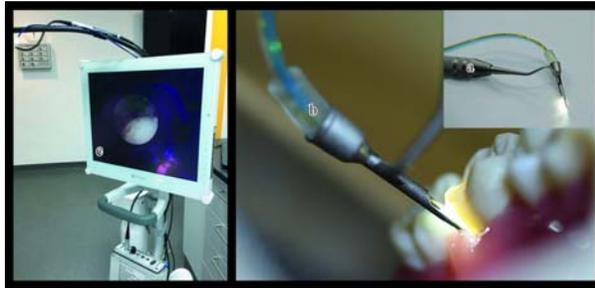
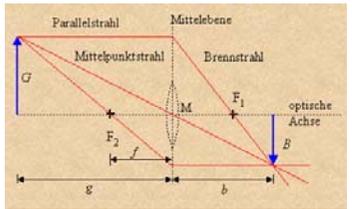
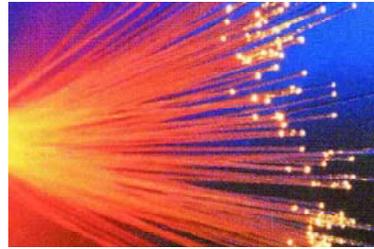


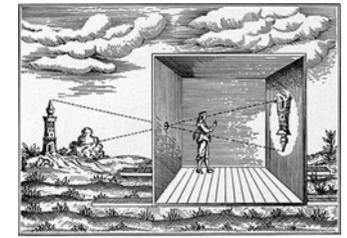
# Licht in der Medizin. Brechung, Linsen, Mikroskop

## Strahlenoptik

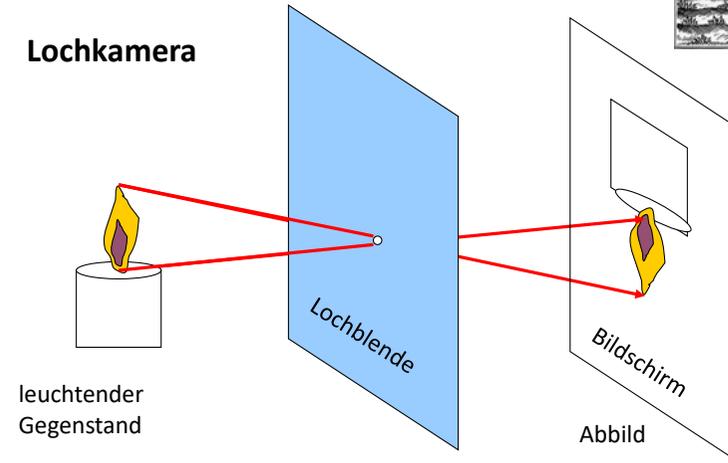


KAD 2023.09.19

# Geradlinige Ausbreitung



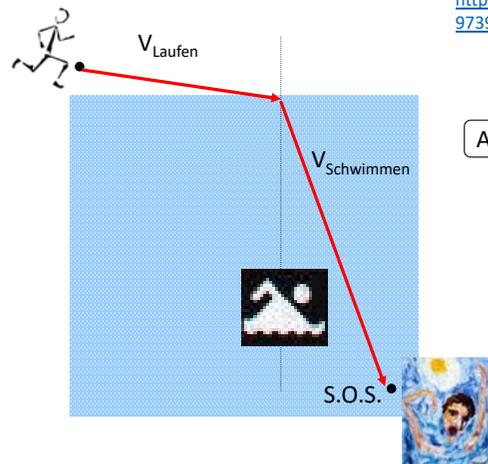
## Lochkamera



## Fermatsches Prinzip:

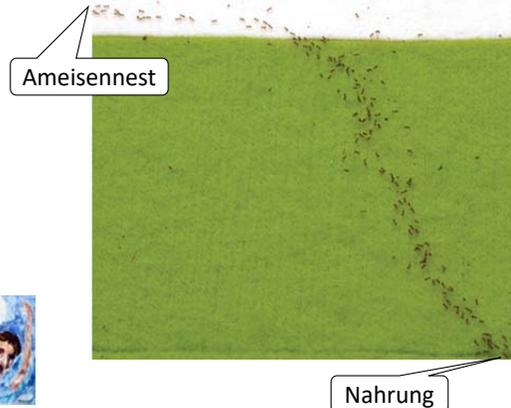
das Licht wählt zwischen zwei Punkten den schnellsten Weg  
(und nicht den geometrisch kürzesten Weg)

