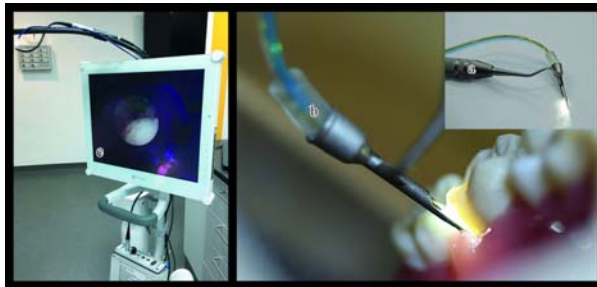
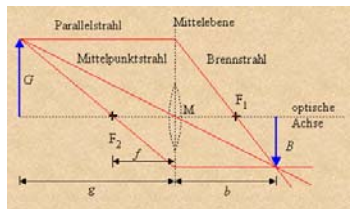


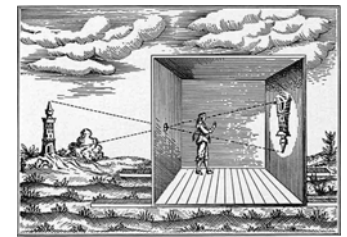
# Licht in der Medizin. Brechung, Linsen, Mikroskop

## Strahlenoptik

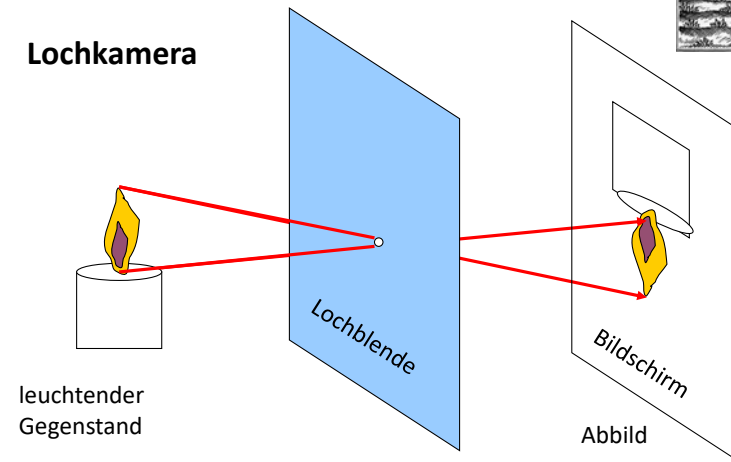


KAD 2023.09.19

# Geradlinige Ausbreitung



## Lochkamera



2

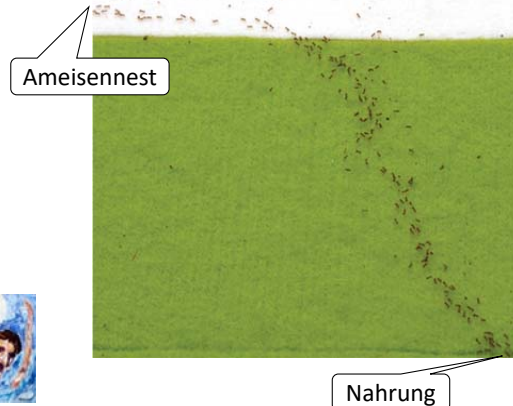
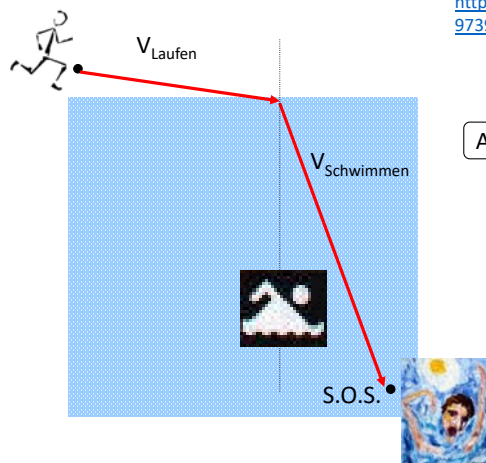
## Fermatsches Prinzip:

das Licht wählt zwischen zwei Punkten den schnellsten Weg  
(und nicht den geometrisch kürzesten Weg)

