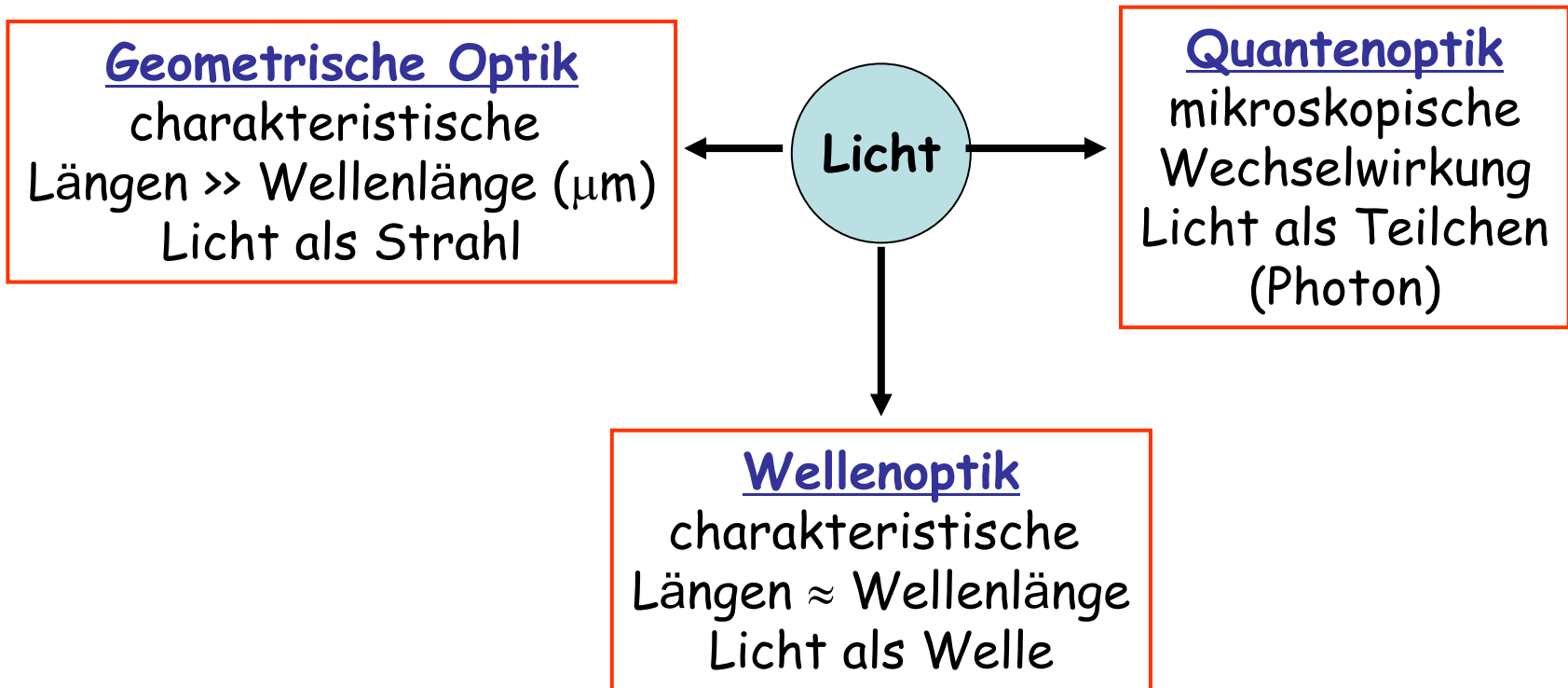


V. Optik

V.2 Wellenoptik

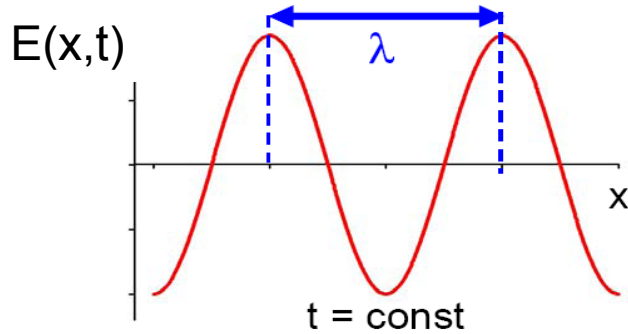
Beschreibungen des Lichts



- Die mit Wellen- und Teilchencharakter des Lichts verbundenen Phänomene gehen fließend ineinander über.
- Die Modellbeschreibungen sind immer nur Näherungen, die auf die jeweilige Problemstellung zugeschnitten sind

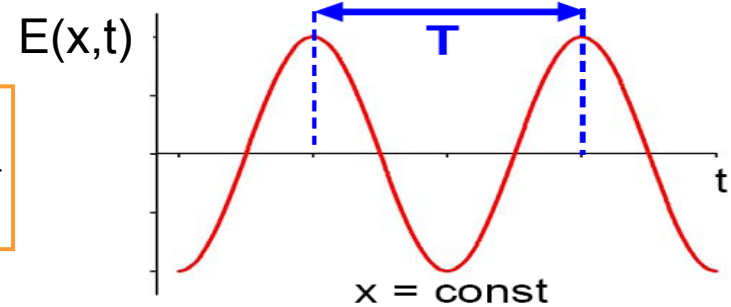
Monochromatisches Licht als elektromagnetische Welle