### Das Rettungsschwimmer Problem



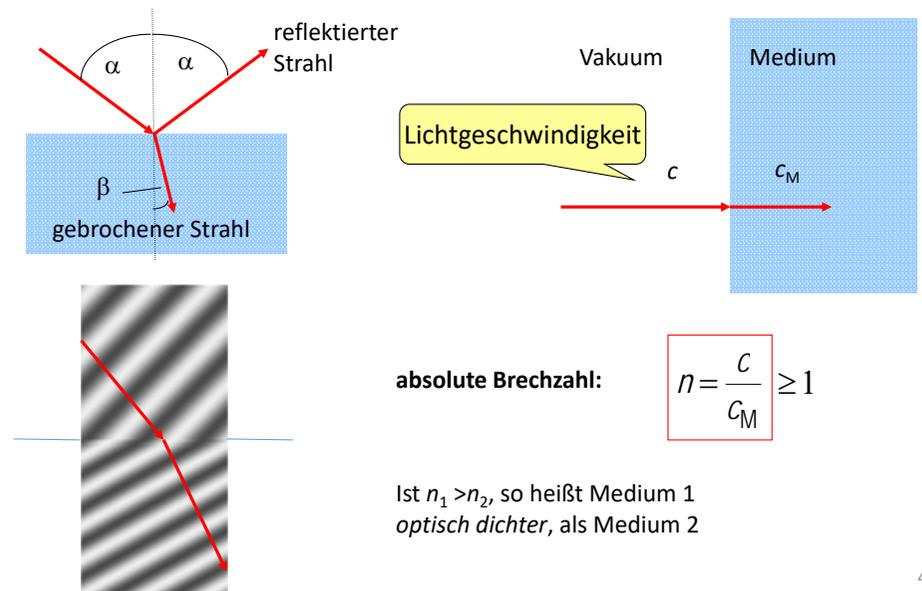
### Das Prinzip gilt auch für Ameisen!

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>

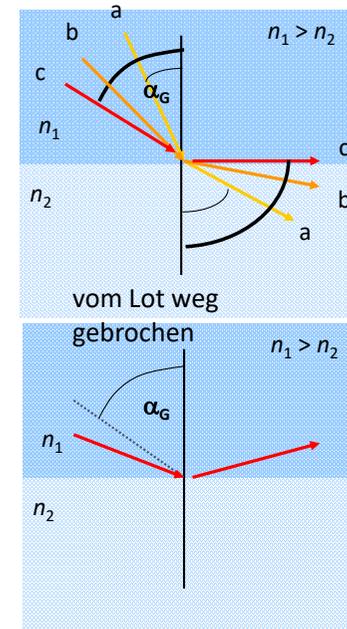


# Lichtbrechung

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



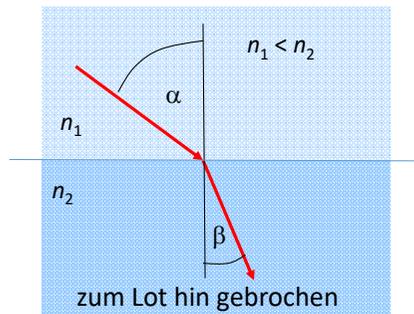
# Totalreflexion



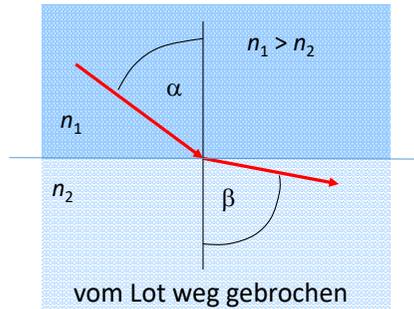
$\alpha_G$  — Grenzwinkel

(s. Refraktometer)

