

# Medizinische Biophysik

## Licht in der Medizin

3. Vorlesung  
20. 09. 2023

## II. Wellenoptik

### 1. Grundkenntnisse der Wellenlehre

- a) Welle, Wellenlänge ( $\lambda$ ), Frequenz ( $f$ ),  
Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ ),  
Transversal- und Longitudinalwellen
- b) Lineare Polarisation
- c) Reflexion und Brechung an Grenzflächen
- d) Interferenz
- e) Beugung, Huygenssches Prinzip

### 2. Licht als Welle

- a) Licht = elektromagnetische Welle
- b) Wellenlängenbereiche des Lichts
- c) Polarisation: linear- und zirkular polarisiertes Licht,  
optische Aktivität, Doppelbrechung
- d) Beugung (Diffraktion) des Lichtes
- e) Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes:  
endliche Auflösung des Mikroskopes

# II. Wellenoptik

## 1. Grundkenntnisse der Wellenlehre

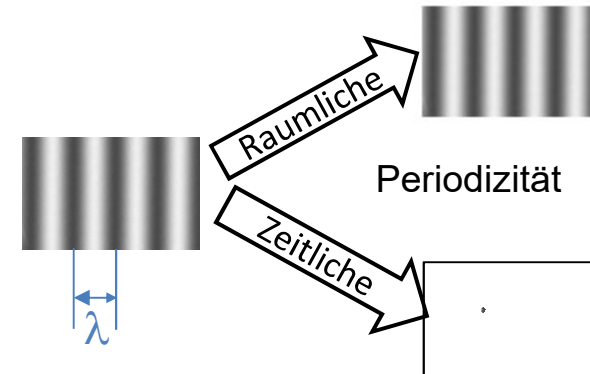
a) Welle, Wellenlänge ( $\lambda$ ), Frequenz ( $f$ ), Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ )  
Transversal- und Longitudinalwellen

$$c = \lambda \cdot f$$

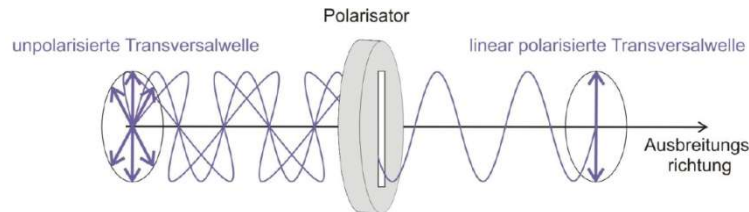
**Zur Erinnerung**

Welle: eine sich räumlich ausbreitende periodische Schwingung

Wellenlänge: der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase.



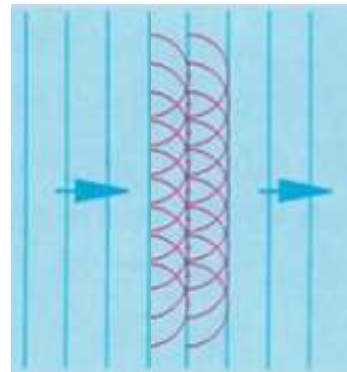
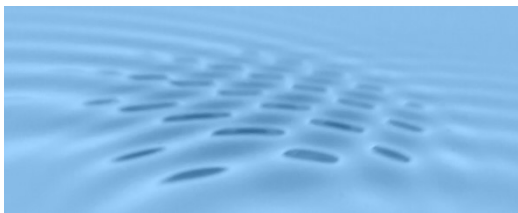
## b) Lineare Polarisation



Siehe: **Vorkenntnisse**  
(Skript „Physikalische Grundkenntnisse“ Kapitel 9)

## c) Reflexion und Brechung an Grenzflächen

## d) Interferenz



## e) Beugung, huygenssches Prinzip

**Huygensches Prinzip:** Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt von Elementarwellen angesehen werden, die sich mit gleicher Geschwindigkeit und Wellenlänge wie die ursprüngliche Welle ausbreiten.

## 2. Licht als Welle

### a) Licht = elektromagnetische Welle

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

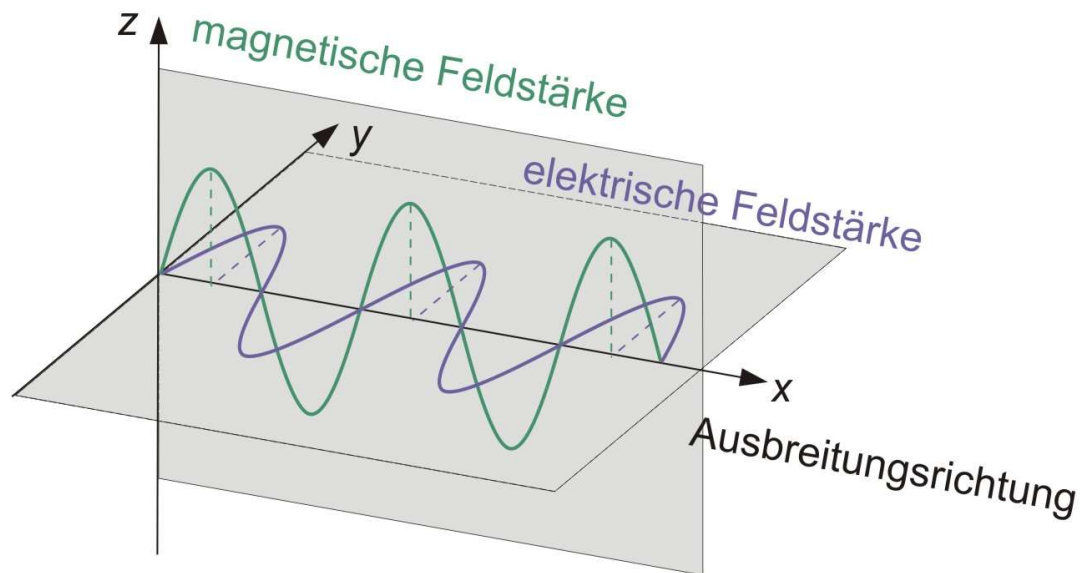
$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen

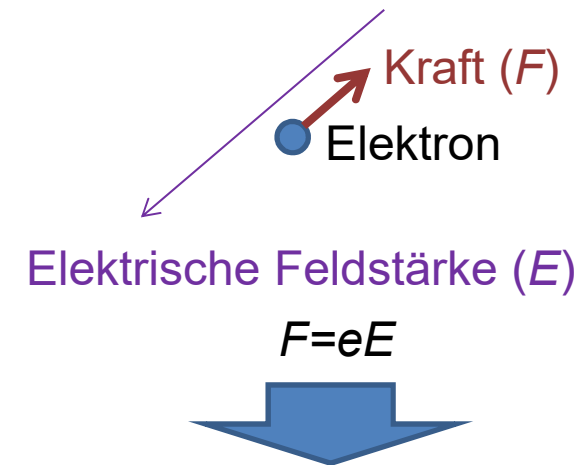
Diese Geschwindigkeit stimmt so gut mit der Lichtgeschwindigkeit überein, daß wir anscheinend **allen Grund zur Annahme haben, das Licht (sowie die Wärmestrahlung, aber auch andere Strahlungen, wenn es solche gibt) sei eine elektromagnetische Störung, die sich in Form von Wellen durch das elektromagnetische Feld, den Gesetzen des Elektromagnetismus entsprechend, fortpflanzt.**

Maxwell: A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field (1859)

#### Transversalwelle



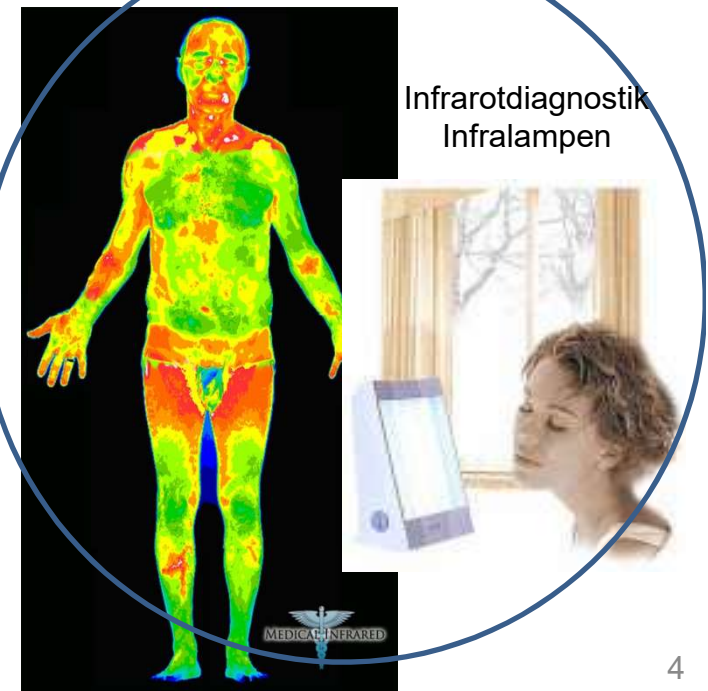
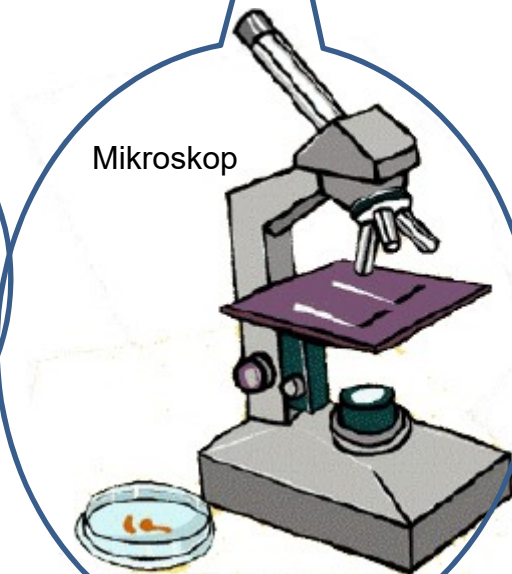
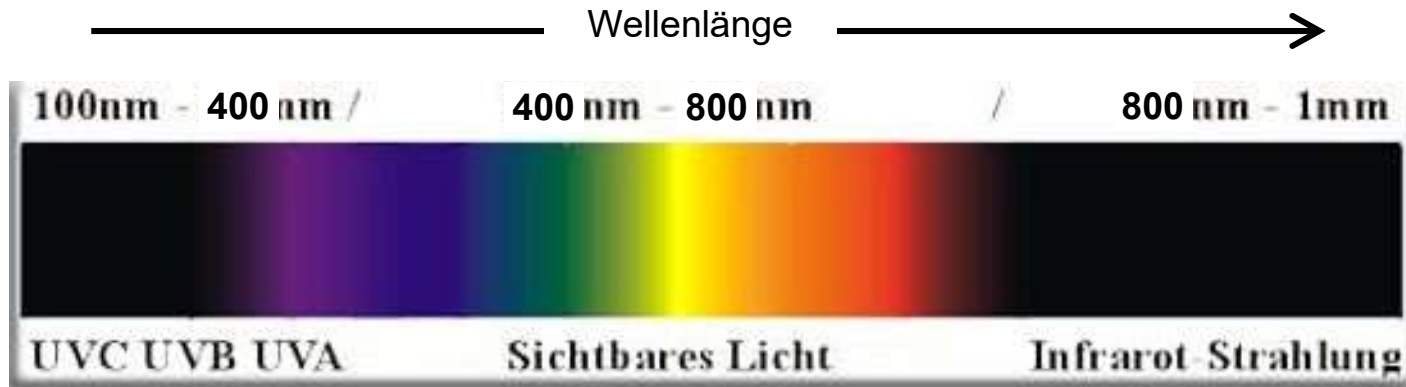
#### Wechselwirkung mit der Materie



