

# 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

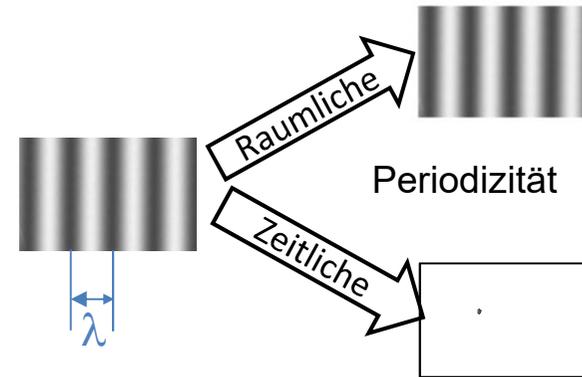
a) Welle, Wellenlänge ( $\lambda$ ), Frequenz ( $f$ ), Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ )  
 Transversal- und Longitudinalwellen

$$c = \lambda \cdot f$$

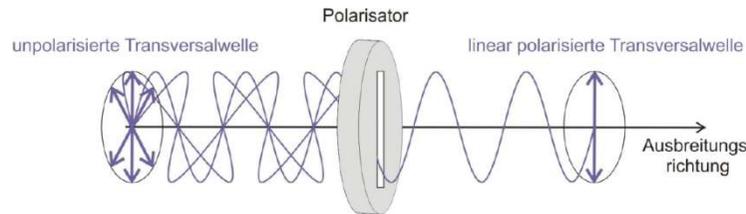
**Zur Erinnerung**

Welle: eine sich räumlich ausbreitende periodische Schwingung

Wellenlänge: der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase.



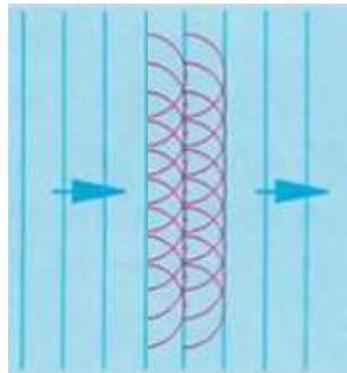
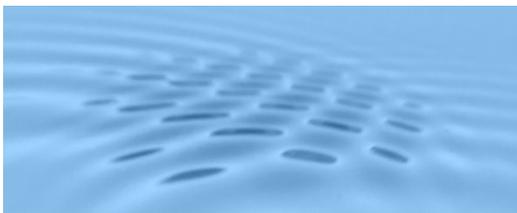
## b) Lineare Polarisation



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

## c) Reflexion und Brechung an Grenzflächen

## d) Interferenz



**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.

## e) Beugung, Huygensches Prinzip

## 2. Licht als Welle

### a) Licht = elektromagnetische Welle

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

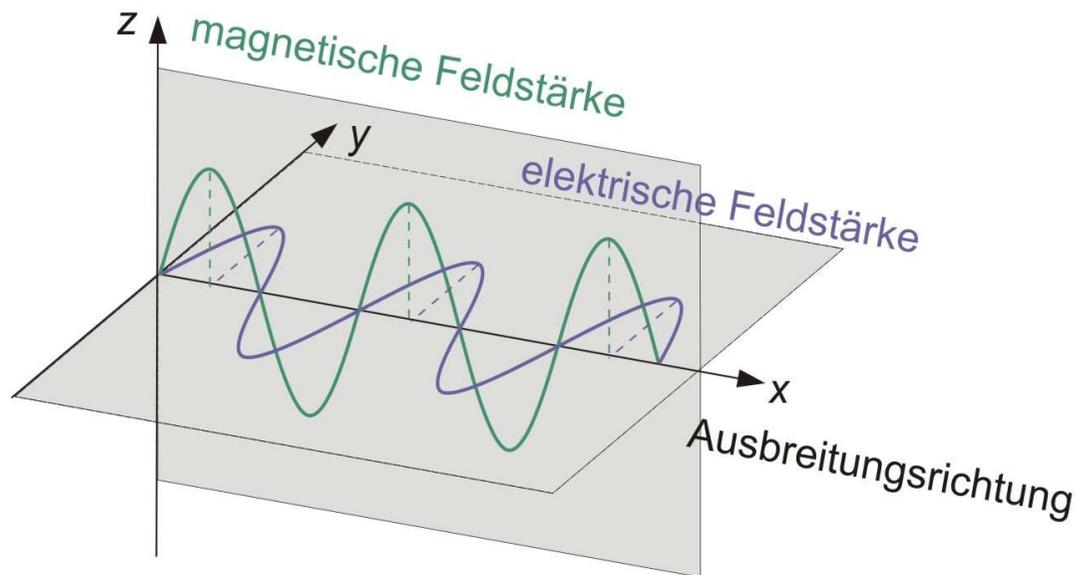
$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen

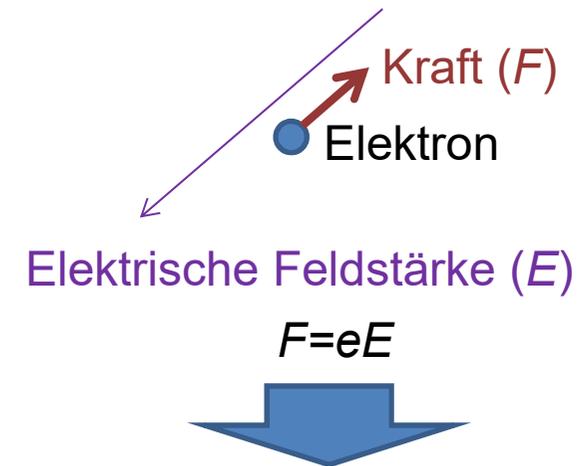
Diese Geschwindigkeit stimmt so gut mit der Lichtgeschwindigkeit überein, daß wir anscheinend **allen Grund zur Annahme haben, das Licht (sowie die Wärmestrahlung, aber auch andere Strahlungen, wenn es solche gibt) sei eine elektromagnetische Störung, die sich in Form von Wellen durch das elektromagnetische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

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

#### Transversalwelle



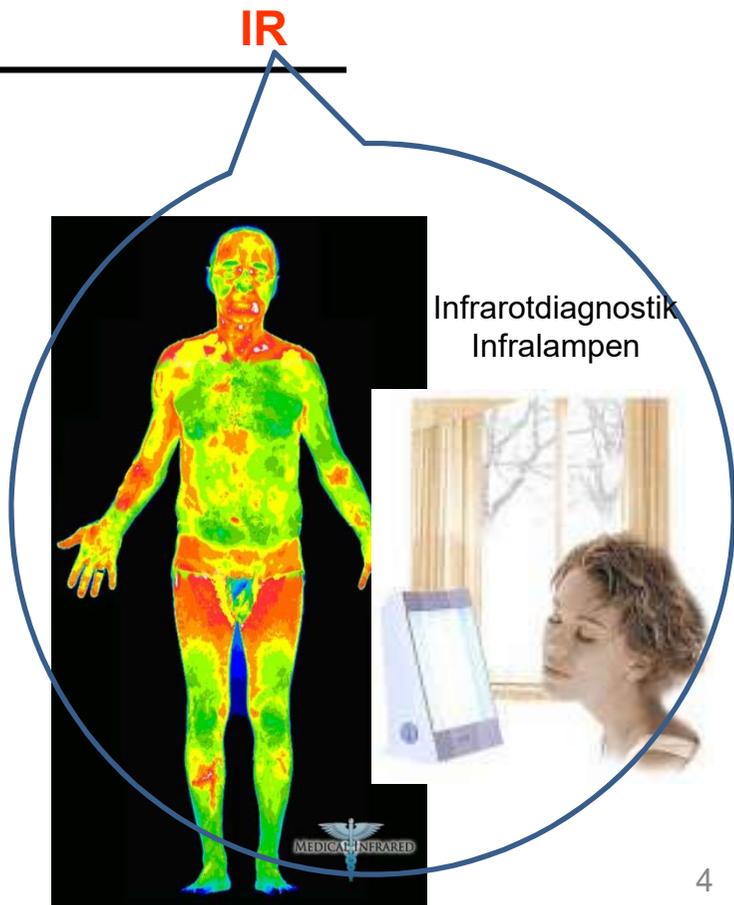
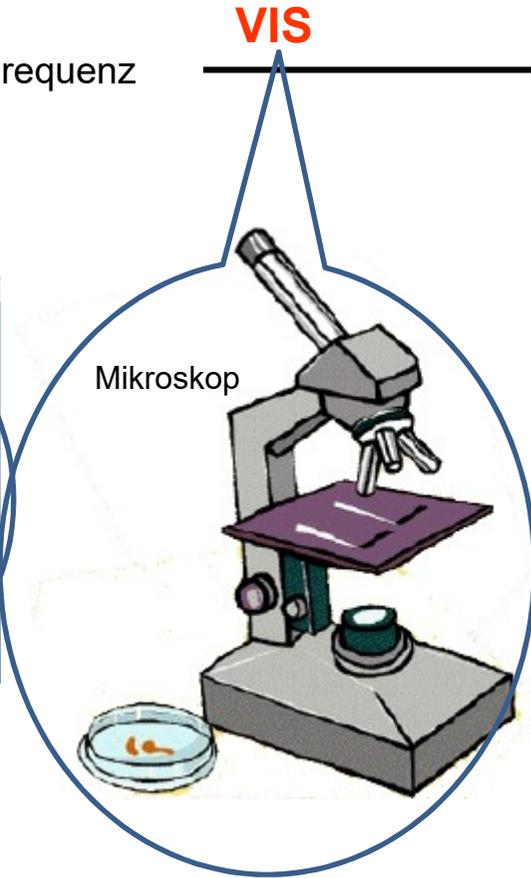
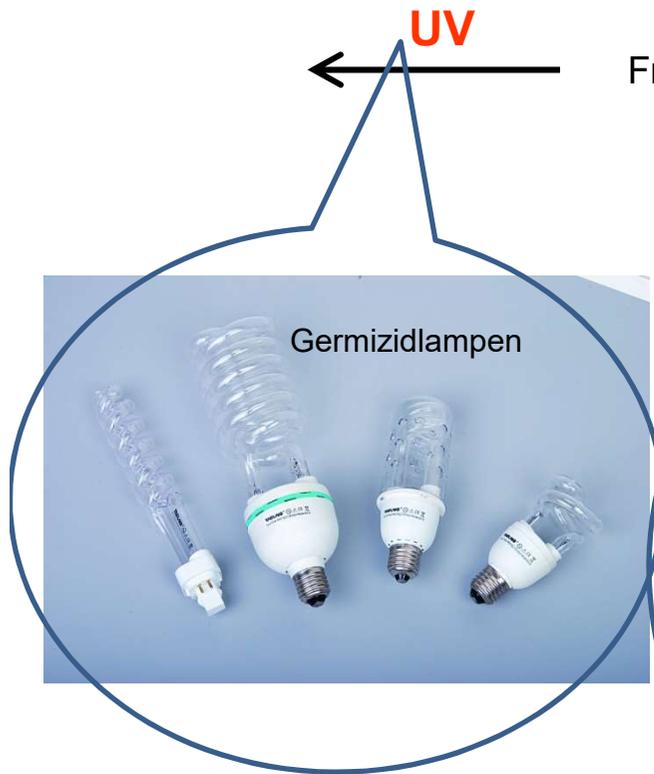
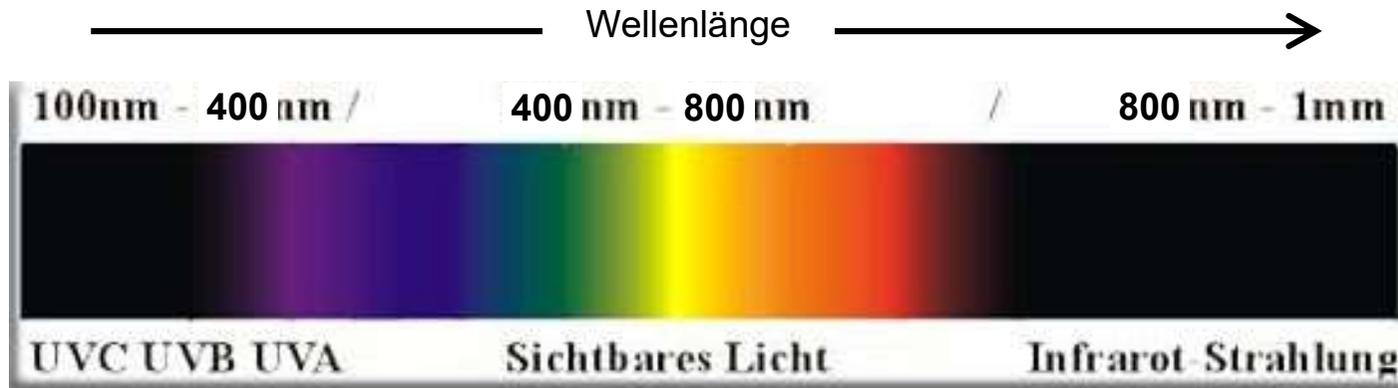
#### Wechselwirkung mit der Materie