$\alpha > \alpha_G \rightarrow$  Totalreflexion



zum Lot hin gebrochen



vom Lot weg gebrochen

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

relative Brechzahl

Brechungsgesetz (Snellius, Descartes)

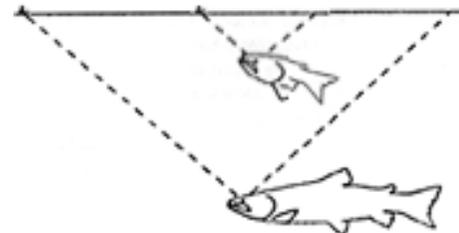
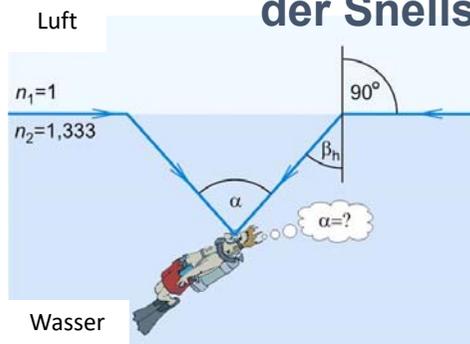
z.B.

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

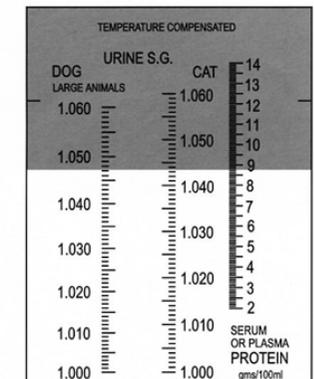
## Folge der Existenz des Grenzwinkels: der Snellsche Kreis



## 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.

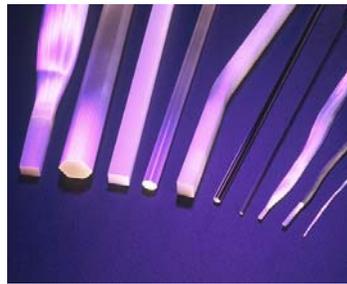
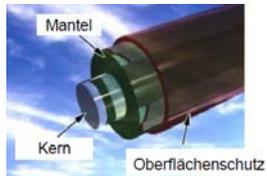
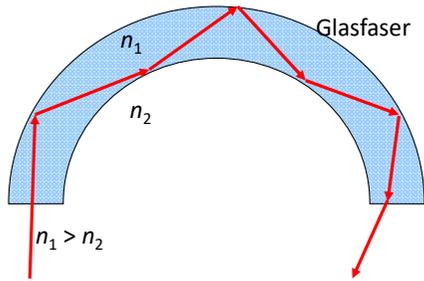
Anwendung: Eiweisskonzentration des Blutplasmas, spezifische Dichte des Urins, Zuckerkonzentration, ...



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

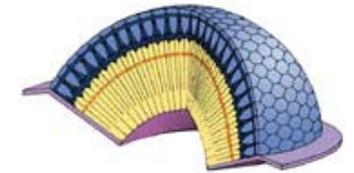
8

# Ausnutzung der Totalreflexion: Lichtleiter



Beispiele:

- Facettenauge der Insekten
- Faseroptik Informationsübertragung
- Endoskopie

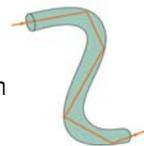


# Faseroptik in der Medizintechnik

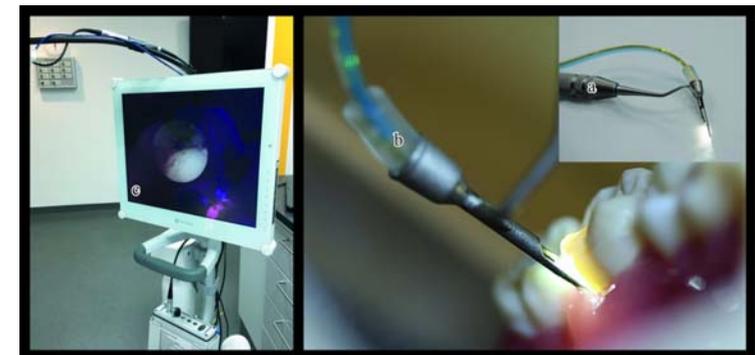
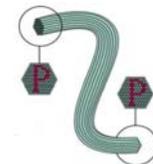
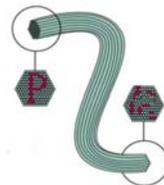