Wegen der Wechselwirkung ist die Lichtgeschwindigkeit in Medium  $< c_{\text{Vakuum}}$

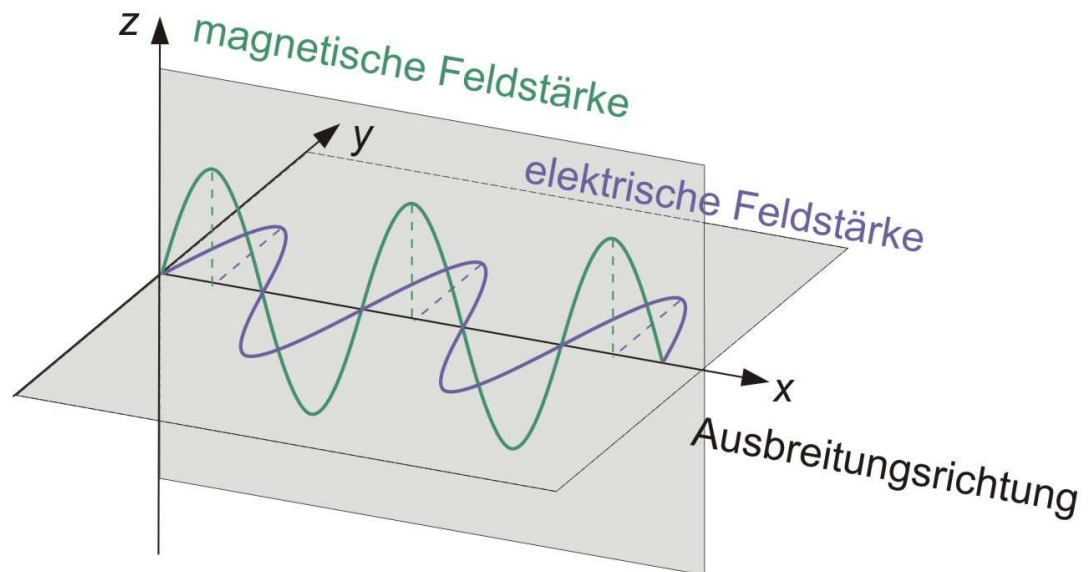
## b) Wellenlängenbereiche des Lichts

$$c = \lambda \cdot f$$



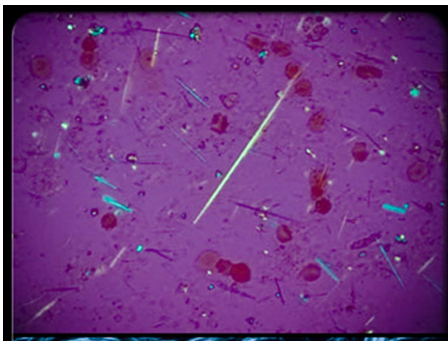
### c) Polarisation

Transversalwelle  $\Rightarrow$  Polarisierbarkeit

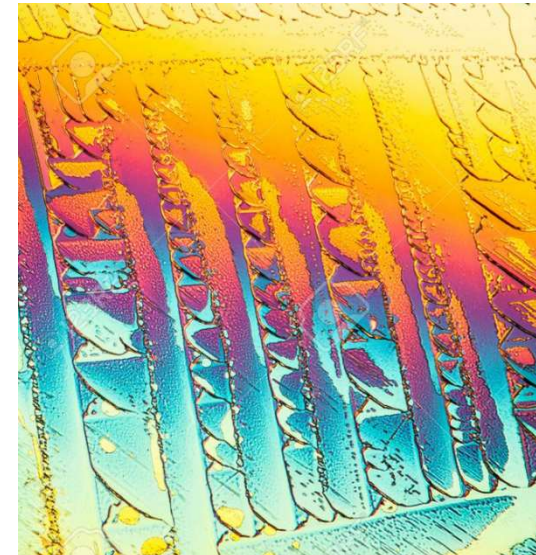


$\Rightarrow$  Doppelbrechung

$\Rightarrow$  Optische Aktivität

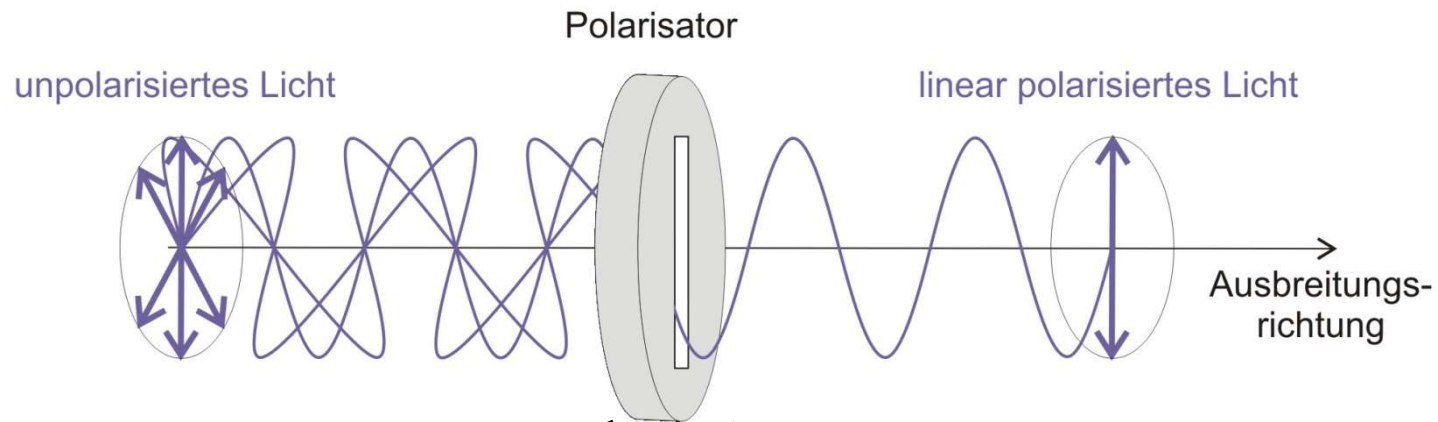


Ablagerung von Harnsäure-Kristalle  
in Gicht





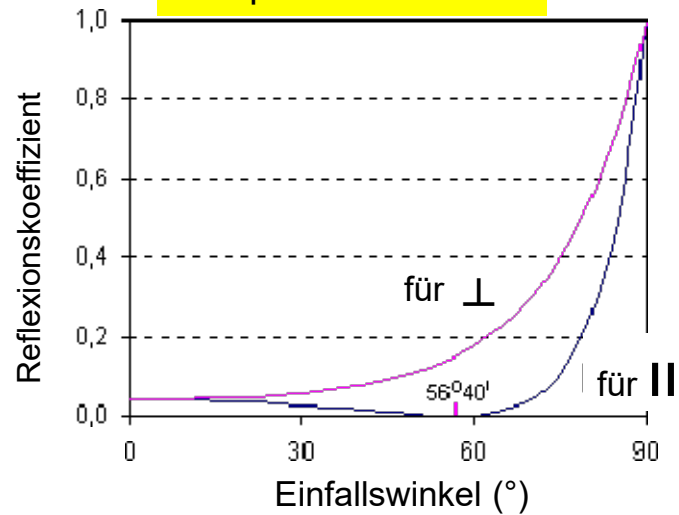
- **lineare Polarisation des Lichtes:**



Spiegel  
(Reflexion)

Polarisationsfilter  
(Absorption)