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

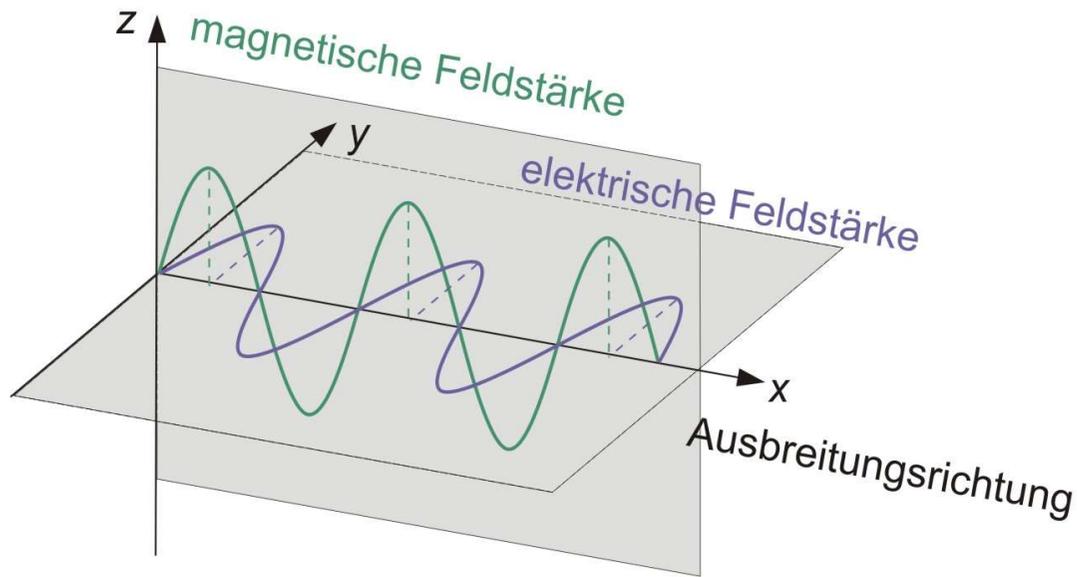
## b) Wellenlängenbereiche des Lichts

$$c = \lambda \cdot f$$



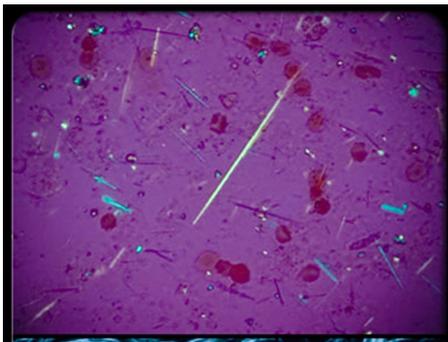
### c) Polarisation

Transversalwelle  $\Rightarrow$  Polarisierbarkeit

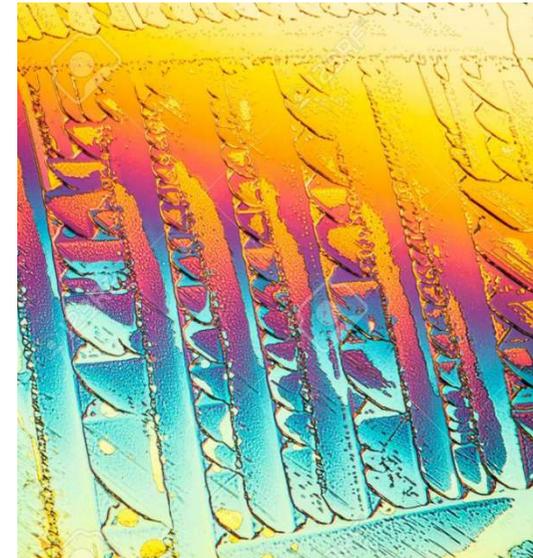


$\Rightarrow$  Doppelbrechung

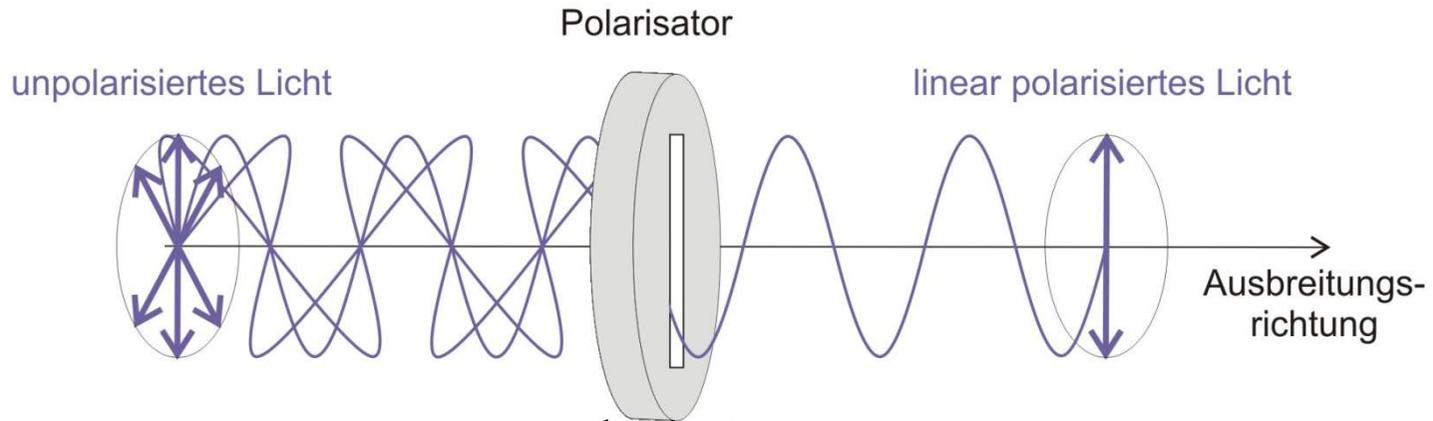
$\Rightarrow$  Optische Aktivität



Ablagerung von Harnsäure-Kristalle  
in Gicht

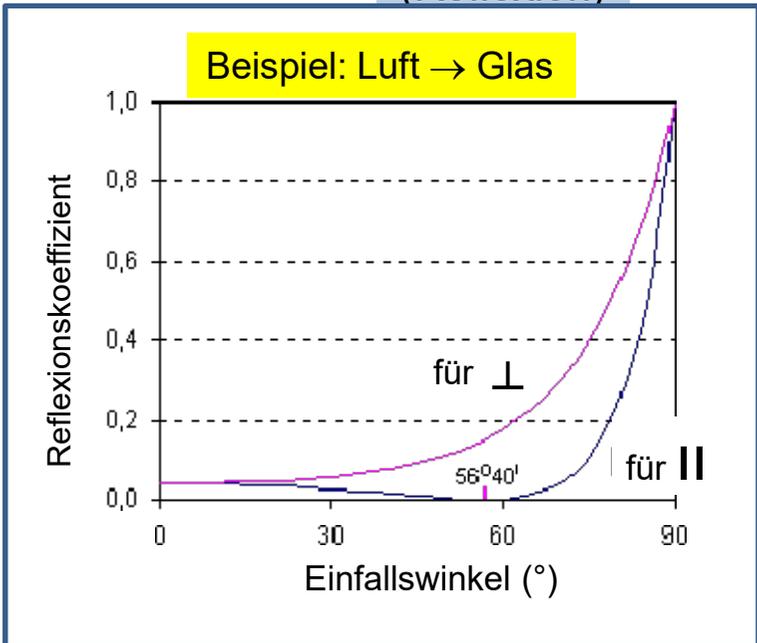


- **lineare Polarisation des Lichtes:**



Spiegel  
(Reflexion)

Polarisationsfilter  
(Absorption)





ohne Polarisator



ohne Polarisator

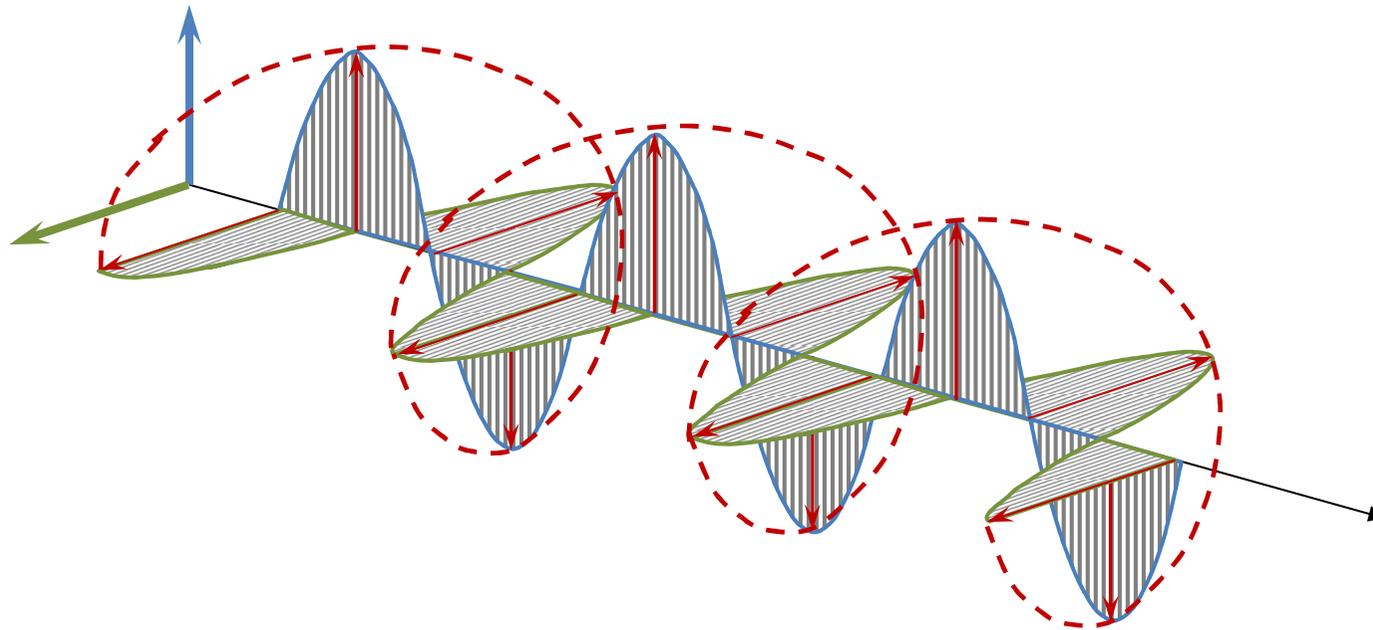


ohne Polarisator



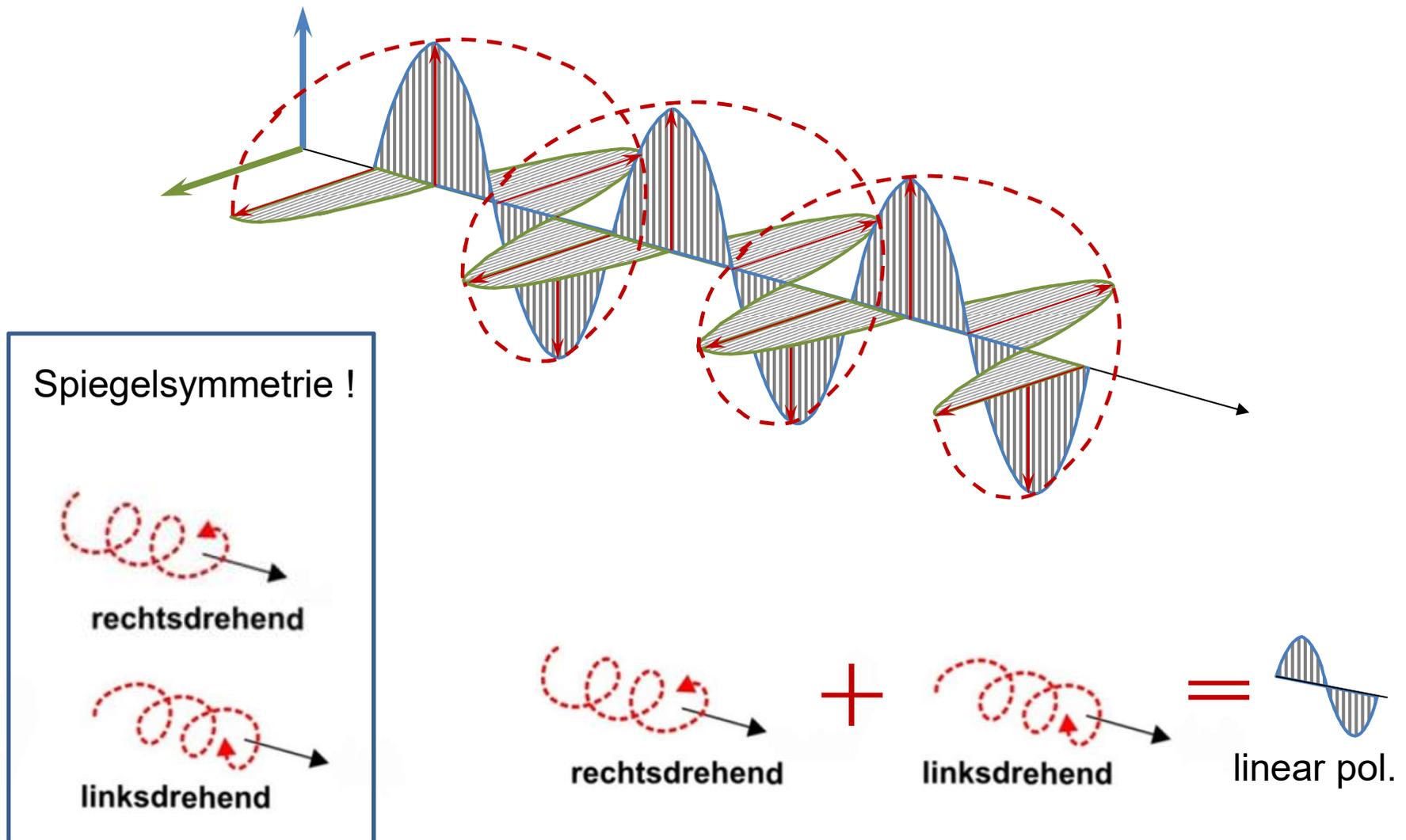
- **Zirkular polarisiertes Licht:**

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



- Zirkular polarisiertes Licht:**

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



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

Drehwinkel (°)

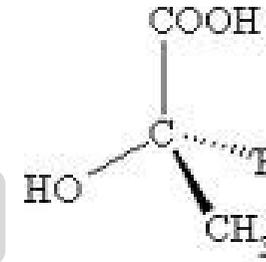
Konzentration (g/cm<sup>3</sup>)

Länge der Küvette (dm)

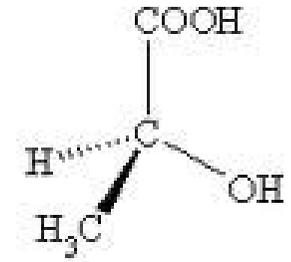
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