### Das Rettungsschwimmer Problem

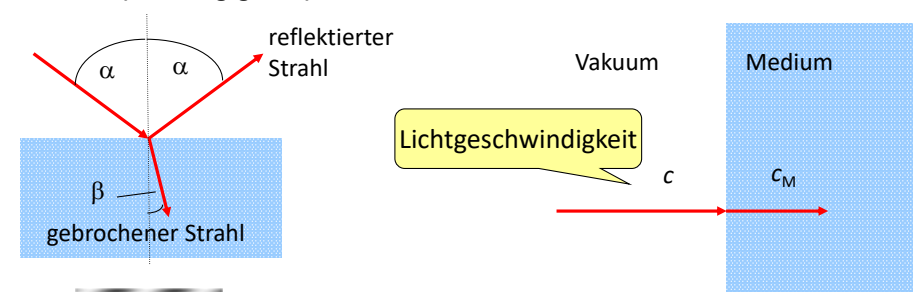
### Das Prinzip gilt auch für Ameisen!

Oettler J et al. (2013) Fermat's Principle of Least Time Predicts Refraction of Ant Trails at Substrate Borders. PLOS ONE 8(3): e59739.  
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0059739>



## Lichtbrechung

aus dem Fermatschen Prinzip ergibt sich das **Gesetz von Snellius-Descartes**  
(Brechungsgesetz)



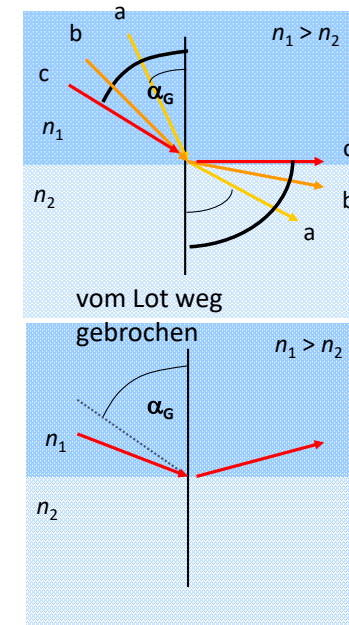
absolute Brechzahl:

$$n = \frac{c}{c_M} \geq 1$$

Ist  $n_1 > n_2$ , so heißt Medium 1 optisch dichter, als Medium 2

4

# Totalreflexion



$\alpha_G$  — Grenzwinkel

(s. Refraktometer)

$\alpha > \alpha_G \rightarrow$  Totalreflexion

6

relative Brechzahl

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{c_1}{c_2}$$

Brechungsgesetz (Snellius, Descartes)

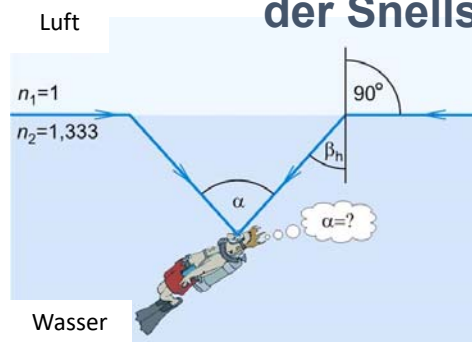
z.B.

| Material     | $n$            |
|--------------|----------------|
| Vakuum       | 1              |
| Luft (1 atm) | 1,00027        |
| Wasser       | 1,333          |
| Augenlinse   | $\approx 1,34$ |
| Ethylalkohol | 1,361          |
| Quarzglas    | 1,459          |
| Flintglas    | 1,613          |
| Diamant      | 2,417          |

abs. Brechzahlen bei 20 °C und 589 nm

5

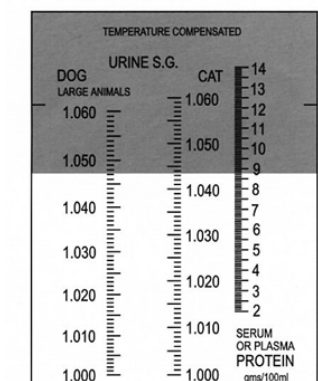
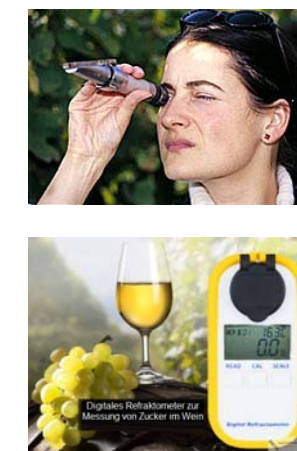
## Folge der Existenz des Grenzwinkels: der Snellsche Kreis