Welle: periodischer Vorgang in Ort und Zeit



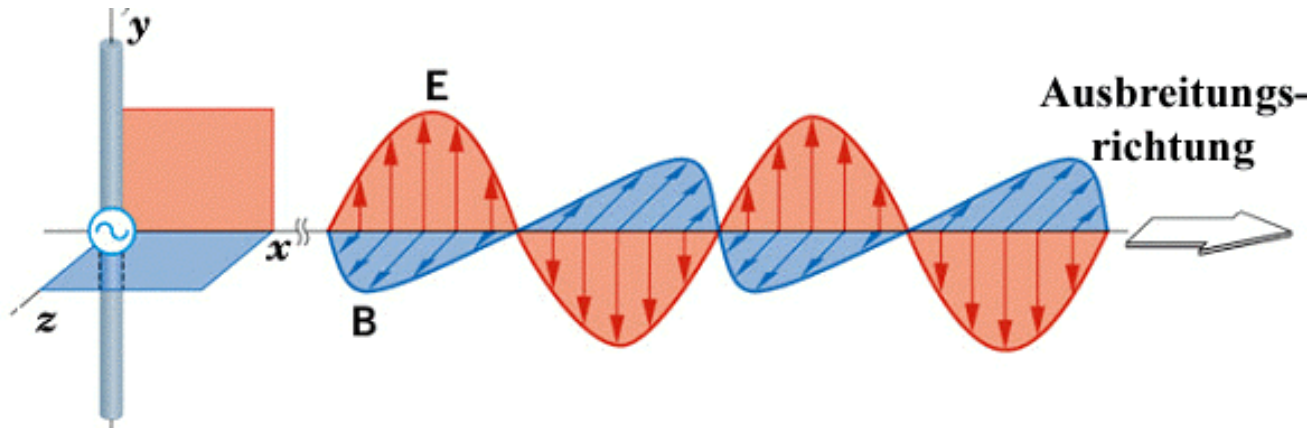
periodische Abhängigkeit vom Ort

$$c = \frac{\lambda}{T}$$



periodische Abhängigkeit von der Zeit

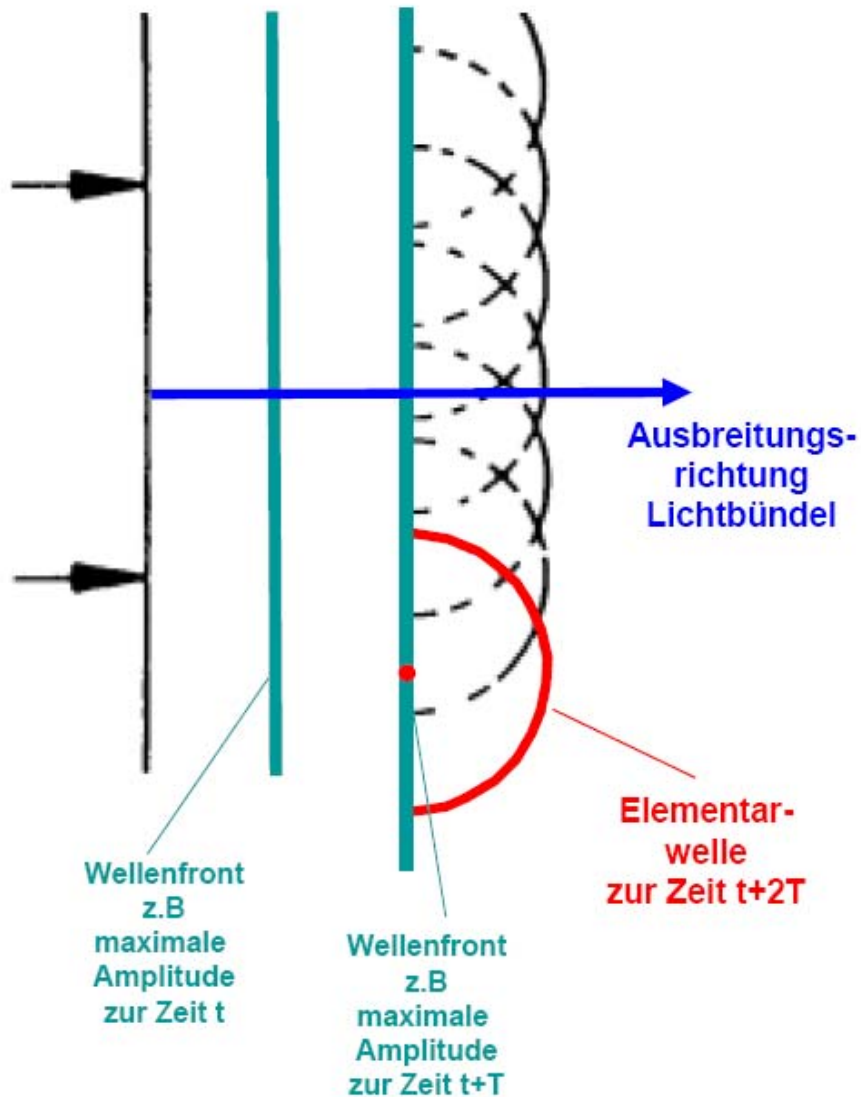
- **Wellenlänge λ** und **Periodendauer T** (Frequenz $f=1/T$)
- **Ausbreitungsrichtung:** Lichtstrahl oder Lichtbündel



- **Polarisationsrichtung:** definiert durch Schwingungsebene des elektrischen Feldvektors

Wellenphänomene beim Licht

- **Wellenfront:** Linien gleicher Amplitude und Phase (Kreise bei Punktquelle)

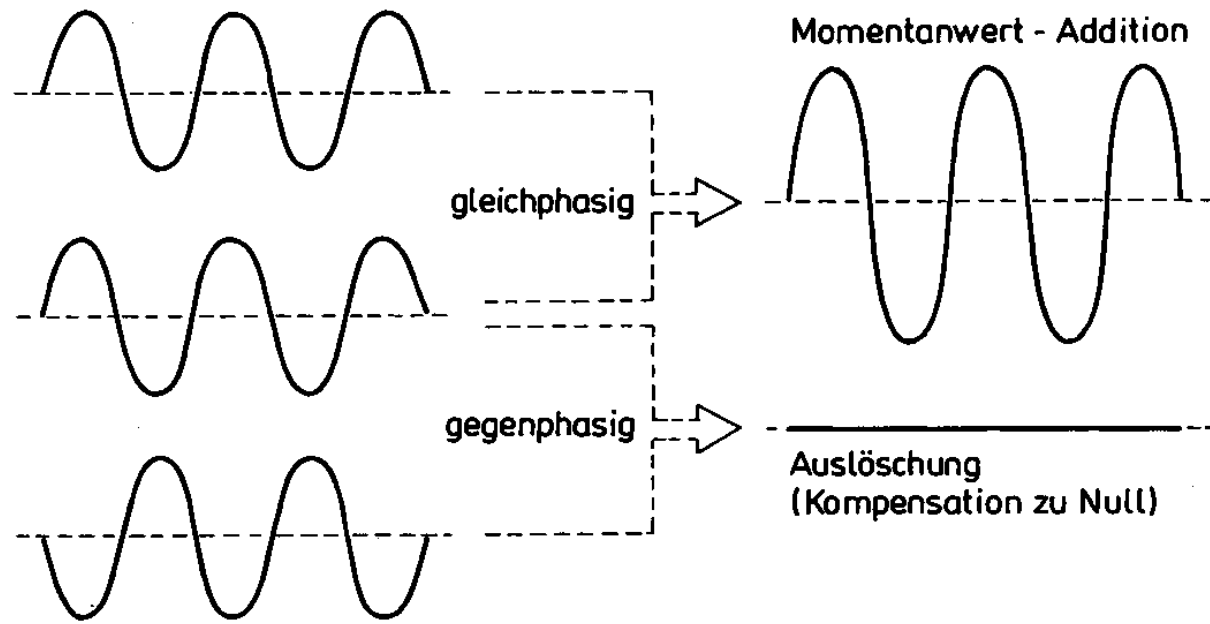


- **Huygens'sches Prinzip:** von jedem Punkt einer Wellenfront gehen neue, kugelförmige Elementarwellen aus. Die Einhüllende dieser Elementarwellen ergibt die Wellenfront zu einem späteren Zeitpunkt:
⇒ **Superposition**

- resultierende Phänomene:
 - **Interferenz**
 - **Beugung** an Strukturen $d \approx \lambda$

Interferenz

- **Interferenz:** zwei Lichtstrahlen können sich – je nach Phasenlage – verstärken oder auslöschen



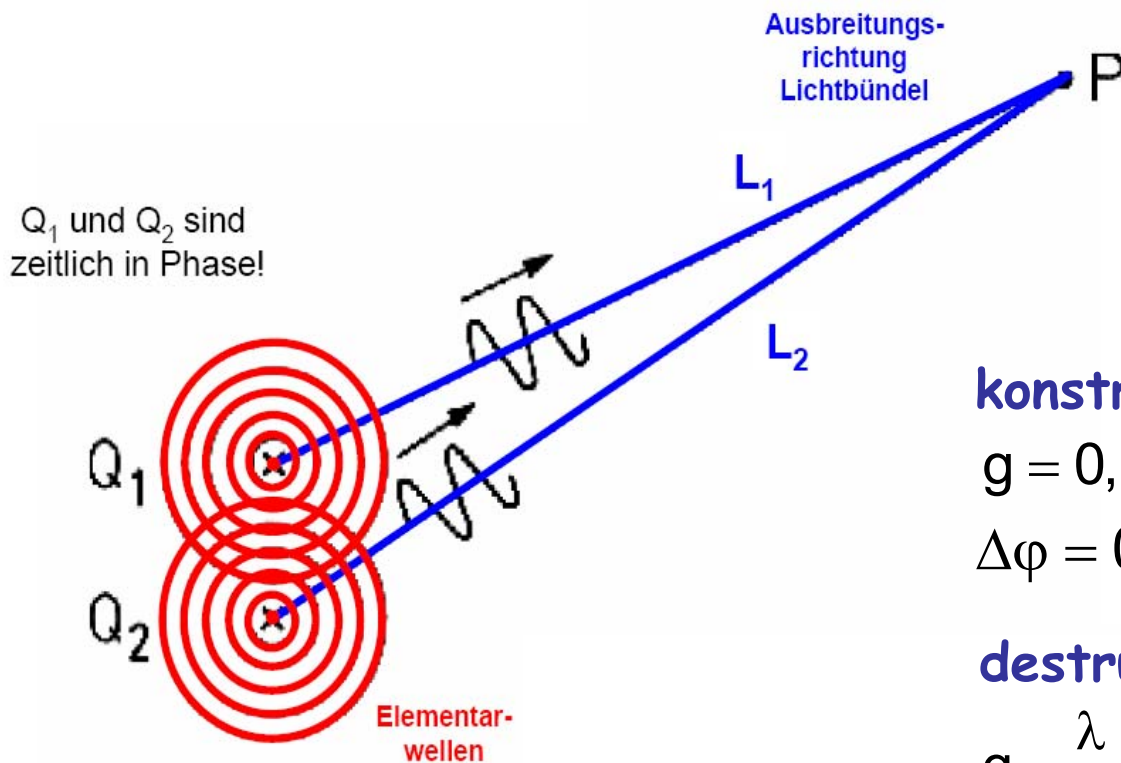
- notwendige Voraussetzung:

Kohärenz: die sich überlagernden Wellenzüge müssen die gleiche Wellenlänge (Frequenz) und eine **feste Phasenbeziehung** zueinander haben zumindest über eine bestimmte Länge, die **Kohärenzlänge** (ca 3 m)

- Das Licht verschiedener Lichtquellen ist nicht kohärent (z.B. Sonne, Glühlampe), da es durch Emission von vielen, voneinander unabhängigen Atomen entsteht.

