

3. Grundliegende Optische Systeme

3.1 Auge und Lupe

3.2 Kombination von Brechkräften

3.3 Grundsysteme aus zwei Linsen

3.4 Allgemeine zusammengesetzte Systeme

3. Grundliegende Optische Systeme

3.1 Auge und Lupe

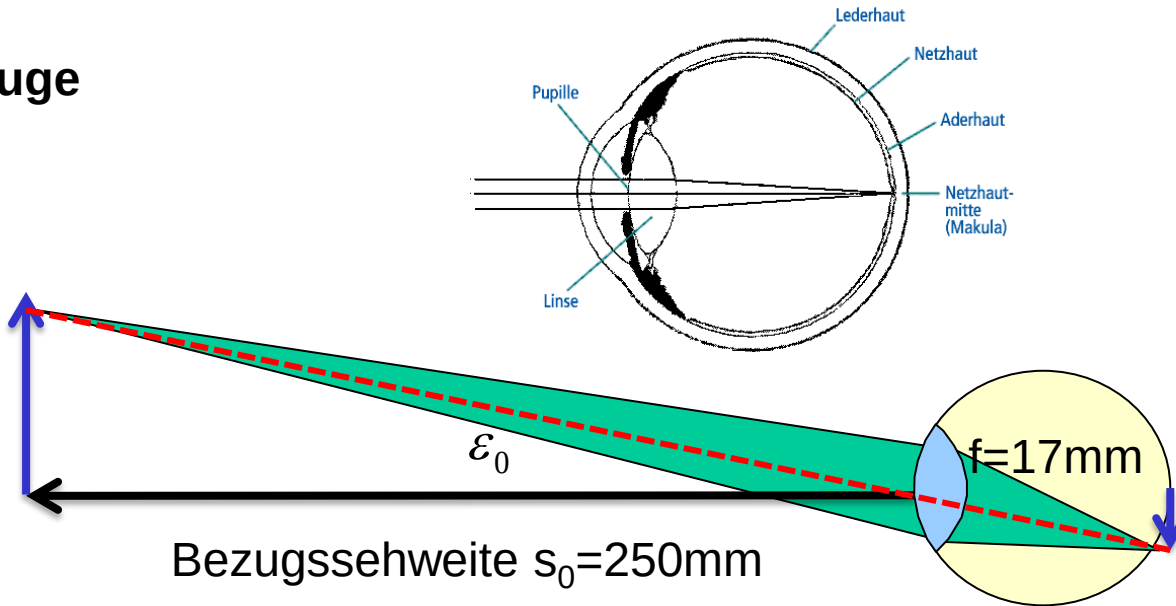
3.2 Kombination von Brechkraften

3.3 Grundsysteme aus zwei Linsen

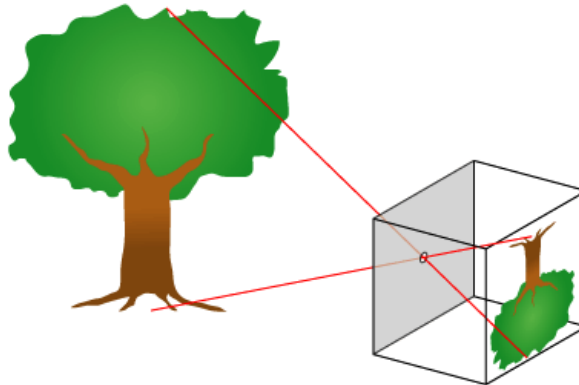
3.4 Allgemeine zusammengesetzte Systeme

Das Auge

Auge



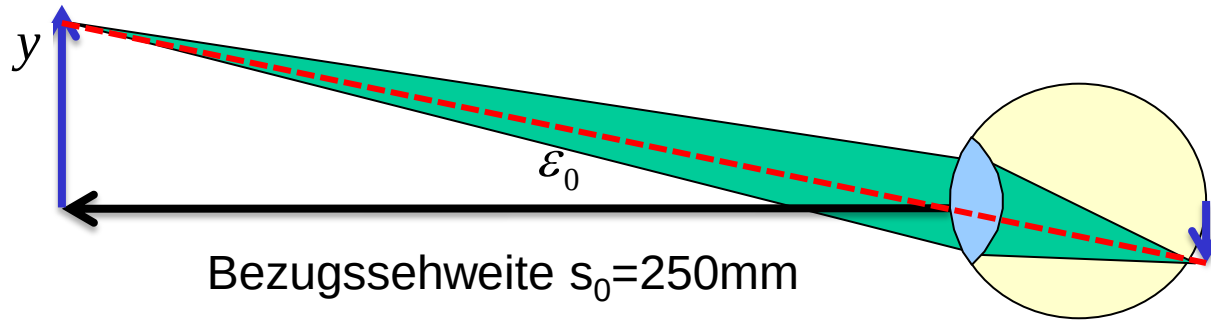
Vergleich: Loch-Kamera



Entscheidend für die Bildgröße ist der sog. Sehwinkel ε_0

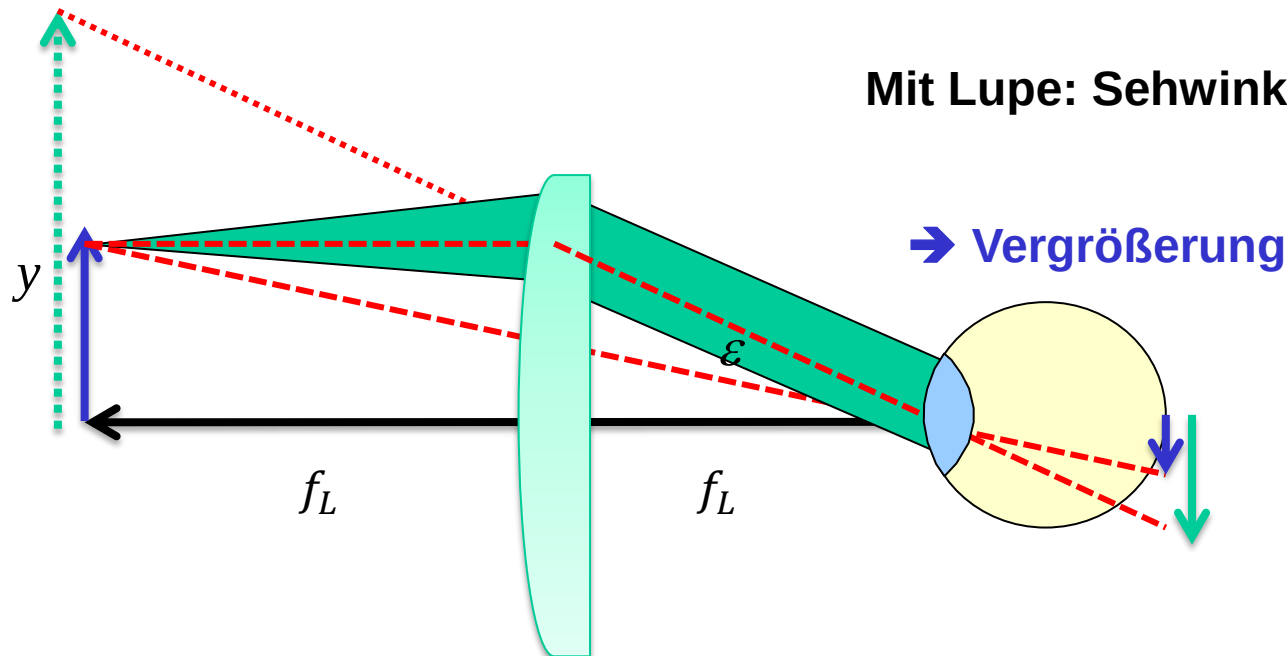
Auge: Sehwinkel

$$\varepsilon_0 = \frac{y}{250\text{mm}}$$



Mit Lupe: Sehwinkel

$$\varepsilon = \frac{y}{f_L'}$$



$$\Gamma = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{250\text{mm}}{f_L'}$$

(3.1)

Vergrößerung Optischer Instrumente

Bei der paraxialen Abbildung einer Linse hatten wir den **Abbildungsmaßstab** definiert:

$$\beta = \frac{\text{Bildgröße}}{\text{Objektgröße}}$$

Bei visuellen optischen System/Instrumenten (und bei afokalen Systemen) wird dagegen die **Vergrößerung** folgendermaßen definiert:

$$\Gamma = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3.2)$$

Man spricht auch von einer Winkelvergrößerung (engl. angular magnification)

Hierbei ist ε_0 der Sehwinkel in deutlicher Sehweite von 250 mm.

Okular = Lupe mit großem Bildfeld

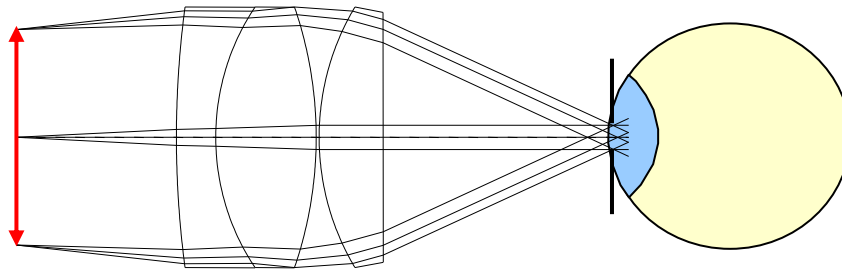
$$\Gamma = \frac{250\text{mm}}{f'_{\text{Okular}}}$$

Durchmesser Zwischenbild

10x / 20.6

O' ($\varnothing = 20.6 \text{ mm}$)

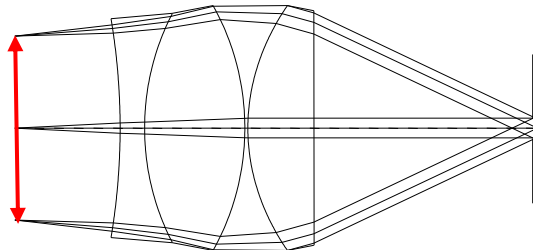
AP ($\varnothing_{\text{max}} = 2.3 \text{ mm}$)



12.5x / 17.6

O' ($\varnothing = 17.6 \text{ mm}$)

AP ($\varnothing_{\text{max}} = 1.9 \text{ mm}$)