Beispiel: Luft → Glas

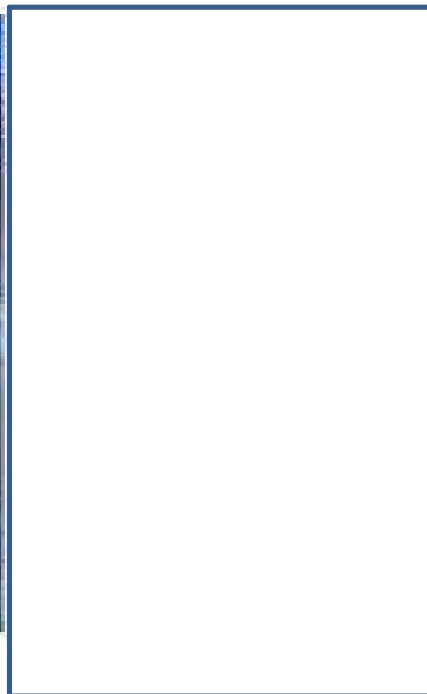




ohne Polarisator



ohne Polarisator

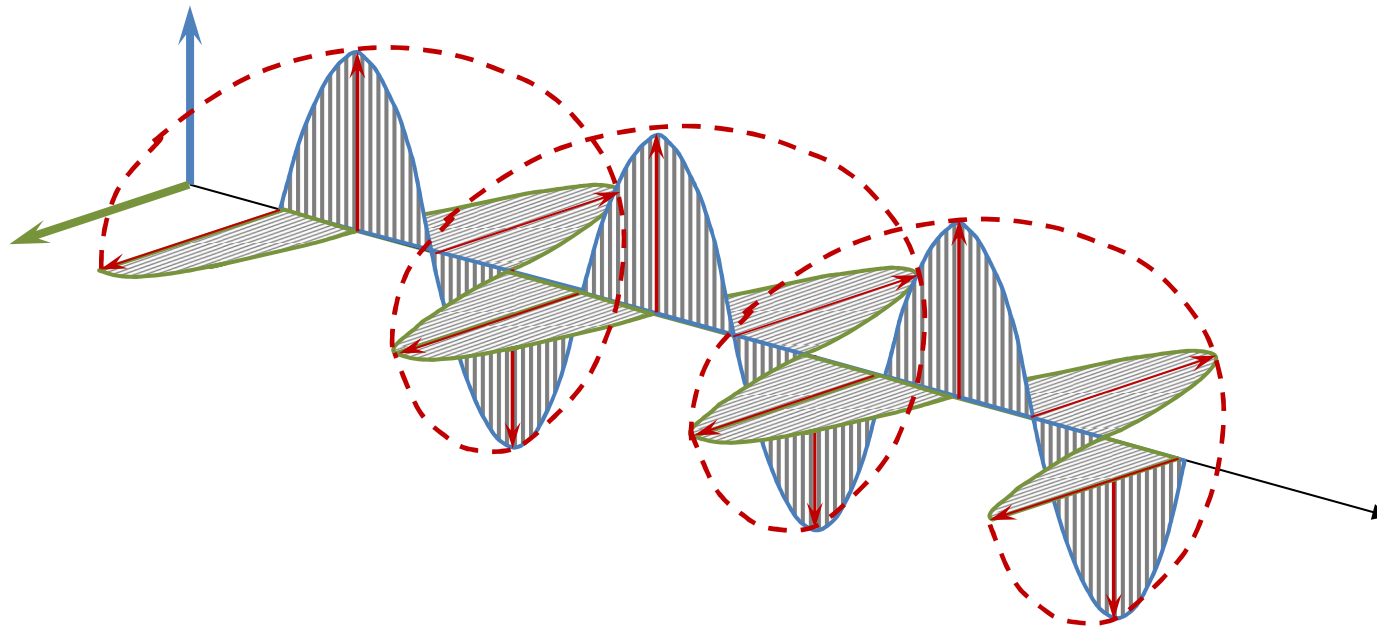


ohne Polarisator



- **Zirkular polarisiertes Licht:**

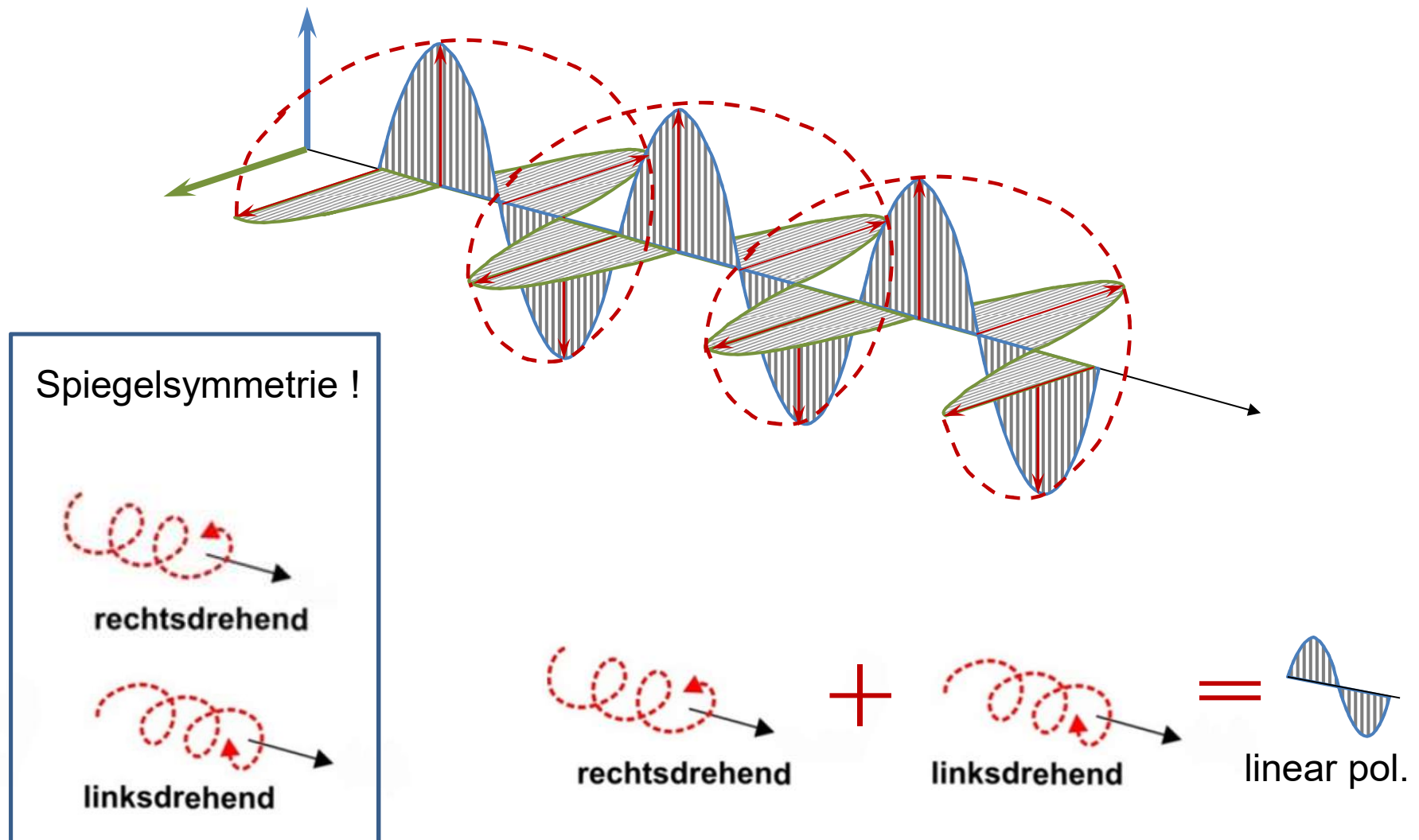
Zwei linear polarisierte Komponenten ergeben zirkularpolarisiertes Licht  
bei einem  $90^\circ$  Phasenverschiebung





- **Zirkular polarisiertes Licht:**

Zwei linear polarisierte Komponenten ergeben zirkulärpolarisiertes Licht  
bei einem  $90^\circ$  Phasenverschiebung



- optische Aktivität:** Drehung der Schwingungsebene des linear polarisierten Lichtes

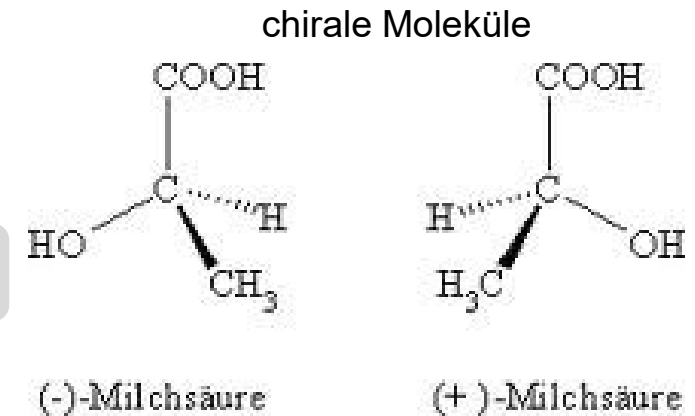
Drehwinkel (°)

Konzentration (g/cm<sup>3</sup>)

Länge der Küvette (dm)

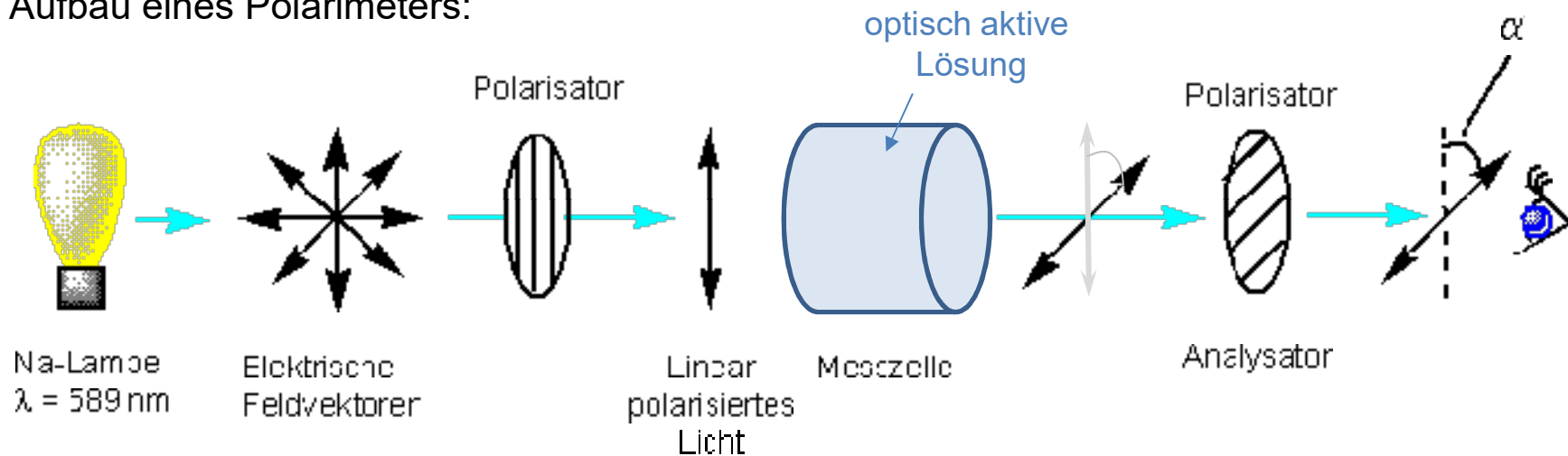
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

