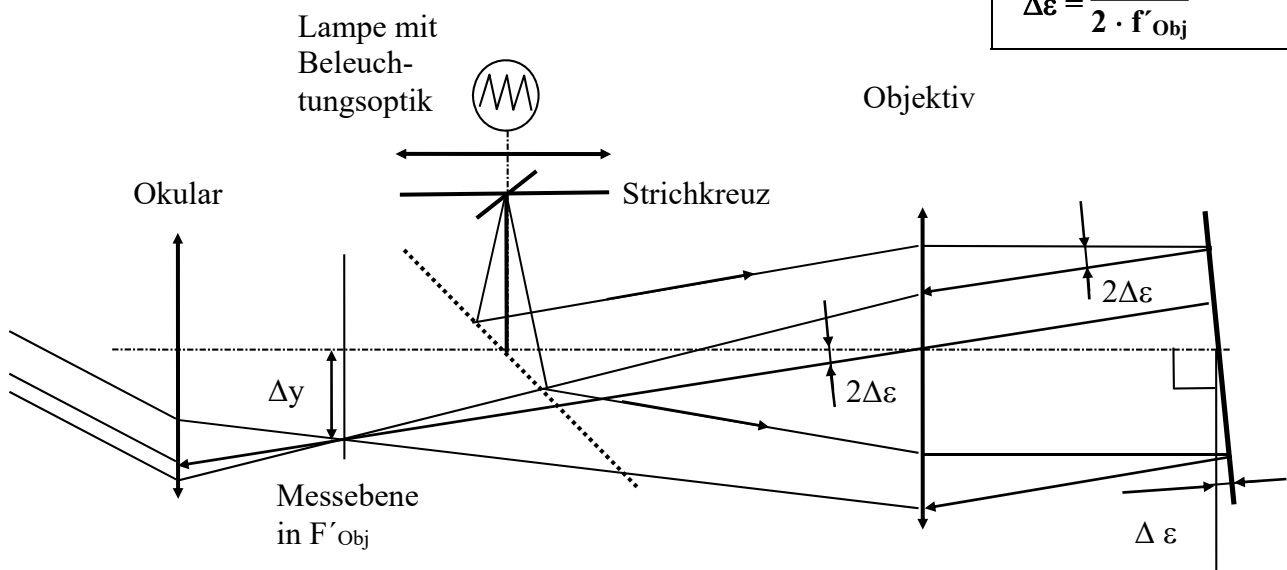
Im Autokollimationsfernrohr sind Kollimator (Beleuchtung) und Fernrohr (Abbildung) in einem Gerät zusammengefasst. Dies lässt sich durch einen Strahlteiler erreichen, welcher die Hälfte der auftreffenden Strahlungsenergie reflektiert und die andere transmittieren lässt. Die Marke M wird aus dem Brennpunkt 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' die Marke in die Messskala abgebildet wird.

Prinzipskizze:



AKF-Grundgleichung:

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



Beispiel eines visuellen AKF:

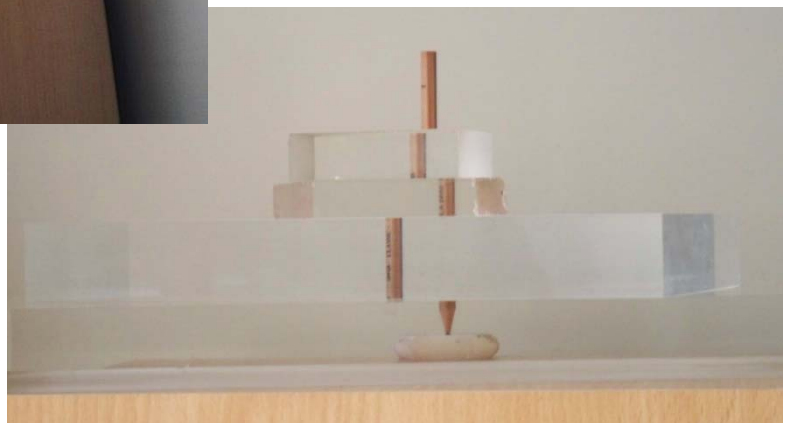


und eines elektronischen Autokollimators mit integriertem Bildsensor (CCD- oder CMOS-Sensor) und Visualisierung auf einem Bildschirm



(<https://trioptics.com/de/produkte/triangle-elektronische-autokollimatoren/>)

und – bildliche Überleitung zu einem zentralen Bauteil des Fluchtfernrohrs: der Planparallelplatte (PPP) sowie deren bildversetzenden Wirkung



Messungen mit dem Fluchtfernrohr (Versuch: FF)

Kleine Abweichungen von Bauteilen gegenüber einer Bezugsgeraden („Fluchtgeraden“) können mit Fluchtfernrohren bestimmt werden. Diese Fluchtungsprüfung (Geradheitsmessung) ist neben der Richtungsprüfung (möglich mit dem AKF) eine **messtechnische Grundaufgabe**. 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 Doppelstrichkreuz) eingestellt (fokussiert) werden.

Dazu ist es nötig, das Objektiv aus der sog. Unendlich-Position eines Unendlich-Fernrohrs näher zum Objekt (Messmarke) zu schieben, um ein scharfes Bild der Messmarke am Ort der Vergleichsmarke zu bekommen. Dieser Fernrohrtyp wird auch Endlich-Fernrohr genannt. Dieses Fernrohr ermöglicht durch das Vergrößern der Messmarke einen genaueren Markeneinfang und damit eine geringere Messunsicherheit.

Der Versatz y' des Messmarkenbildes zur Vergleichsmarke (Fadenkreuz) im Fernrohr kann nur bestimmt werden, wenn der Abbildungsmaßstab β' konstant ist.

Häufig wird jedoch die **Kompensationsmethode (Nullmethode)** angewandt, so auch im Praktikum:

eine zusätzlich vor dem Objektiv angebrachte Planparallelplatte wird so stark verkippt, bis durch den Parallelversatz des Hauptstrahls das Doppelstrichkreuz symmetrisch zum Strichkreuz (Vergleichsmarke) im Fernrohr liegt. Dieser Versatz y kann dann an der betreffenden Stellschraube für die Verkipfung nach einer Kalibrierung abgelesen werden.