3. Grundliegende Optische Systeme

3.1 Auge und Lupe

3.2 Kombination von Brechkräften

3.3 Grundsysteme aus zwei Linsen

3.4 Allgemeine zusammengesetzte Systeme

Abbildungsgleichung Einzelfläche

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \varphi$$

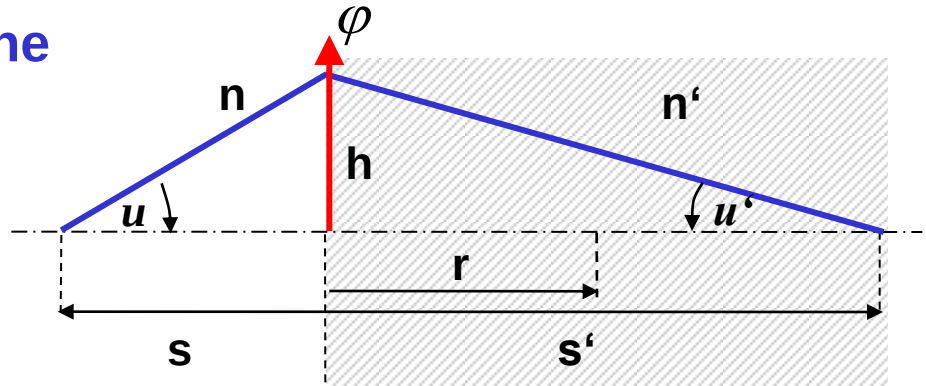
Multiplikation mit h

$$u = \frac{h}{s}, \quad u' = \frac{h}{s'}$$

$$n' \cdot u' - n \cdot u = h \cdot \varphi \quad (3.3)$$

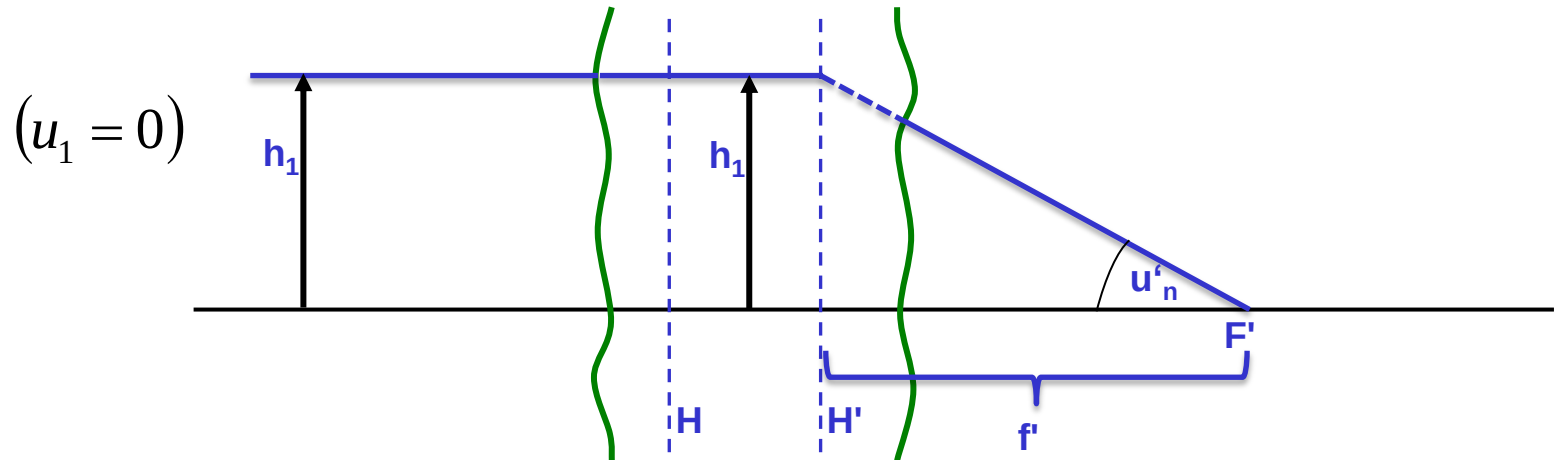
$$u' = \frac{h \cdot \varphi}{n'} + \frac{n}{n'} \cdot u$$

$$u' = h \cdot \varphi + u \quad \text{für} \quad n, n' = 1$$



Winkelübergang an einer Einzelfläche

Achspareller Einfallsstrahl:



$$f' = \frac{h_1}{u'_n}$$

$$\varphi = \frac{u'_n}{h_1}$$

(3.4)

Für ein zusammengesetztes System kann die Brennweite aus der Höhe des Achsparallel einfallenden Strahls und dessen Austrittswinkel bestimmt werden

Brechkraft zweiteiliger Systeme



Zusammengesetztes System aus zwei Brechkräften:

$$u'_1 = h_1 \cdot \varphi_1 / n_1$$

aus
(3.3)

$$u'_2 = h_2 \cdot \varphi_2 + \underbrace{h_1 \cdot \varphi_1}_{n_1 \cdot u'_1}$$

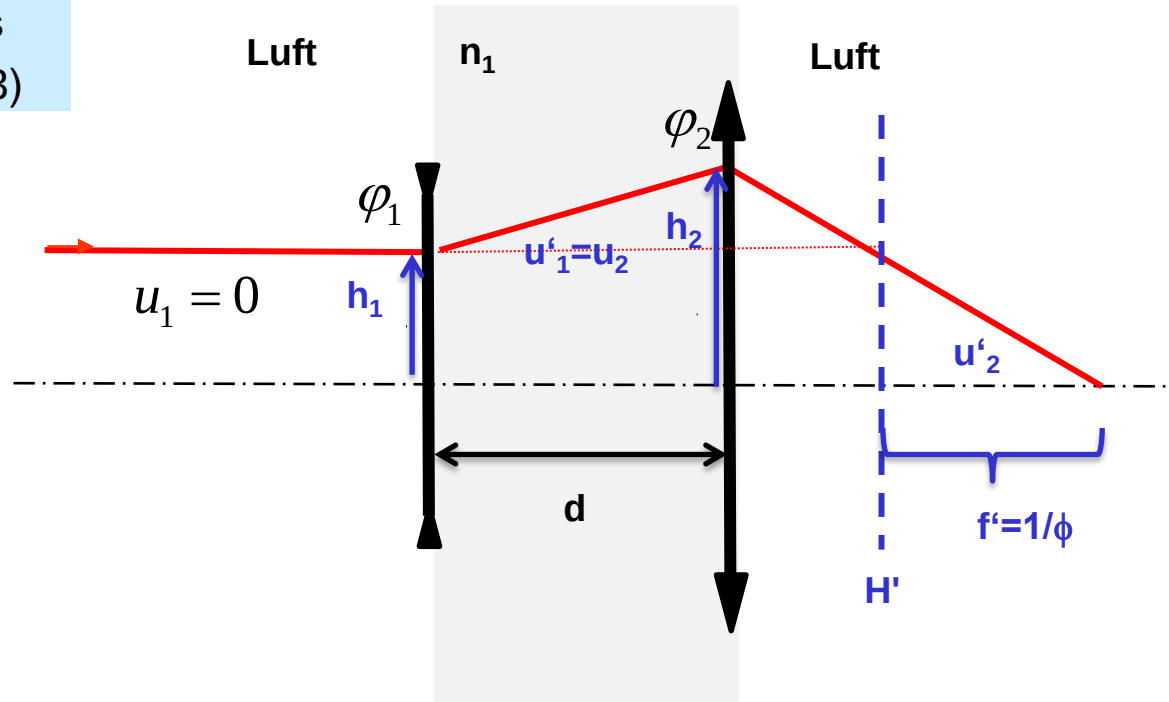
$$\varphi = \frac{u'_2}{h_1}$$

aus (3.4)

$$\varphi = \varphi_1 + \frac{h_2}{h_1} \varphi_2$$

$$h_2 = h_1 - d \cdot \underbrace{h_1 \cdot \varphi_1 / n_1}_{u'_1}$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d}{n} \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \quad (3.5)$$



Gesamtbrechkraft zweier Brechkräfte mit Abstand d (Brechungsindex n)

Gleichungen für die dicke Linse

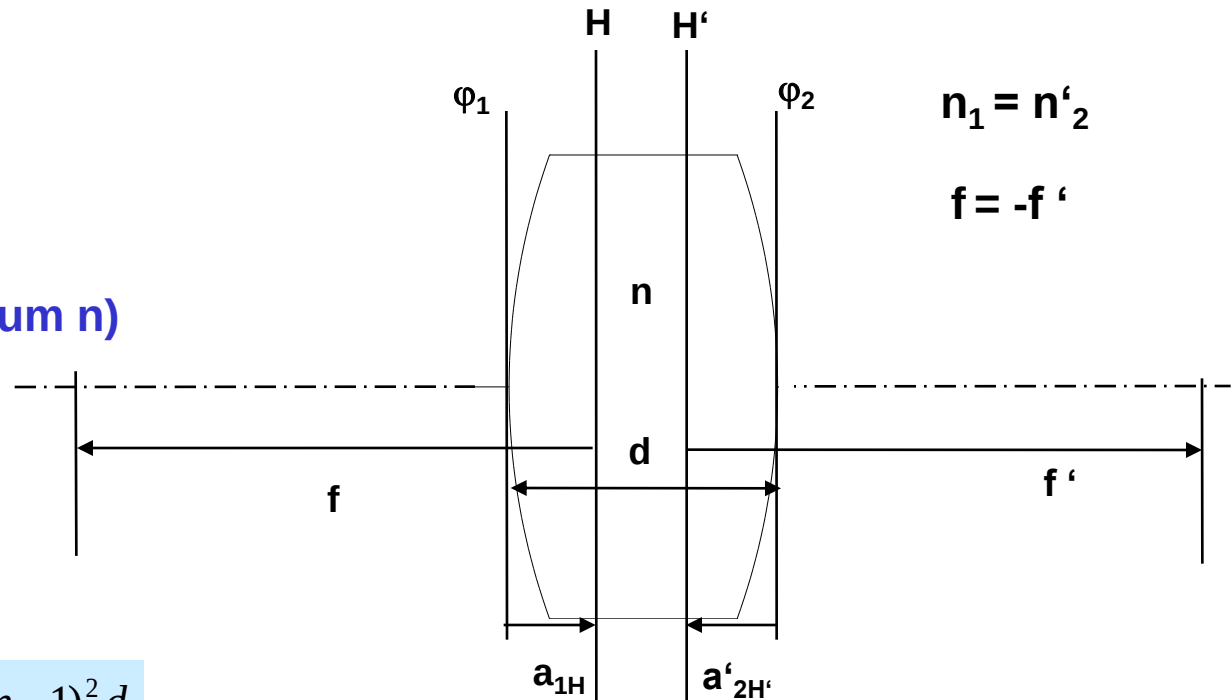


Einzelbrechkkräfte in Luft

$$\varphi_1 = \frac{n-1}{r_1} \quad \varphi_2 = \frac{1-n}{r_2}$$

Gesamtbrechkraft (Medium n)

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d}{n} \varphi_1 \varphi_2$$



Brechkraft dicke Linse

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{n r_1 r_2} \quad (3.6)$$

Vgl. dünne Linse

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Hauptebenen:

$$a_{1H} = f' \varphi_2 \frac{d}{n}$$

$$a'_{2H'} = -f' \varphi_1 \frac{d}{n}$$

(3.7)

Kombination von zwei Linsen in Luft

Kombination von zwei Brechkraften
in Luft ($n=1$)