**Drehwert, spezifische Drehvermögen (spez. Drehung)**  
(°·cm<sup>3</sup>/(g·dm)) bezogen auf 20°C und auf die D-Linie (589 nm) von Na



**Anwendung:** Polarimetrie - Konzentrationsbestimmung

Aufbau eines Polarimeters:



- **Doppelbrechung:**

**Anisotropie**

zB: Kristalle,  
Polymere,  
Muskelgewebe

Ausgewählte Richtung:  
Optische Achse

Vereinfacht:

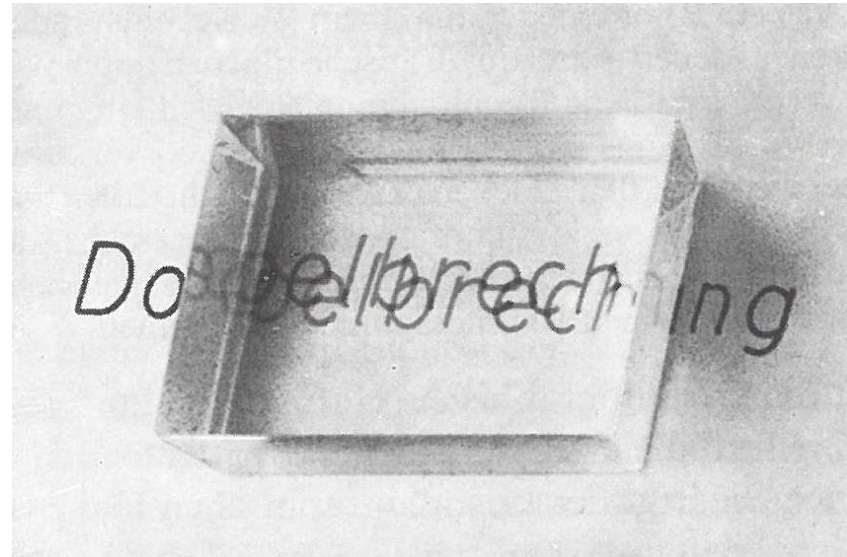
**Ordentlicher Strahl:**

⊥ auf optische Achse polarisiert

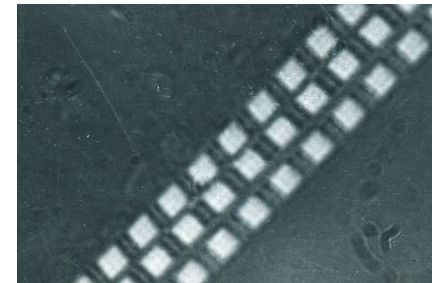
**Außerordentlicher Strahl:**

|| zur optische Achse polarisiert

Ordentliche und außerordentliche Strahlen haben unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, d.h. unterschiedliche Brechzahlen.



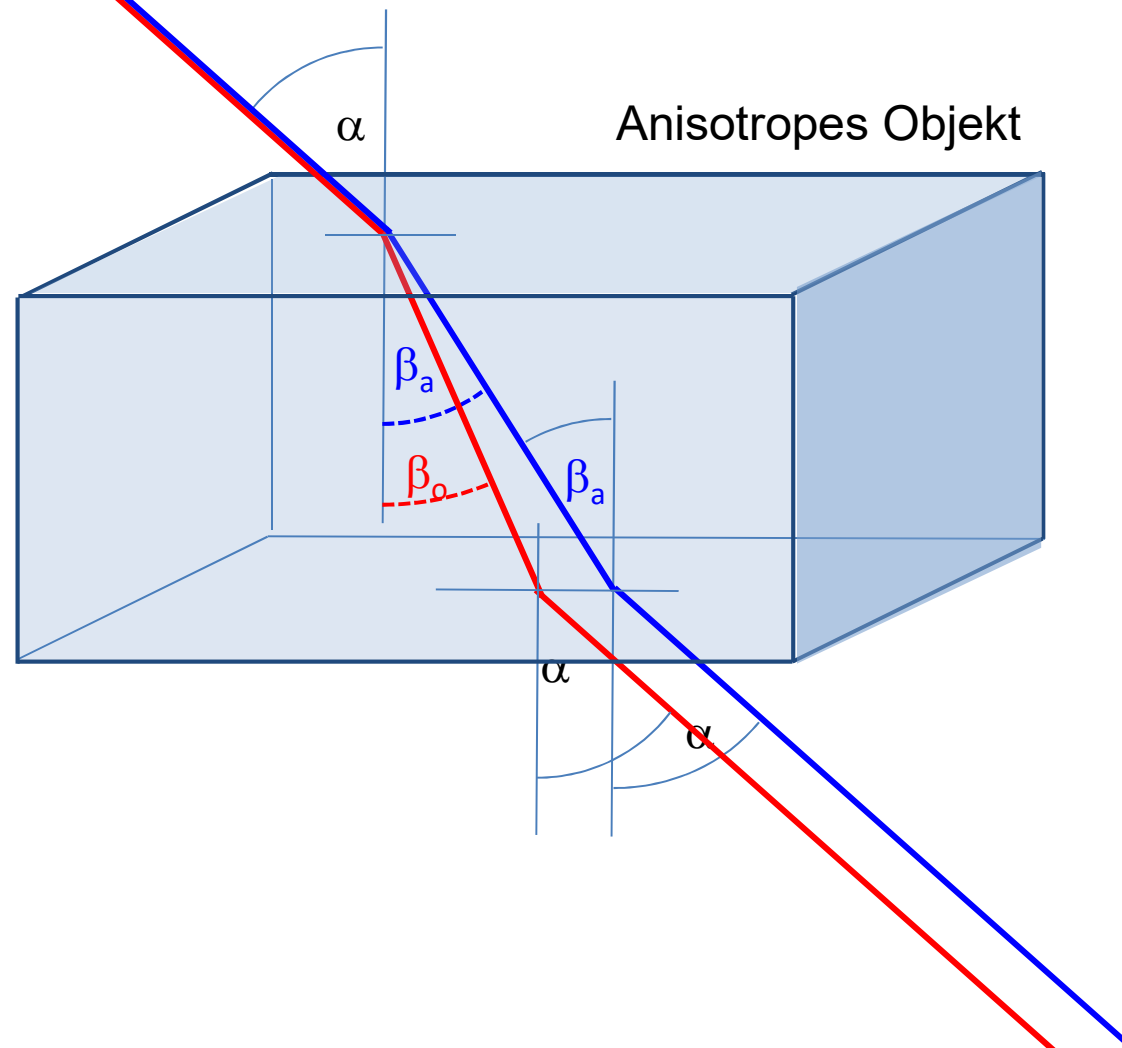
Doppelbrechung eines Kalkspatkristals



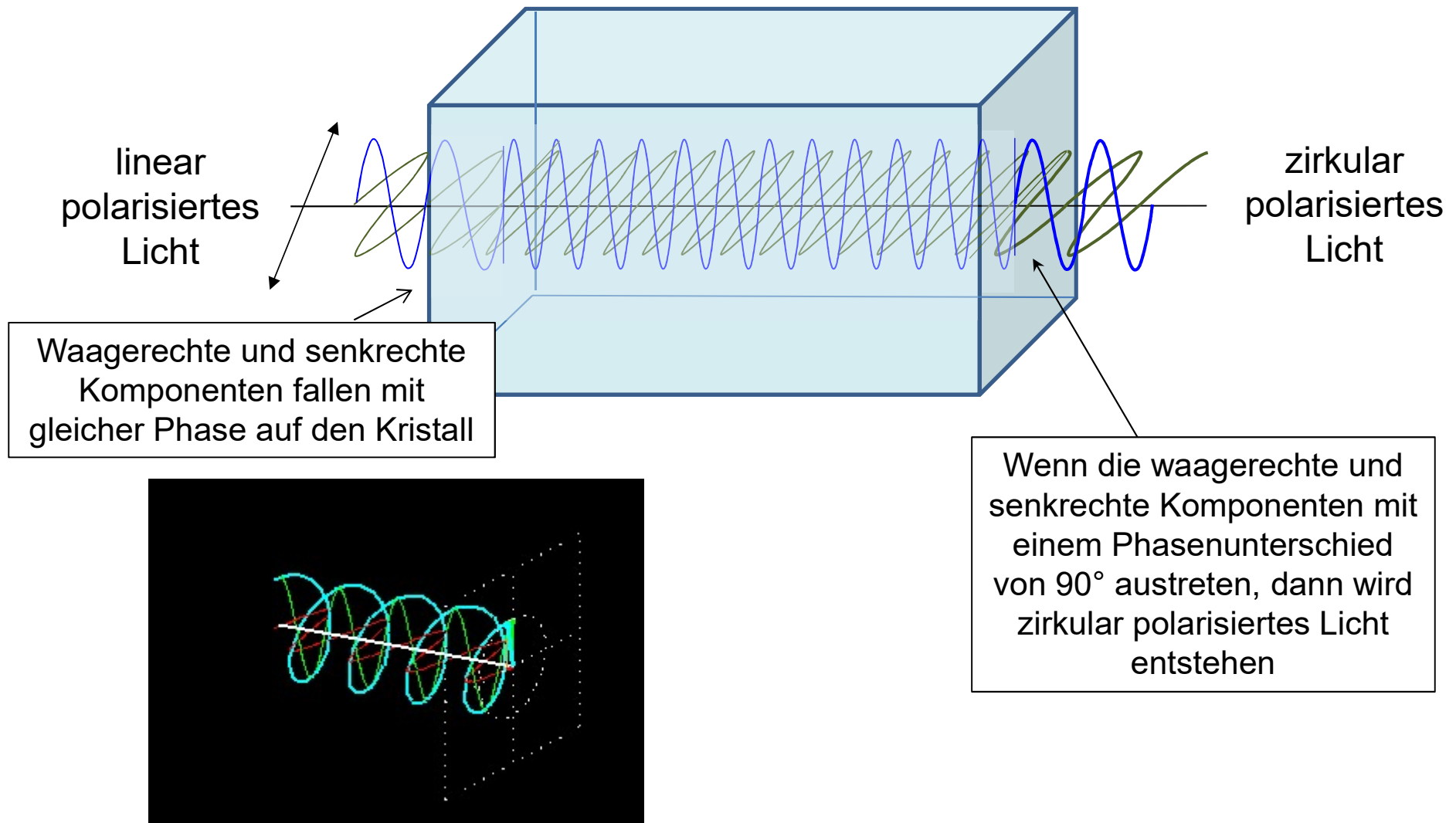
Doppelbrechung:  
leicht ausgedehnter Muskel  
des Flügels einer Biene  
(in einem Polarisationsmikroskop)