Superposition und Interferenz

- die Lichtamplitude in P ist die Summe der Amplituden der Teilwellen



Gangunterschied:

$$g = L_1 - L_2$$

Phasendifferenz:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{g}{\lambda}$$

konstruktive Interferenz für

$$g = 0, \lambda, 2\lambda, \dots \quad g = n \cdot \lambda$$

$$\Delta\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots \quad \Delta\varphi = 2n \cdot \pi$$

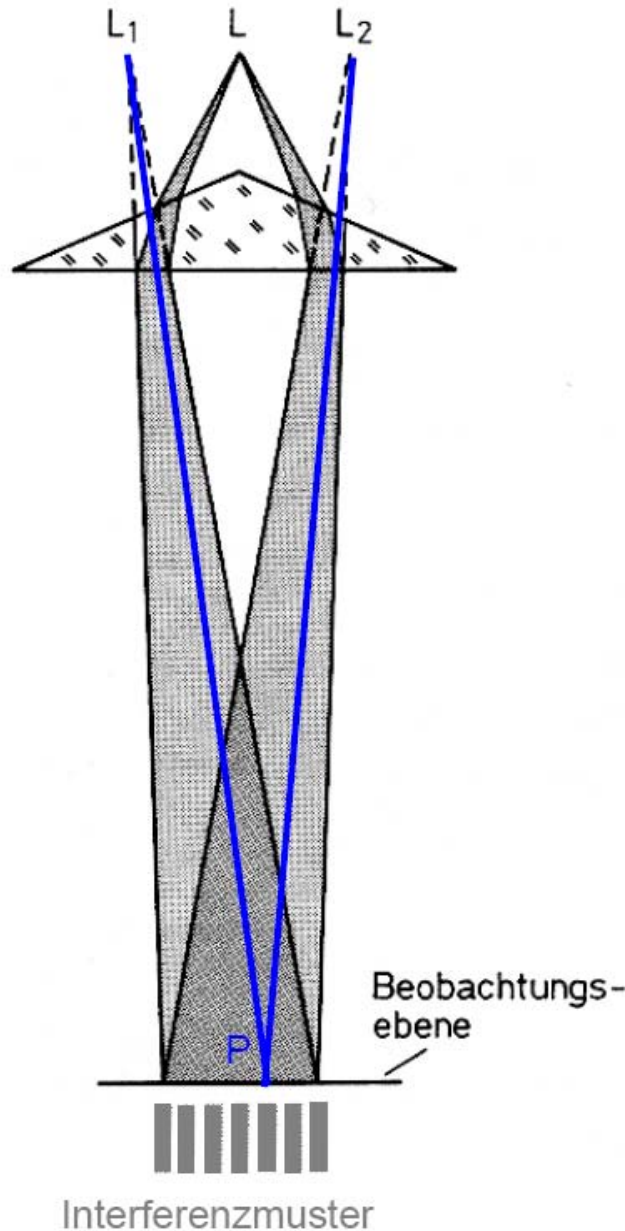
destruktive Interferenz für

$$g = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots \quad g = \frac{2n+1}{2} \cdot \lambda$$

$$\Delta\varphi = \pi, 3\pi, \dots \quad \Delta\varphi = (2n+1) \cdot \pi$$

	Phasendifferenz	Gangunterschied	Gesamtamplitude
konstruktiv	0	0	2E ₀
destruktiv	π	λ/2	0
konstruktiv	2π	λ	2E ₀

Fresnel'sches Biprisma



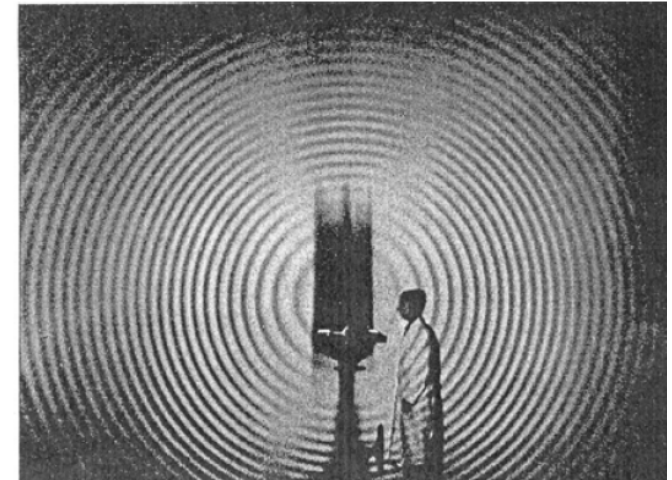
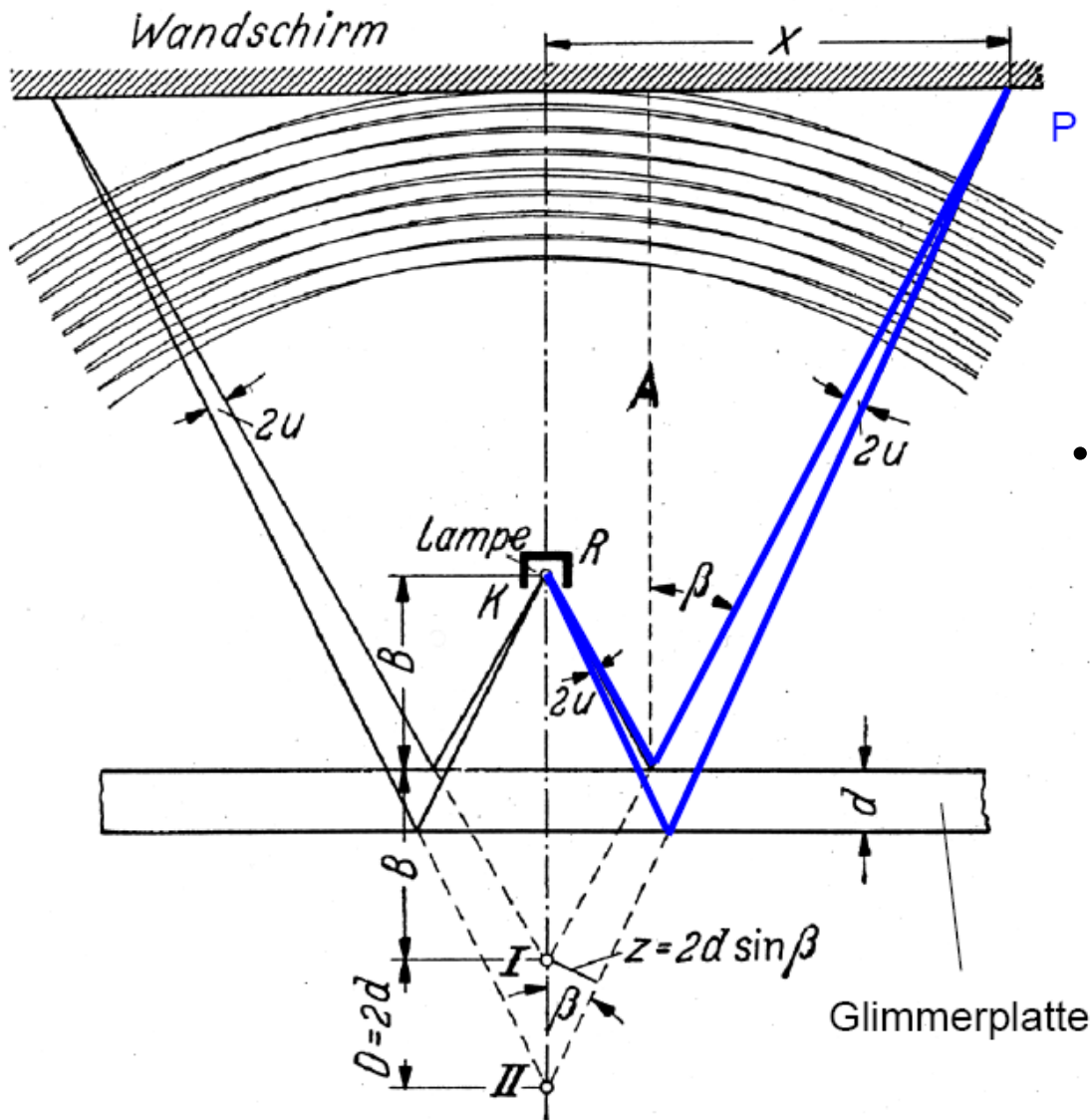
- **Erzeugung kohärenter Strahlenbündel:**
Aufspaltung einer Welle in zwei Teilwellen mit anschließender Überlagerung
- die Teilwellen, die durch das Biprisma erzeugt werden, wirken wie zwei virtuelle Lichtquellen L_1 und L_2 mit **fester Phasenbeziehung (Kohärenz)**
- beispielsweise ist im Punkt P der Gangunterschied $d = \lambda$, $\Rightarrow$ konstruktive Interferenz der Teilbündel in diesem Punkt