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

chirale Moleküle



(-)-Milchsäure

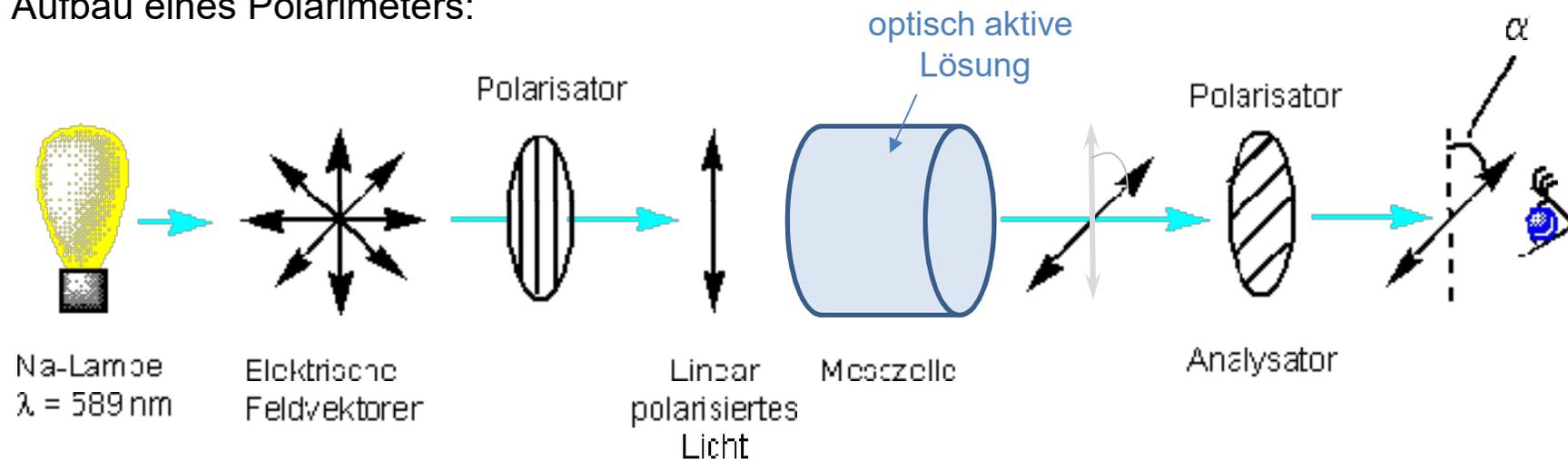


(+)-Milchsäure



Anwendung: Polarimetrie - Konzentrationsbestimmung

Aufbau eines Polarimeters:



- **Doppelbrechung:**

**Anisotropie**

zB: Kristalle,  
Polymere,  
Muskelgewebe

Ausgewählte Richtung:  
Optische Achse

Vereinfacht:

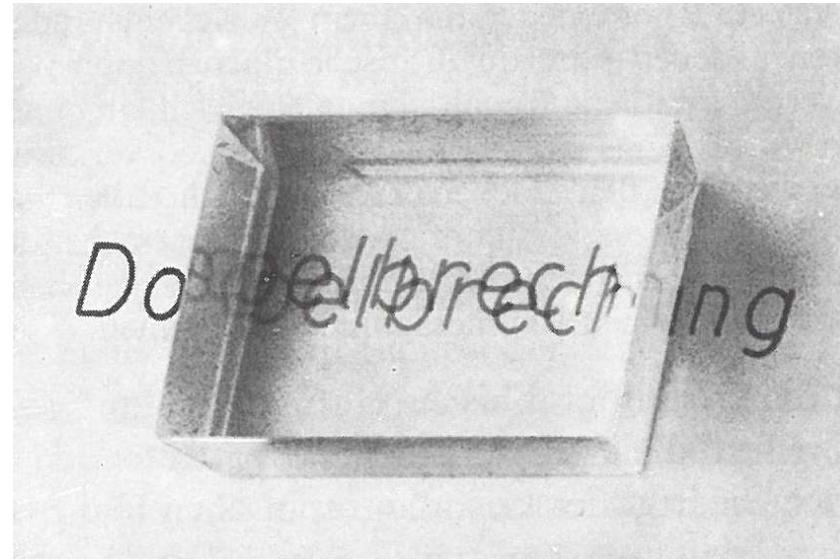
**Ordentlicher Strahl:**

⊥ auf optische Achse polarisiert

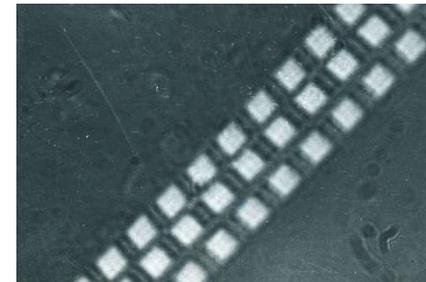
**Außerordentlicher Strahl:**

|| zur optische Achse polarisiert

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



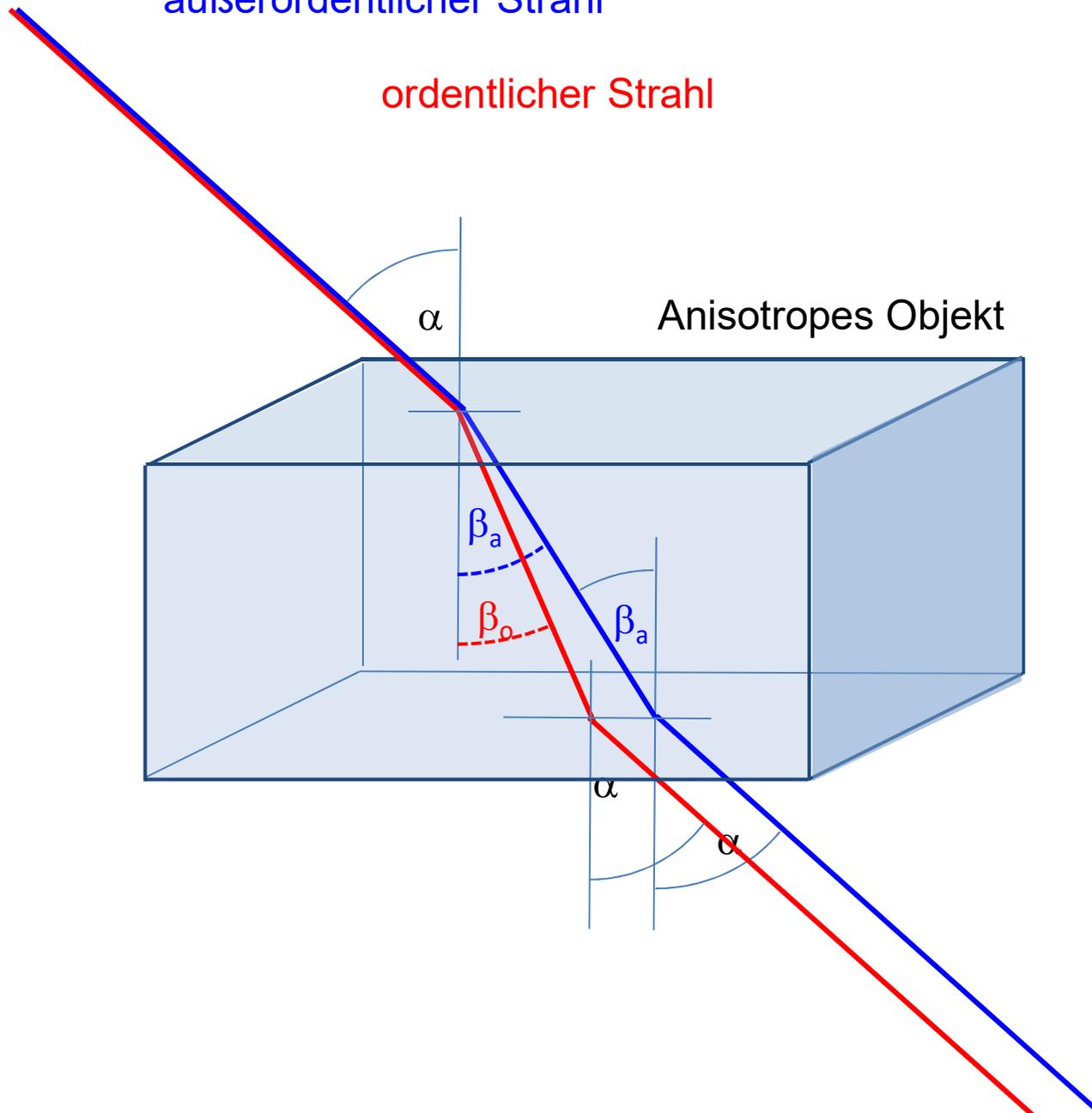
Doppelbrechung eines Kalkspatkristals



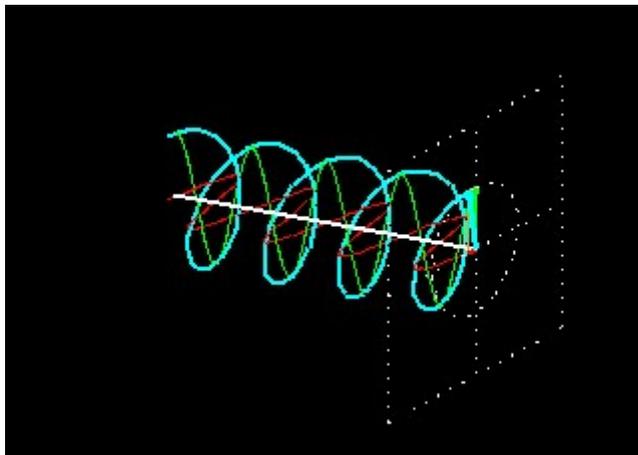
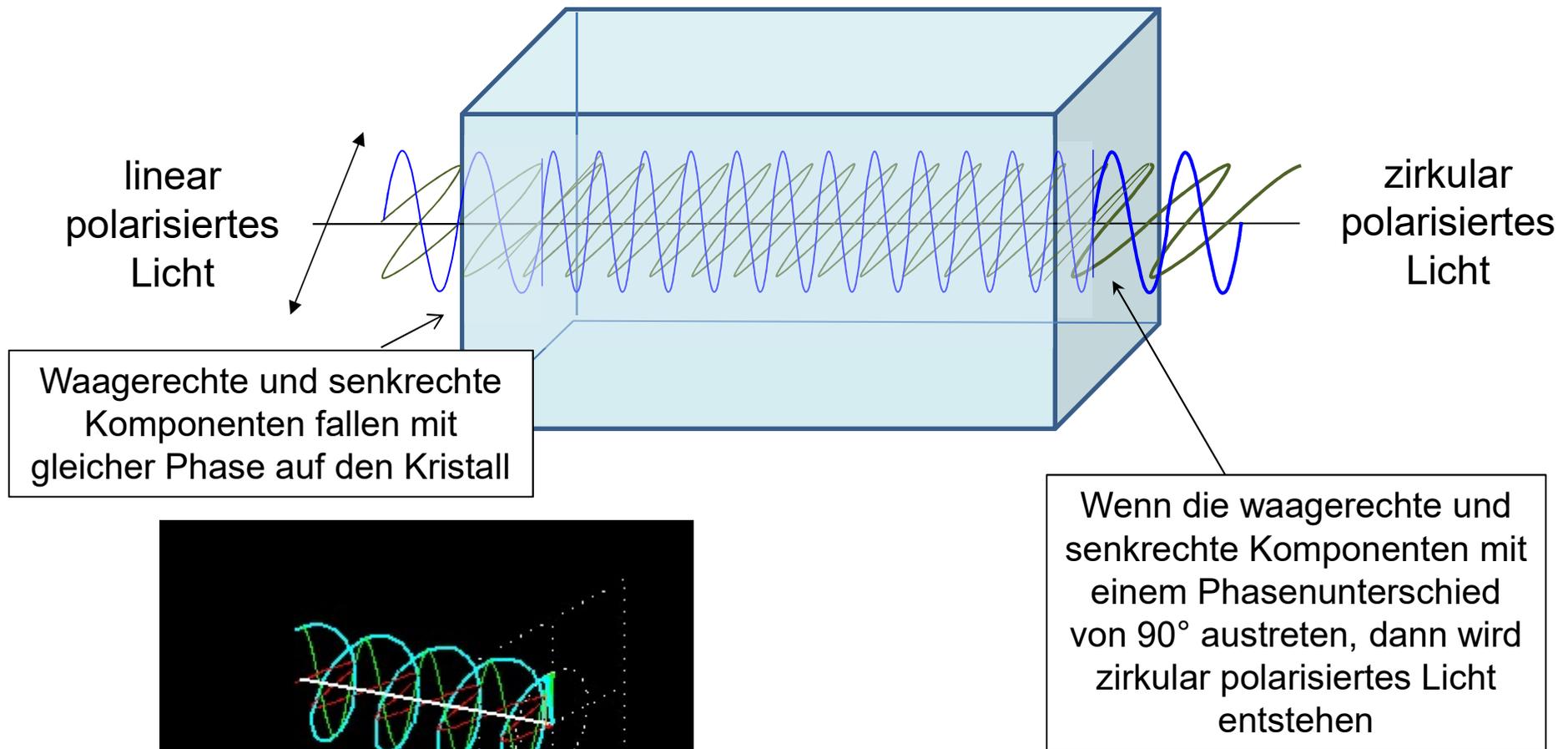
Doppelbrechung:  
leicht ausgedehnter Muskel  