- Doppelbrechung:  
außerordentlicher Strahl

ordentlicher Strahl

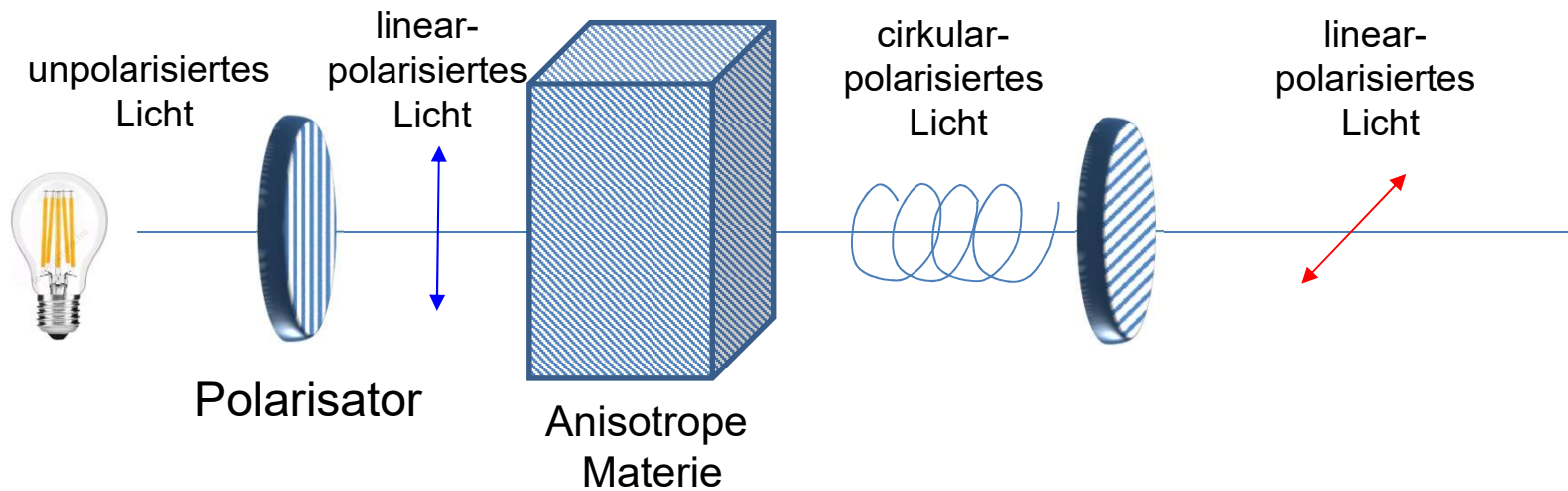
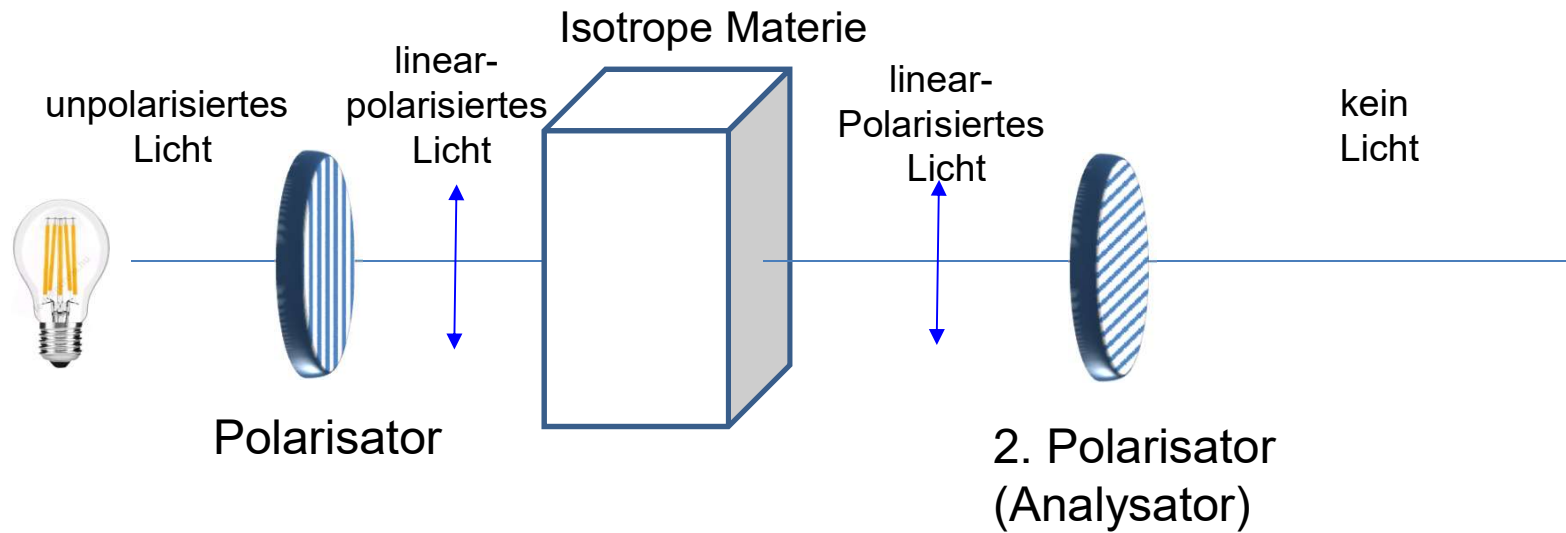


- **Doppelbrechung:**  
Ein Spezialfall, wenn nur die Geschwindigkeiten sind unterschiedlich:  
Entstehung des zirkularpolarisierten Lichtes.



s. weitere Animationen hier: [https://cddemo.szialab.org/index\\_de.html](https://cddemo.szialab.org/index_de.html)





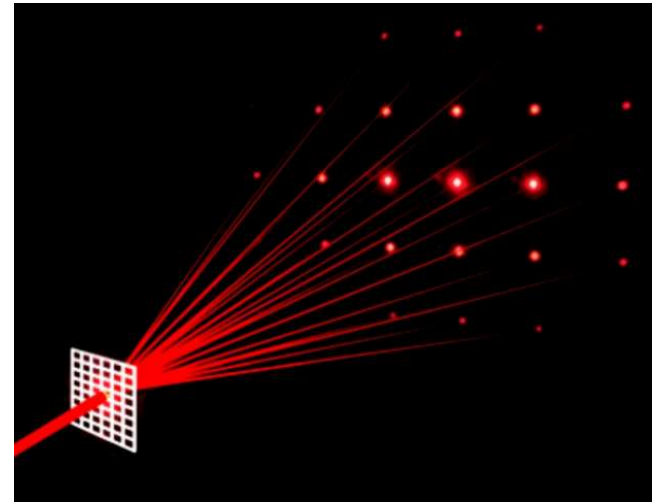
Durch gekreuzten Polarisatoren sieht man nur die anisotrope Objekte! (s. Polarisationsmikroskop)

- Zusammenfassung und Vergleich der optischen Aktivität und Doppelbrechung:

	Doppelbrechung	Optische Aktivität
Eigenschaft der Materie	Geordneter Struktur Anisotropie (meistens Kristalle)	Spiegelsymmetrische Moleküle (meistens in Lösung)
Ursache	Unterschiedliche $n$ für ordentliche und außerordentliche Lichtstrahlen (beide Linearpolarisiert)	Unterschiedliche Brechzahl für rechts und links zirkularpolarisierte Lichtkomponente.
Beleuchtung	Lin. pol. Licht	Lin. pol. Licht
Nach der Probe	Zirkular (oder elliptisch polarisiertes) Licht	Lin. pol Licht mit gedrehter Polarisationssebene.
Zur Beobachtung notwendiger Lichtweg	$\mu\text{m}$	dm