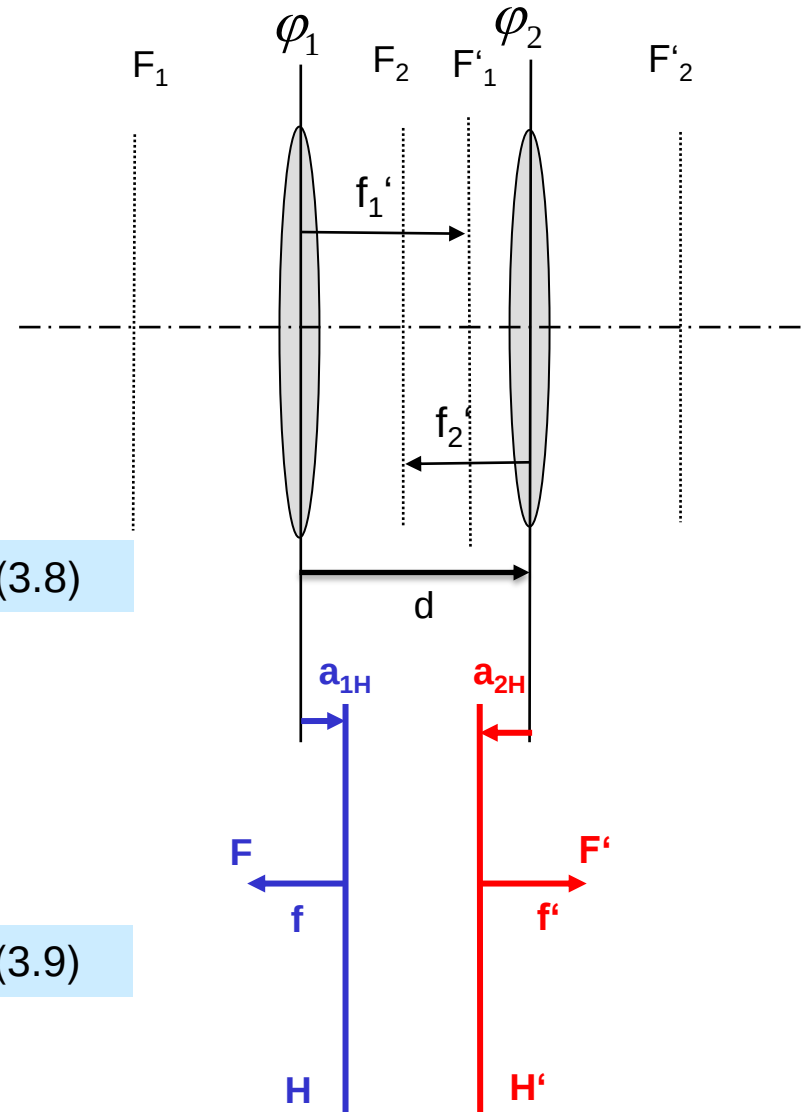
→ analog zur dicken Linsen folgt
(siehe Gl. 3.29 und Gl. 3.31)

Brechkraft:

$$\phi = \frac{1}{f'} = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2 \quad (3.8)$$

Hauptebenen:

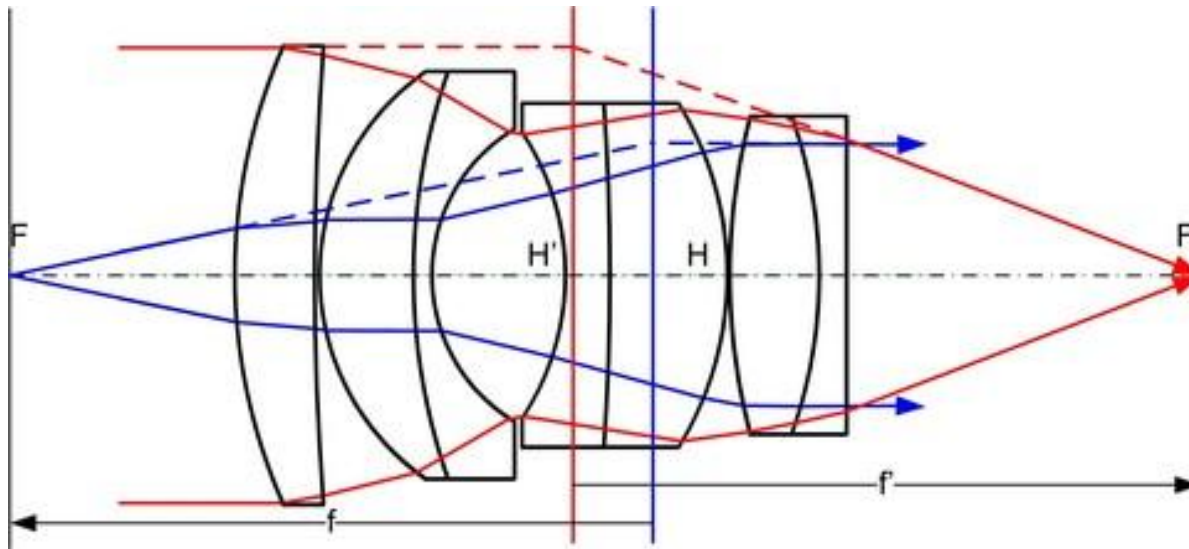
$$a_{1H} = f' \cdot \phi_2 \cdot d \quad a'_{2H'} = -f' \cdot \phi_1 \cdot d \quad (3.9)$$



Zusammengesetzte Systeme

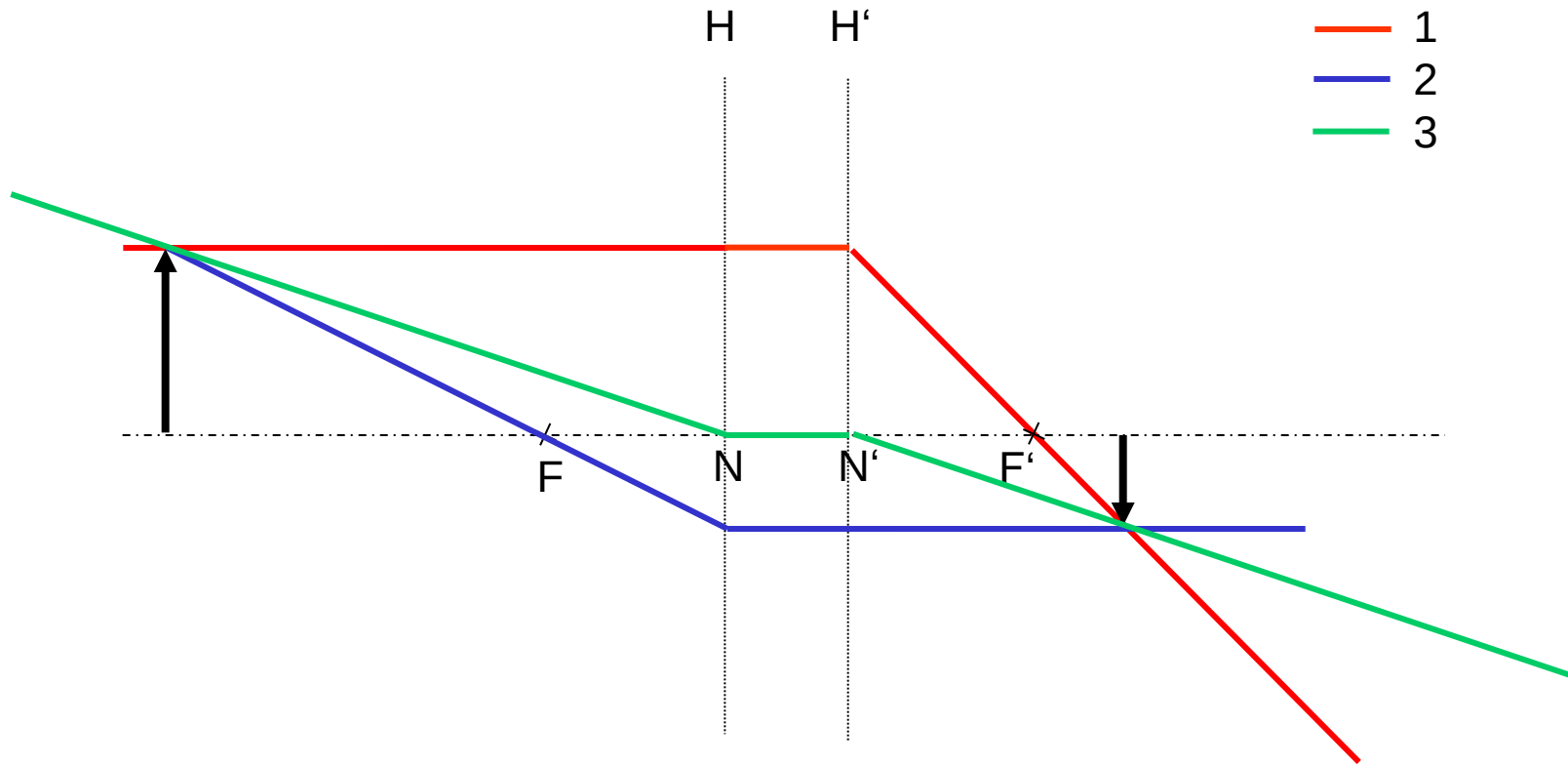


Auch für beliebige mehrlinse Systeme können die Hauptebenen angegeben werden. Diese sind zusammen mit der Gesamtbrechkraft für eine Strahlkonstruktion ausreichend !



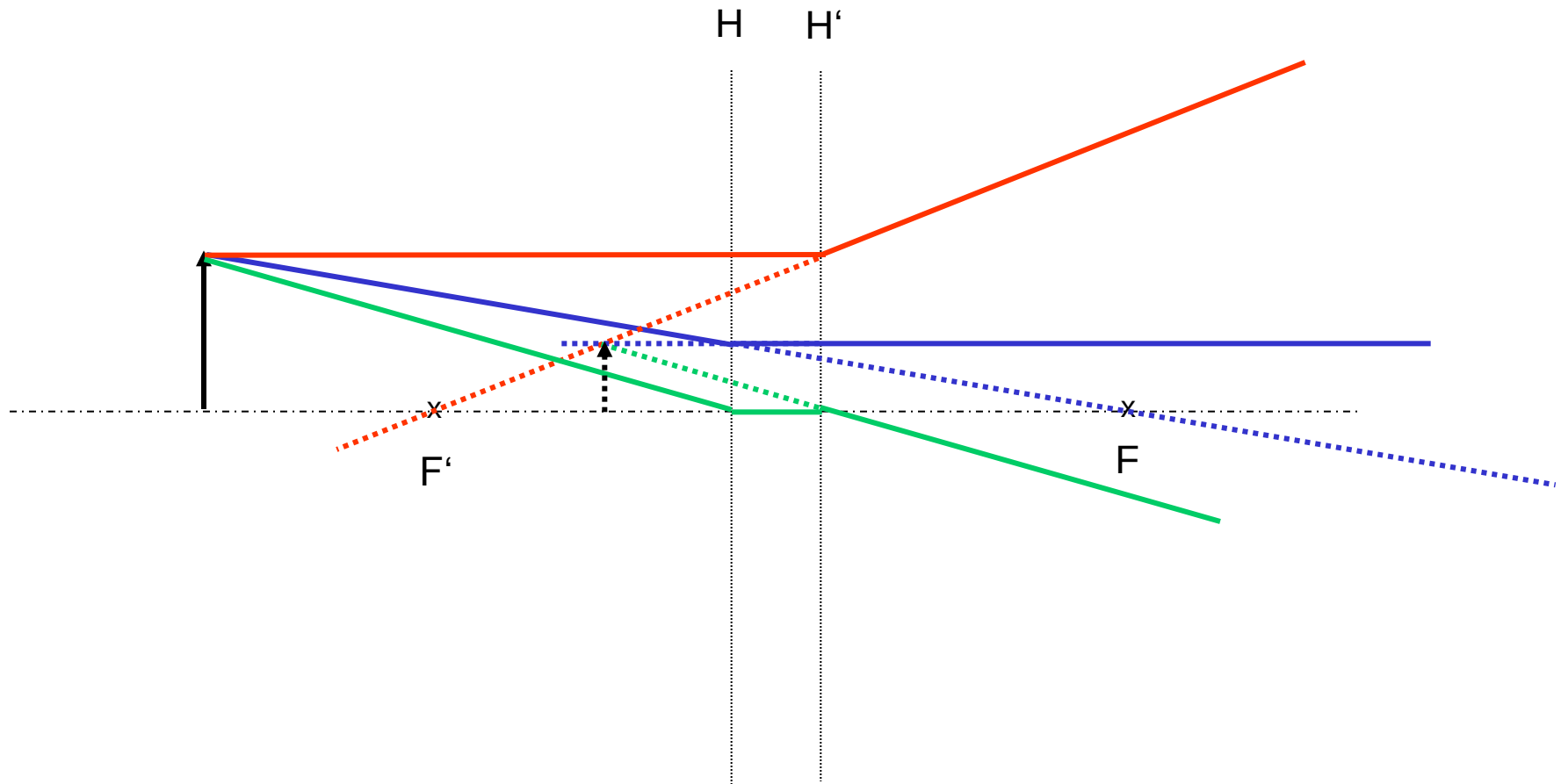
http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M03_C01/co/Contenu