ungeordnete Faserbündel für Beleuchtungszwecke

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



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



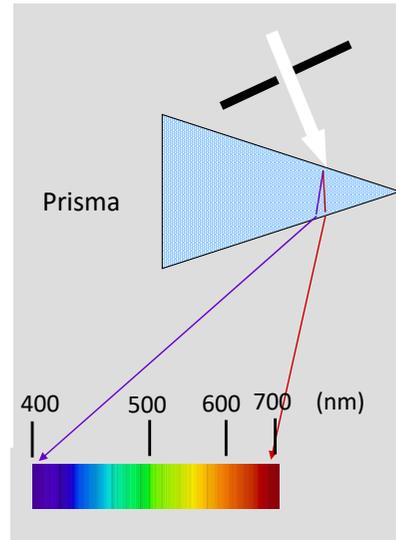
**Perioscopy®** der Firma Zest Dental Solutions. Mithilfe verschiedener Hand-Explorer (a), die den fiberoptischen Leiter (b) und eine Wasserleitung führen, wird auf einem Monitor (c) ein Echtzeitbild des inspizierten Gebietes dargestellt

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

# 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.)

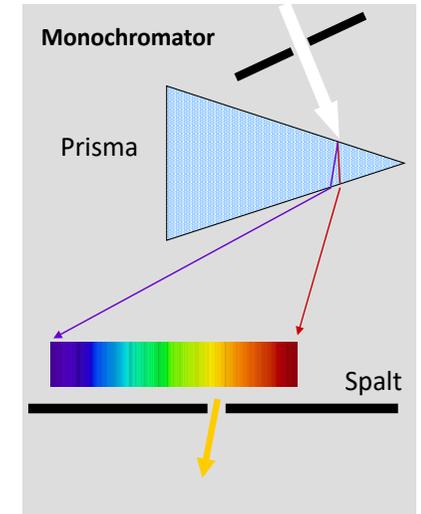


nichtlineare Wellenlänge-Skala!

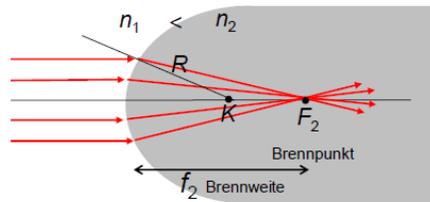
# Anwendung der Dispersion: Monochromator

**Monochromatisches Licht:**  
einfarbiges Licht

Anwendung: Lichtanalyse  
(Spektralanalyse)



# 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

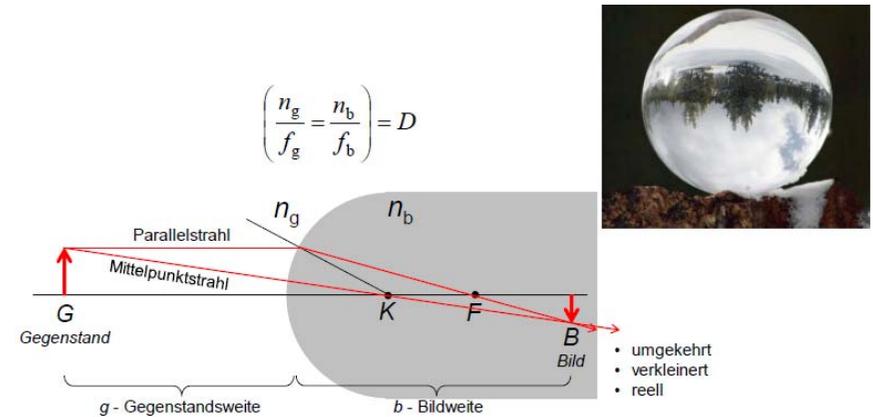
$n_2 - n_1$	$R$	$D$	
positiv	positiv	positiv	Fokussierung
negativ	positiv	negativ	Zerstreuung
positiv	negativ	negativ	Zerstreuung
negativ	negativ	positiv	Fokussierung

