

Medizinische Biophysik

Licht in der Medizin

4. Vorlesung
30. 09. 2020

II. Wellenoptik

1. Grundkenntnisse der Wellenlehre

- a) Welle, Wellenlänge (λ), 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, Doppelbrechung, optische Aktivität
- d) Beugung (Diffraktion) des Lichtes
- e) Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes –
endliche Auflösung der optischen Instrumenten
und des Auges

II. Wellenoptik

1. Grundkenntnisse der Wellenlehre

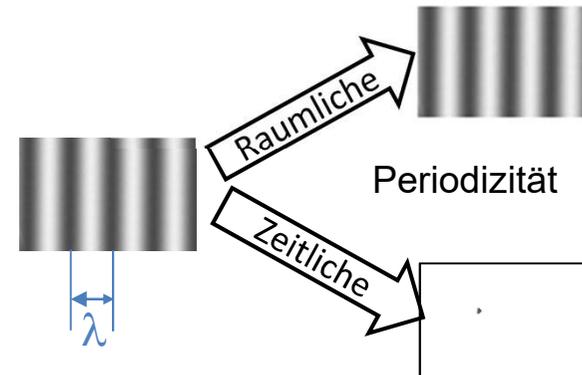
a) Welle, Wellenlänge (λ), Frequenz (f), Ausbreitungsgeschwindigkeit (c)
 Transversal- und Longitudinalwellen

$$c = \lambda \cdot f$$

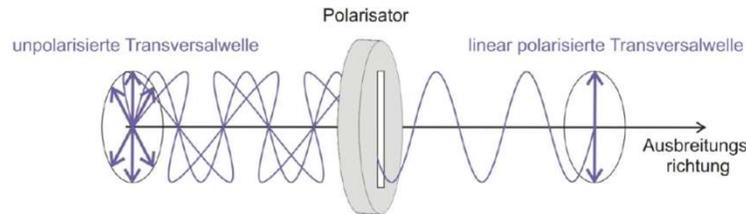
Zur Erinnerung

Welle: eine sich räumlich ausbreitende periodische Schwingung

Wellenlänge: der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase.



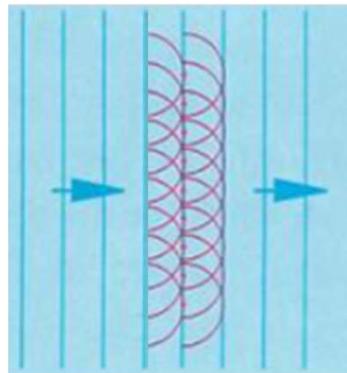
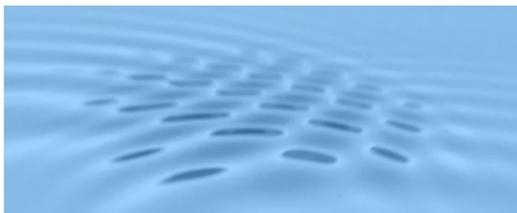
b) Lineare Polarisation



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

c) Reflexion und Brechung an Grenzflächen

d) Interferenz



e) Beugung, Huygensches 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

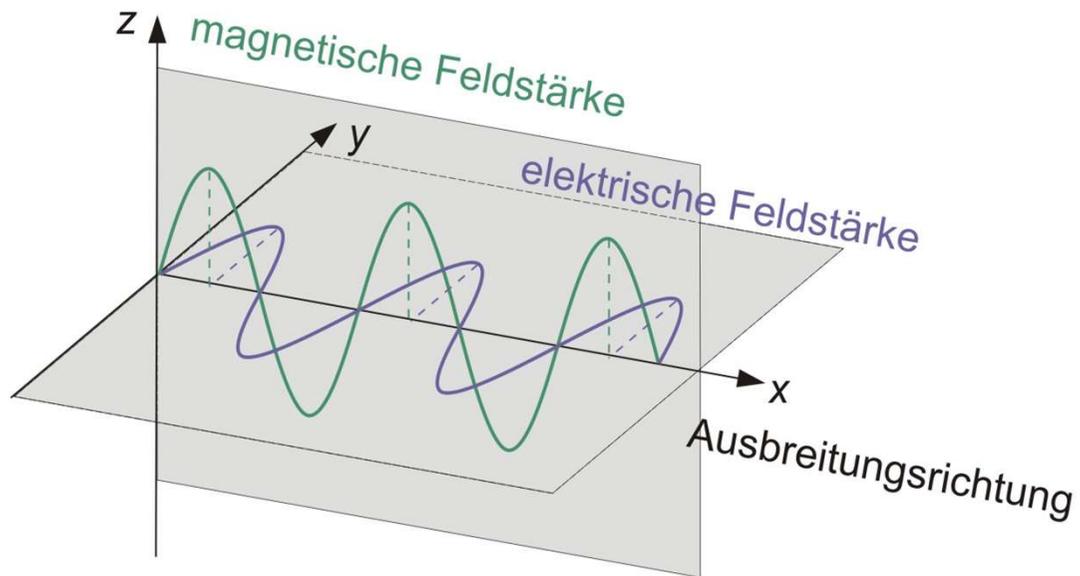
$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen

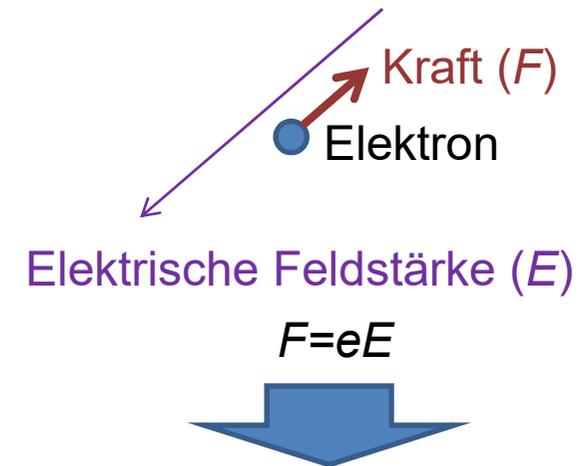
Diese Geschwindigkeit stimmt so gut mit der Lichtgeschwindigkeit überein, daß wir anscheinend **allen Grund zur Annahme haben, das Licht (sowie die Wärmestrahlung, aber auch andere Strahlungen, wenn es solche gibt) sei eine elektromagnetische Störung, die sich in Form von Wellen durch das elektromagnetische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

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

Transversalwelle



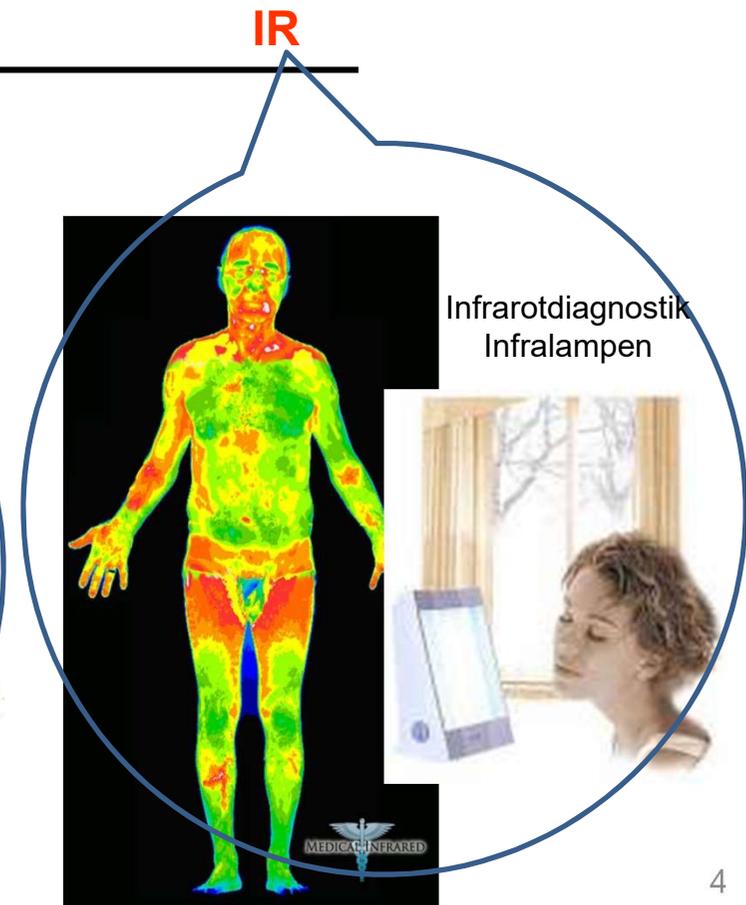
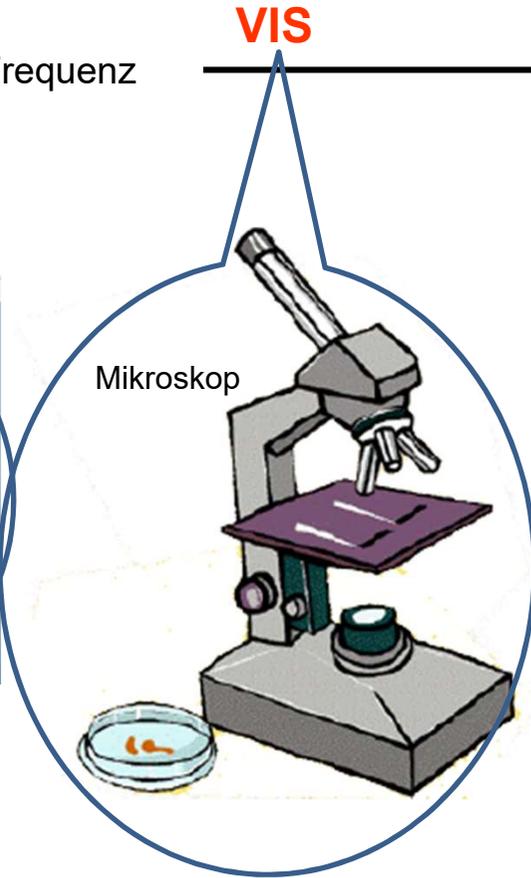
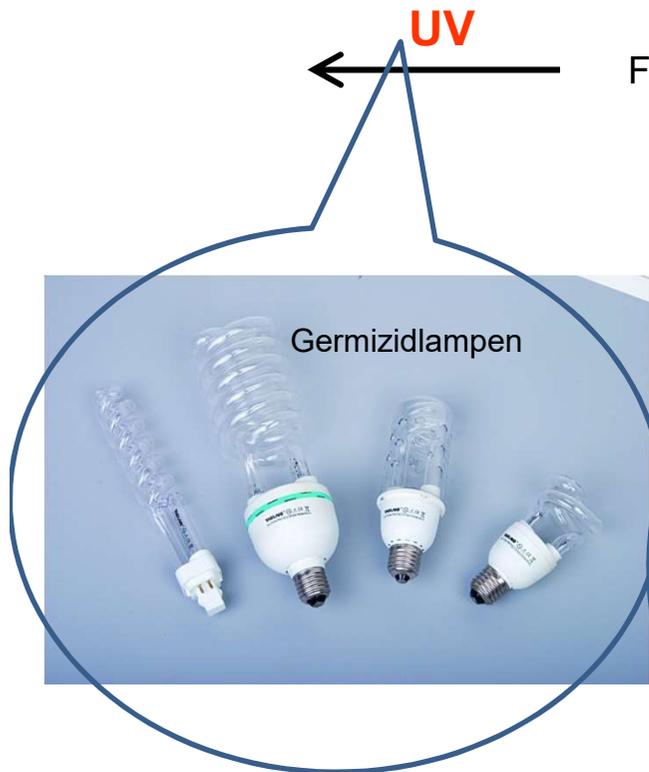
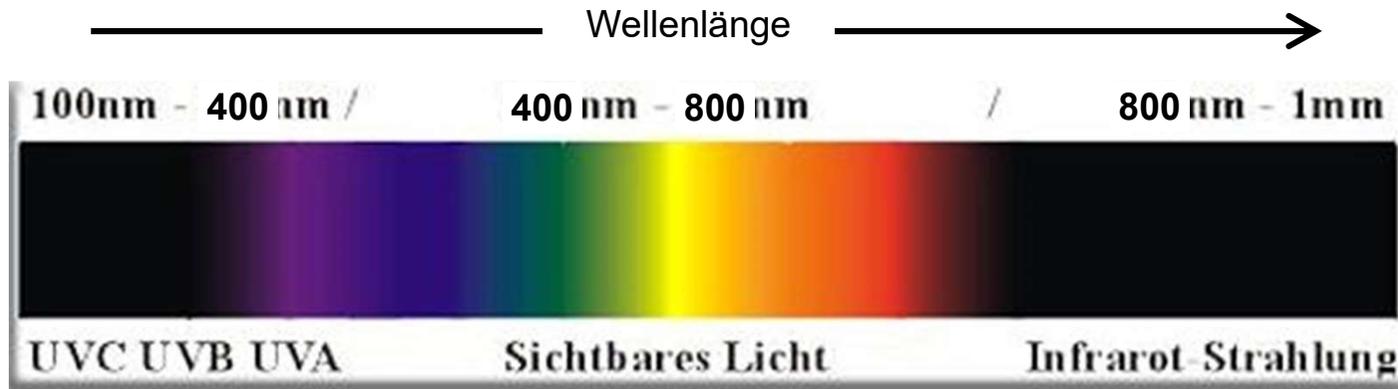
Wechselwirkung mit der Materie