Listing Konstruktion (Positive Brechkraft)



N = Knotenpunkte (nodal points) – in Luft identisch zu Hauptebenen
→ Jeder einfallende Strahl durch N verlässt N' unter demselben Winkel

Listing Konstruktion (Negative Brechkraft)



3. Grundliegende Optische Systeme

3.1 Auge und Lupe

3.2 Kombination von Brechkräften

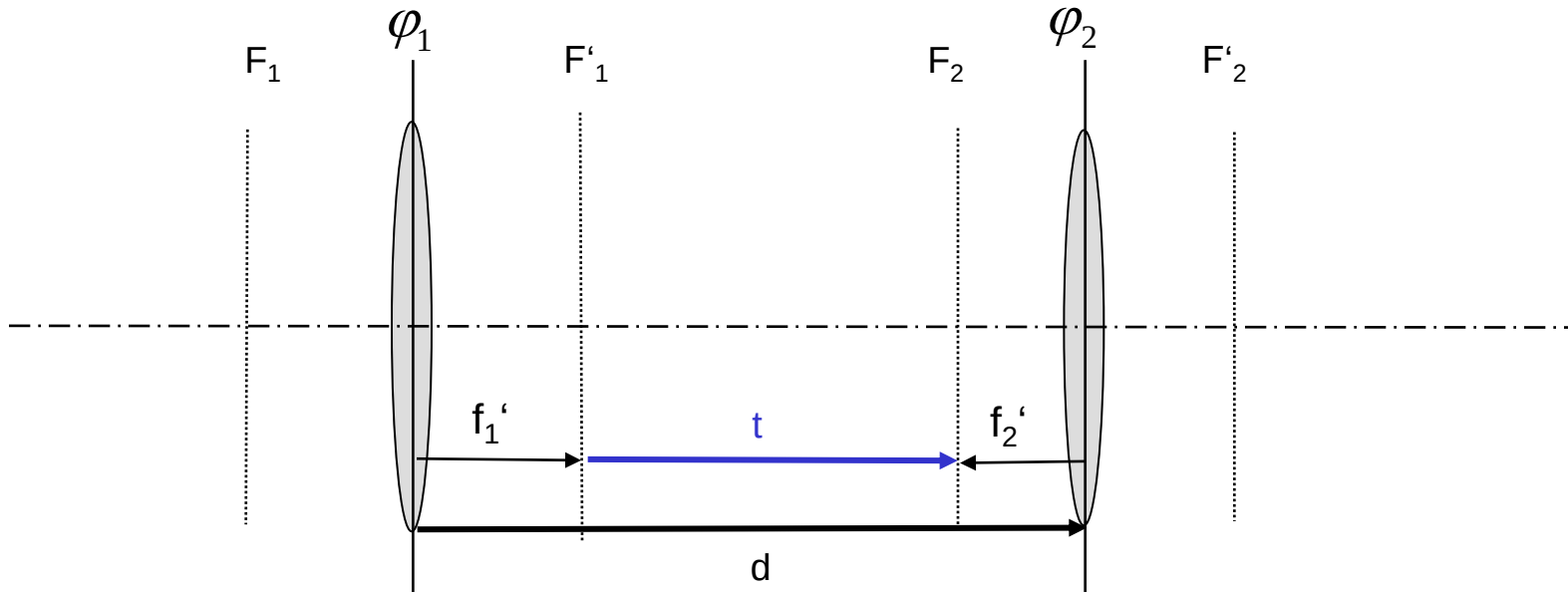
3.3 Grundsysteme aus zwei Linsen

3.4 Allgemeine zusammengesetzte Systeme

System aus zwei Linsen - Tubuslänge



Kombination von zwei positiven Linsen in Luft mit Abstand d



Brechkraft: $\phi = \frac{1}{f'} = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2$

Tubuslänge $t = \overline{F'_1 F_2}$ $t = d - f'_1 - f'_2$

Brennweite f': $f' = -\frac{f'_1 f'_2}{t}$ (3.10)

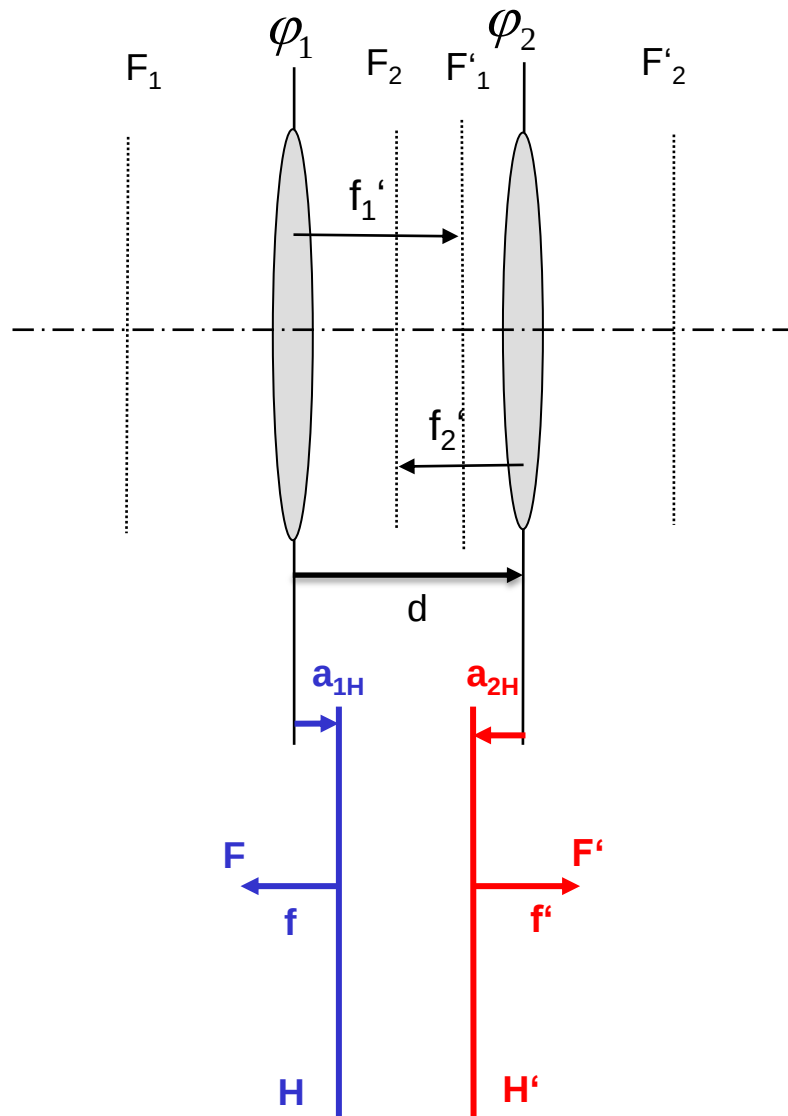
Hauptebenen:

$$a_{1H} = -\frac{f'_1 \cdot d}{t}$$

$$a'_{2H} = \frac{f'_2 \cdot d}{t}$$

System-Wirkung hängt von Tubuslänge t ab

Systeme aus zwei Linsen – Tubuslänge $t < 0$



Zwei Positivlinsen mit $t < 0$:

$$f' = -\frac{f_1' f_2'}{t} > 0$$

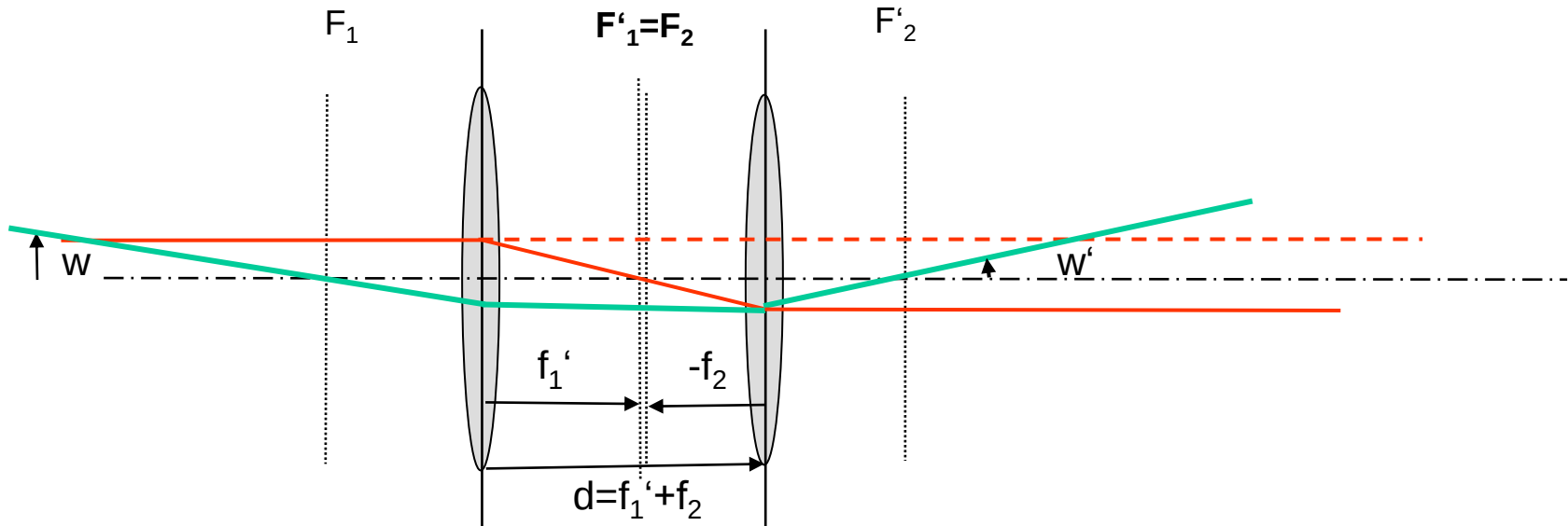
→ Positive Brechkraft

$$a_{1H} = -\frac{f_1' \cdot d}{t} > 0$$

$$a'_{2H'} = \frac{f_2' \cdot d}{t} < 0$$

→ Verhält sich wie dicke Linse

Kombination von zwei Positivlinsen mit Tubuslänge $t=0$



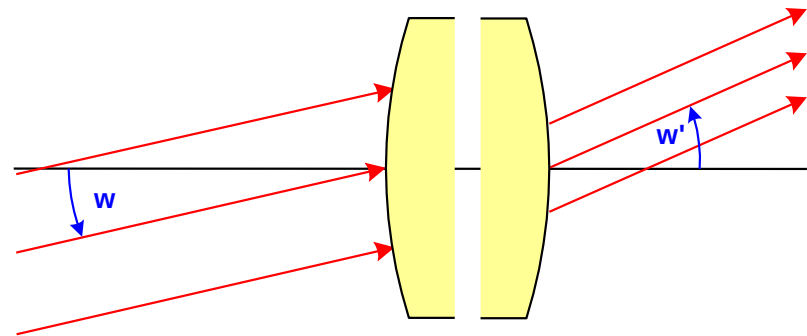
Tubuslänge $t = \overline{F_1'F_2} = 0$

Brennweite f' : $f' = -\infty$

➔ **Afokales System**

➔ **Winkelvergrößerung**

$$\Gamma = \frac{w'}{w}$$



Kepler Teleskop: Objektiv + Okular

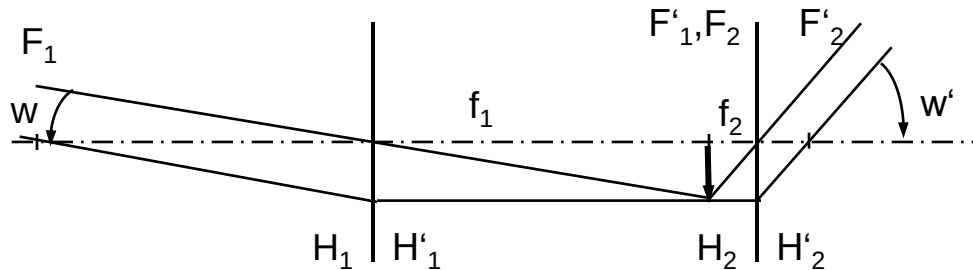
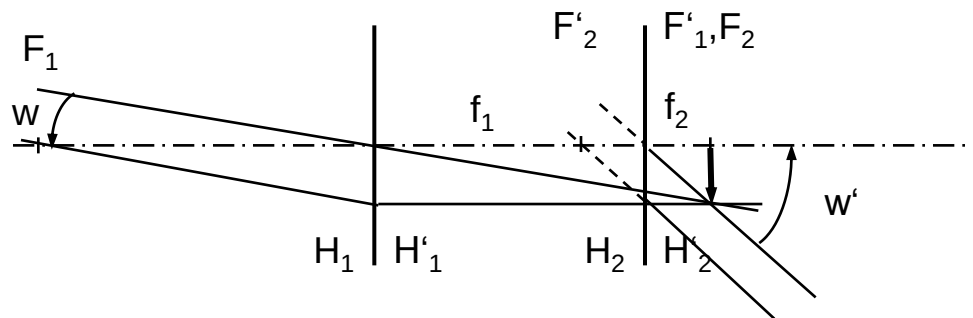


Bild ist umgekehrt

$$\Gamma = \frac{w'}{w} = -\frac{f_1}{f_2} < 0 \quad (3.11)$$

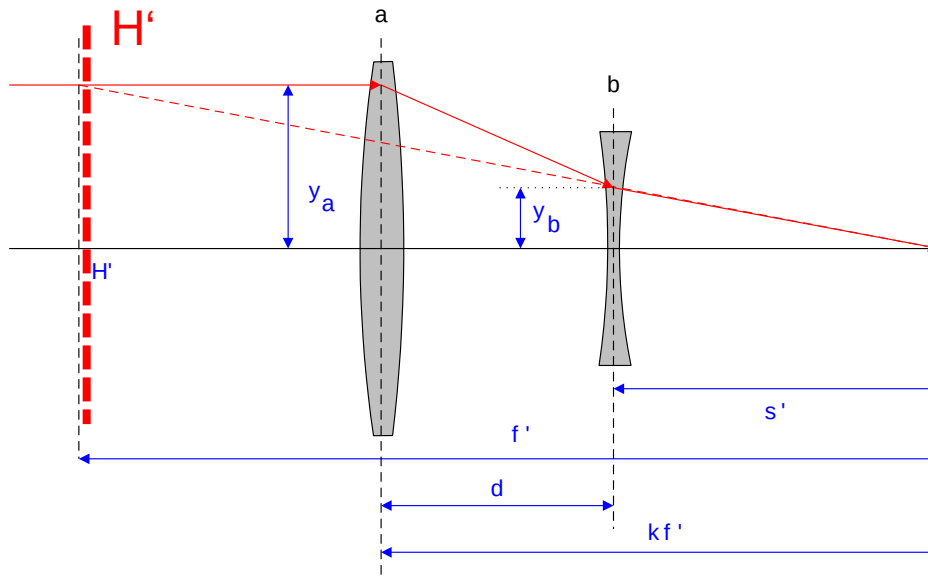
Galilei Teleskop: Objektiv + negative Linse



= Holländisches Teleskop
= Opernglas
= Aufrechtes Bild

$$\Gamma = \frac{w'}{w} = -\frac{f_1}{f_2} > 0 \quad (3.12)$$

Systeme aus zwei Linsen – Tubuslänge $t > 0$



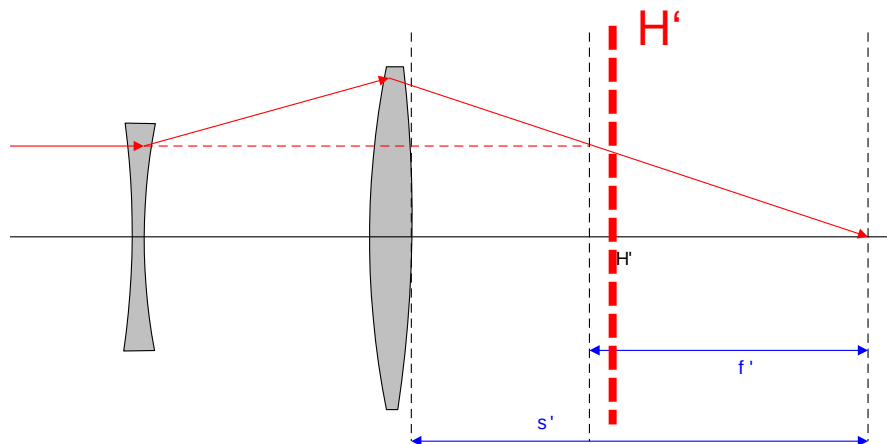
Positivlinse / Negativlinse mit $t > 0$:

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{t} > 0$$

→ Positive Brechkraft zuerst
(Telephoto)

$$a'_{2H'} = \frac{f'_2 \cdot d}{t} < 0$$

→ H' nach vorn verlagert

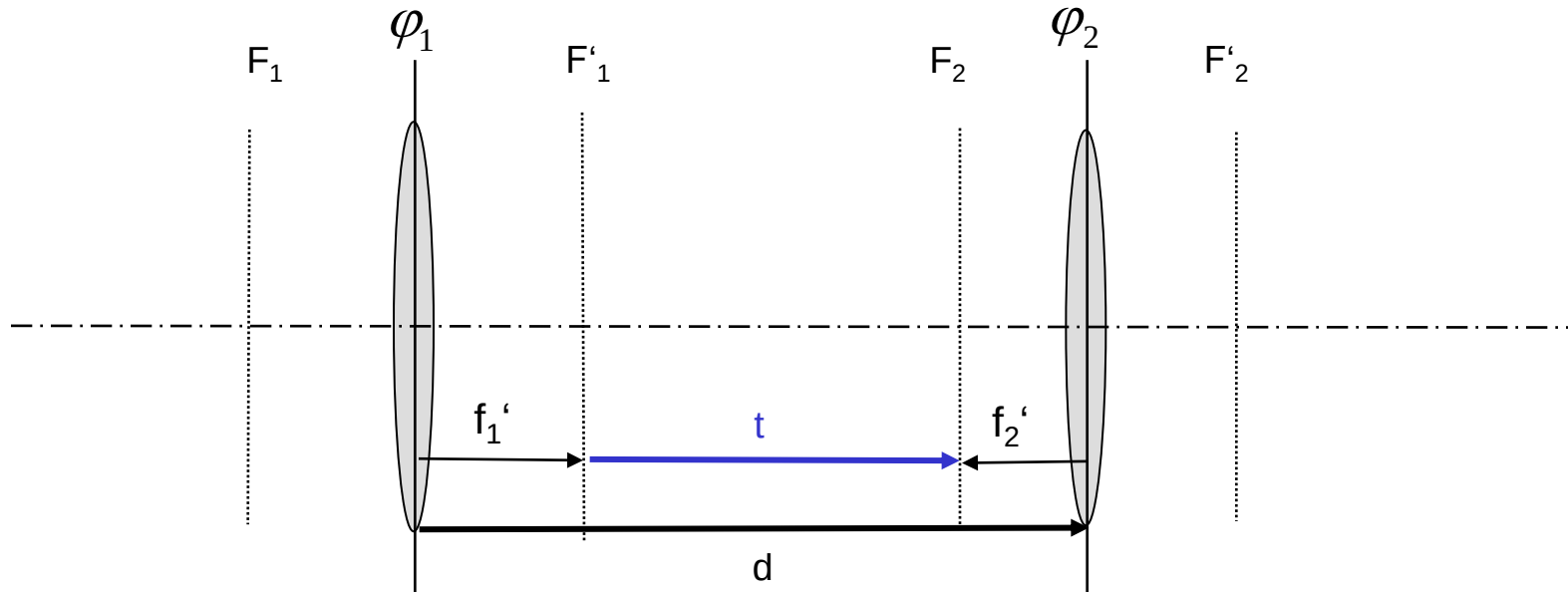


→ Negative Brechkraft zuerst
(Retrofokus)