## Ausnutzung die Existenz des Grenzwinkels: Abbe Refraktometer

Der Wert des Grenzwinkels hängt von der Brechzahl einer Lösung ab. Die Brechzahl hängt **linear** von der Konzentration ab.

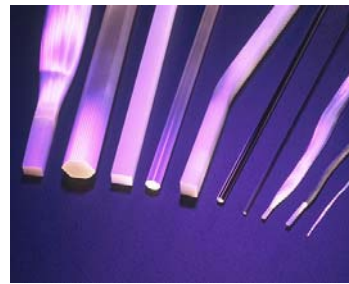
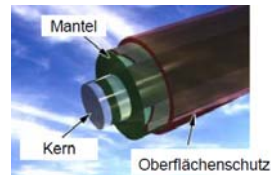
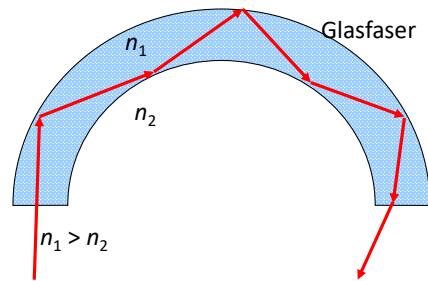
Anwendung: Eiweisskonzentration des Blutplasmas, spezifische Dichte des Urins, Zuckerkonzentration, ...



The VET 360 Scale is designed for use with animals of all sizes.

8

## Ausnutzung der Totalreflexion: Lichtleiter



Beispiele:

- Facettenauge der Insekten
- Faseroptik Informationsübertragung
- Endoskopie



10

## Faseroptik in der Medizintechnik

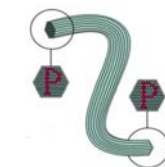
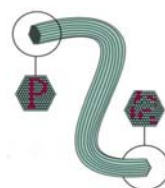


ungeordnete Faserbündel für Beleuchtungszwecke

**Einzelfaser** zur Übertragung von Laserstrahlung  
extrem hohe Leistungsdichten können verlustarm transportiert werden



**geordnete Faserbündel** für die Bildübertragung (eine Art der Endoskopie)



11



**Perioscopy®** der Firma Zest Dental Solutions. Mithilfe verschiedener Hand-Explorer (a), die den fiberoptischen Leiter (b) und eine Wasserleitung führen, wird auf einem Monitor (c) ein Echtzeitbild des inspizierten Gebietes dargestellt

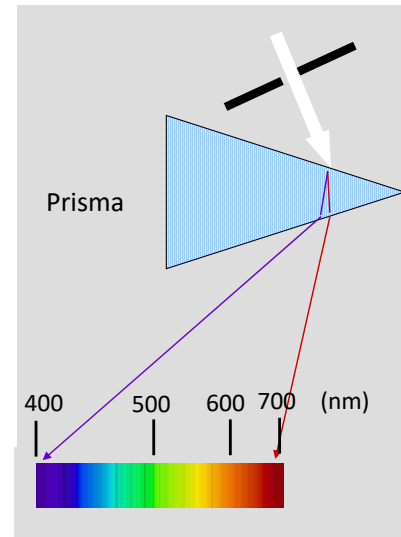
ARTIKEL: CHR. GRAETZ UND S. SCHORR  
Das Endoskop für die Zahnfleischtasche – nur zur Diagnostik?

12

# Dispersion

Die Brechzahl  $n$  einer Substanz hängt von der Farbe (Wellenlänge) des Lichtstrahls ab.

(Normale Dispersion liegt vor, wenn  $n$  für Rot kleiner ist als für Blau.)