des Flügels einer Biene  
(in einem Polarisationsmikroskop)

- Doppelbrechung:  
außerordentlicher Strahl

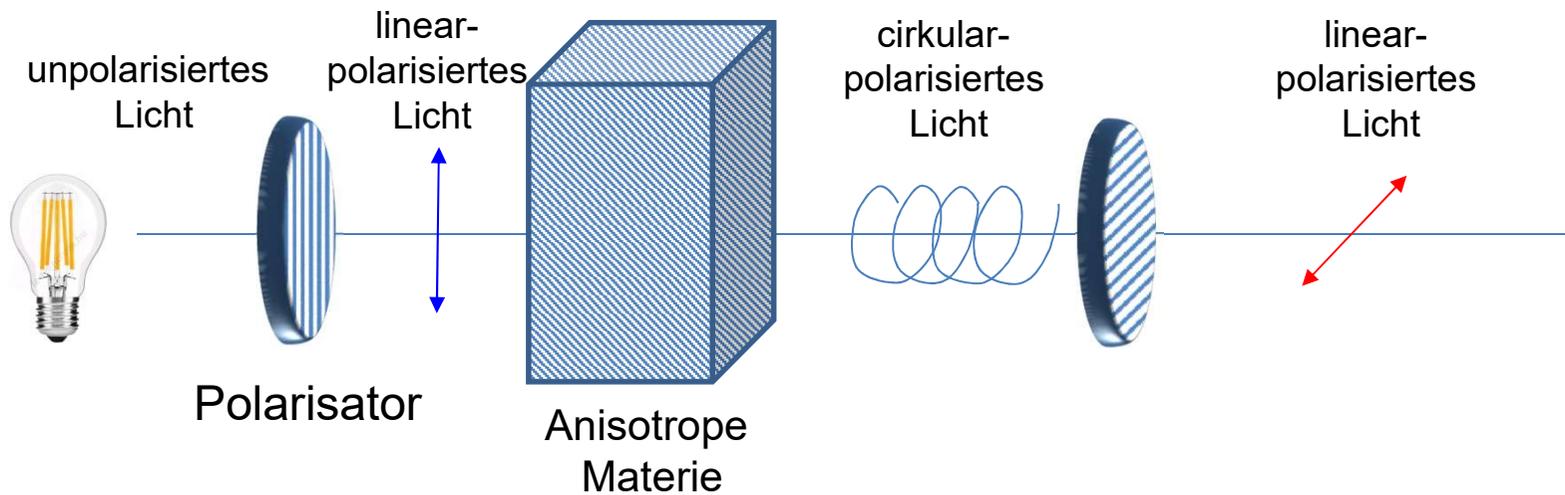
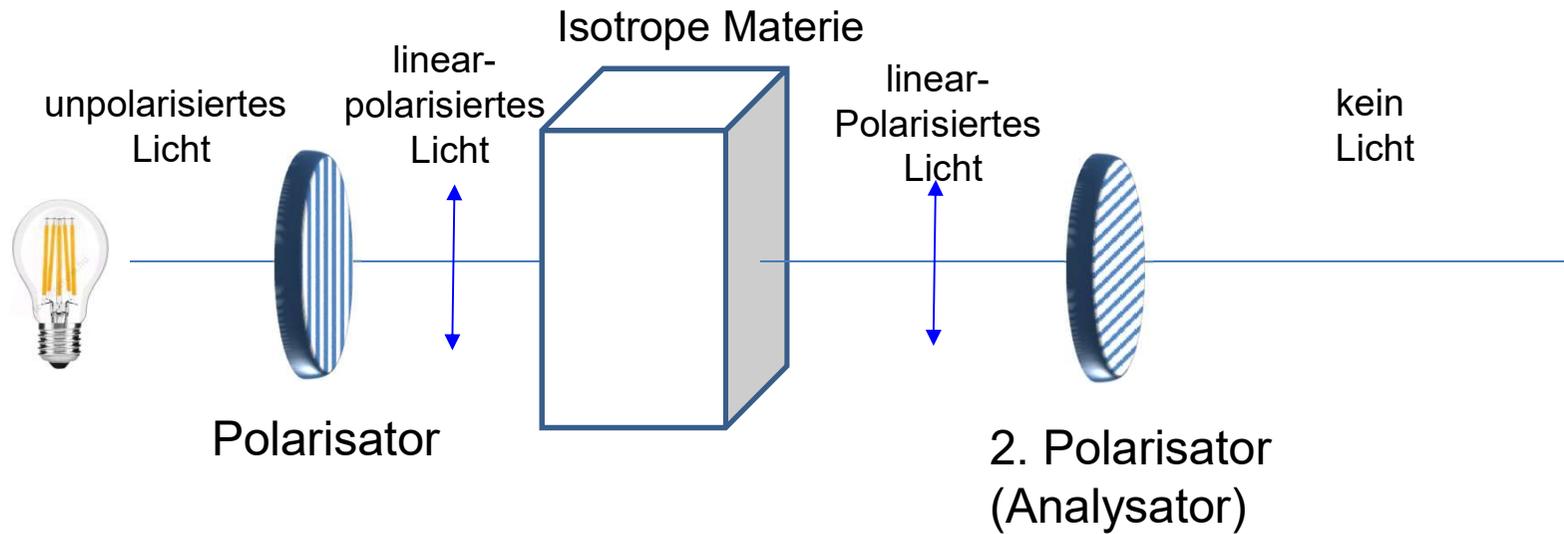
ordentlicher Strahl



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



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



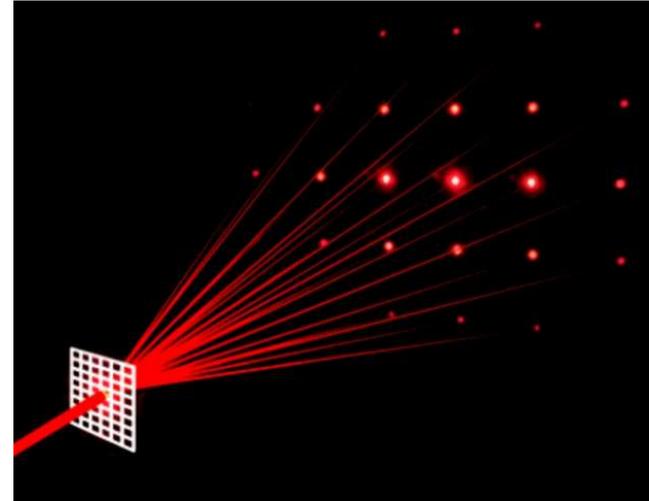
Durch gekreuzten Polarisatoren sieht man nur die anisotrope Objekte!  
(s. Polarisationsmikroskop)