Interferenz am
Biprisma

Haidinger Ringe

Lichtquelle vor Glimmerplatte



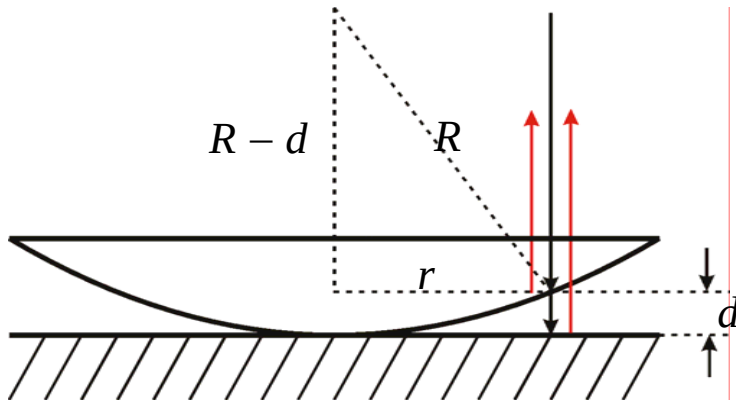
- Interferenz im Punkt P der Lichtstrahlen, die an der Vorderseite der Glimmerplatte reflektiert werden, mit denen, die an der Rückseite reflektiert werden.
- ähnliche Beispiele: Ölfilm, Seifenblase, Glaskeil



Interferenz am
Glimmerplättchen

Newtonsche Ringe

- schwach gekrümmte Linse auf planer Spiegelplatte



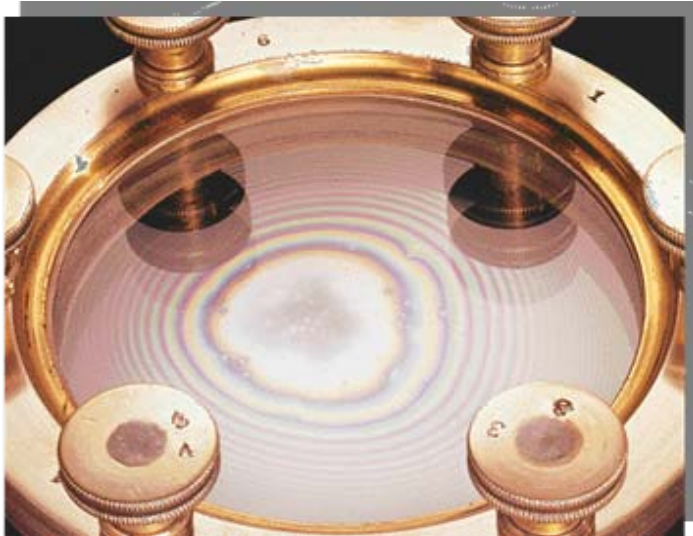
- Interferenz von Strahlen, die an Linsenoberfläche bzw. Spiegelplatte reflektiert werden
- an Spiegelplatte reflektiertes Licht legt einen um $2d$ längeren Weg zurück; zusätzlich Phasensprung um $\lambda/2$ bei Reflexion am optisch dichteren Medium
 $\Rightarrow$ optischer Gangunterschied: $g = 2d - \frac{\lambda}{2}$

Verstärkung für: $g = m \cdot \lambda = 2d - \frac{\lambda}{2}$

$$d = \frac{\lambda}{2} \cdot \left(m + \frac{1}{2} \right) \text{ für } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

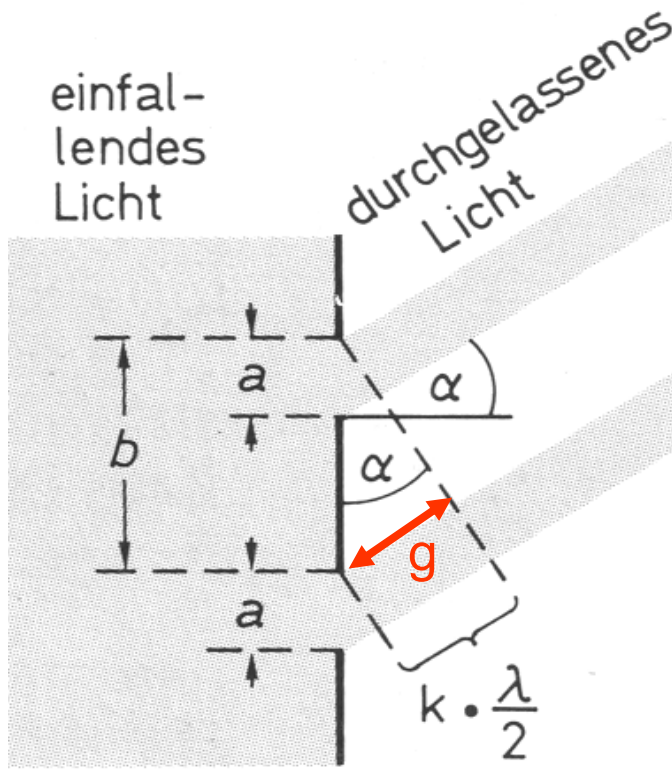
$$r = \sqrt{R \cdot \lambda \cdot \left(m + \frac{1}{2} \right)} \sim \sqrt{\lambda} \Rightarrow r_{\text{rot}} > r_{\text{grün}}$$

denn $\lambda_{\text{rot}} \approx 700\text{nm} > \lambda_{\text{grün}} \approx 500\text{nm}$



Newtonsche
Ringe

Interferenz am Gitter



- Interferenz der von benachbarten Gitterspalten ausgehenden Wellen nur in bestimmten Richtungen konstruktiv, sonst destruktiv:

Gangunterschied: $g = b \cdot \sin \alpha$

Interferenzbedingung: $b \cdot \sin \alpha = k \cdot \frac{\lambda}{2}$

Maxima für $k = 0, 2, 4, 6 \dots$ (geradzahlig)

d.h. $\sin \alpha = n \cdot \frac{\lambda}{b}$ mit $n = 1, 2, 3, \dots$

Minima für $k = 1, 3, 5, 7 \dots$ (ungeradzahlig)

d.h. $\sin \alpha = \frac{2n+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{b}$

- Winkel der Interferenzmaxima proportional der Wellenlänge:

$\alpha_{\text{rot}} > \alpha_{\text{grün}} \Rightarrow$ Zerlegung von weißem Licht in Spektralfarben

Gegensatz zum Prisma (Brechung): kürzere Wellenlängen stärker abgelenkt

Gitterspektrometer: Bestimmung der Wellenlänge λ durch Messung der Position des 1. Maximums

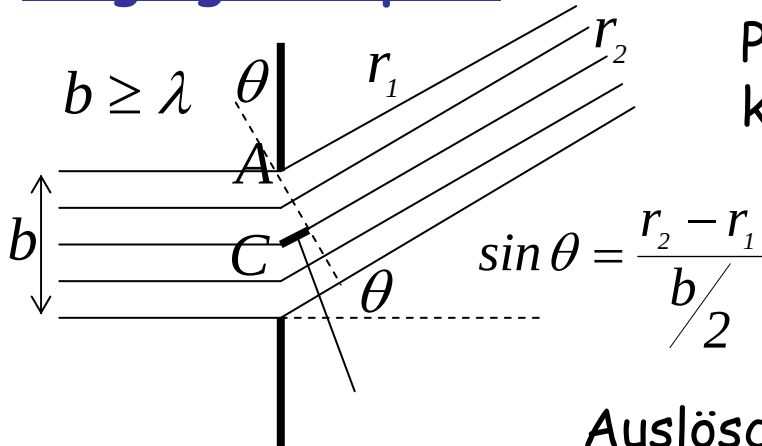


Interferenz am Gitter

Beugung

- **Beugung:** Abweichung von der geradlinigen Lichtausbreitung gemäß geometrischer Optik