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

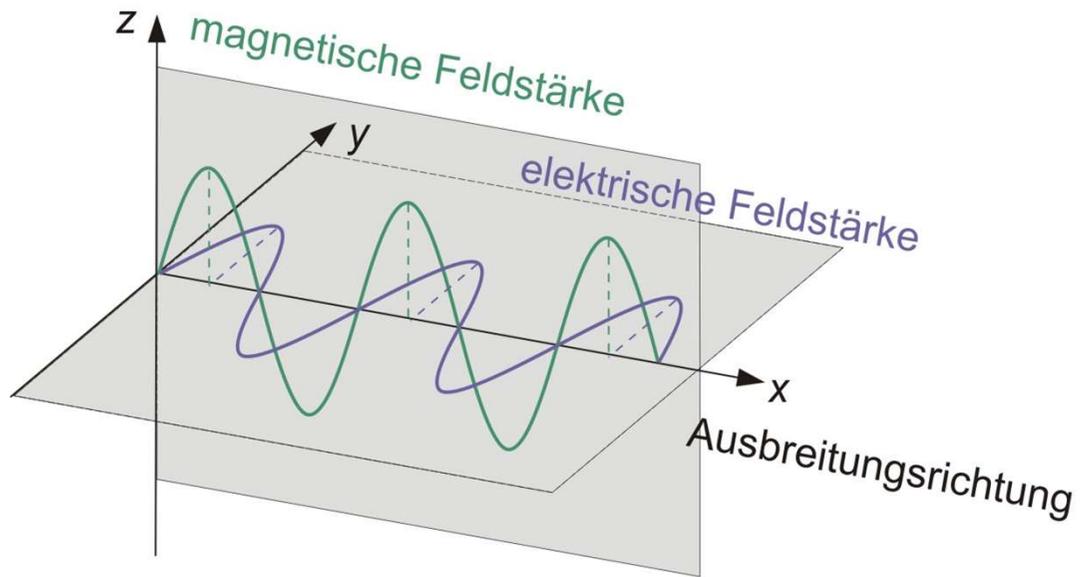
b) Wellenlängenbereiche des Lichts

$$c = \lambda \cdot f$$



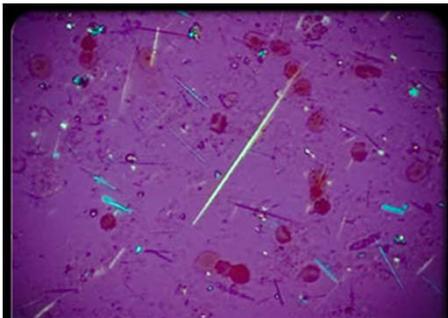
c) Polarisation

Transversalwelle \Rightarrow Polarisierbarkeit

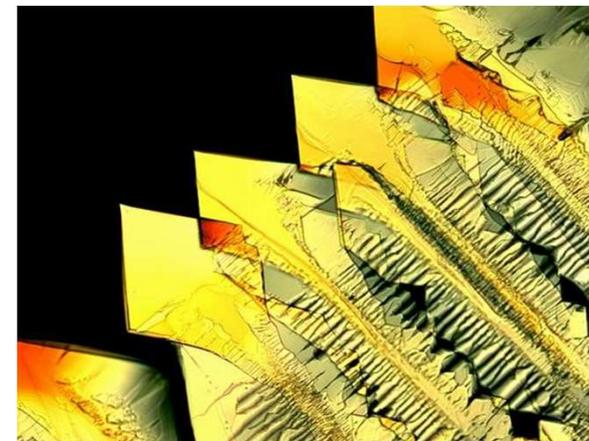


\Rightarrow Doppelbrechung

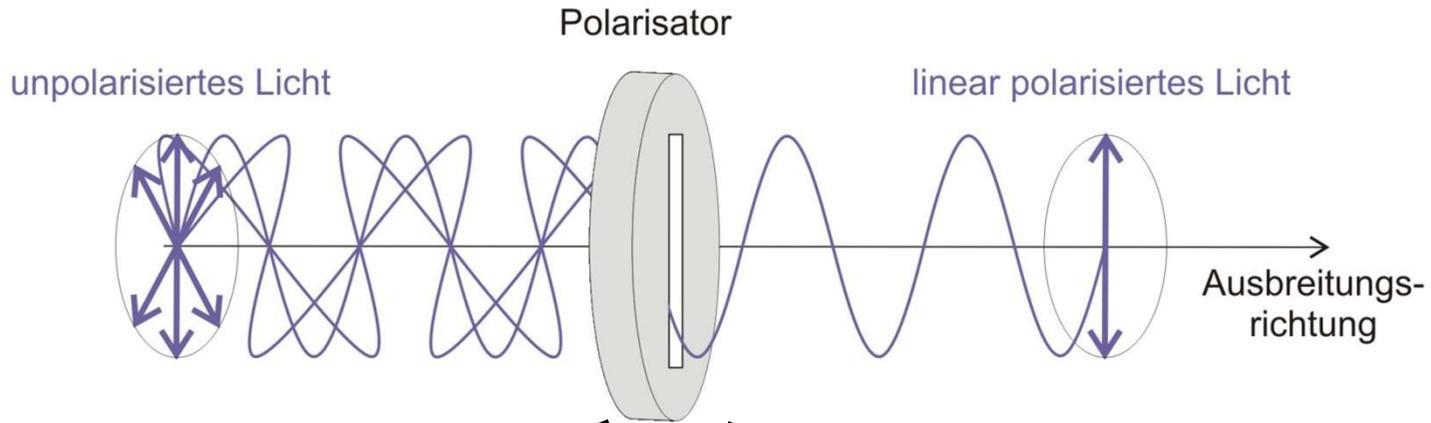
\Rightarrow Optische Aktivität



Ablagerung von Harnsäure-Kristalle
in Gicht

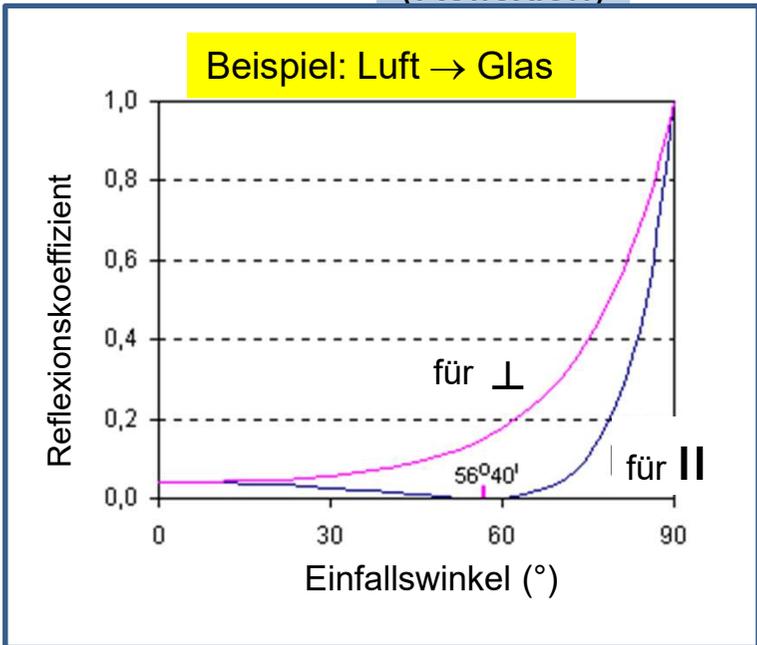


- **lineare Polarisation des Lichtes:**



Spiegel
(Reflexion)