- 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 Polarisationsebene.
Zur Beobachtung notwendiger Lichtweg	$\mu\text{m}$	dm

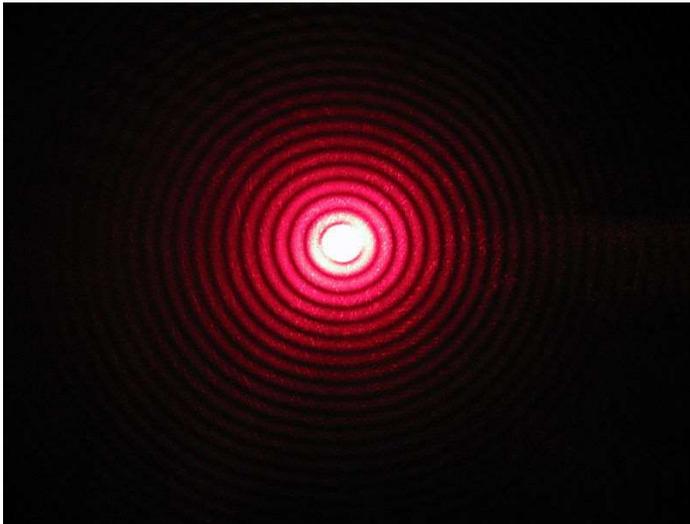
## d) Beugung (Diffraktion) des Lichtes

Beweis für den  
Wellencharakter  
des Lichts

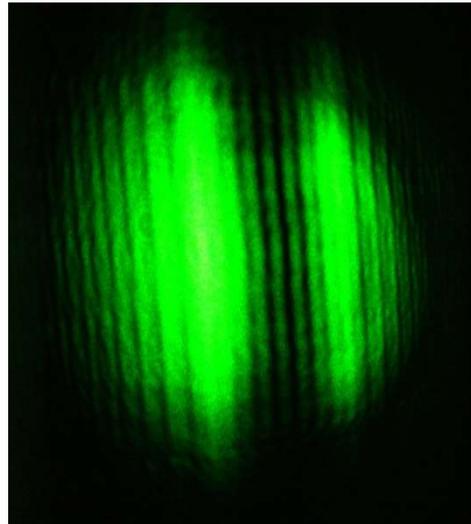


Beugung eines Laserstrahls an einem  
zweidimensionalen optischen Gitter

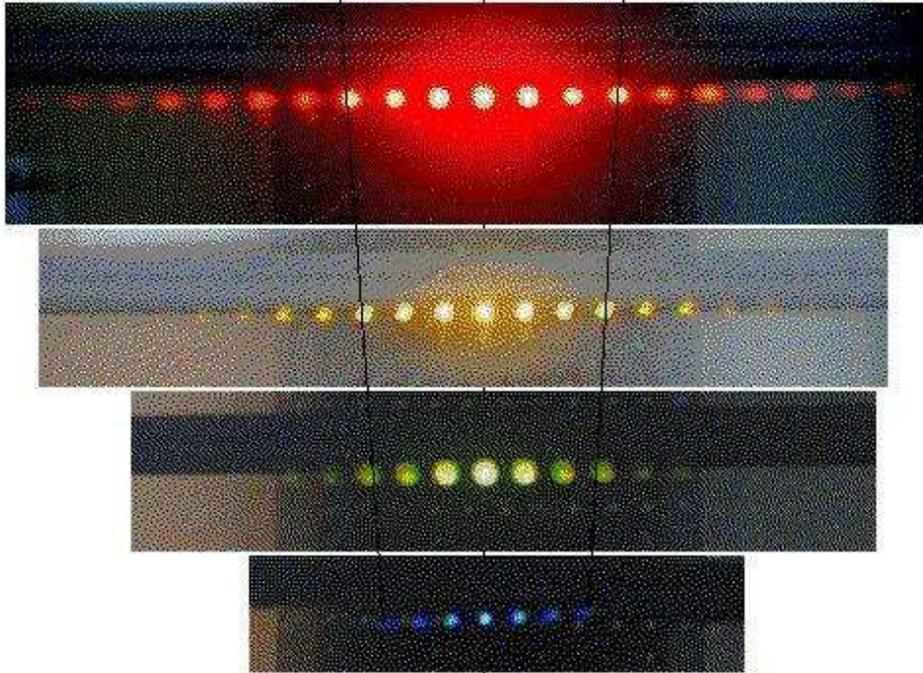
Beugung eines Laserstrahls  
an einem Loch



Beugung eines Laserstrahls  
an einem Haar



Beugung von Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge an einem optischen Gitter

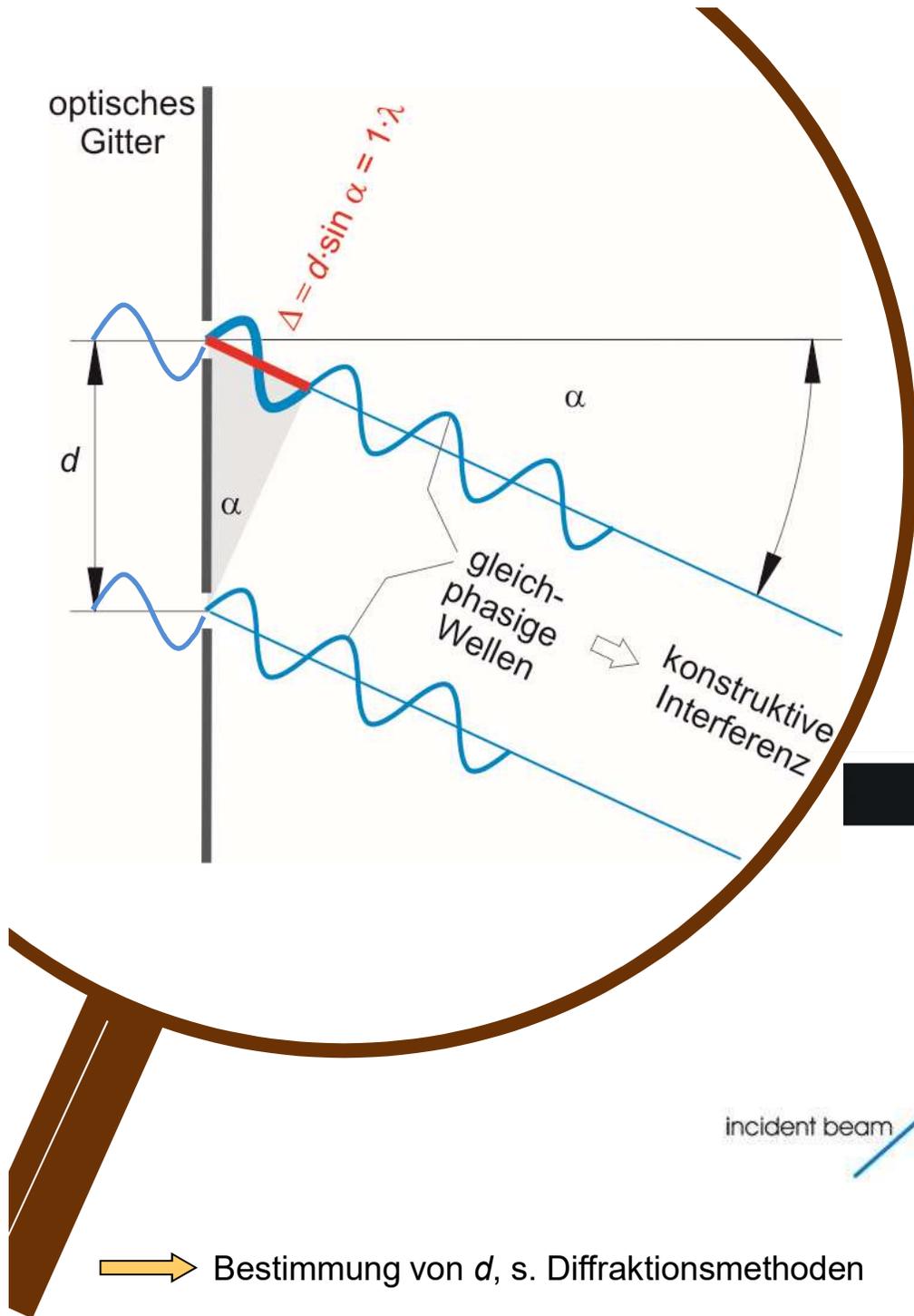


Beugung ist Wellenlängeabhängig!