- **Beugung am Spalt:**



Alle Punkte im Spalt sind nach Huygenschem Prinzip Ausgangspunkte von Elementarwellen; kontinuierliche Verteilung von Punktquellen

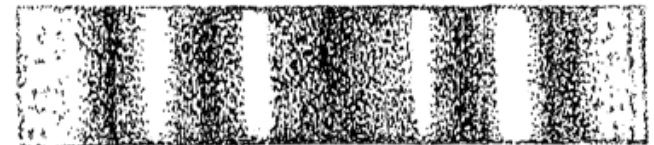
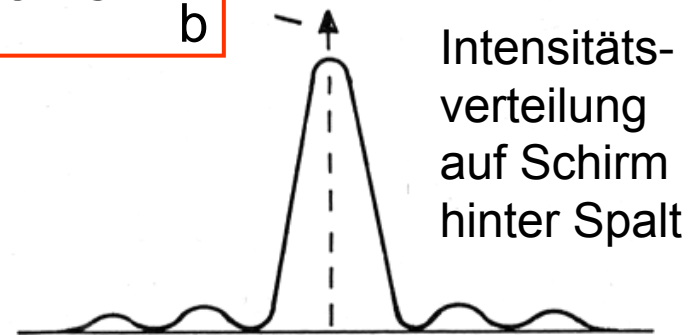
Gangunterschied von Strahlen vom Rand (A) und Mitte (C): $g = r_2 - r_1 = \frac{b}{2} \sin \Theta$

Auslöschung (1. Minimum) für $g = r_2 - r_1 = \frac{b}{2} \sin \Theta = \frac{\lambda}{2}$

zu jedem Strahl in der oberen Hälfte gibt es einen Strahl in der unteren Hälfte mit Gangunterschied $\lambda/2$; $\Rightarrow$ Auslöschung

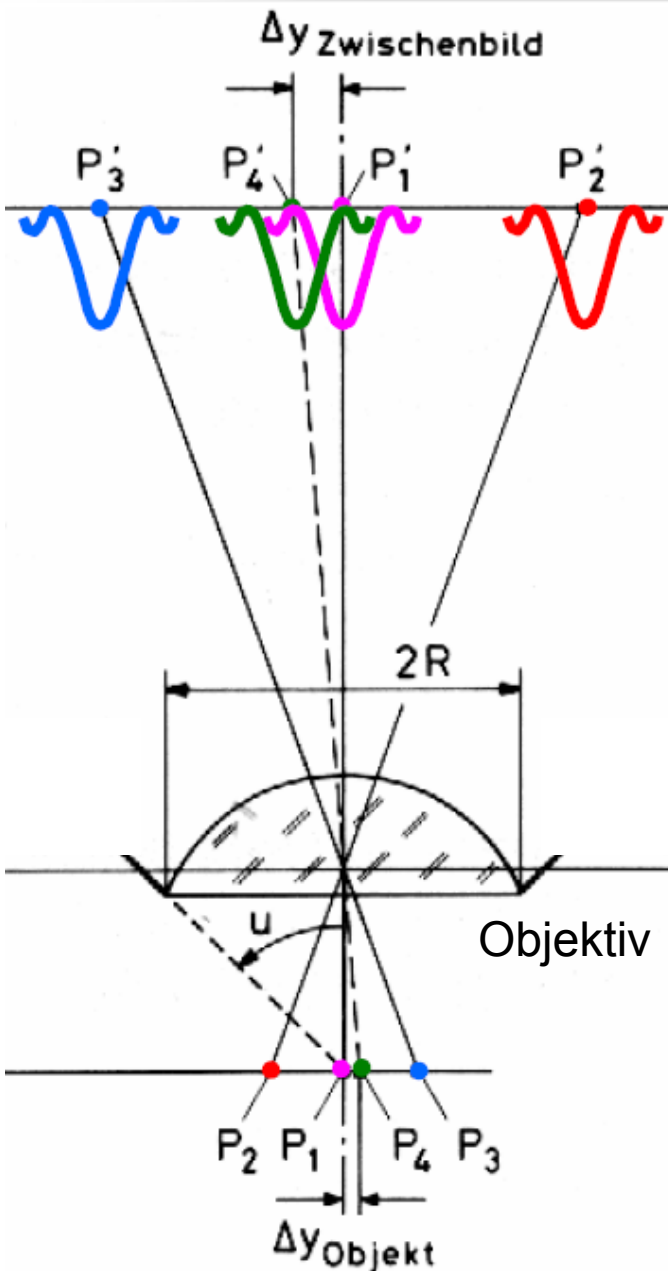
weitere Minima bei $\sin \theta = m \cdot \frac{\lambda}{b}$
(m ganzzahlig)

$$\Rightarrow \sin \Theta = \frac{\lambda}{b}$$



Beugung am Spalt

Auflösungsvermögen eines Mikroskops

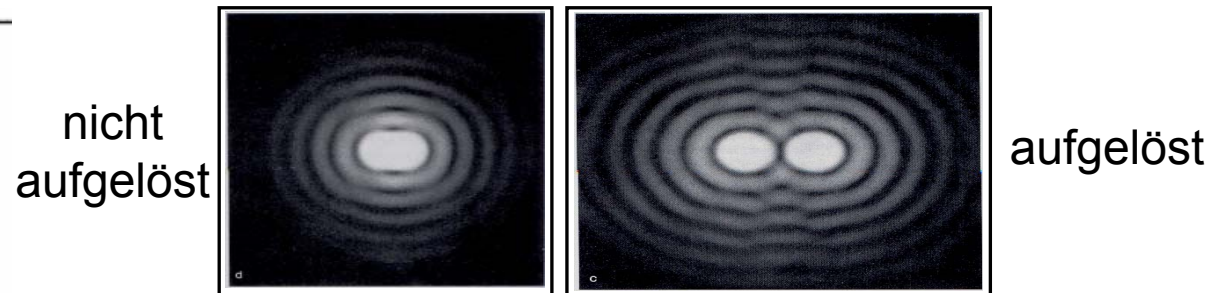


- P_1 bis P_4 leuchtende Punkte des Objekts
- Abbildungen P'_1 bis P'_4 sind Beugungsbilder
- P'_2 und P'_3 deutlich getrennt
- P'_1 und P'_4 nur trennbar, wenn Maximum des einen Beugungsbildes auf Minimum des anderen Beugungsbildes fällt.

$\Rightarrow$ kleinster auflösbarer Abstand $\Delta y \approx \frac{\lambda}{n \cdot \sin u}$