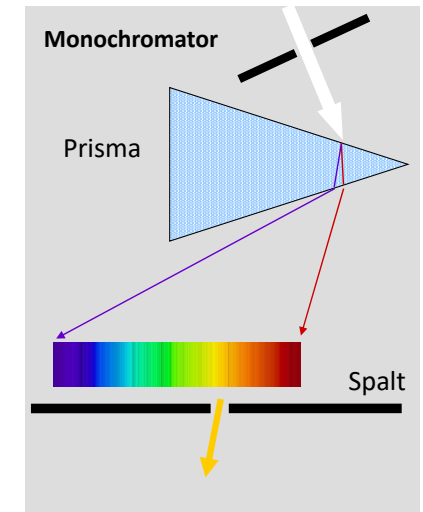
nichtlineare Wellenlänge-Skala!

13

# Anwendung der Dispersion: Monochromator

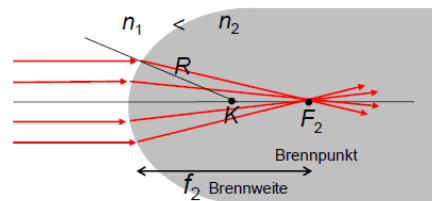
**Monochromatisches Licht:**  
einfarbiges Licht

Anwendung: Lichtanalyse  
(Spektralanalyse)



14

# Brechung an einer sphärischen Grenzfläche



- Krümmungsradius ( $R$ ):
  - $R$  ist positiv ( $0 < R$ ), wenn die Grenzfläche konvex ist:
  - $R$  ist negativ ( $R < 0$ ), wenn die Grenzfläche konkav ist:

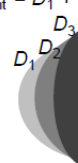
**Brechkraft ( $D$ ):**  $D = \frac{n_2}{f_2} = \frac{n_2 - n_1}{R} \left( = \frac{n_1}{f_1} \right)$

Die Formel gilt nur für achsennahe Strahlen genau!

$D$  ist positiv ( $0 < D$ )  $\Rightarrow$  Fokussierung  
 $D$  ist negativ ( $D < 0$ )  $\Rightarrow$  Zerstreuung

| $n_2 - n_1$ | $R$     | $D$     |              |
|-------------|---------|---------|--------------|
| positiv     | positiv | positiv | Fokussierung |
| negativ     | positiv | negativ | Zerstreuung  |
| positiv     | negativ | negativ | Zerstreuung  |
| negativ     | negativ | positiv | Fokussierung |

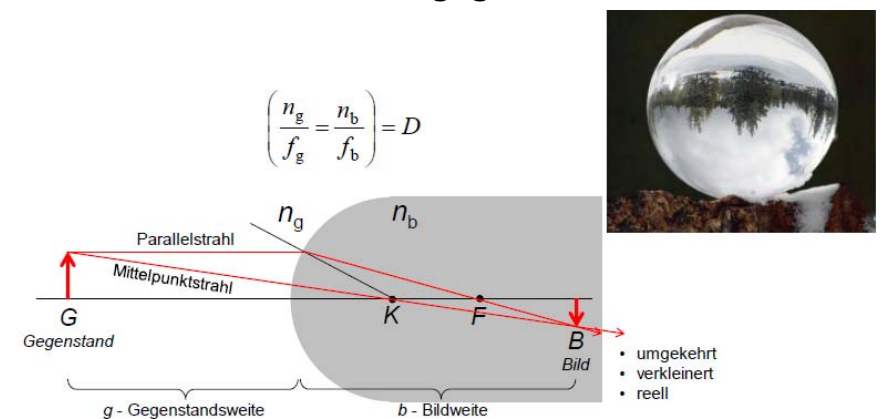
Für naheliegende Grenzflächen gilt:  
 $D_{\text{gesamt}} = D_1 + D_2 + D_3 + \dots$