Beugung von weißem Licht an einem optischen Gitter



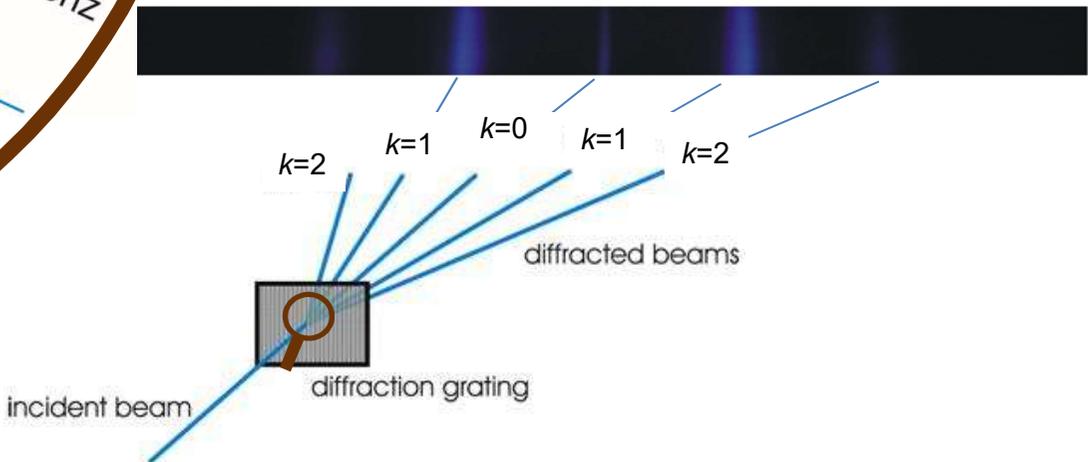
Hauptmaximum  
Nebenmaximum  
1-ter Ordnung  
Nebenmaximum  
2-ter Ordnung



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

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

Bestimmung von  $\lambda$



▪ Beugung an einem optischen Gitter

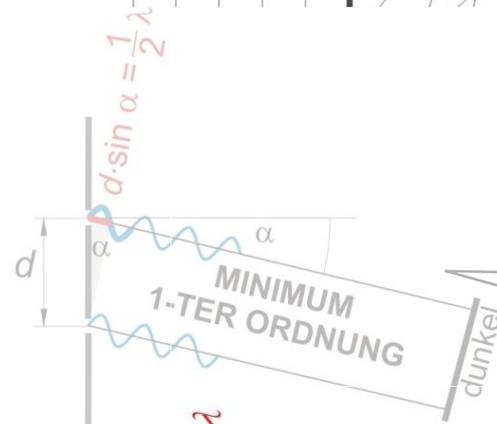
(s. Abbildung am Titelblatt des Themas Spezialmikroskope im Praktikumsbuch!)

OPTISCHES GITTER

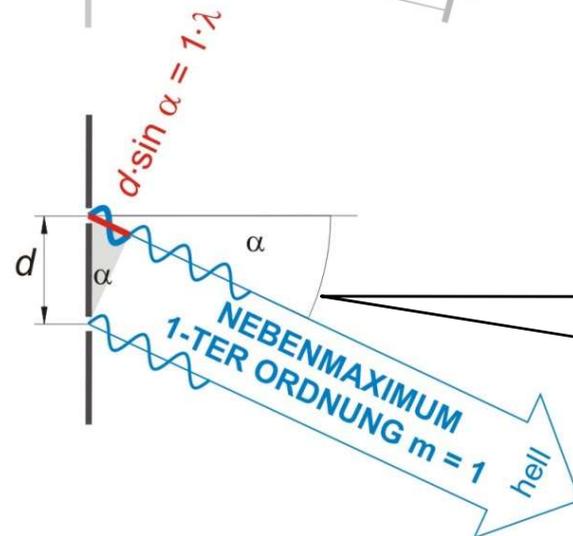
Gitterkonstante =  $d$



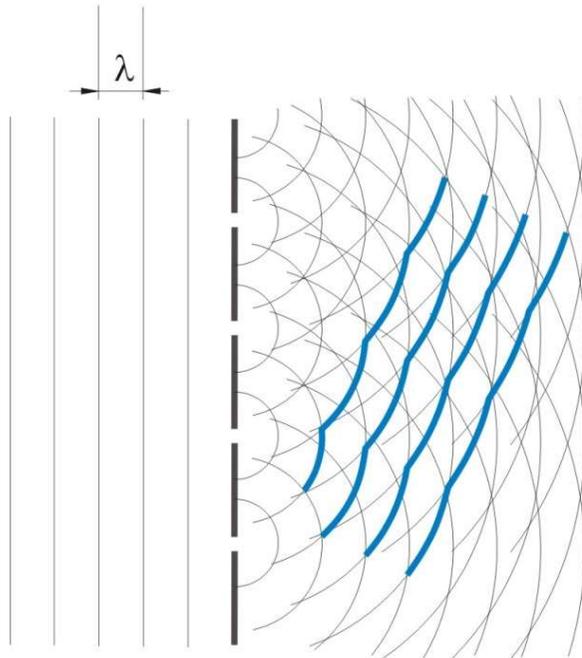
Elementarwellen in gleicher Phase  $\Rightarrow$  positive Interferenz



Elementarwellen in entgegengesetzter Phase  $\Rightarrow$  negative Interferenz

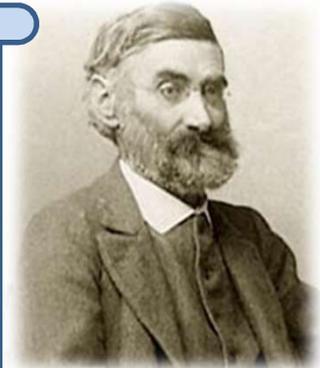


Elementarwellen in gleicher Phase  $\Rightarrow$  positive Interferenz



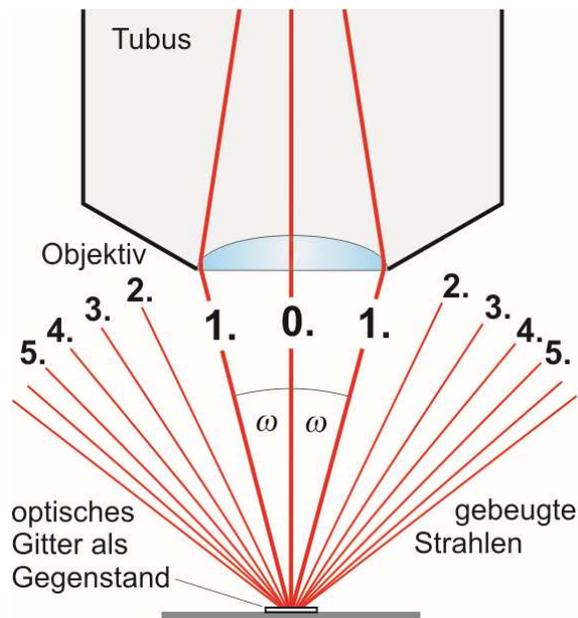
e) Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes – endliche Auflösung der optischen Instrumenten und des Auges

**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 ( $\delta$ ):



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

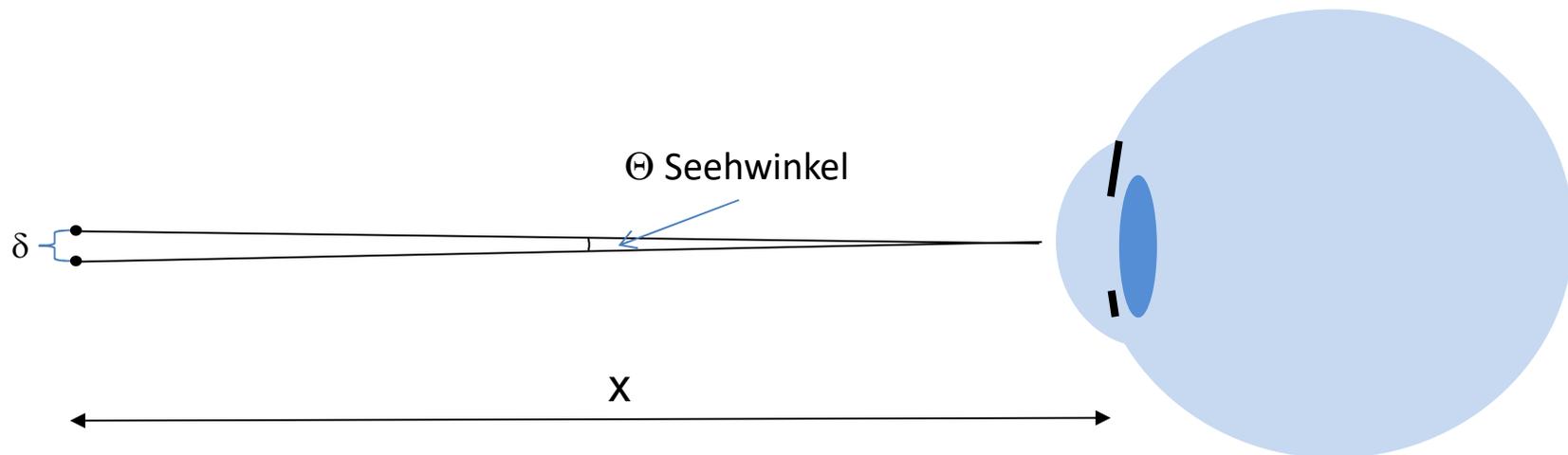
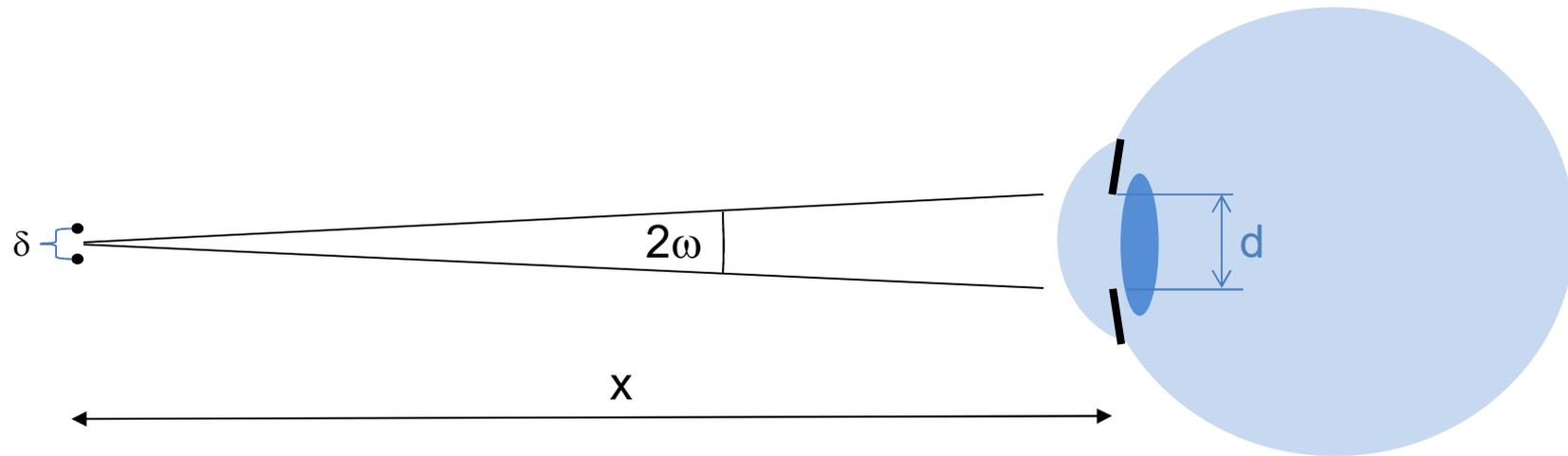
Wellenlänge des verwendeten Lichts