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



→ siehe Linse und Auge

# Optische Abbildung durch eine sphärische Grenzfläche, Abbildungsgesetz



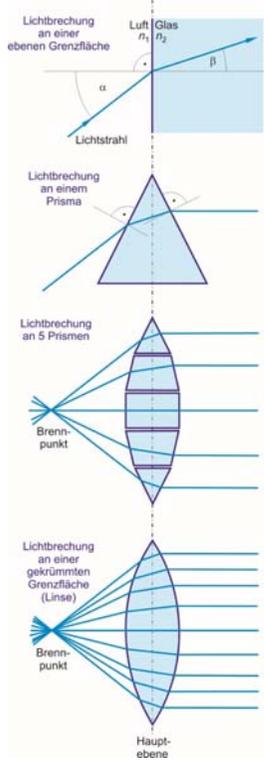
$$\left( \frac{n_g}{f_g} = \frac{n_b}{f_b} \right) = D$$



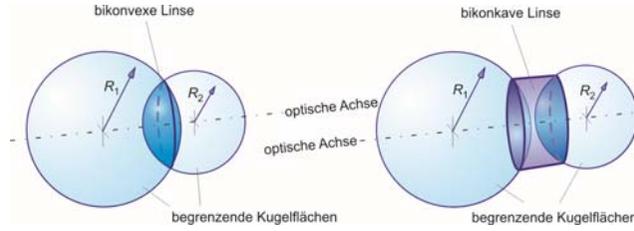
- umgekehrt
- verkleinert
- reell

▪ **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!



## Brechkraft einer Linse, Linsenschleiferformel

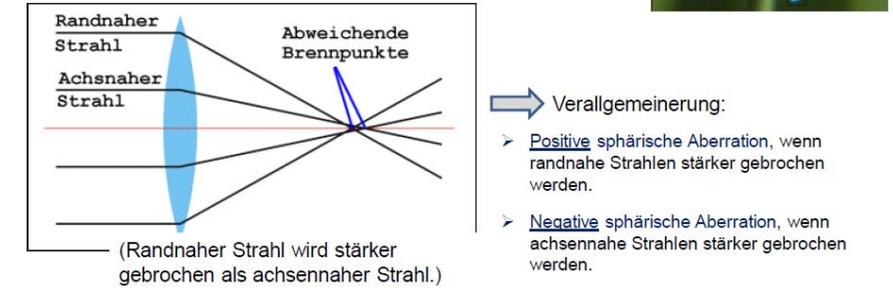
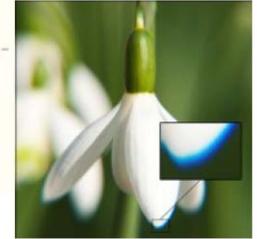
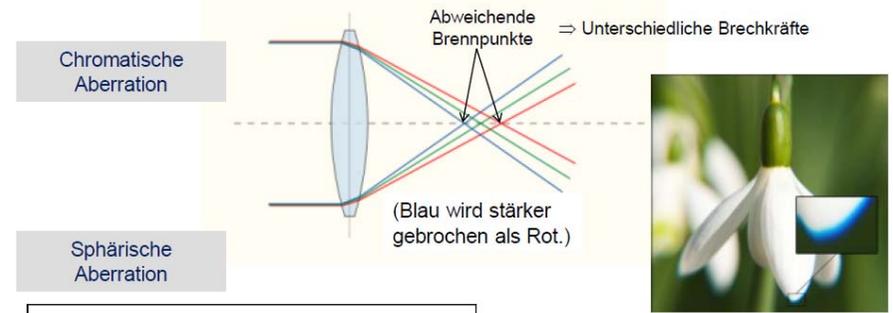