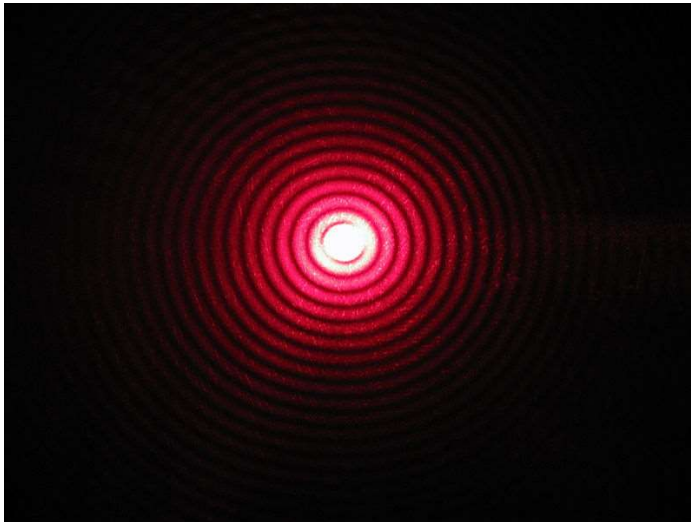
#### d) Beugung (Diffraction) des Lichtes

Beweis für den  
Wellencharakter  
des Lichts

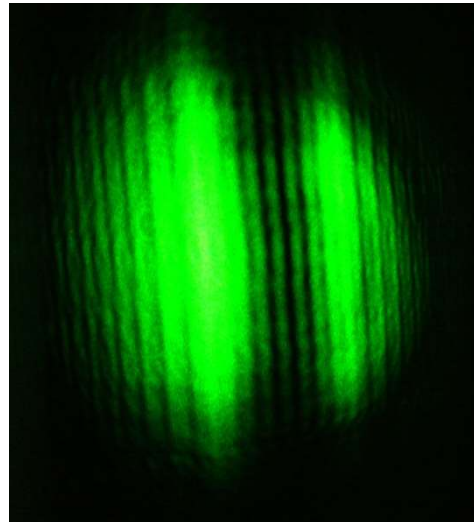


Beugung eines Laserstrahls an einem  
zweidimensionalen optischen Gitter

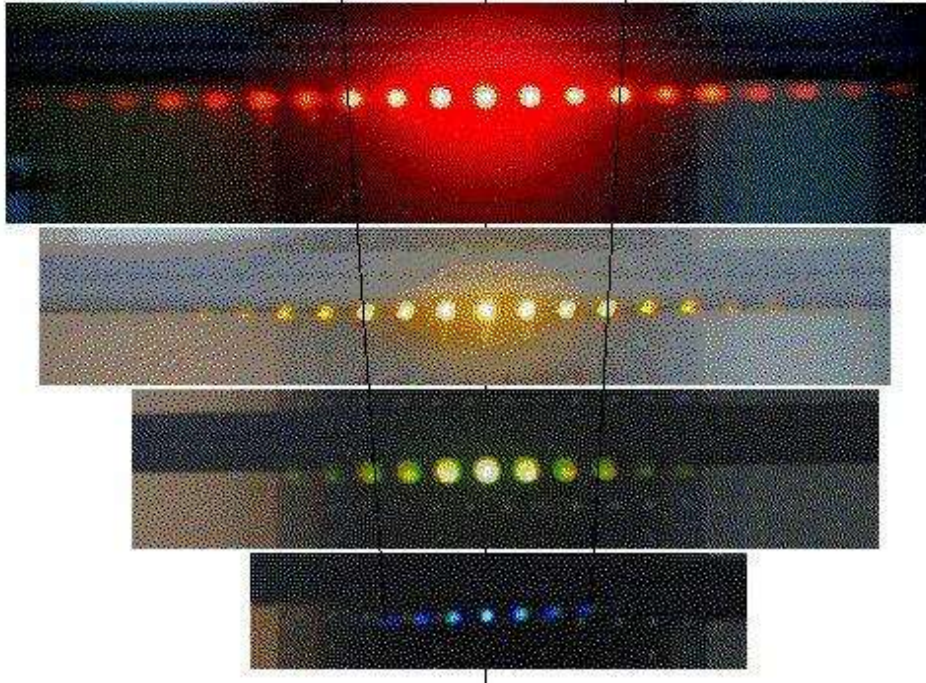
Beugung eines Laserstrahls  
an einem Loch



Beugung eines Laserstrahls  
an einem Haar



Beugung von Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge an einem optischen Gitter

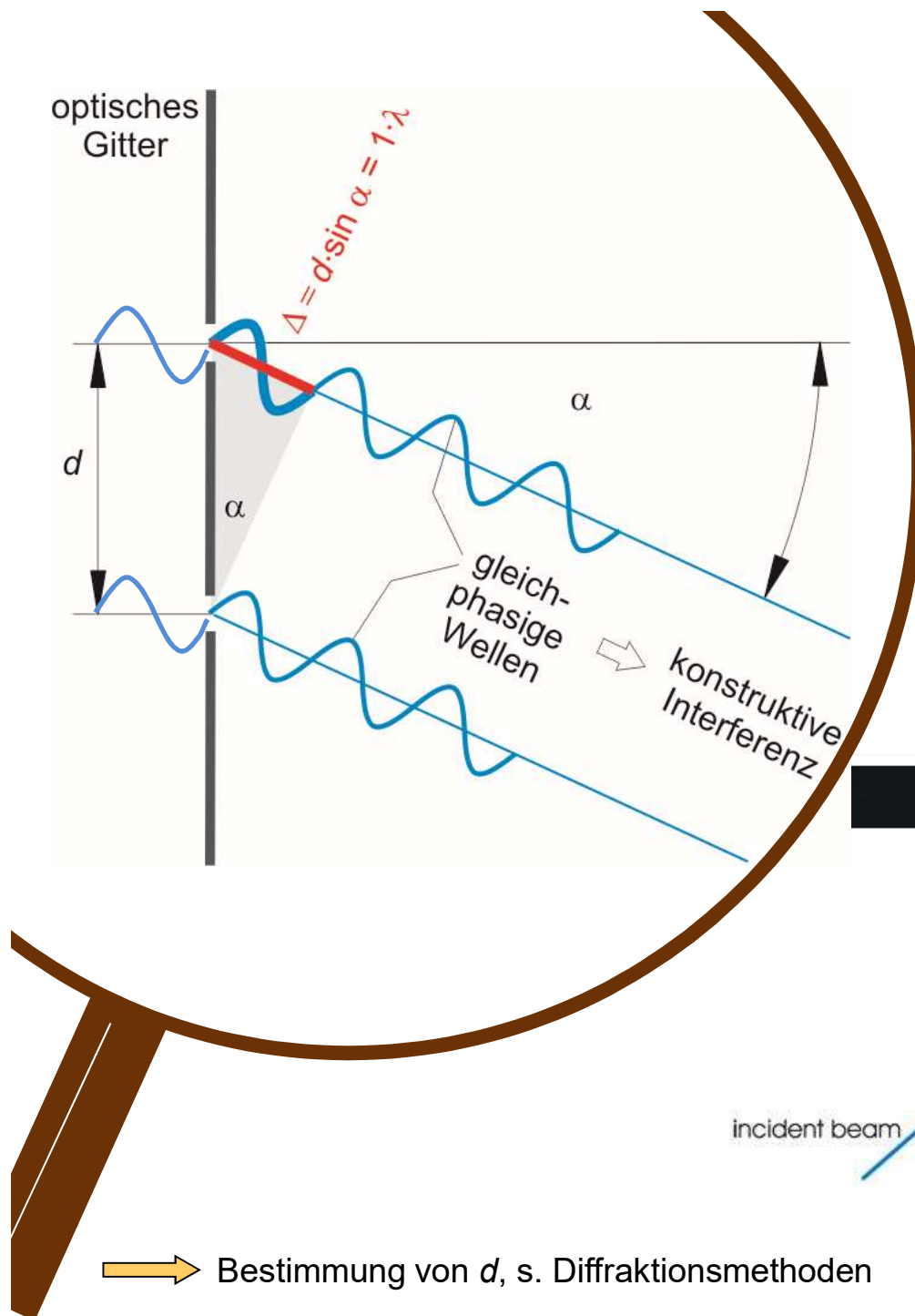


Beugung ist Wellenlängeabhängig!

Beugung von weißem Licht an einem optischen Gitter



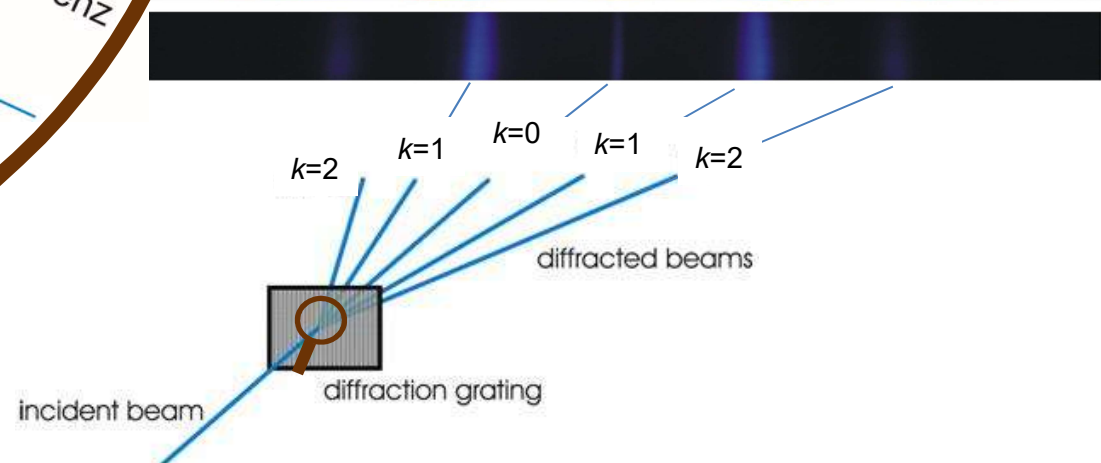
Hauptmaximum  
Nebenmaximum  
1-ter Ordnung  
Nebenmaximum  
2-ter Ordnung



$$d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$$

wobei  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Bestimmung von  $\lambda$



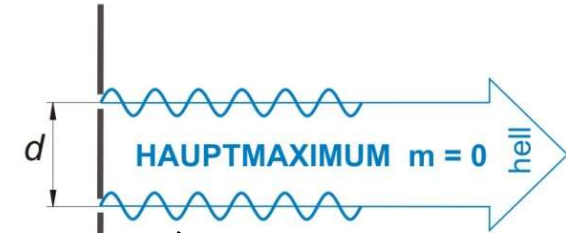


- Beugung an einem optischen Gitter

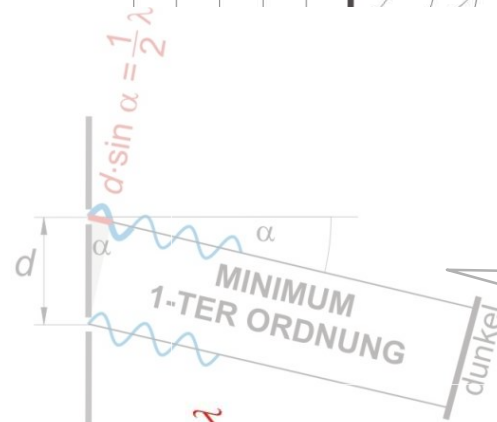
(s. Abbildung am  
Titelblatt des Themas  
Spezialmikroskope im  
Praktikumsbuch!)