$$a'_{2H'} = \frac{f'_2 \cdot d}{t} > 0$$

→ H' nach hinten verlagert

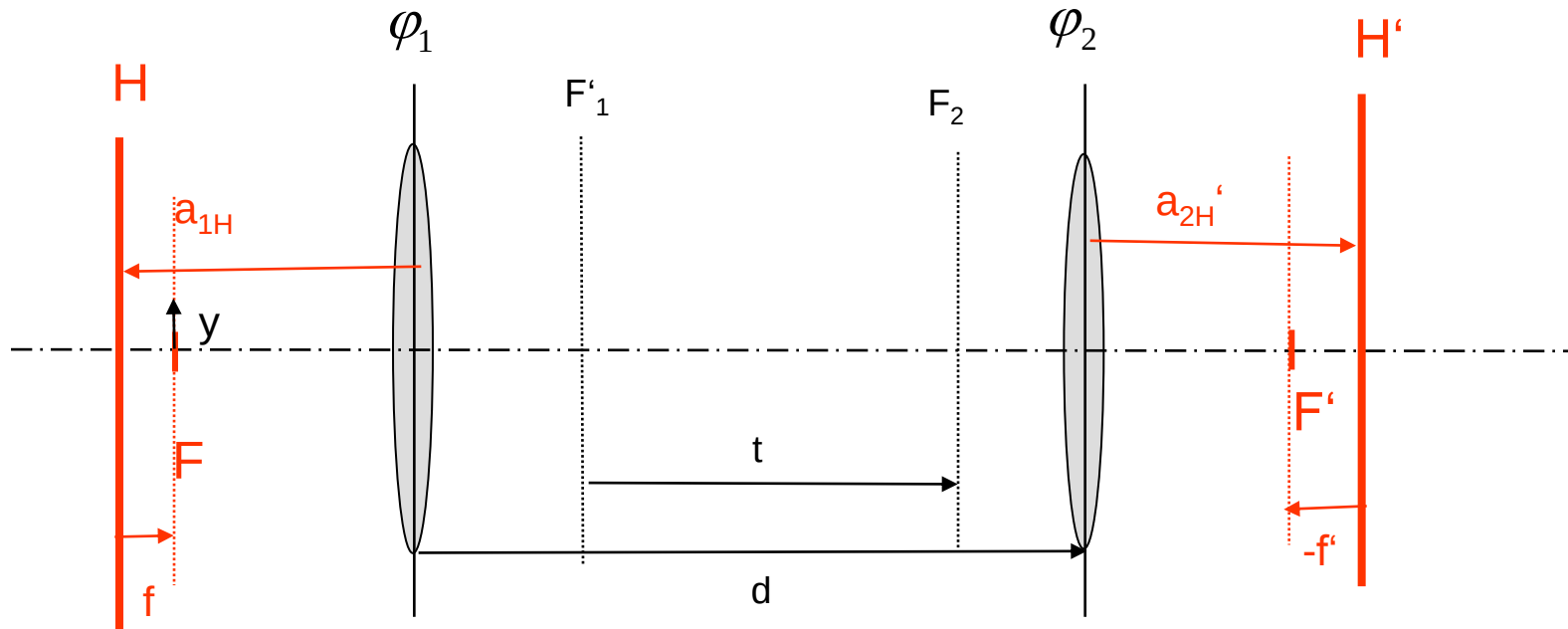
Kombination von zwei positiven Linsen in Luft mit größerem Abstand



Brennweite f' :

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{t}$$

→ Für positive t wird f' negativ !



Hauptebenen:

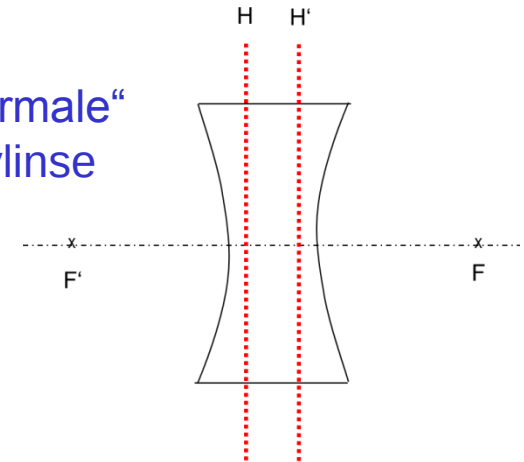
$$a_{1H} = f' \cdot \varphi_2 \cdot d < 0$$

vgl. (3.9)

$$a'_{2H'} = -f' \cdot \varphi_1 \cdot d > 0$$

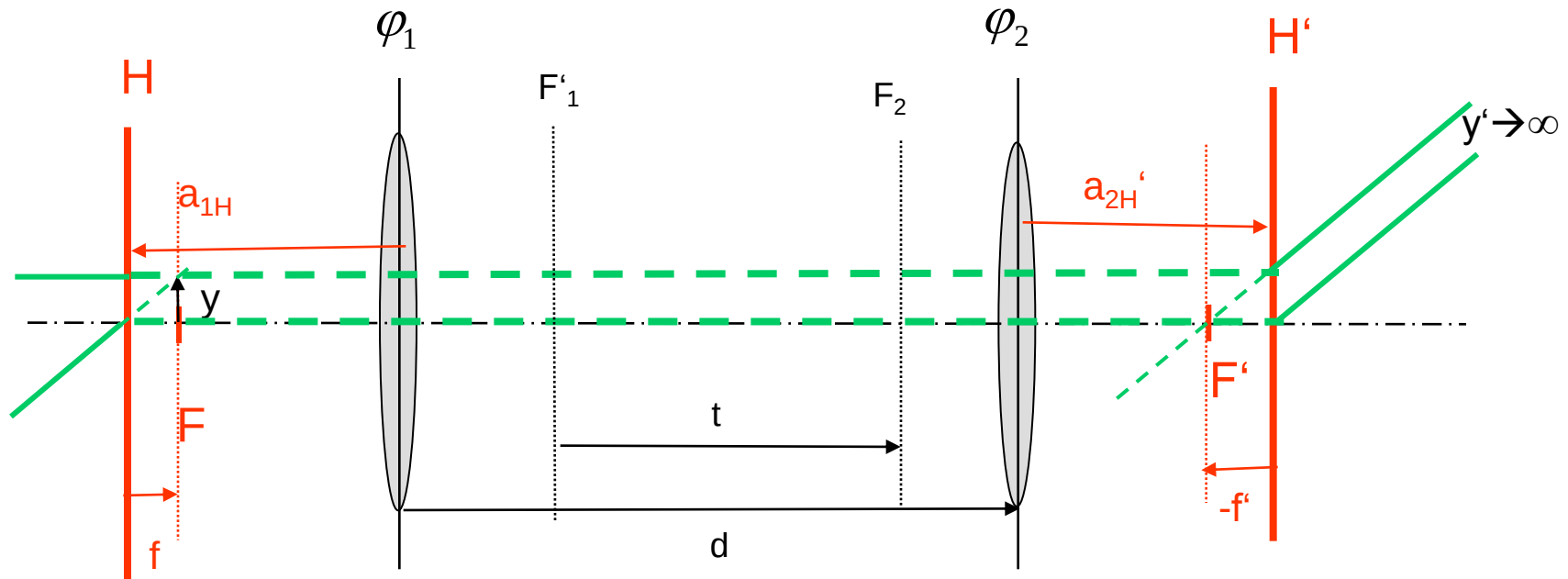
➔ Hauptebenen liegen weit auseinander
(Abstand > Brennweite)
+ Negative Brechkraft

vgl. „normale“
Negativlinse

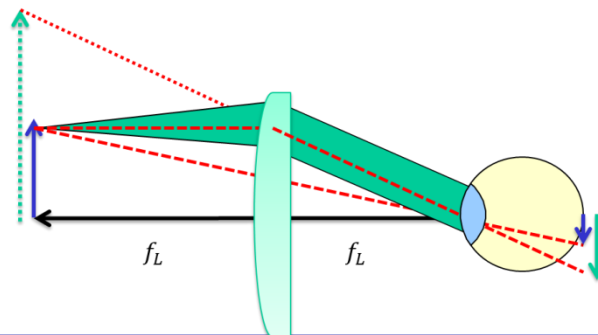


→ Im Gegensatz zu einfache Negativlinse ist damit die objektseitige Brennebene (F) real und zugänglich

➔ Für Objekt im Brennpunkt ➔ Bild im Unendlichen



= Lupe → Mikroskop



3. Grundliegende Optische Systeme

3.1 Auge und Lupe

3.2 Kombination von Brechkräften

3.3 Grundsysteeme aus zwei Linsen

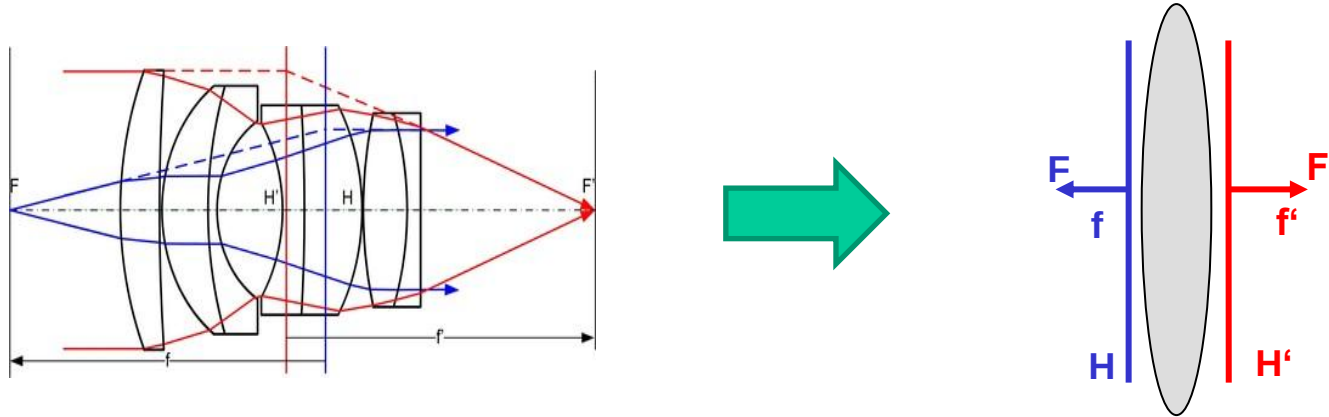
3.4 Allgemeine zusammengesetzte Systeme

Allgemeine Zusammengesetzte System



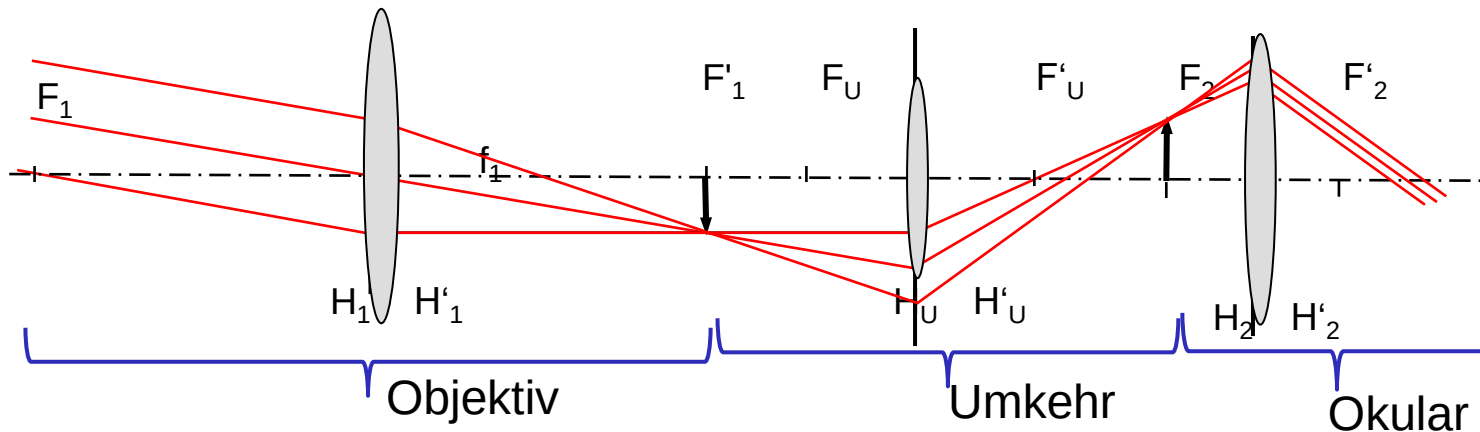
Fall 1: Mehrlinsige Systeme eng beieinander