Ableitung optischer Linsen von Kugelflächen

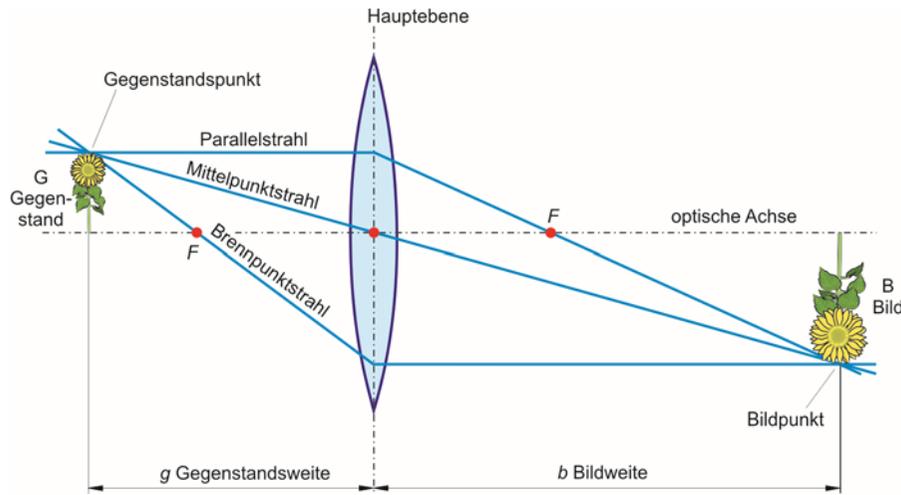
$$D = \frac{1}{f} = (n_{21} - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

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

## Linsenfehler

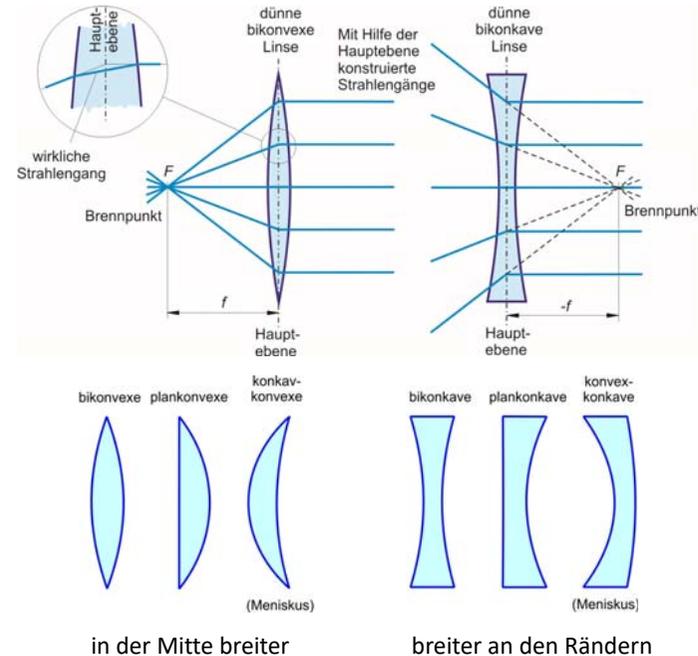


## Dünne Linsen. Verlauf der ausgezeichneten Strahlen



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

$f$ : Brennweite



Konstruktion der Brennweite bei „dünnen“ Sammellinse und Zerstreuungslinse mit Hilfe der Hauptebene

Linsenarten

# Abbildung von Objekten in verschiedenen typischen Entfernungen

Abbildungs-  
gleichung

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

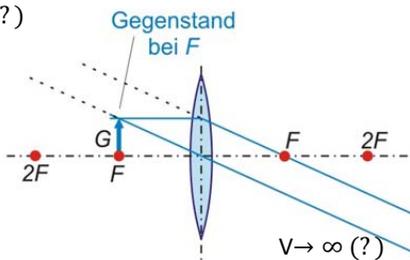
f: Brennweite  
g: Gegenstandsweite  
b: Bildweite