OPTISCHES  
GITTER

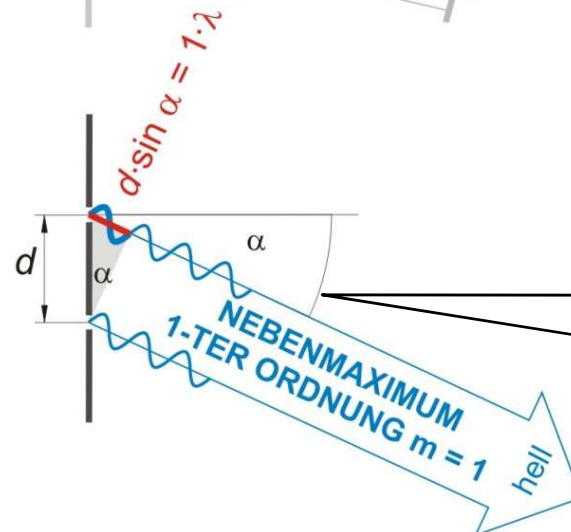
Gitterkonstante =  $d$



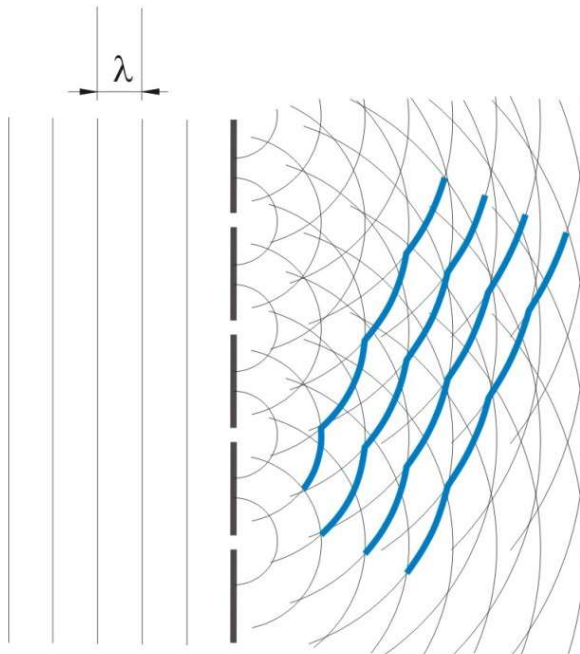
Elementarwellen in  
gleicher Phase  $\Rightarrow$   
positive Interferenz



Elementarwellen in  
entgegengesetzter Phase  
 $\Rightarrow$  negative Interferenz

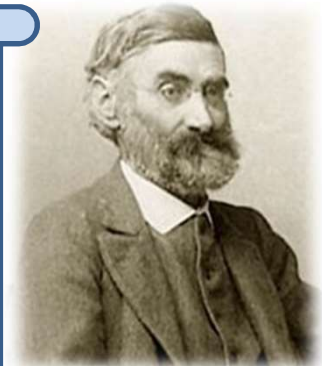


Elementarwellen in  
gleicher Phase  $\Rightarrow$   
positive Interferenz



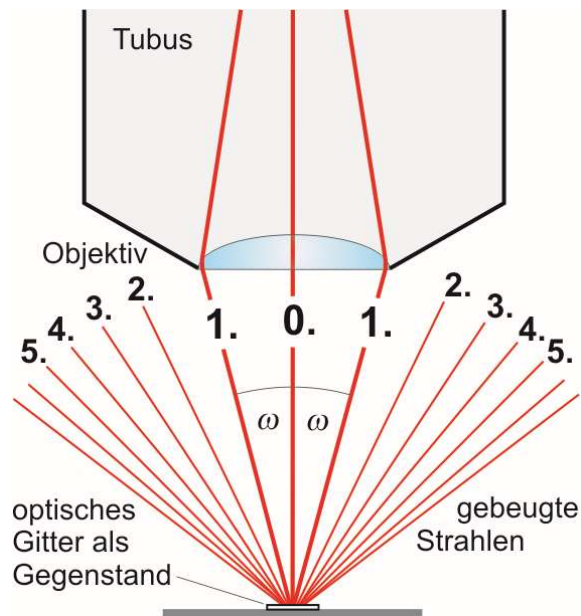
## e) Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes – endliche Auflösung der optischen Instrumenten und des Auges

**Abbesches Prinzip:** Im Mikroskop erhält man nur dann ein Bild, wenn von den am Objekt gebeugten Strahlen außer dem Hauptmaximum mindestens die Beugungsstrahlen erster Ordnung in den Tubus gelangen und auch an der Bildentstehung teilnehmen



Ernst Karl Abbe  
(1840-1905)  
Mitbegründer der  
Zeiss-Werke

### ■ Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops ( $\delta$ ):



$$\delta = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin \omega}$$

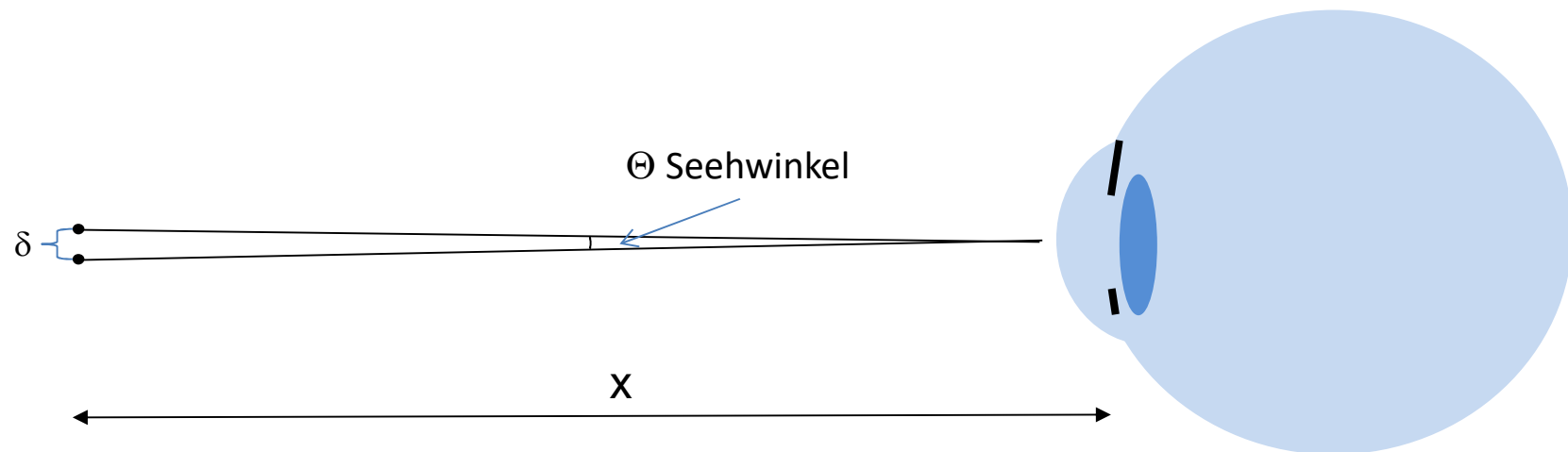
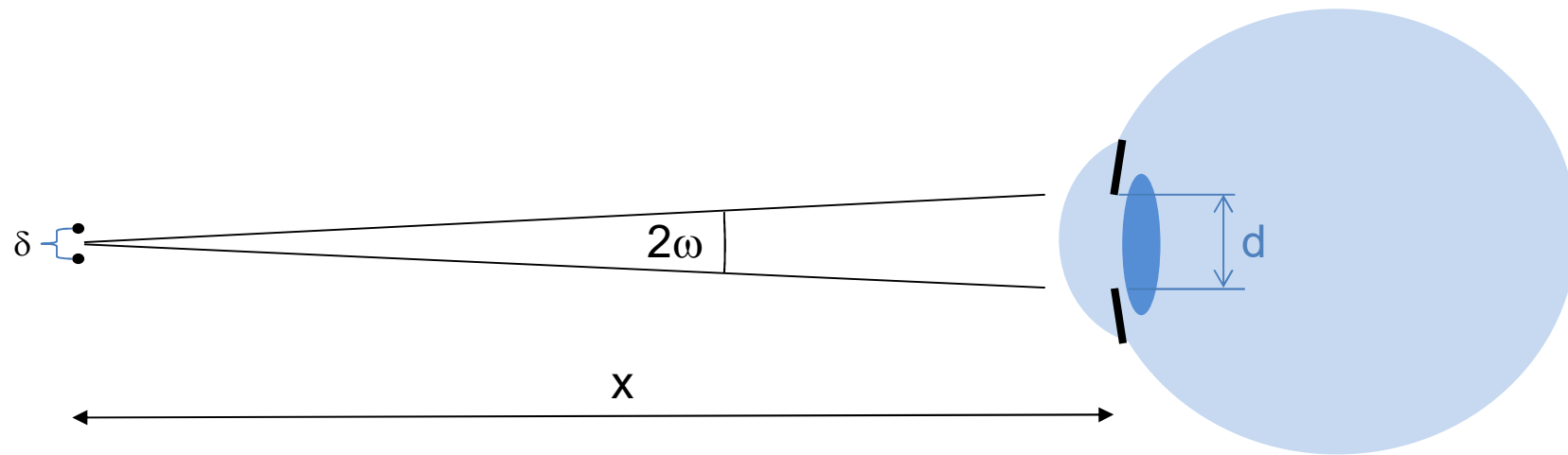
Wellenlänge des  
verwendeten Lichts