→ Beschreibung als Ersatzsystem mit Gesamtbrechkraft und Hauptebenen

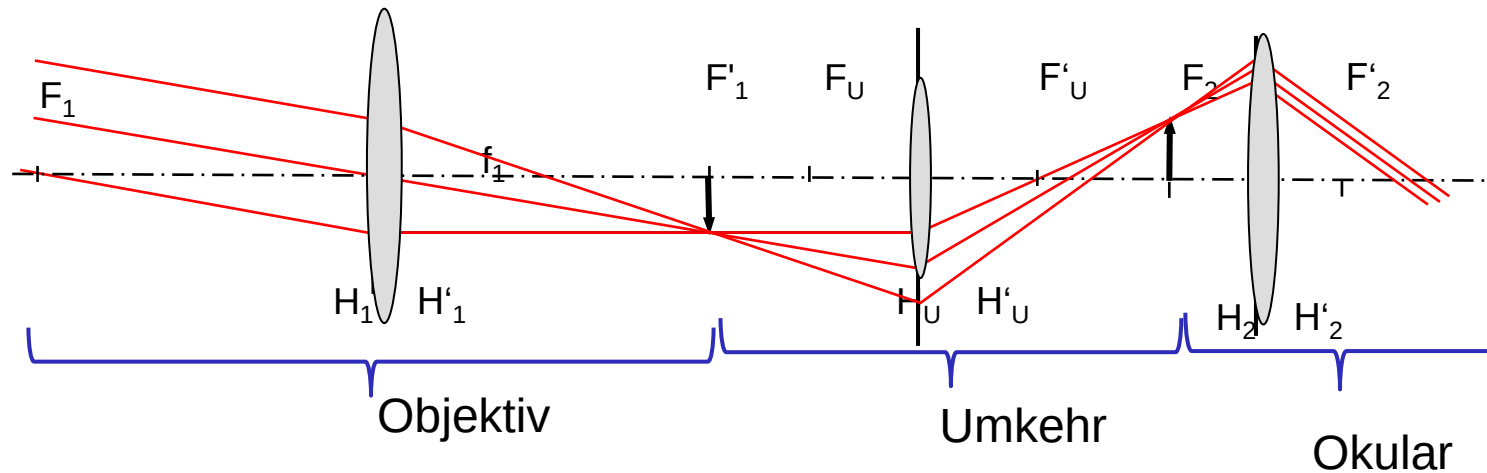


Fall 2: Mehrlinsige Systeme weit auseinander

→ Aufteilung des Systems in Abbildungsstufen



Aufteilung des Systems in Abbildungsstufen



Die Gesamtwirkung wird dann durch Kombination der Einzelsysteme beschrieben.

➔ Z.B. Gesamtvergrößerung ist Produkt der Einzelvergrößerungen

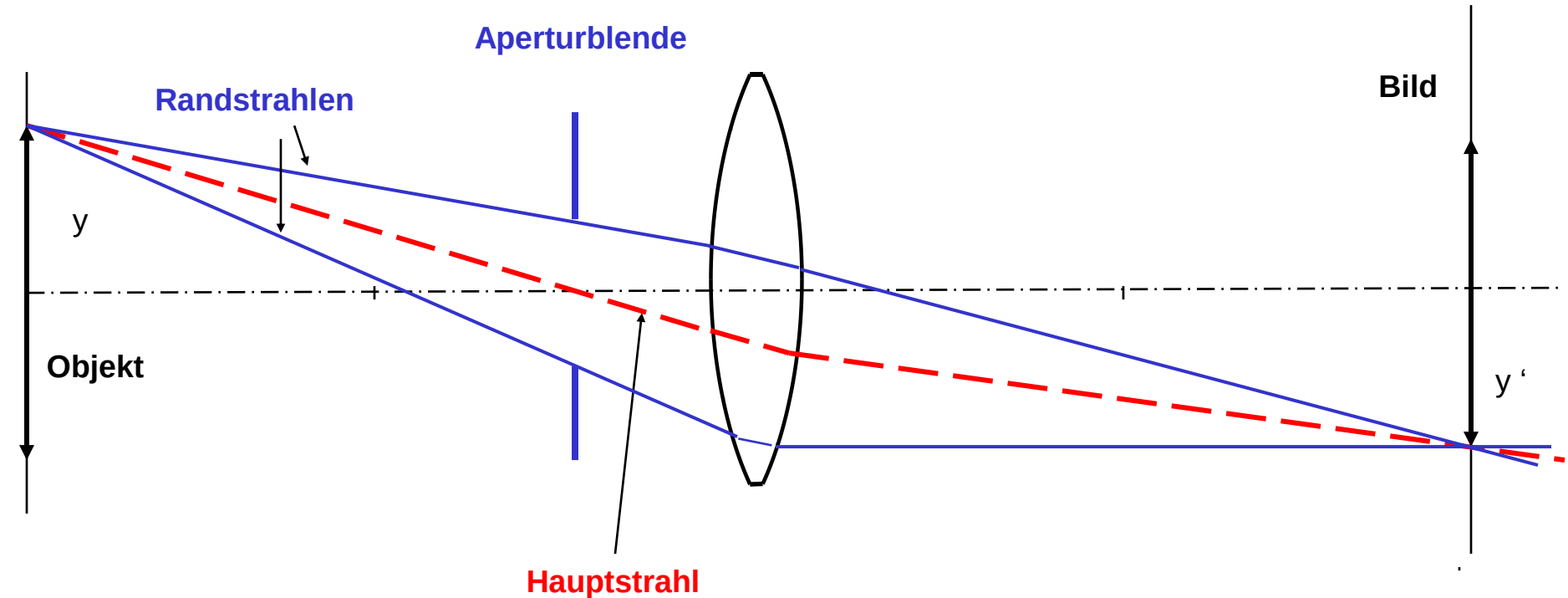
$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n$$

$$\Gamma = \Gamma_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \Gamma_n$$

Was ist eine Pupille ?



Die **Aperturblende** beschränkt den Lichtstrom der vom System aufgenommen wird und damit zur Abbildung beiträgt → **Größe und Lage der Aperturblende sind wichtige Größen**



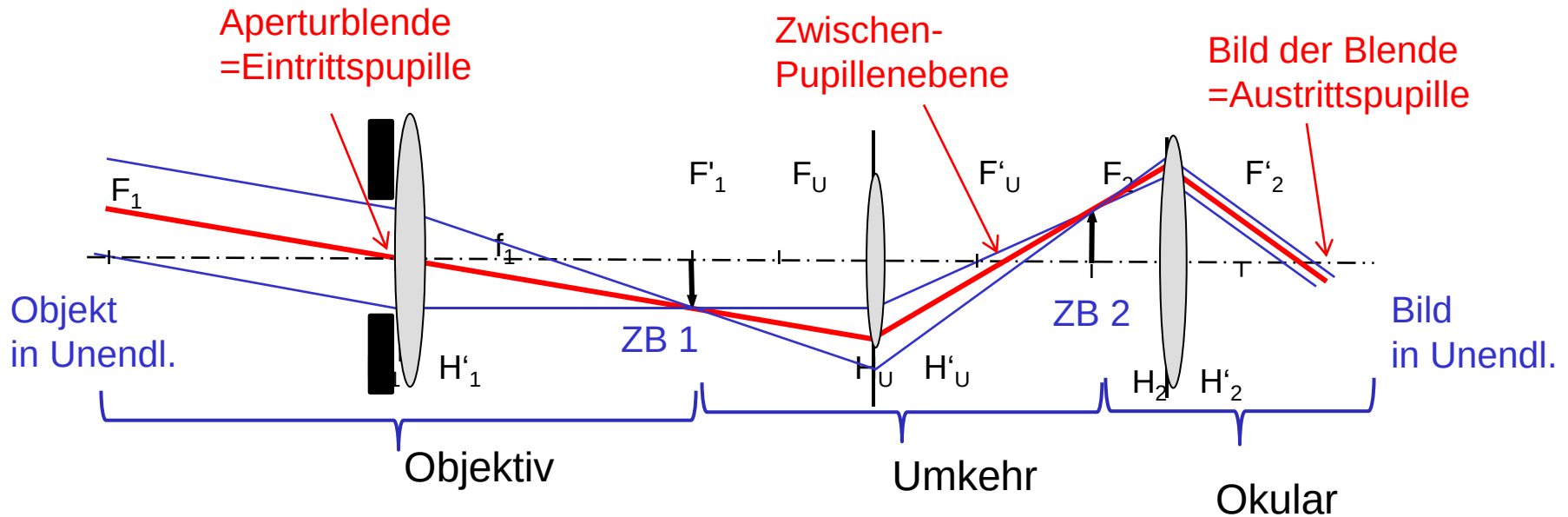
Hauptstrahl: Strahl von einem Feldpunkt durch die Mitte der Aperturblende

Randstrahl: Strahlen von einem Feldpunkt zum Rand der Aperturblende

Pupillenlage in zusammengesetzten Systemen



Die **Pupillen** (z.B. Eintritts- und Austrittspupille) sind **Bilder der Aperturblende**.
Der **Hauptstrahl** schneidet hier die optische Achse