Abbildungs-  
maßstab

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

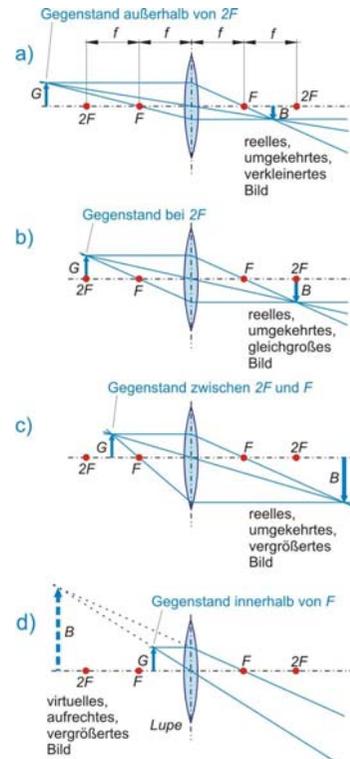
V: Vergrößerung  
B: Bildhöhe  
G: Gegenstandshöhe

$V \rightarrow \infty$  (?)

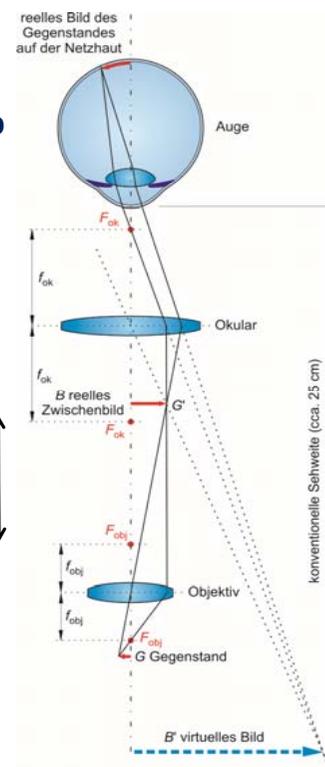


kein Bild!

$V \rightarrow \infty$  (?)



# Lichtmikroskop



Vergrößerung des Mikroskops:

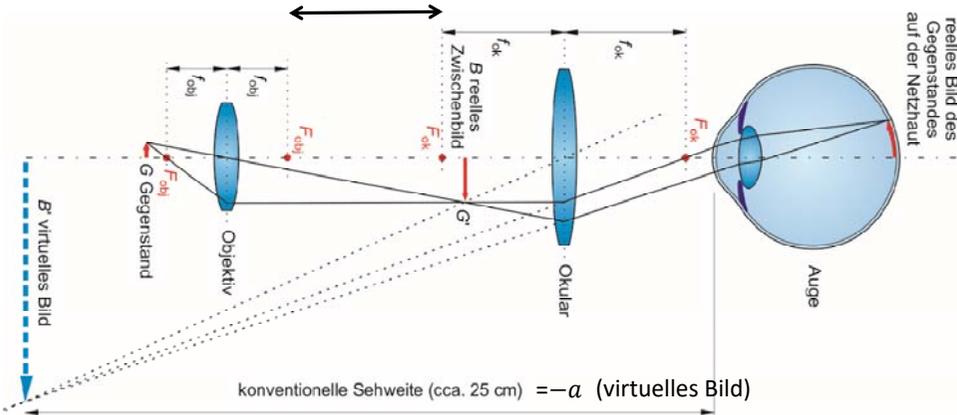
$$V = V_{Obj} \cdot V_{Ok} = \frac{B_{Obj}}{g_{Obj}} \cdot \frac{B_{Ok}}{g_{Ok}} = \frac{b_{Obj}}{g_{Obj}} \cdot \frac{b_{Ok}}{g_{Ok}}$$

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

$d =$  optische Tubuslänge

verzerrtes Bild!

$d =$  optische Tubuslänge



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

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

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

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)
- Dispersion, Monochromator
- sphärische Grenzfläche
- Abbildungsgesetz
- Brechkraft
- Linsenschleiferformel
- Linsenfehler
- ausgezeichnete Strahlen
- Linsenarten
- Vergrößerung
- Lichtmikroskop