→ siehe Linse und Auge

15

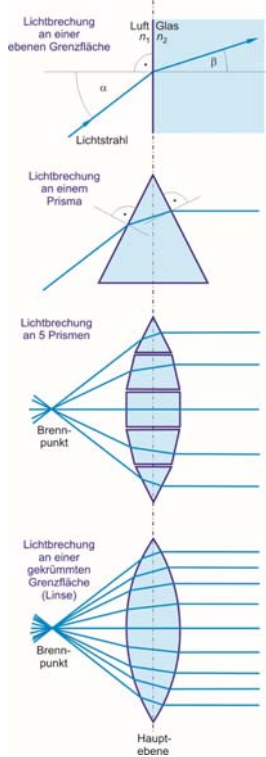
# Optische Abbildung durch eine sphärische Grenzfläche, Abbildungsgesetz



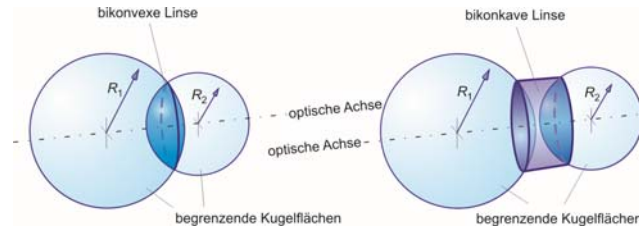
▪ **Abbildungsgesetz:**  $\left( \frac{n_g}{f_g} = \frac{n_b}{f_b} \right) = D = \frac{n_g}{g} + \frac{n_b}{b}$

Gilt nur für achsennahe Strahlen!

16



## Brechkraft einer Linse, Linsenschleiferformel



Ableitung optischer Linsen von Kugelflächen

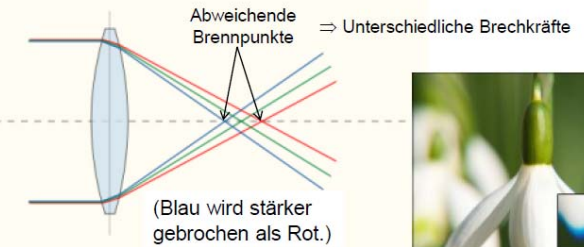
$$D = \frac{1}{f} = (n_{21} - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$D$ : Brechkraft  
 $f$ : Brennweite  
 $R_1, R_2$ : Krümmungsradien  
 $n$ : Brechzahl des Linsematerials

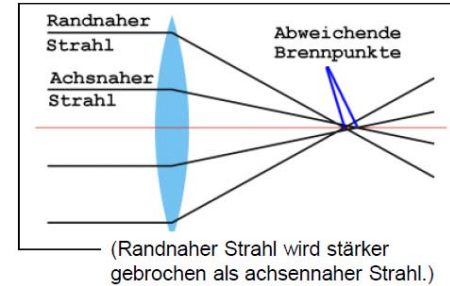
17

## Linsenfehler

Chromatische Aberration



Sphärische Aberration

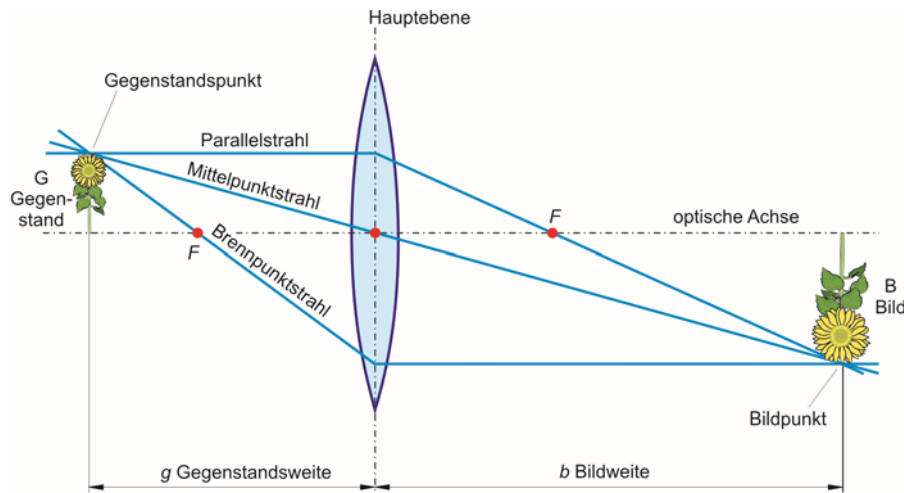


Verallgemeinerung:

- Positive sphärische Aberration, wenn randnahe Strahlen stärker gebrochen werden.
- Negative sphärische Aberration, wenn achsnaher Strahlen stärker gebrochen werden.