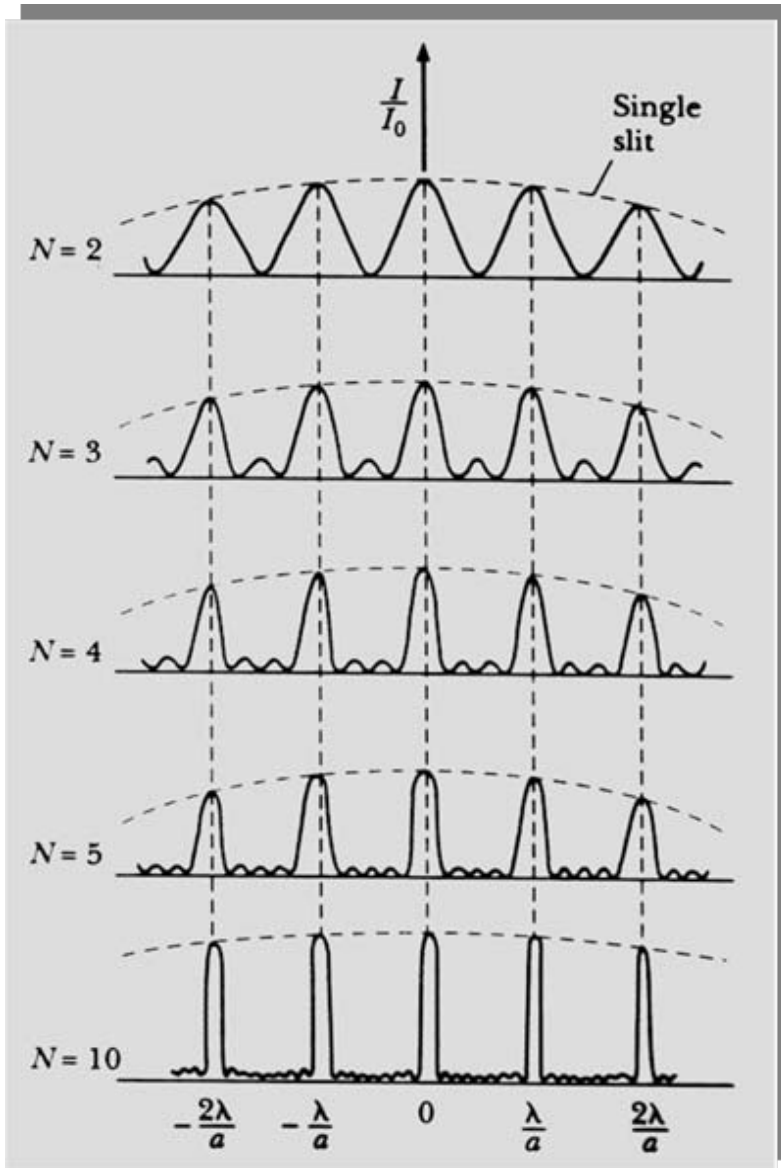
n = Brechzahl des Mediums zwischen Objekt und Objektiv

u = Öffnungswinkel des Objektivs



- je kürzer die Wellenlänge, desto besser die Auflösung !!

Auflösungsvermögen des Gitters



- Interferenzmaxima bei:
 $b \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
 b : Gitterkonstante (Abstand der Spalte)
- je größer die Zahl der Spalte des Gitters, desto schmaler sind die Hauptmaxima und desto schwächer sind die Nebenmaxima für feste Wellenlänge λ
- **Auflösungsvermögen** A des Gitters
Trennung zweier unterschiedlicher Wellenlängen λ und $\lambda + \Delta \lambda$

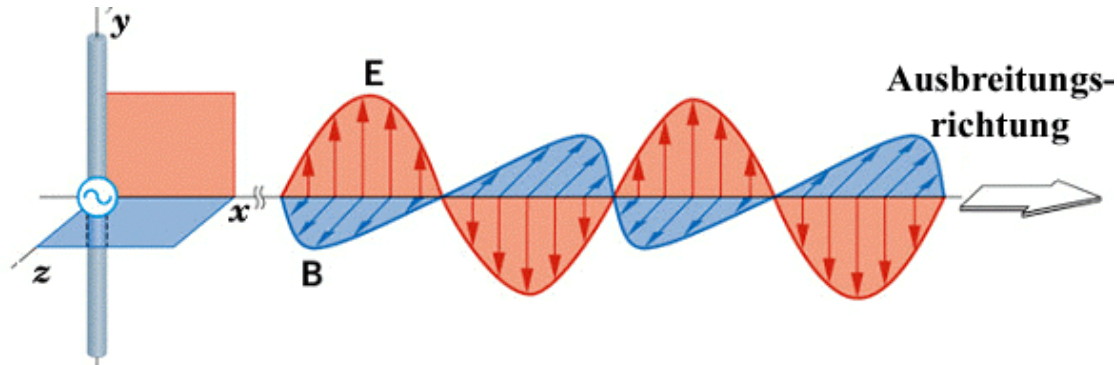
$$A = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = N \cdot z$$

N : Zahl der Spalte
 z : Ordnung



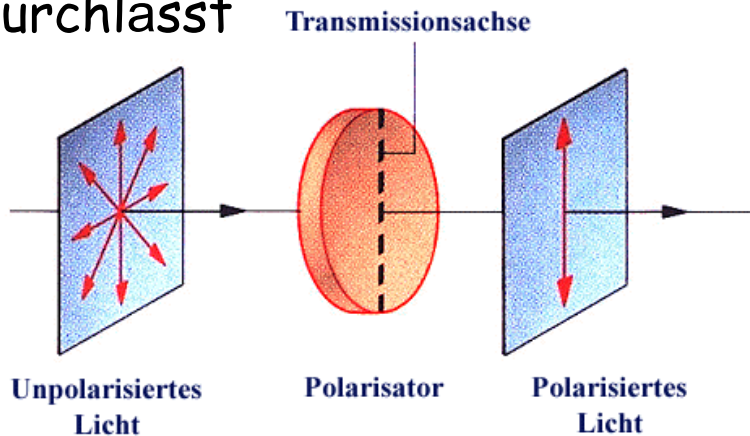
Auflösungsvermögen
eines Gitters

Weitere Welleneigenschaften des Lichts: Polarisation

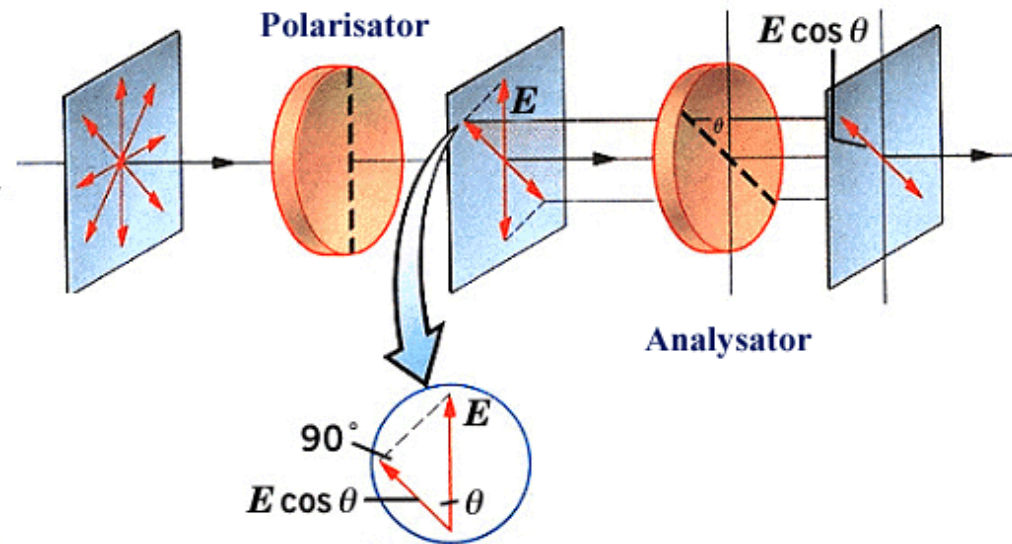


Polarisator: Material, das nur Lichtwellen mit einer bestimmten Schwingungsebene des $\vec{E}$ -Vektors durchlässt

Analysator: Polarisator, der benutzt wird, um die Polarisationsrichtung des Lichts zu bestimmen



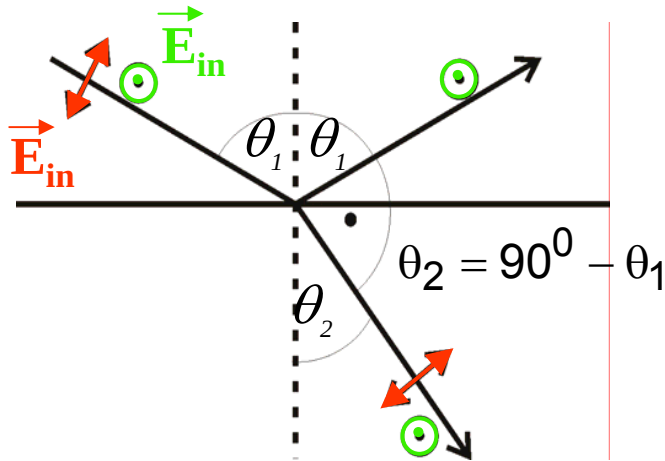
Ergebnis:
linear polarisiertes Licht



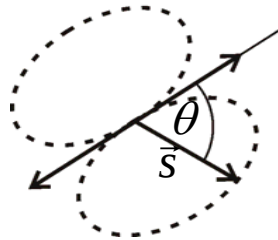
durchgelassene Lichtintensität: $I \sim \vec{E}^2 \cdot \cos^2 \theta$