Polarisationsfilter
(Absorption)

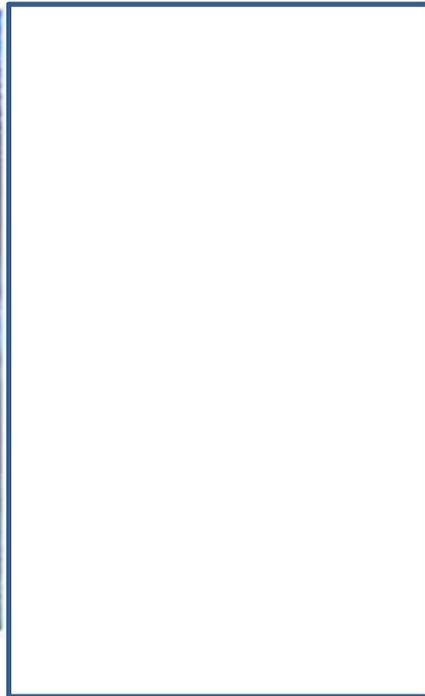




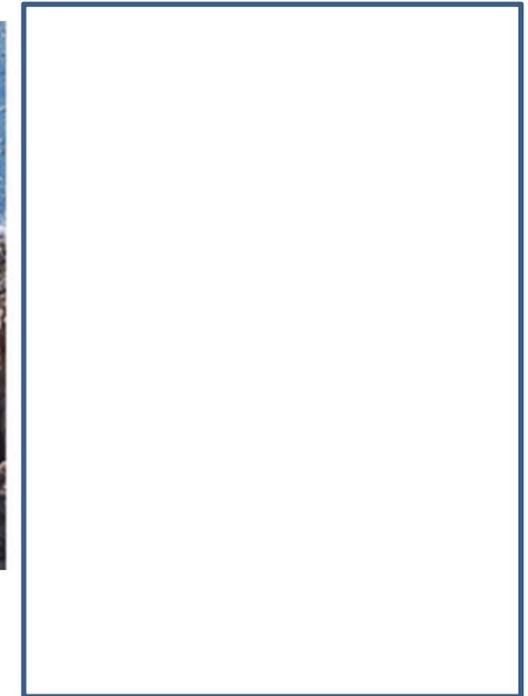
ohne Polarisator



ohne Polarisator



ohne Polarisator



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

Drehwinkel (°)

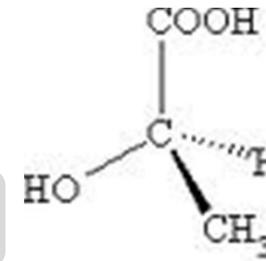
Konzentration (g/cm³)

Länge der Küvette (dm)

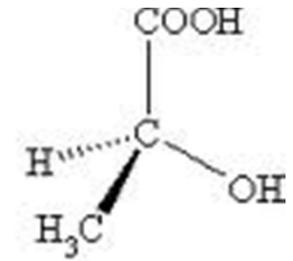
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

Drehwert, spezifische Drehvermögen (spez. Drehung)
(°·cm³/(g·dm)) bezogen auf 20°C und auf die D-Linie (589 nm) von Na

chirale Moleküle



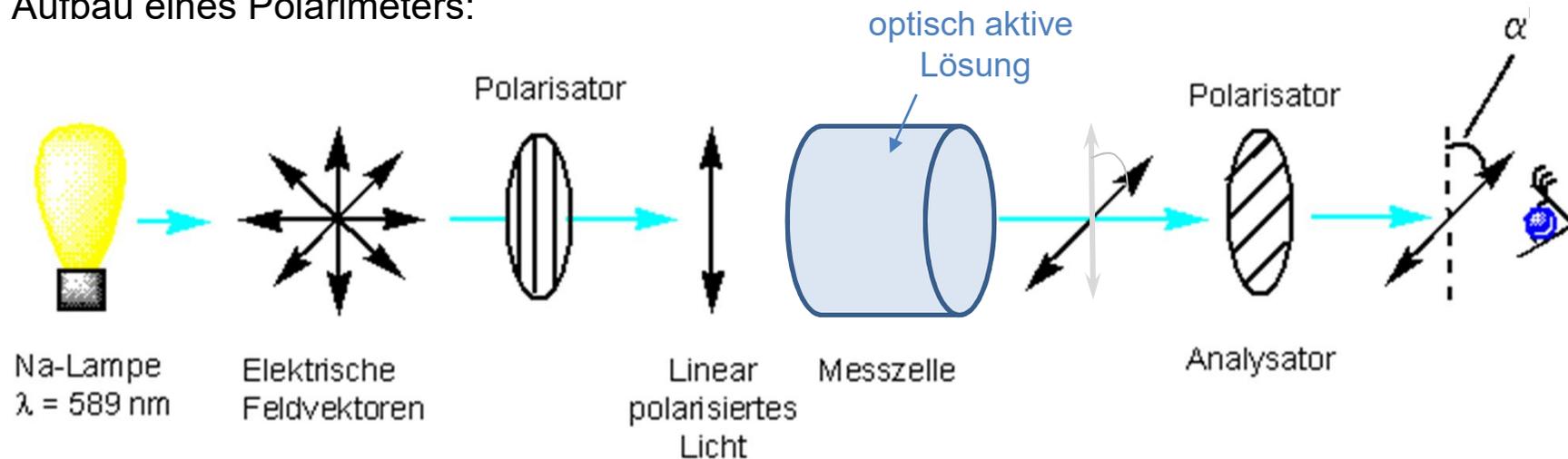
(-)-Milchsäure



(+)-Milchsäure

Anwendung: Polarimetrie - Konzentrationsbestimmung

Aufbau eines Polarimeters:



- **Doppelbrechung:**

Anisotropie

zB: Kristalle,
Polymere,
Muskelgewebe

Ausgewählte Richtung:
Optische Achse

Vereinfacht:

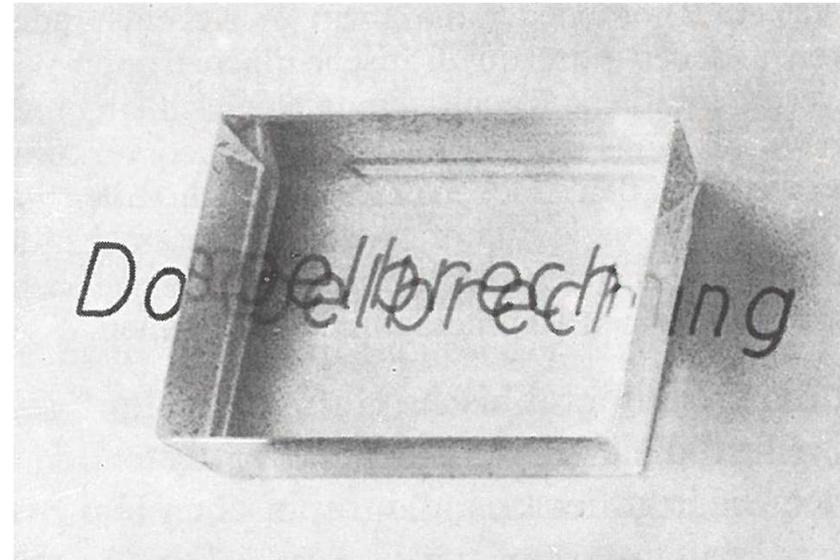
Ordentlicher Strahl:

⊥ auf optische Achse polarisiert

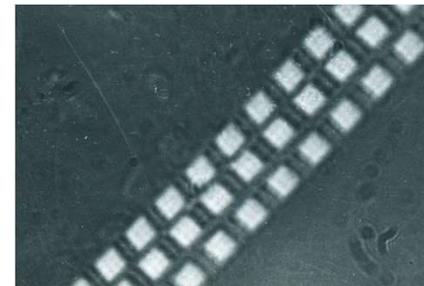
Außerordentlicher Strahl:

|| zur optische Achse polarisiert

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

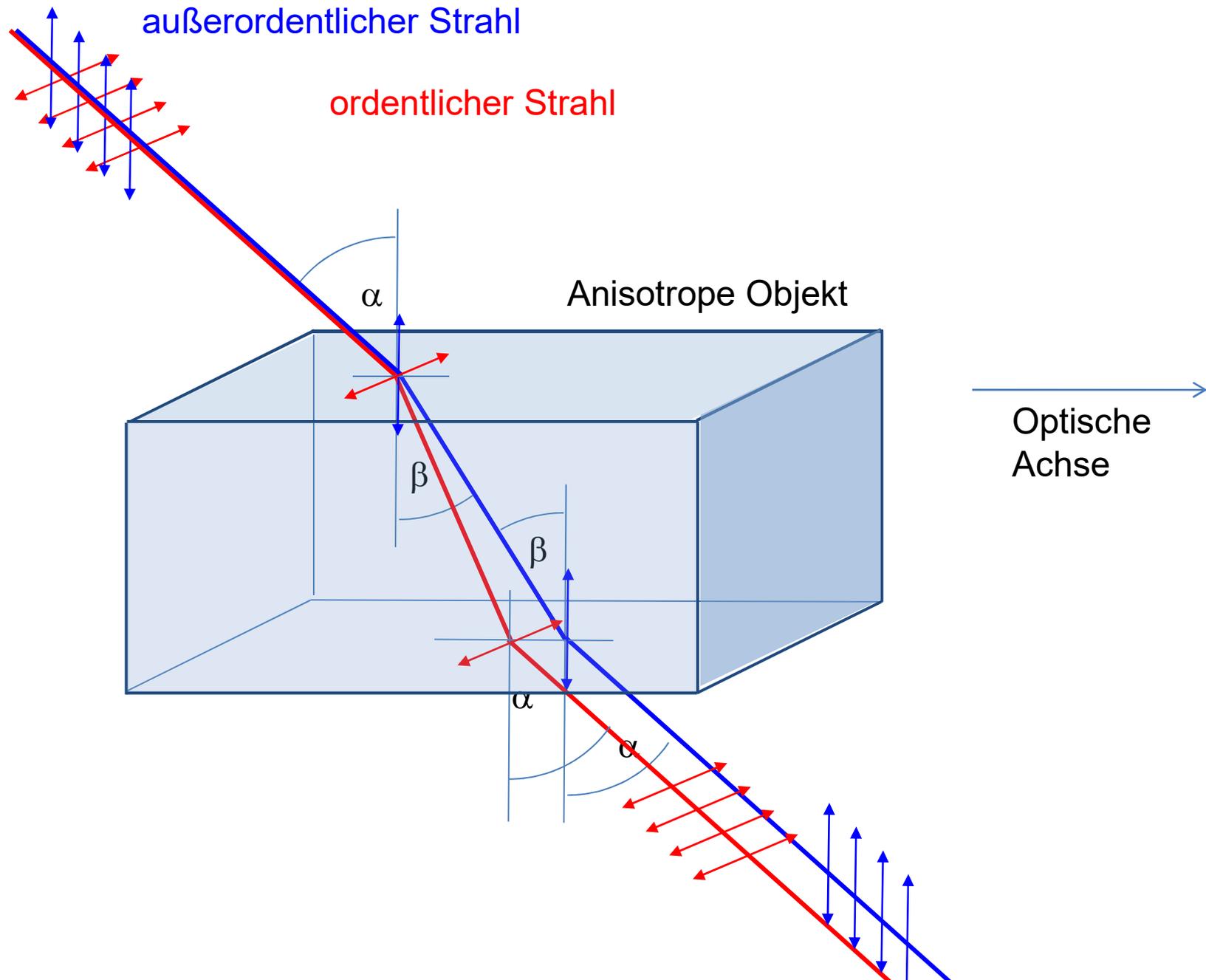


Doppelbrechung eines Kalkspatkristals

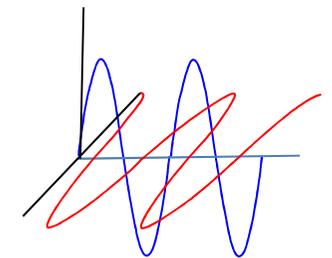
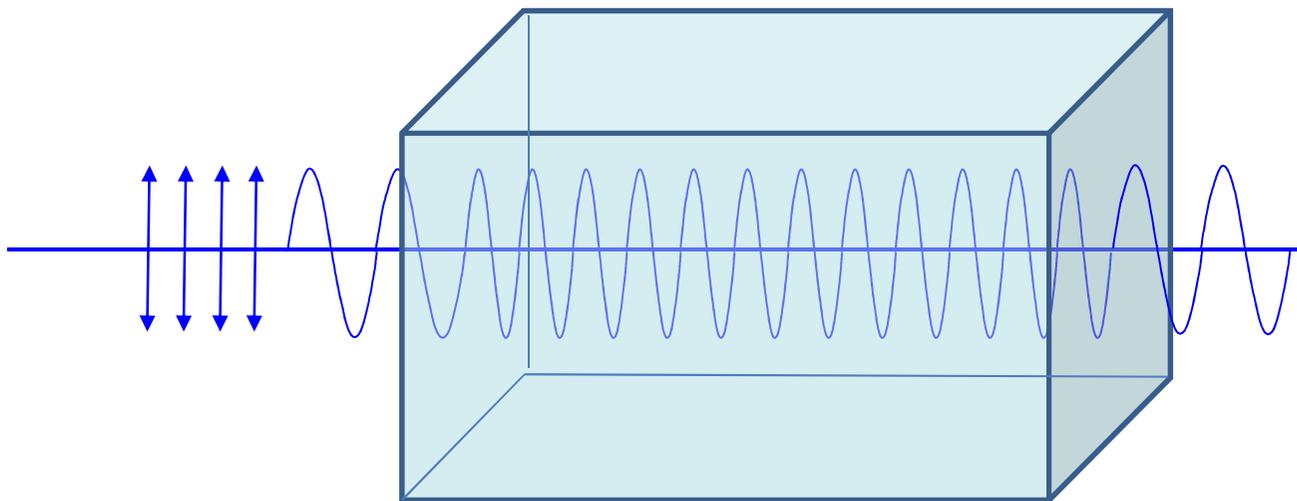
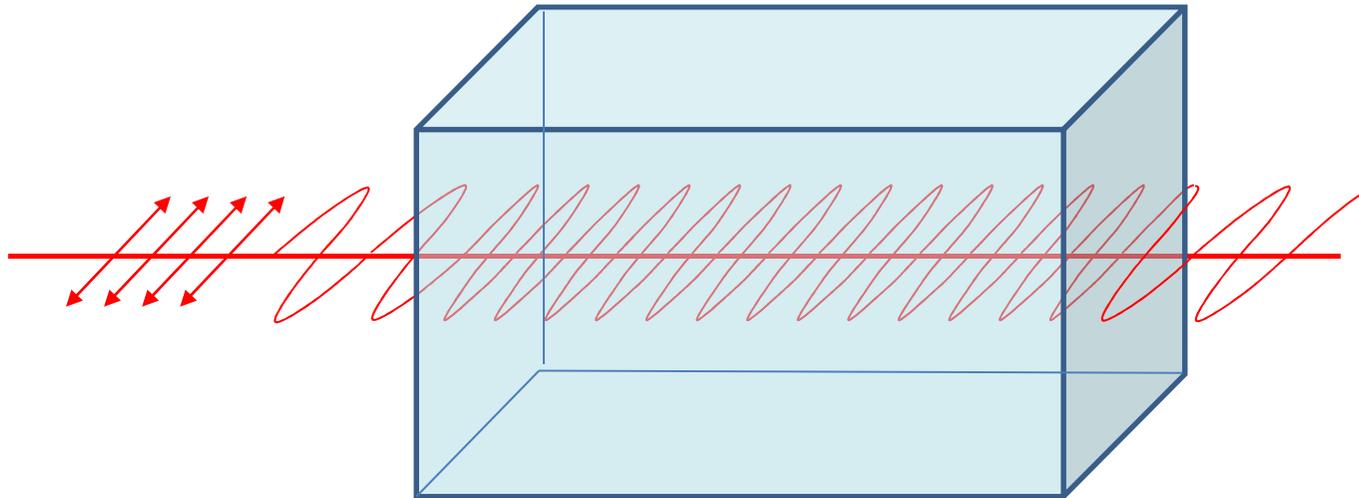


Doppelbrechung:
leicht ausgedehnter Muskel
des Flügels einer Biene
(in einem Polarisationsmikroskop)

- Doppelbrechung:

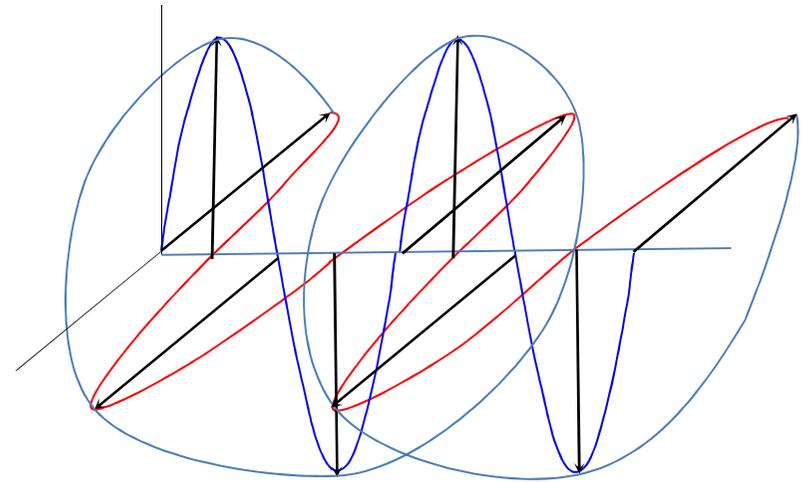
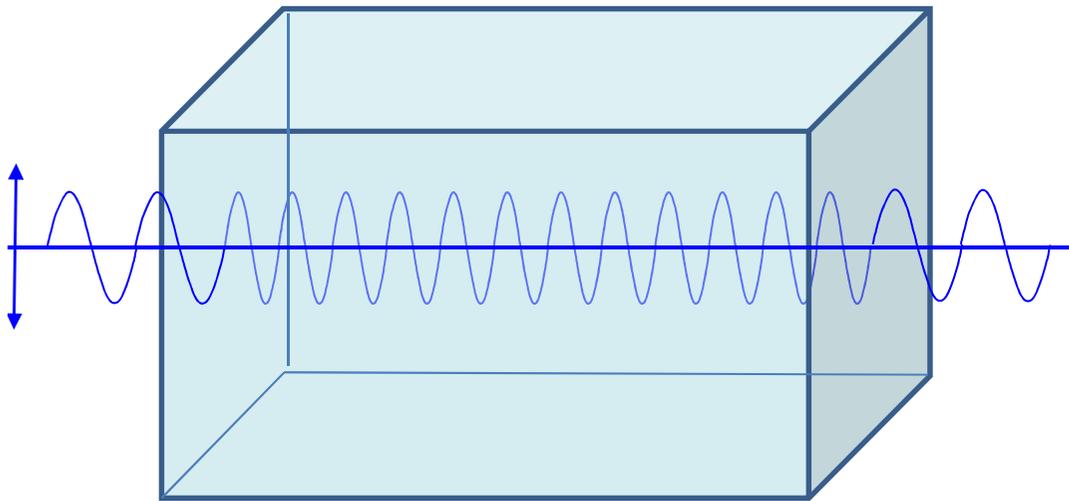
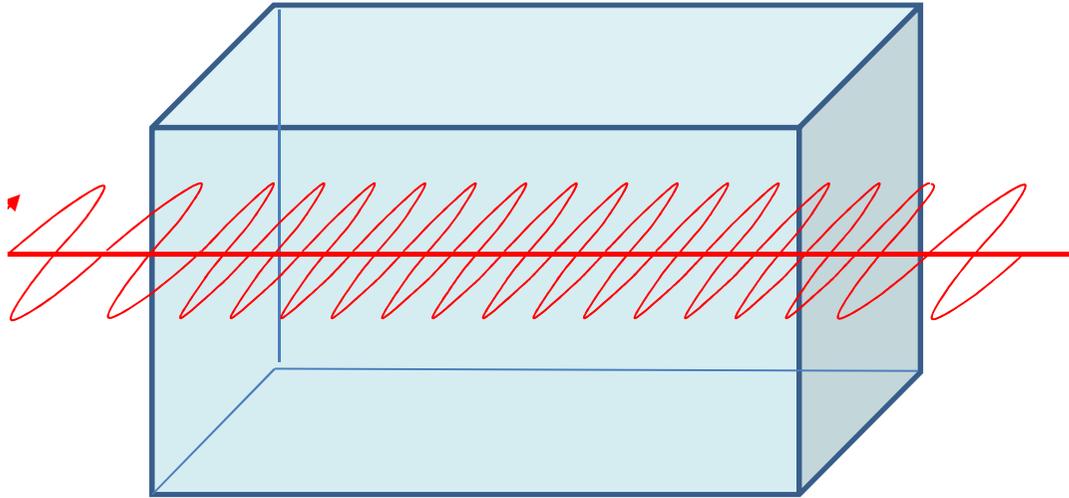