18

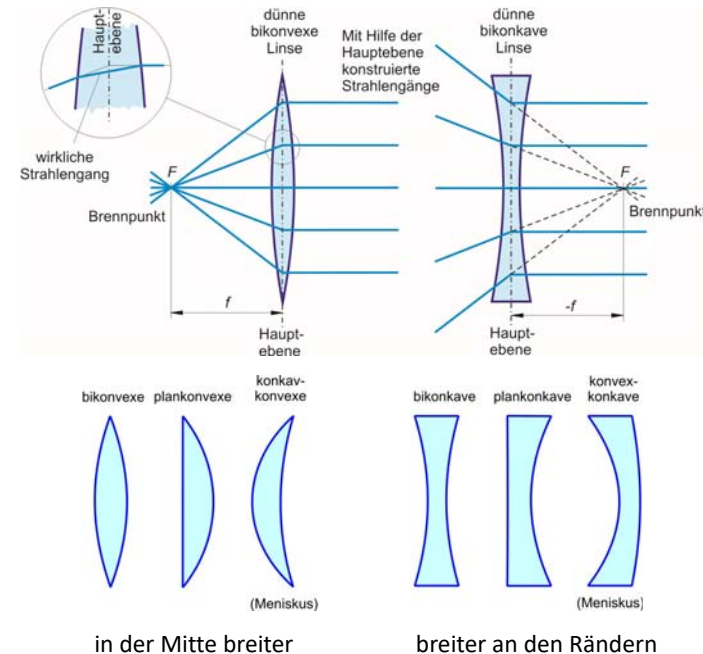
## Dünne Linsen. Verlauf der ausgezeichneten Strahlen



Abbildungsgleichung:  $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$

$f$ : Brennweite

19



Konstruktion der Brennweite bei „dünnen“ Sammellinsen und Zerstreuungslinsen mit Hilfe der Hauptebene

Linsenarten

20

## Abbildung von Objekten in verschiedenen typischen Entfernungen

Abbildungs-  
gleichung

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

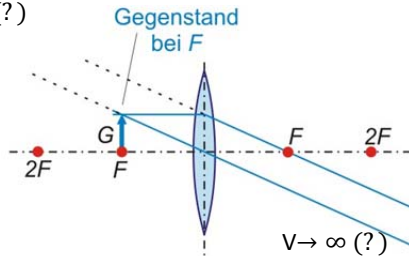
$f$ : Brennweite  
 $g$ : Gegenstandsweite  
 $b$ : Bildweite

Abbildungs-  
maßstab

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

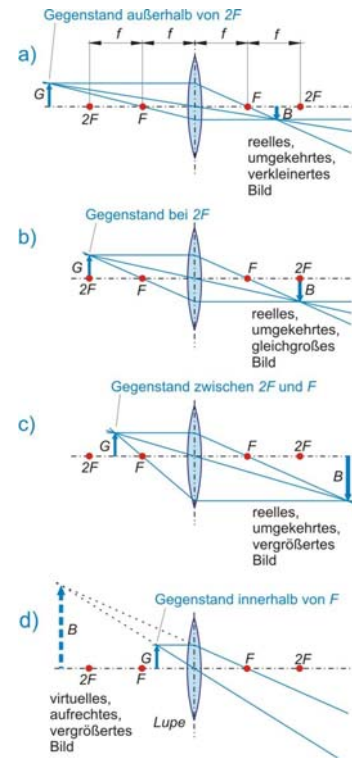
$V$ : Vergrößerung  
 $B$ : Bildhöhe  
 $G$ : Gegenstandshöhe

$V \rightarrow \infty$  (?)



kein Bild!