Polarisation durch Reflexion

- einfallende unpolarisierte Lichtwelle wird teils reflektiert, teils gebrochen



- Atome des Mediums werden zu erzwungenen Schwingungen angeregt und emittieren Licht
- Abstrahlungscharakteristik des Dipols:
keine Strahlung in Schwingungsrichtung



- a.) wenn $\vec{E}$ in Ebene schwingt, schwingen Atome ebenfalls in Ebene
d.h. wenn reflektierter und gebrochener Strahl $\perp$ zueinander stehen,
keine Abstrahlung in Richtung des reflektierten Strahls

$$\sin \theta_1 = n \cdot \sin \theta_2 = n \cdot \sin(90^\circ - \theta_1) = n \cdot \cos \theta_1 \Rightarrow \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \tan \theta_1 = n$$

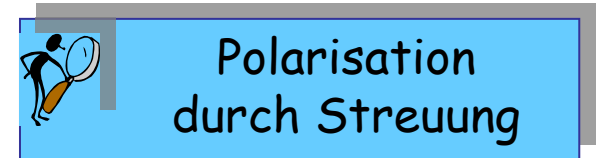
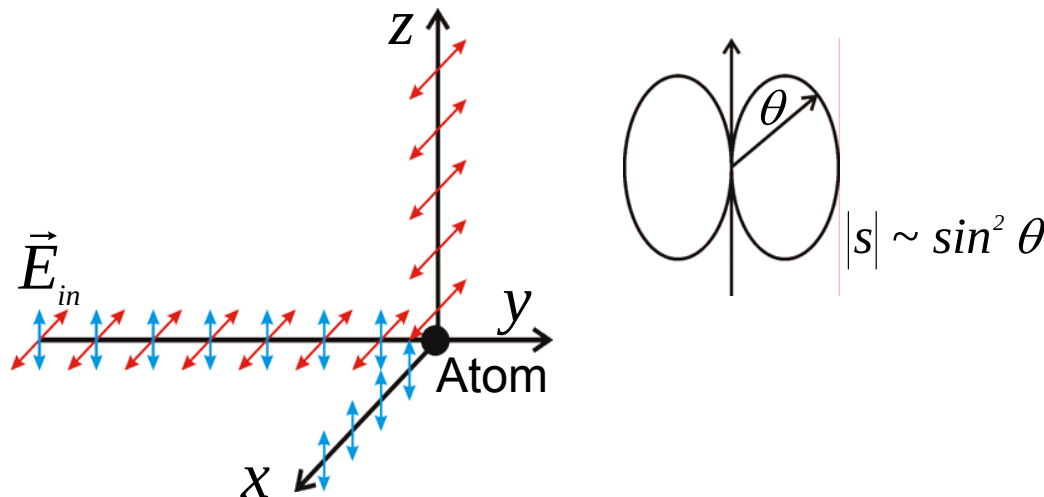
Brewster-Winkel: $\tan \theta_1 = n$

- b.) wenn $\vec{E} \perp$ Ebene schwingt, ungehinderte Abstrahlung in Richtung des reflektierten Strahls

- bei unpolarisiertem, unter Brewster Winkel einfallendem Licht ist reflektierter Strahl $\perp$ Ebene linear polarisiert

Polarisation durch Streuung

- Lichtstreuung im trüben Medium (z.B. Moleküle in Luft)
Streuung = Absorption und sofortige Re-Emission des Lichtes
Anregung der Elektronen im Medium zu erzwungenen Schwingungen;
Abstrahlung mit Dipolcharakteristik:
⇒ keine Abstrahlung in Richtung der Dipolachse



Polarisation
durch Streuung

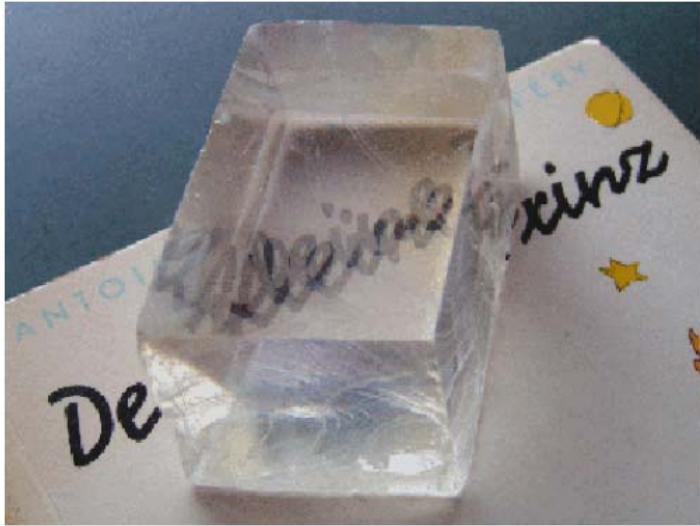
a.) keine Abstrahlung in z-Richtung, wenn $\vec{E}_{in} \parallel$ z-Achse

b.) keine Abstrahlung in x-Richtung, wenn $\vec{E}_{in} \parallel$ x-Achse

- bei Einstrahlung von unpolarisiertem Licht ist Streulicht linear polarisiert
- Streuung stärker für kürzere Wellenlängen ⇒ **Himmel ist blau !**

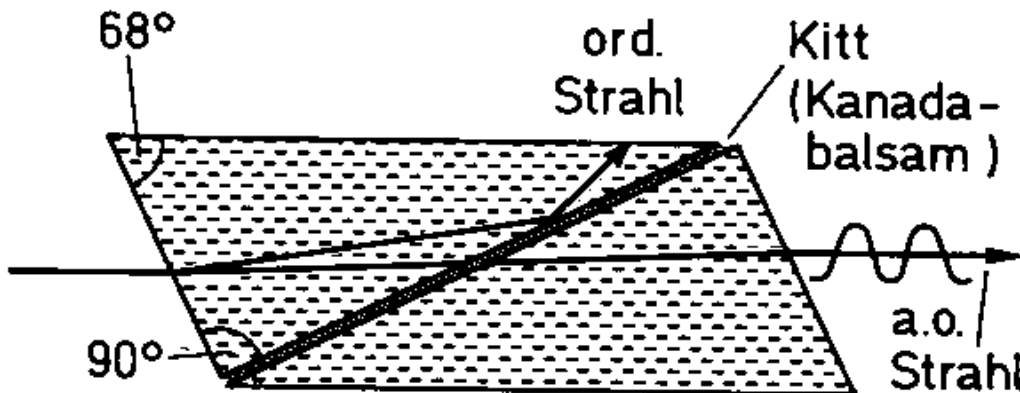
Polarisation durch Doppelbrechung

- Doppelbrechung tritt auf in Kristallen wie Kalkspat, Glimmer oder Quarz



- Aufgrund der Kristallsymmetrie erfolgt im Kristall eine Aufspaltung eines Lichtstrahls in zwei Teilstrahlen:
 - **ordentlicher Strahl**
 - **außerordentlicher Strahl** (folgt nicht dem normalen Brechungsgesetz)beide Teilstrahlen sind senkrecht zueinander polarisiert