- Doppelbrechung:
Ein Spezialfall, wenn nur die Geschwindigkeiten sind unterschiedlich

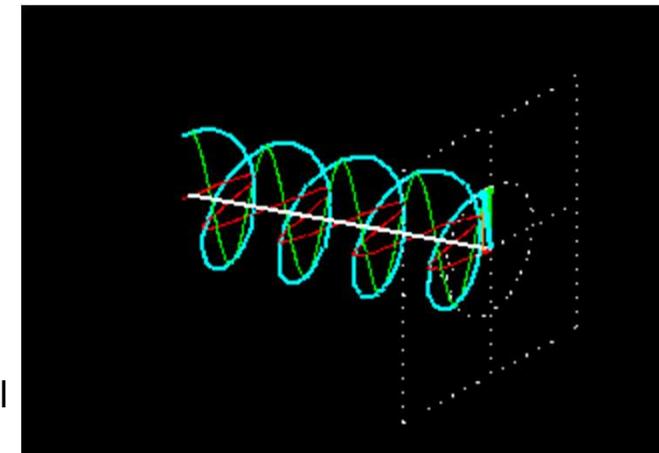


zirkular-
polarisiertes
Licht

- Doppelbrechung:
Ein Spezialfall, wenn nur die Geschwindigkeiten sind unterschiedlich

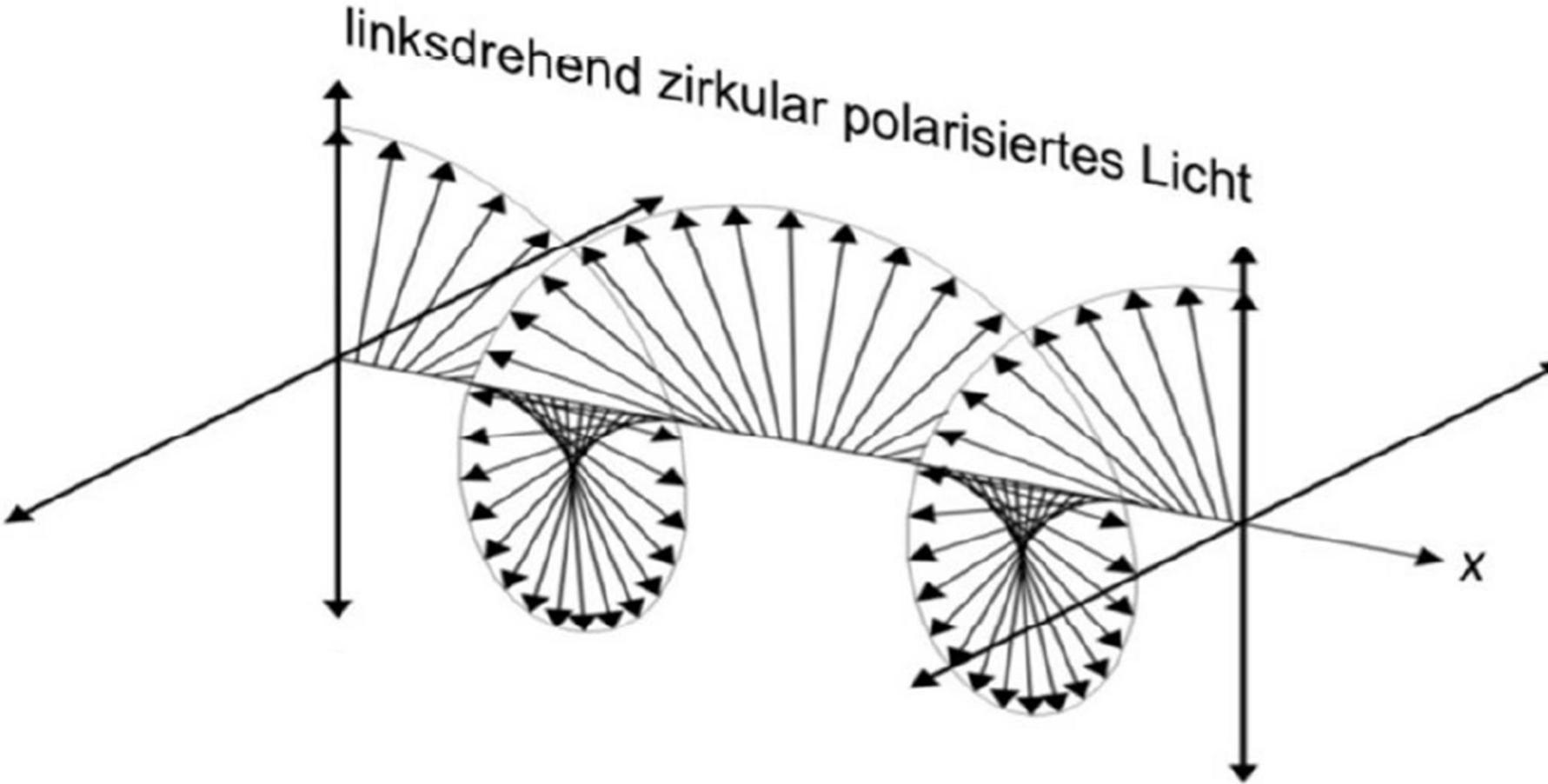


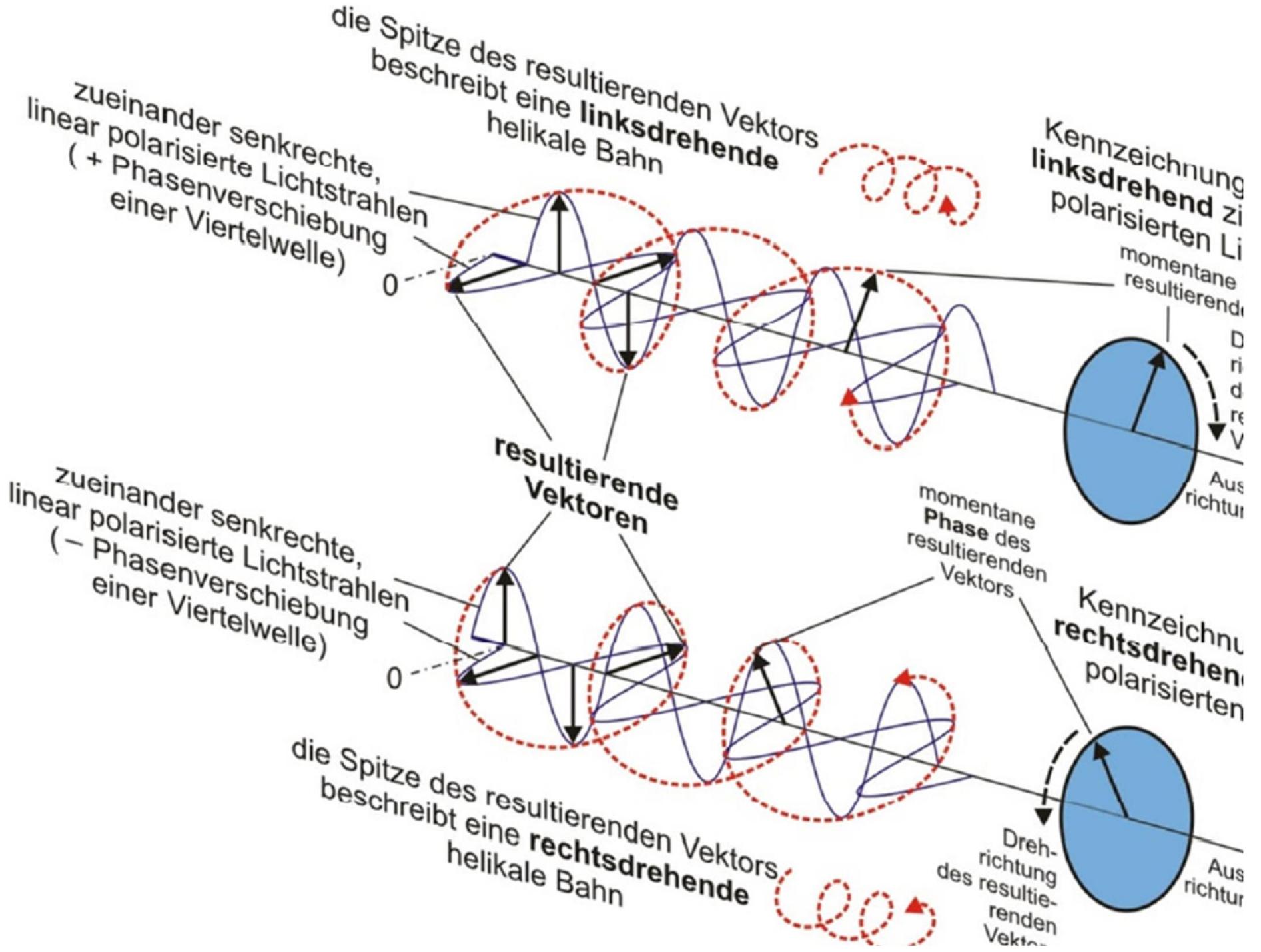
zirkular-
polarisiertes
Licht



s. weitere Animationen hier: https://cddemo.szialab.org/index_de.html

Zirkularpolarisiertes Licht





die Spitze des resultierenden Vektors beschreibt eine **linksdrehende** helikale Bahn

zueinander senkrechte, linear polarisierte Lichtstrahlen (+ Phasenverschiebung einer Viertelwelle)

0

resultierende Vektoren

die Spitze des resultierenden Vektors beschreibt eine **rechtsdrehende** helikale Bahn

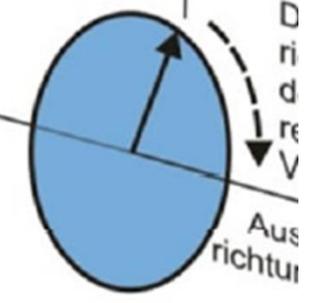
zueinander senkrechte, linear polarisierte Lichtstrahlen (- Phasenverschiebung einer Viertelwelle)