Brechzahl des Materials zwischen dem Präparat und der Objektivlinse

Halböffnungswinkel der Objektivlinse

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

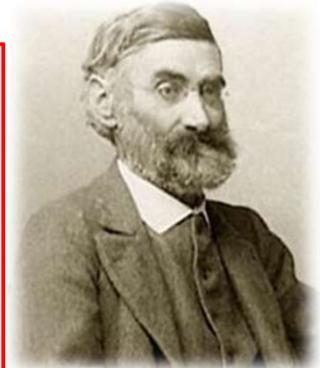
- Auflösung des Auges



- **Auflösung des Auges**

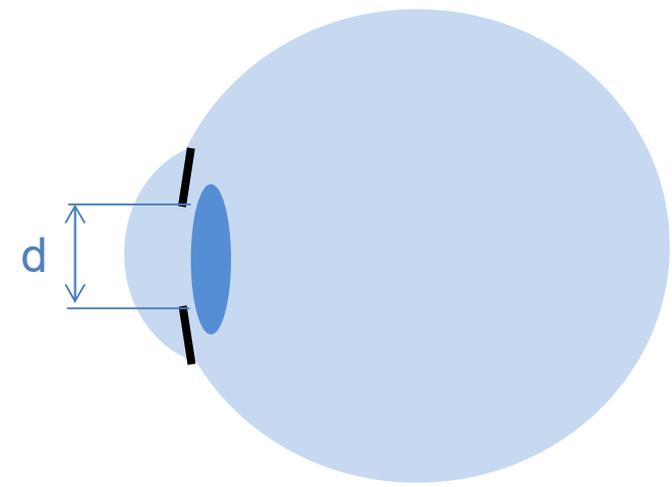
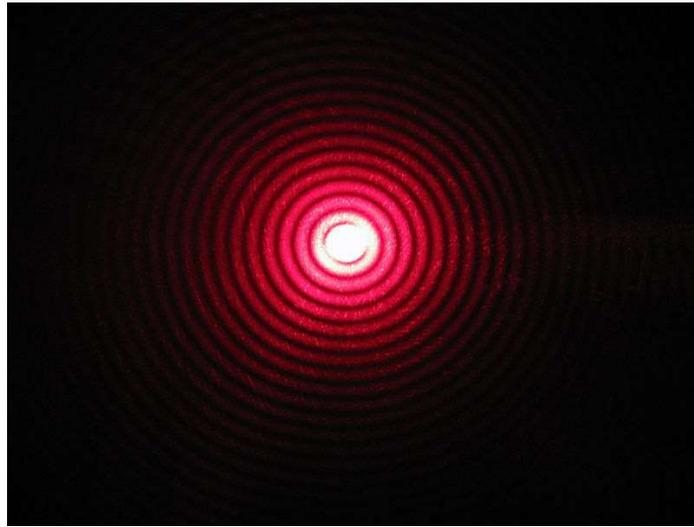
Airy-Scheibe

„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.“

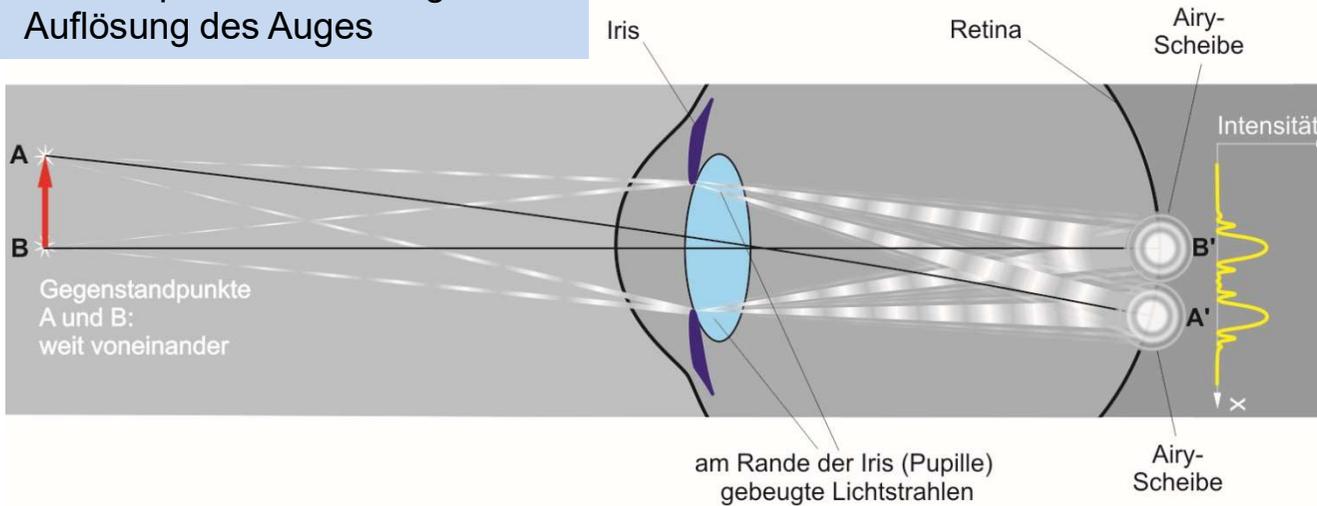


Ernst Karl Abbe  
(1840-1905)  
Mitbegründer der  
Zeiss-Werke

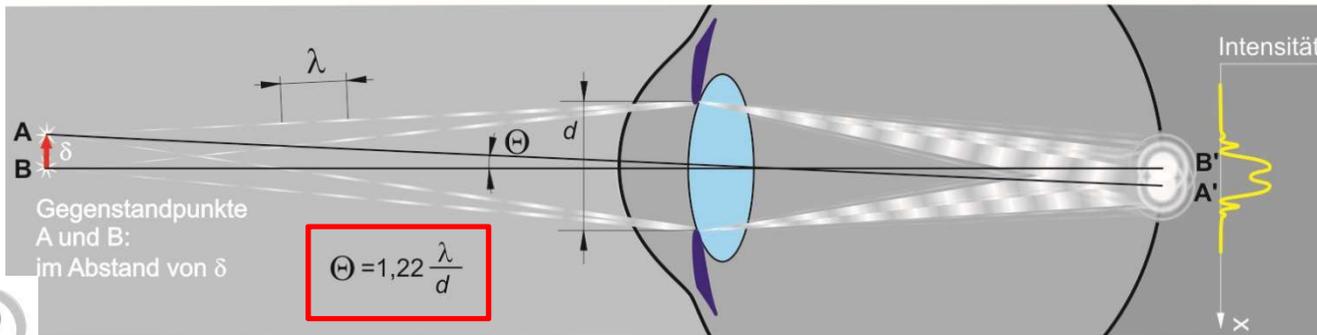
Beugung eines Laserstrahls  
an einem Loch



➤ Wellenoptische Erklärung der Auflösung des Auges



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

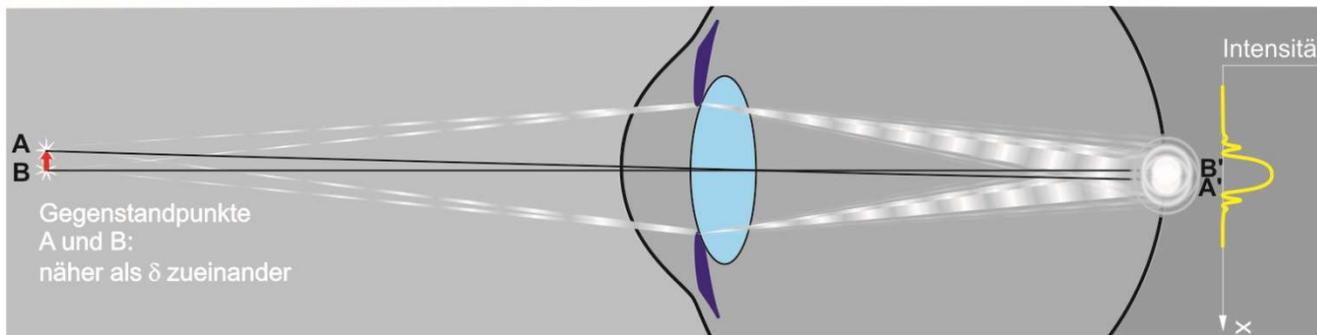


Seien A und B im kritischen Abstand voneinander, überlappen die Airy-Scheiben einander, aber sie sind zu unterscheiden.

- $\delta$  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