Nicolsches Prisma



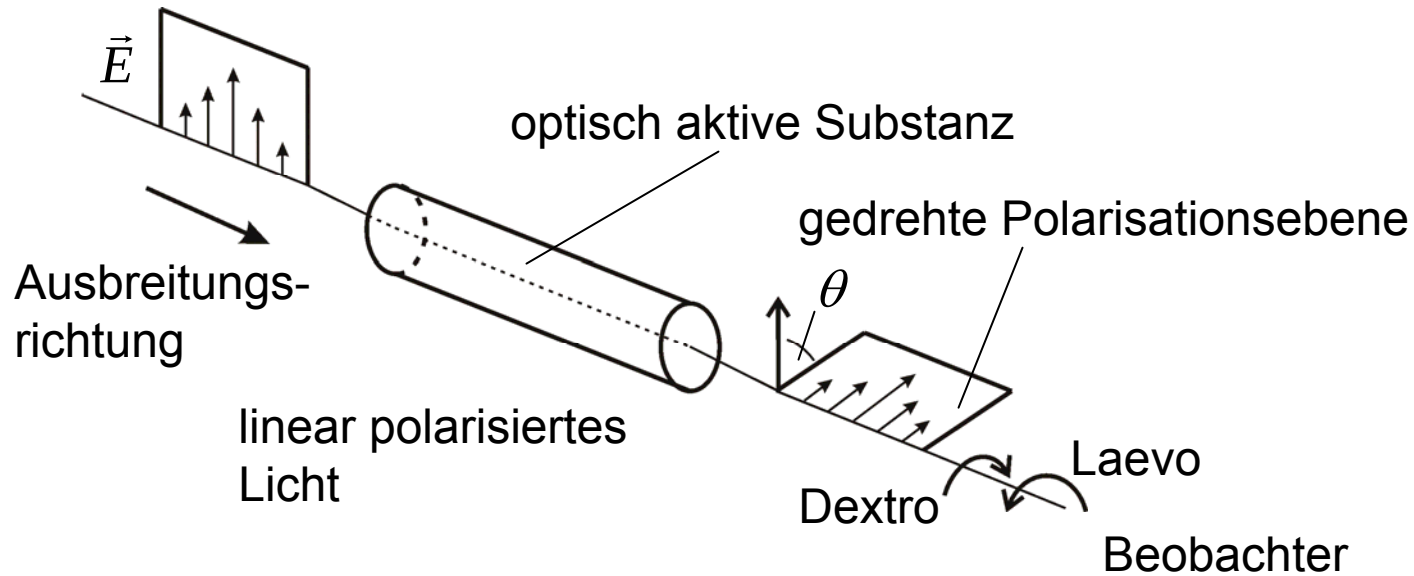
Polarisation durch Doppelbrechung

Der ordentliche Strahl wird durch Totalreflexion an der optisch dünneren Kittschicht ausgelenkt. Es verbleibt der 100% linear polarisierte außerordentliche Strahl

Optische Aktivität

- **Drehung der Polarisationssebene:**

viele organische und auch anorganische Stoffe sind optisch aktiv: d.h., die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht wird beim Durchgang durch diese Stoffe gedreht



- der Drehwinkel α für gelöste Stoffe ist proportional zur Konzentration c des Stoffes und zur Länge L der durchstrahlten Probe $\alpha \sim c \cdot L$

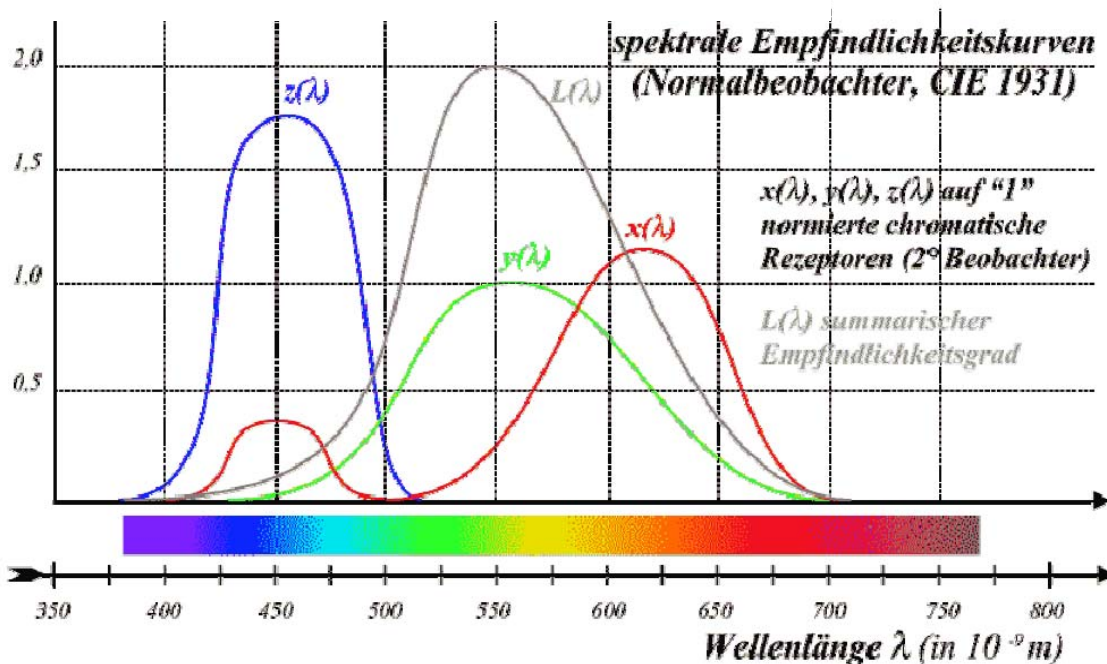
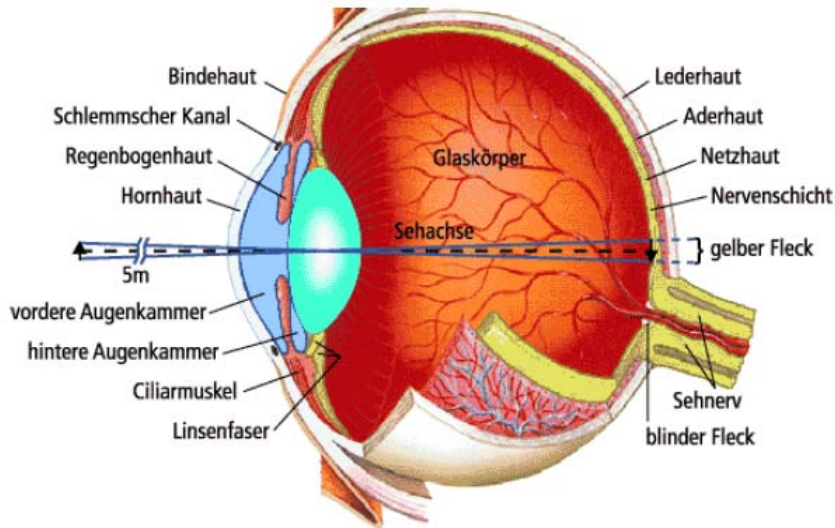
- **Anwendung:**

Harnzuckerbestimmung, Zuckerkonzentration in Wein (Oechsle Grad)

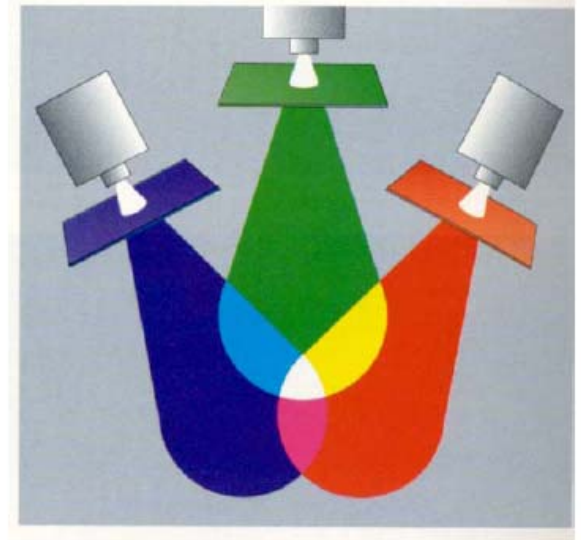


Farbsehen mit dem Auge

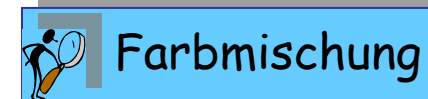
- für das Farbsehen sind drei Arten von farbempfindlichen Zäpfchen (getrennt für **rot**, **grün** und **blau**) verantwortlich, die unterschiedliche typische Absorptionskurven besitzen



Additive Farbmischung



Überlagerung von Licht verschiedener Grundfarben



Zusammenfassung

- **Licht** hat auch **Wellencharakter**; es treten Wellenphänomene auf, wenn charakteristische Abmessungen $\approx$ Wellenlänge
 - Superposition nach **Huygens'schem Prinzip**
 - **Interferenz** bei Kohärenz
 - **Beugung** an kleinen Strukturen
Folge: Auflösungsvermögen ist beugungsbegrenzt
 - Anwendung: Gitterspektrometer
- **Polarisation**:
 - Definition der Schwingungsebene des elektrischen Feldvektors
 - Erzeugung polarisierten Lichts: Reflexion, Streuung, Doppelbrechung
 - Anwendungen. Polarisatoren, Bestimmung der optischen Aktivität
- **Weißes Licht** (sichtbares Licht 400 – 700 nm) ist spektral zerlegbar in **Grundfarben**
 - Farberkennung beim Auge über drei Arten von Farbzäpfchen