0

momentane Phase des resultierenden Vektors

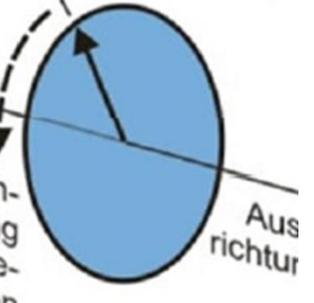
Kennzeichnung **linksdrehend** zirkular polarisierten Lichts

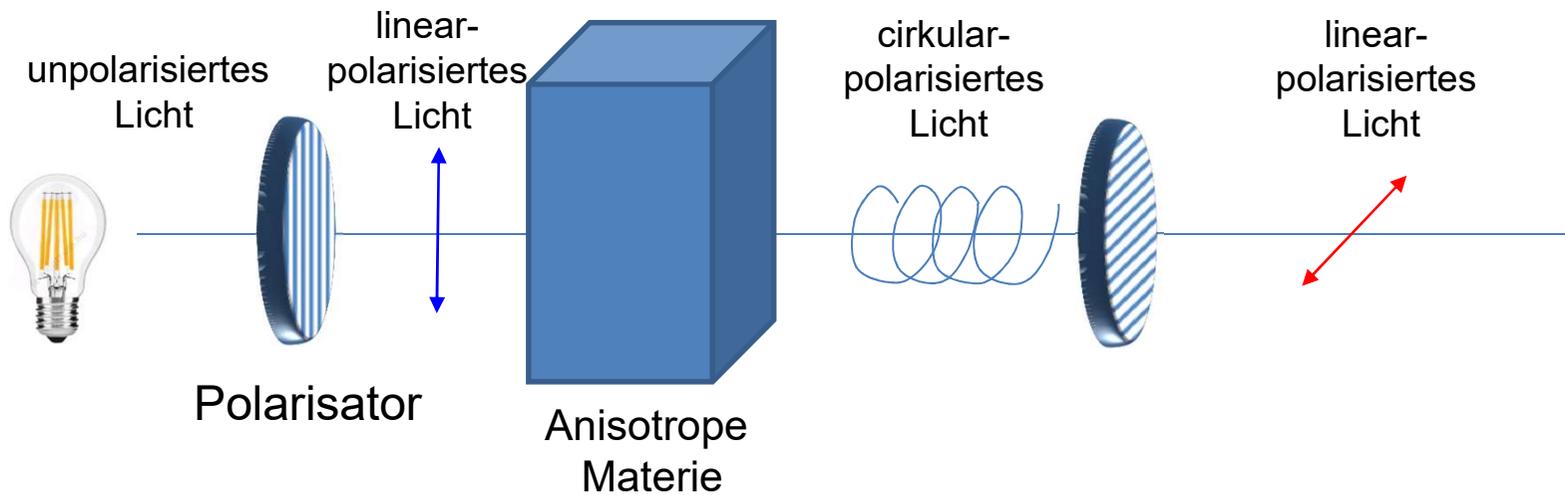
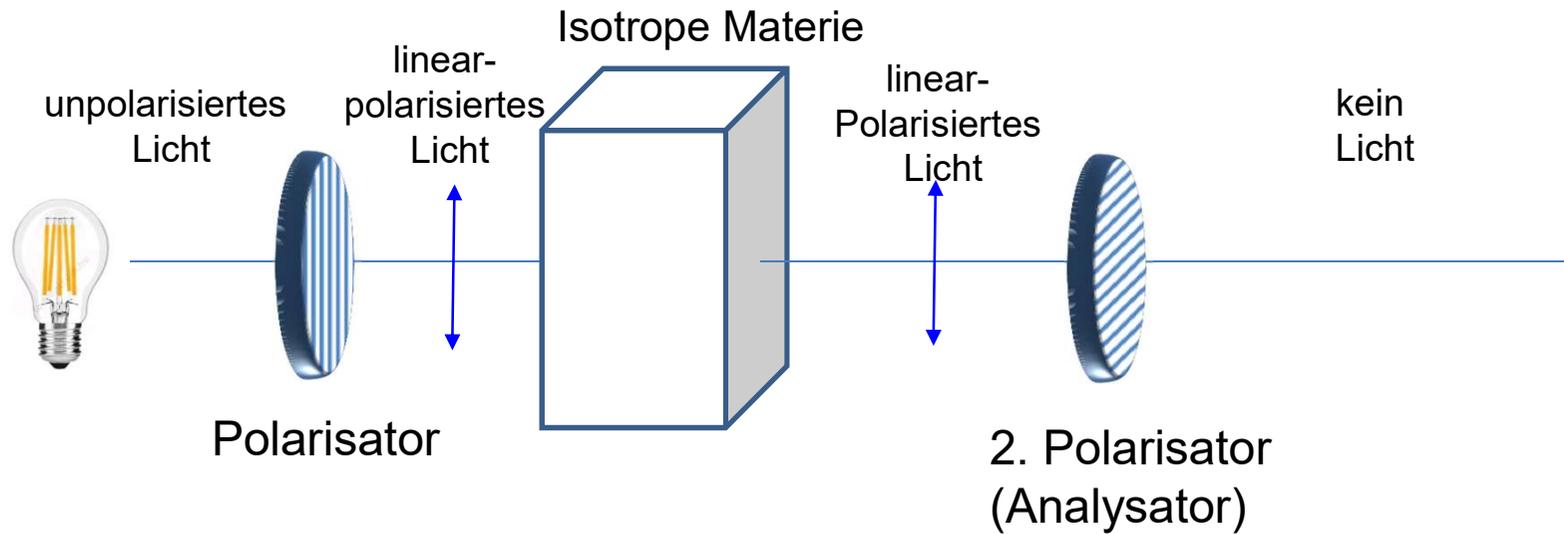
momentane resultierende Ausrichtung



Kennzeichnung **rechtsdrehend** zirkular polarisierten Lichts

Drehrichtung des resultierenden Vektors

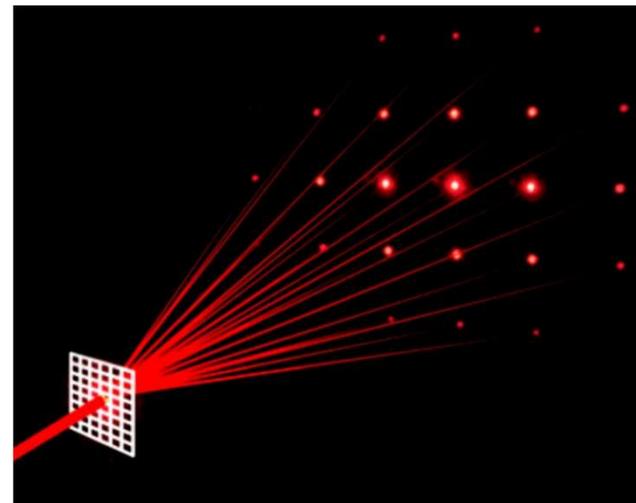




Durch gekreuzten Polarisatoren sieht man nur die anisotrope Objekte!
(s. Polarisationsmikroskop)

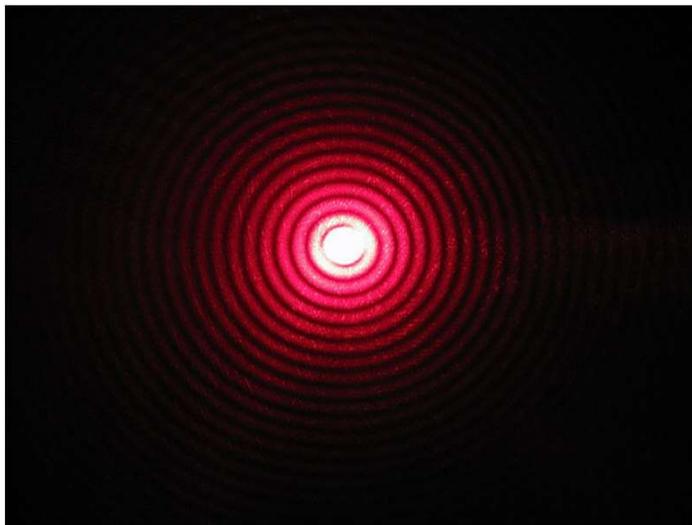
d) Beugung (Diffraktion) des Lichtes

Beweis für den
Wellencharakter
des Lichts

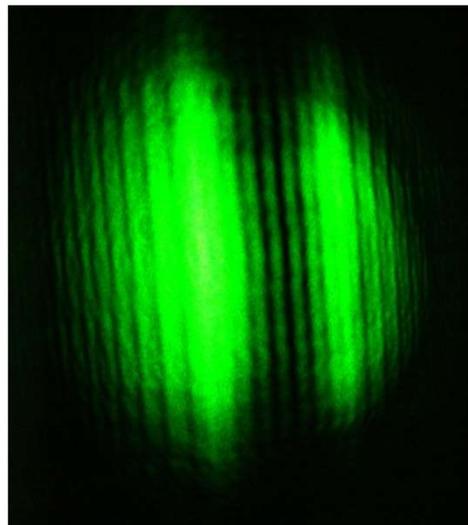


Beugung eines Laserstrahls an einem
zweidimensionalen optischen Gitter

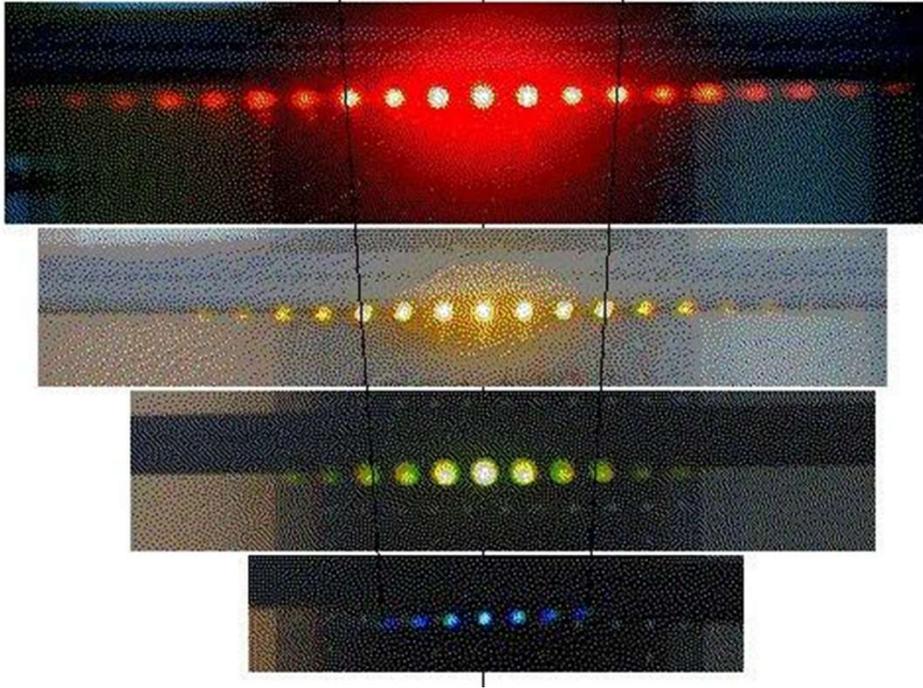
Beugung eines Laserstrahls
an einem Loch



Beugung eines Laserstrahls
an einem Haar



Beugung von Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge an einem optischen Gitter



Beugung ist Wellenlängeabhängig!