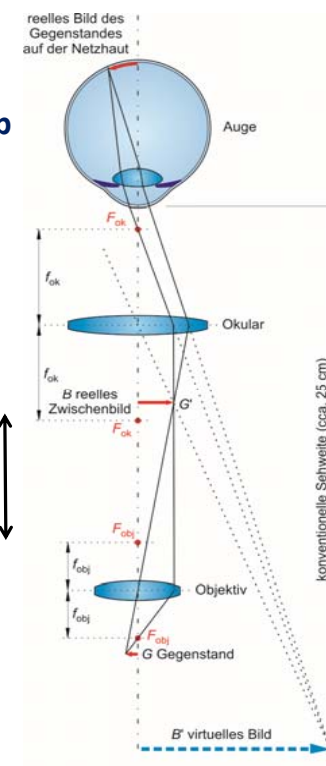
$V \rightarrow \infty$  (?)



## Lichtmikroskop

$d$  = optische  
Tubuslänge

verzerrtes Bild!



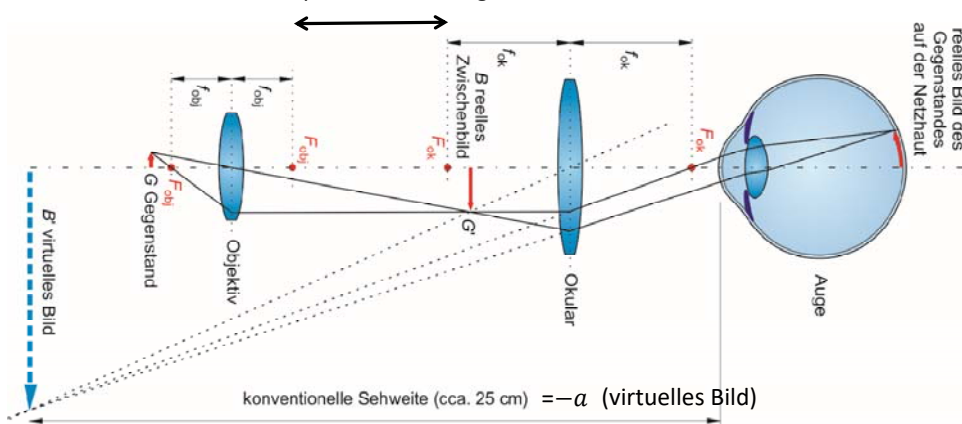
Vergrößerung des Mikroskops:

$$\begin{aligned} V &= V_{\text{Obj}} \cdot V_{\text{Ok}} = \\ &= \frac{B_{\text{Obj}}}{G_{\text{Obj}}} \cdot \frac{B_{\text{Ok}}}{G_{\text{Ok}}} = \\ &= \frac{b_{\text{Obj}}}{g_{\text{Obj}}} \cdot \frac{b_{\text{Ok}}}{g_{\text{Ok}}} \end{aligned}$$

Über  $V \approx 500$  nur leere Vergrößerung!!

22

$d$  = optische Tubuslänge



$$V = \frac{b_{\text{Obj}}}{g_{\text{Obj}}} \cdot \frac{b_{\text{Ok}}}{g_{\text{Ok}}} = \frac{f_{\text{Obj}} + d + \varepsilon}{f_{\text{Obj}} + \varepsilon} \cdot \frac{-a}{f_{\text{Ok}} - \varepsilon} \approx \frac{d}{f_{\text{Obj}}} \cdot \frac{-a}{f_{\text{Ok}}} = -\frac{d}{f_{\text{Obj}}} \cdot \frac{a}{f_{\text{Ok}}}$$

wo sich der Gegenstand  
befinden sollte, um die  
Vergrößerung zu maximieren?

reelles Bild:  $g = f + \varepsilon$   
virtuelles Bild:  $g = f - \varepsilon$   
( $\varepsilon \rightarrow 0$ )

Gegenstandsweite  
ist fast gleich der  
Brennweite

Fermatsches Prinzip  
Lichtbrechung, Brechungsgesetz (Snellius-Descartes)  
absolute/relative Brechzahl  
Totalreflexion  
der Snellsche Kreis  
Grenzwinkel  
Lichtleiter, Faseroptik, Faserbündel (ungeordnete, geordnete)  
Disperison, Monochromator  
sphärische Grenzfläche  
Abbildungsgesetz  
Breckkraft  
Linsenschleiferformel  
Linsenfehler  
ausgezeichnete Strahlen  
Linsenarten  
Vergrößerung  
Lichtmikroskop