Pupillen-Ebenen sind Bilder der Aperturblende

Feld-Ebenen sind Bilder des Objektes

Man spricht in beiden Fällen von **konjugierten Ebenen**

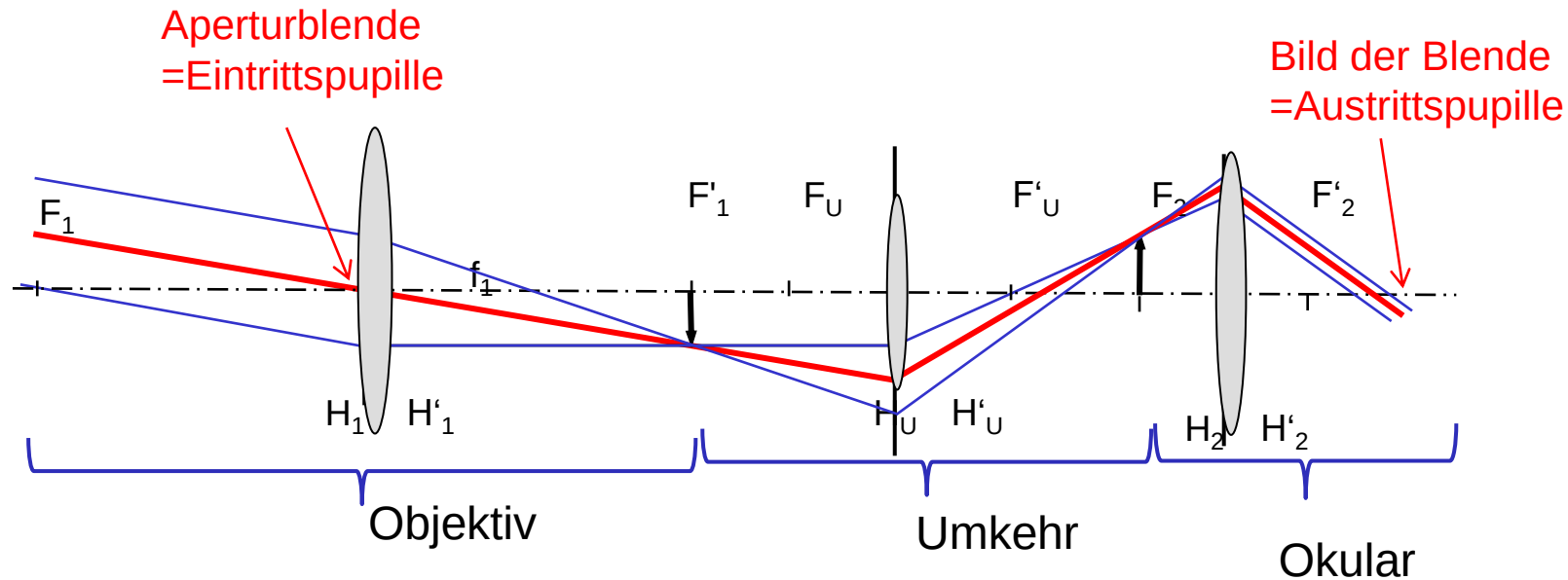
Pupillenvergrößerung



Der Abbildungsmaßstab für die Pupillenabbildung (Pupillendurchmesser, NA) verhält sich umgekehrt wie der Abbildungsmaßstab für das Feld (Feldwinkel, Feldgröße).

Unten: **Teleskop** = Winkelvergrößerung
→ Verkleinerung der Eintrittspupille

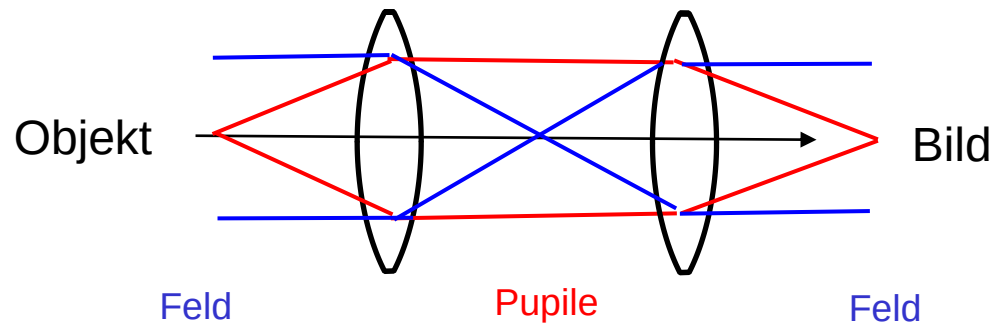
$$\frac{D'_{AP}}{D_{EP}} = \frac{1}{\Gamma} = \frac{w}{w'} \quad (3.13)$$



Mikroskop = Abbildungsvergrößerung
→ Verkleinerung der NA

$$\frac{NA'_{Bild}}{NA_{Objekt}} = \frac{1}{\beta} = \frac{y}{y'} \quad (3.14)$$

- Die Feld- und Pupillenabbildung sind untrennbar miteinander verbunden
Man spricht man von verflochtenen Strahlengängen.
- Feld und Pupille folgen stets abwechselnd aufeinander.
Niemals stehen zwei Felder oder zwei Pupillen unmittelbar hintereinander.

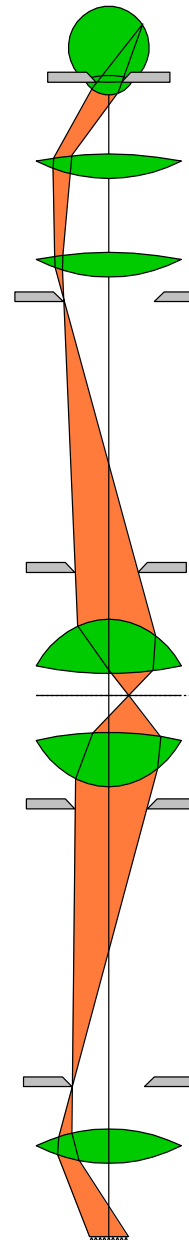


Verflochtene Strahlengänge

Gesamtsystem ist
zusammengesetzt aus:

- Auge
- Okular
- Objektiv
- Kondensor
- Kollektor

Lukenstrahlengang



Netzhautbild
Auge
Austrittspupille
Mikroskop

Okular

Zwischenbild

Austrittspupille

Objektiv

Objektebene

Kondensor

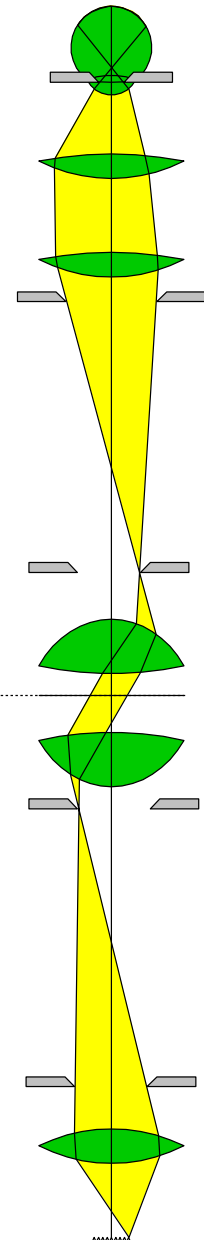
Beleuchtungs-
Aperturblende

Leuchtfeldblende

Kollektor

Lichtquelle

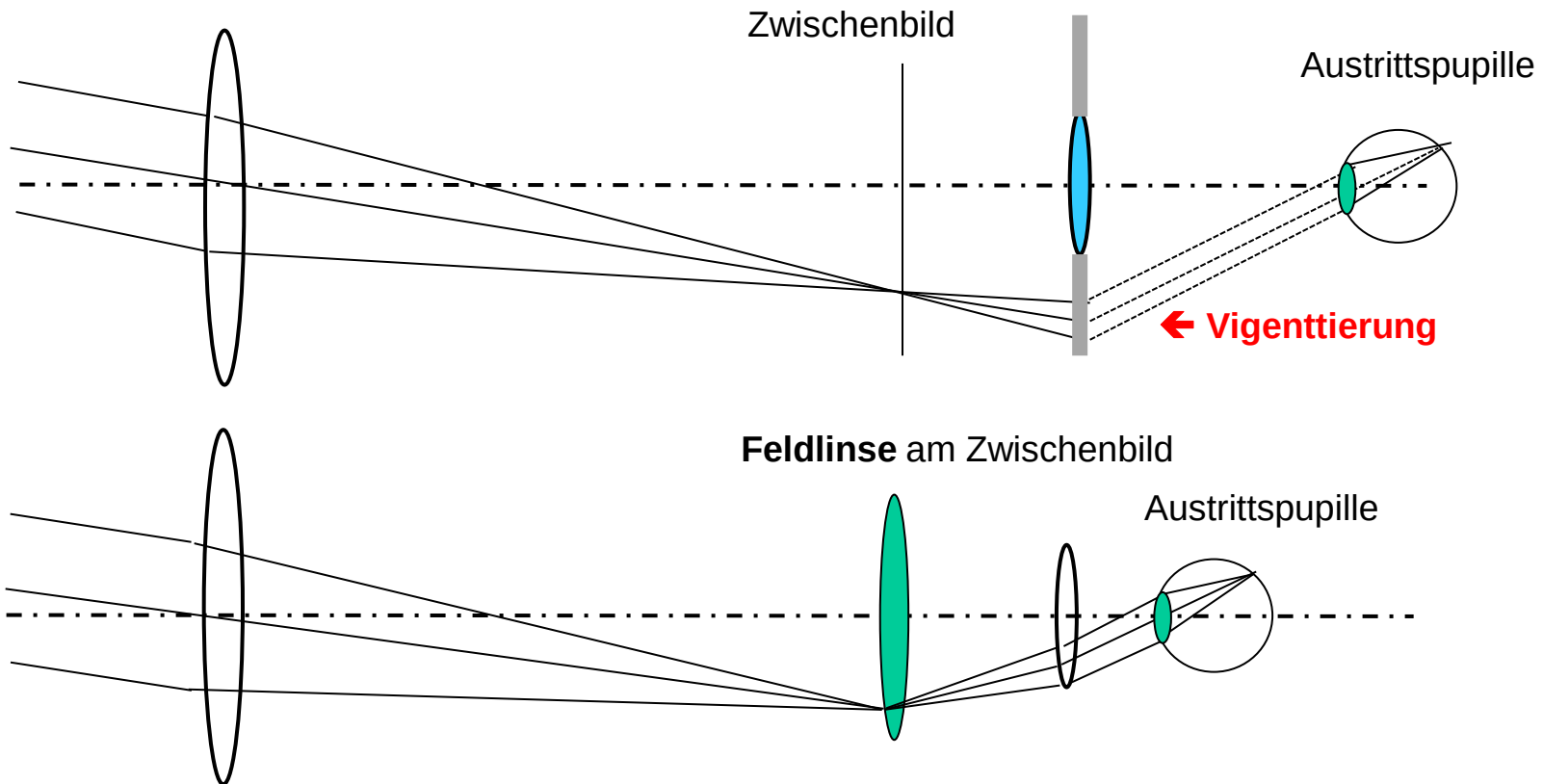
Pupillenstrahlengang



Verflochtene Strahlengänge

Wichtig:

In zusammengesetzten Systeme müssen die Nahtstellen, d.h. Zwischenbildebenen und Pupillenebenen aufeinander abgestimmt sein !



→ **Feldlinse steuert Pupillenlage**

→ **Wichtig zur Anpassung an Folge-Systeme (z.B. Objektiv – Okular)**

- größeres Bildfeld
- geringerer Augenabstand