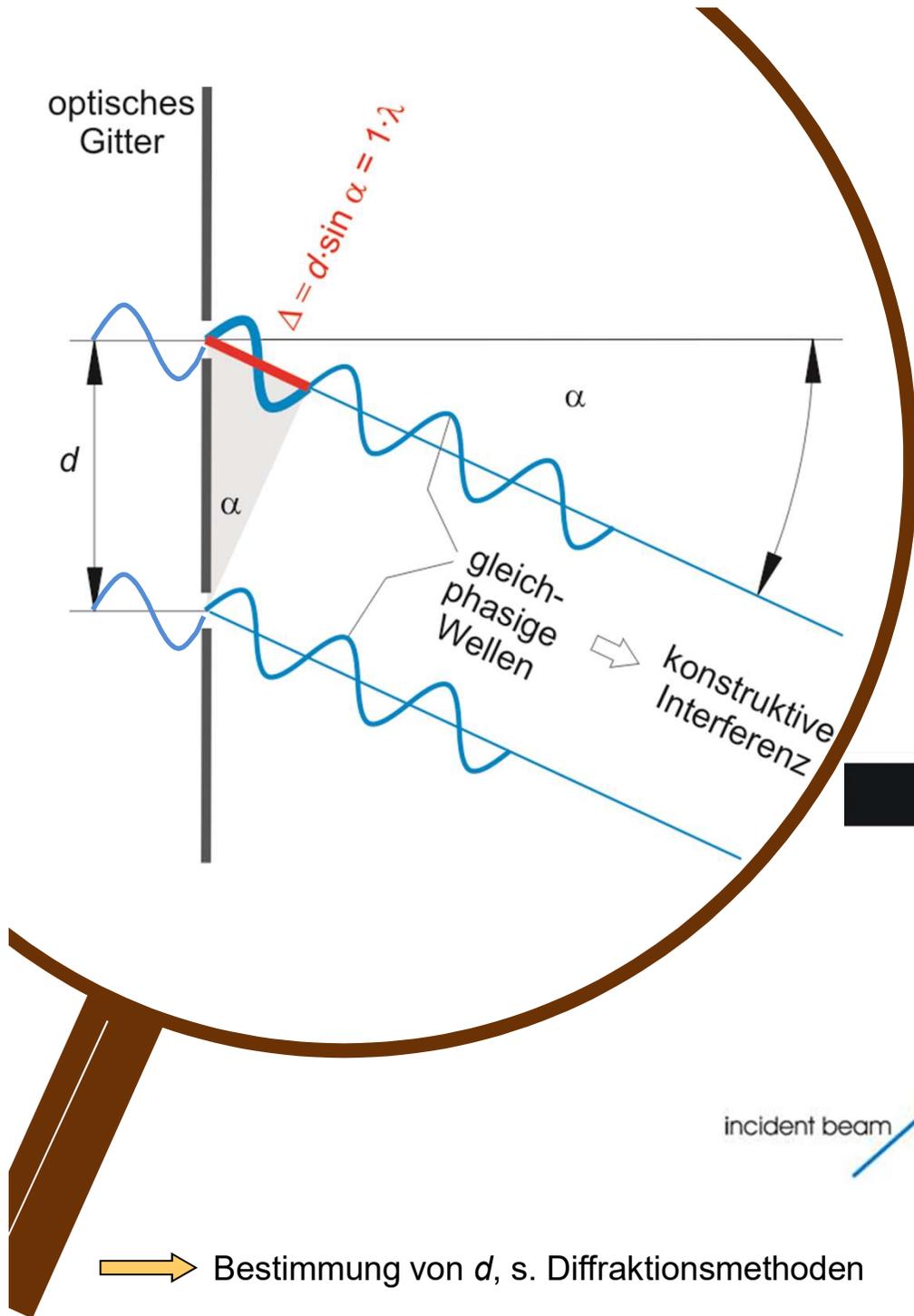
Beugung von weißem Licht an einem optischen Gitter



Hauptmaximum

Nebenmaximum
1-ter Ordnung

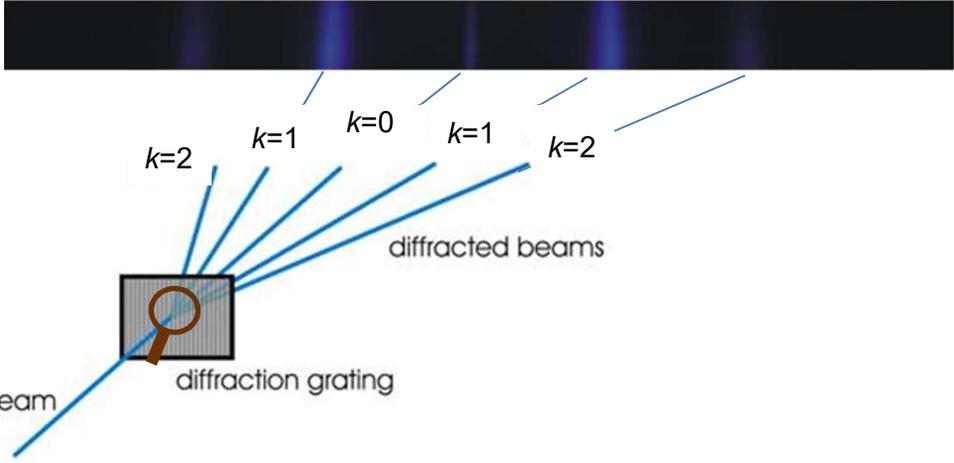
Nebenmaximum
2-ter Ordnung



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

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

Bestimmung von λ

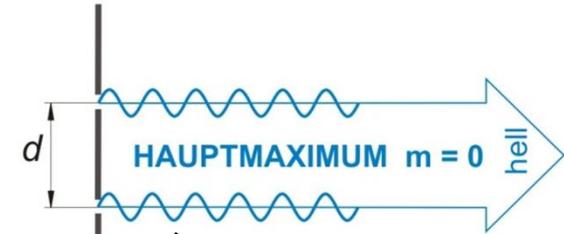


▪ Beugung an einem optischen Gitter

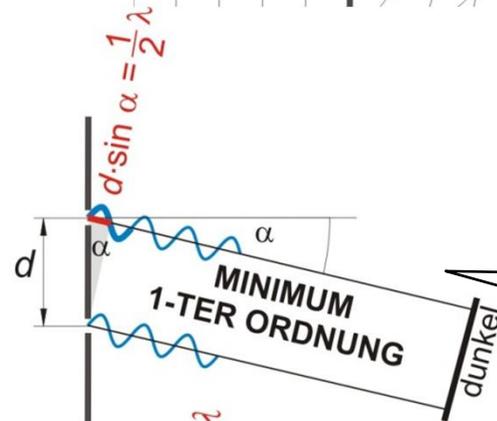
(s. Abbildung am Titelblatt des Themas Spezialmikroskope im Praktikumsbuch!)

OPTISCHES GITTER

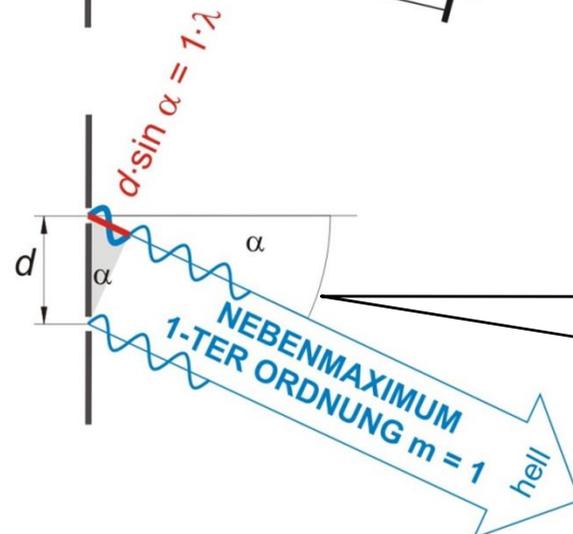
Gitterkonstante = d



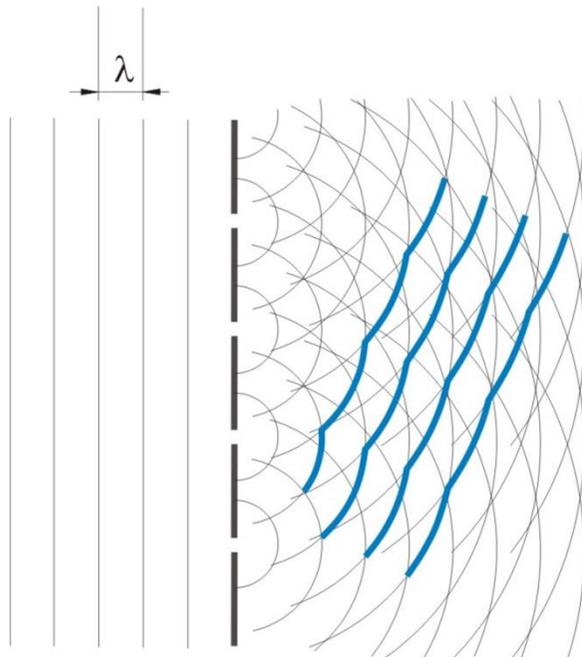
Elementarwellen in gleicher Phase \Rightarrow positive Interferenz