Brechzahl des  
Materials zwischen  
dem Präparat und  
der Objektivlinse

Halböffnungswinkel  
der Objektivlinse

### ■ Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops ( $f$ ): $f = \frac{1}{\delta}$

- Auflösung des Auges



- **Auflösung des Auges**

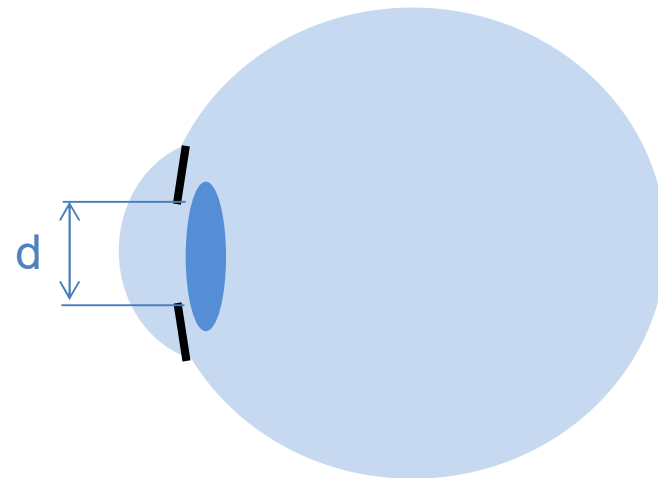
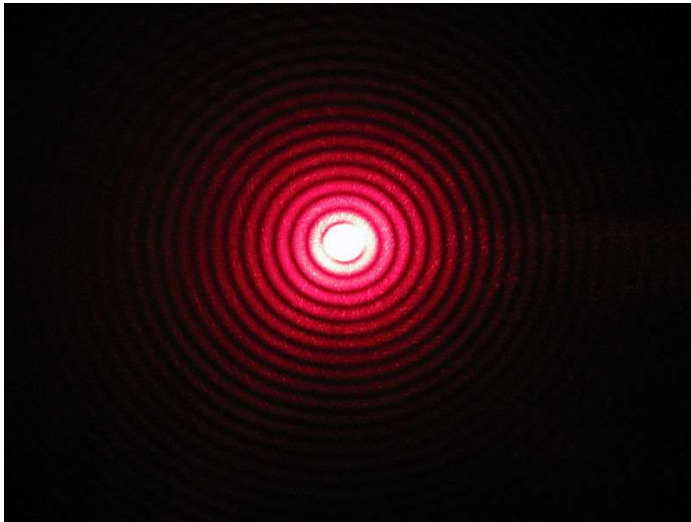
Airy-  
Scheibe

„So präzise eine Linse auch geschliffen sei, **infolge der Wellennatur** des Lichtes tritt an der Eintrittsöffnung der Linse **Diffraction** auf: demzufolge erhält man von einer punktförmigen Lichtquelle statt eines punktförmigen Bildes eine kleine leuchtende Scheibe. **Dieses Phänomen verhindert das Studium beliebig feiner Strukturen**, weil diese Scheiben einander überlappen.“

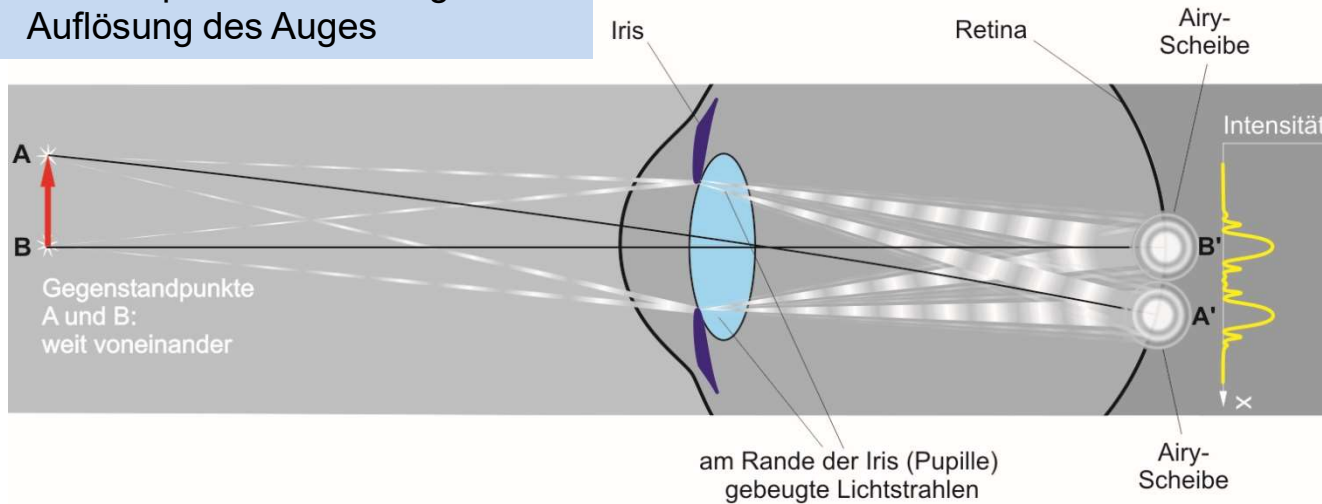


Ernst Karl Abbe  
(1840-1905)  
Mitbegründer der  
Zeiss-Werke

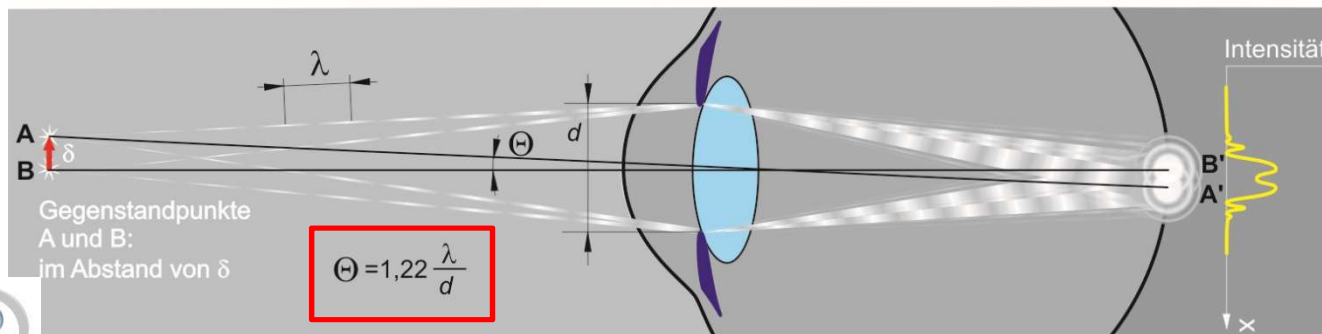
Beugung eines Laserstrahls  
an einem Loch



➤ Wellenoptische Erklärung der Auflösung des Auges



Seien A und B weit voneinander, so sind die Airy-Scheiben A' und B' voneinander getrennt.



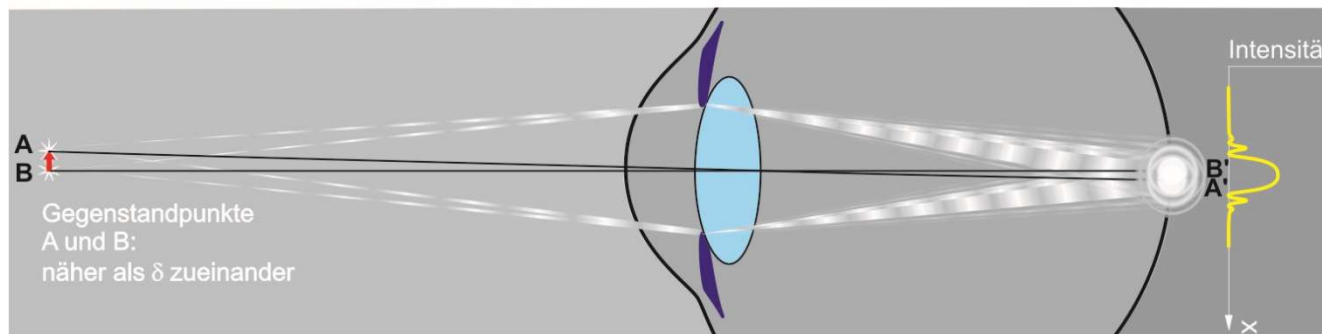
Seien A und B im kritischen Abstand voneinander, überlappen die Airy-Scheiben einander, aber sie sind zu unterscheiden.

$\delta$  minimale aufgelöste Entfernung,

$\Theta$  Sehwinkelgrenze infolge Lichtbeugung.



Sehwinkelgrenze infolge Lichtbeugung ( $\Theta$ ):



Sei der Abstand zwischen A und B kleiner als  $\delta$ , bilden zwei Airy-Scheiben eine Bildscheibe.

Das Bild von zwei Gegenstandspunkten ist nicht aufzulösen.



# Hausaufgaben: Aufgabensammlung

2.31, 32, 38-39



Polarsations-  
mikroskopische  
Aufnahmen