Elementarwellen in entgegengesetzter Phase \Rightarrow negative Interferenz

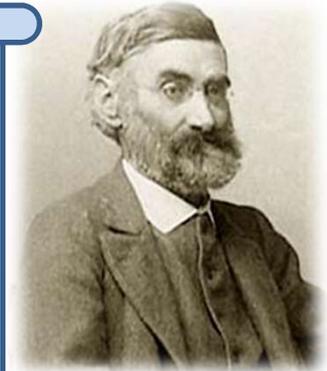


Elementarwellen in gleicher Phase \Rightarrow positive Interferenz



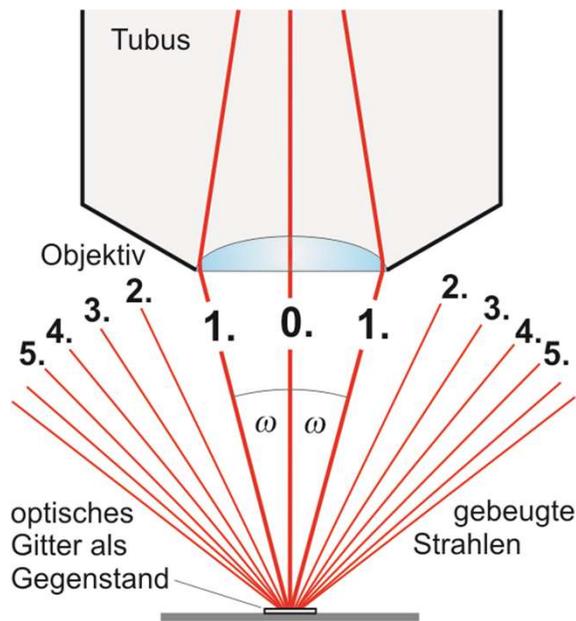
e) Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes – endliche Auflösung der optischen Instrumenten und des Auges

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 (δ):



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

Wellenlänge des verwendeten Lichts

Brechzahl des Materials zwischen dem Präparat und der Objektivlinse

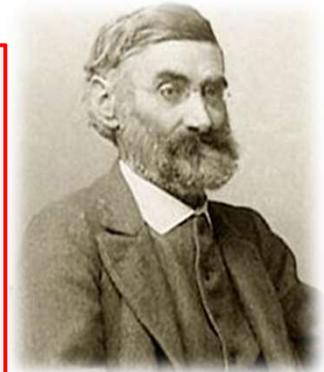
Halböffnungswinkel der Objektivlinse

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

- **Auflösung des Auges**

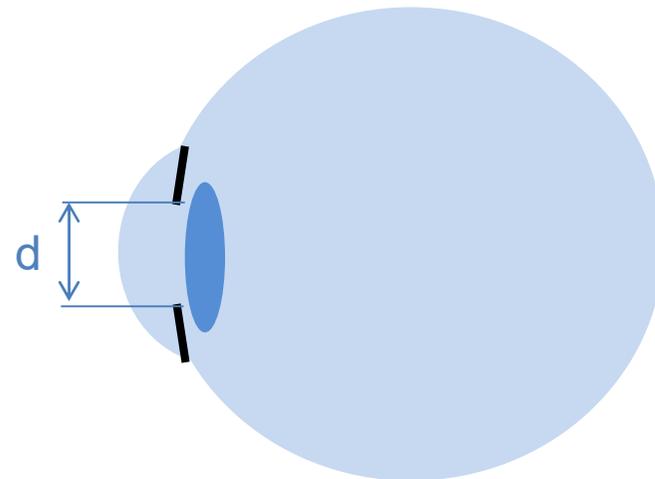
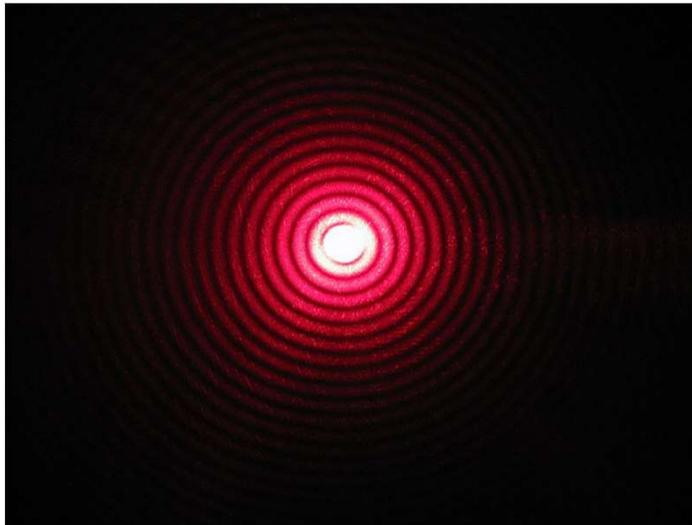
Airy-Scheibe

„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.“

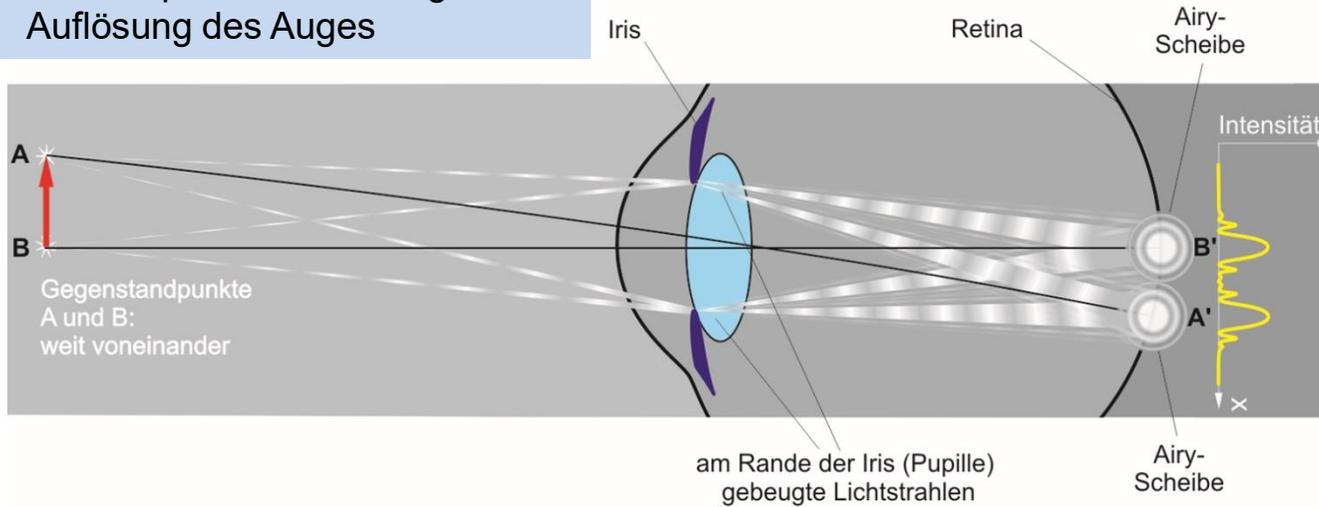


Ernst Karl Abbe
(1840-1905)
Mitbegründer der Zeiss-Werke

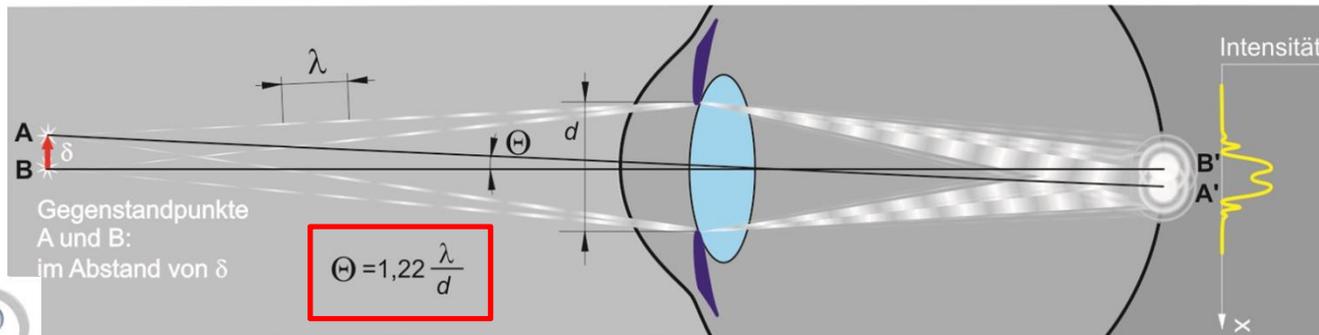
Beugung eines Laserstrahls an einem Loch



➤ Wellenoptische Erklärung der Auflösung des Auges



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

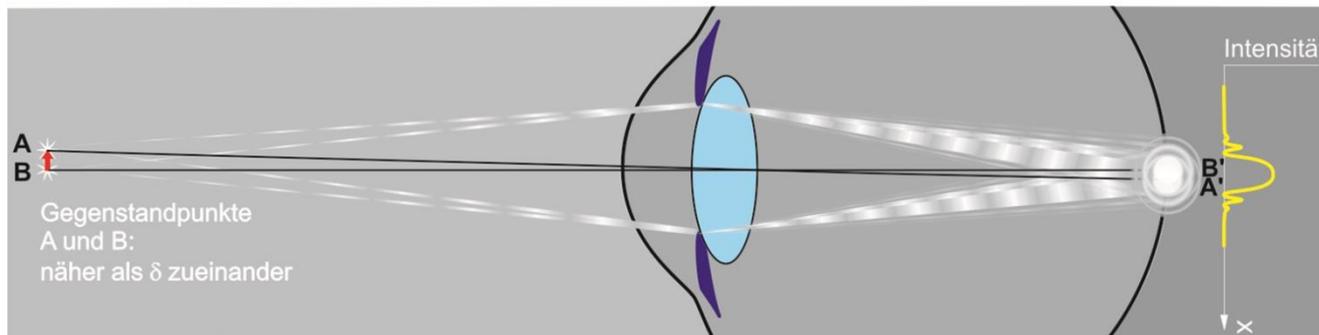


Seien A und B im kritischen Abstand voneinander, überlappen die Airy-Scheiben einander, aber sie sind zu unterscheiden.

- δ minimale aufgelöste Entfernung,
- Θ Sehwinkelgrenze infolge Lichtbeugung.



Sehwinkelgrenze infolge Lichtbeugung (Θ):



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

Das Bild von zwei Gegenstandspunkten ist nicht aufzulösen.

Hausaufgaben: Aufgabensammlung
2.31, 32, 38-39



Polarsations-
mikroskopische
Aufnahmen

