

**ACHTUNG: Eine Verbreitung
der Unterlagen außerhalb der
Vorlesung bzw. der
dazugehörigen Übungen ist
nicht gestattet !**

**Diese Vorlesung basiert auf: Hering et al., „Physik
für Ingenieure“**

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-22568-0

DOI 10.1007/978-3-642-22569-7

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

e-ISBN 978-3-642-22569-7

6. Optik

Geometrische Optik

- Reflexion und Spiegel
- Brechung, Prismen und Linsen

Radiometrie und Photometrie

Wellenoptik

- Interferenz und Beugung
- Polarisation des Lichts

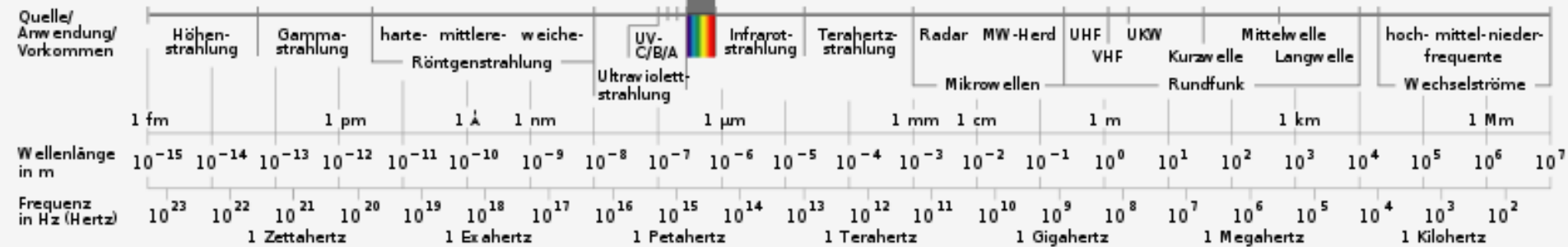
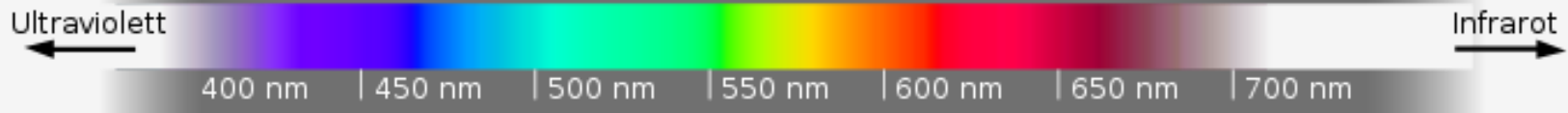
Quantenoptik

- Welle-Teilchen Dualismus
- Wärmestrahlung und Laser

Grundgleichung der
Optik sind aus
Elektrodynamik ableitbar

Insbesondere nötig für
Wechselwirkung mit
Materie

Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)

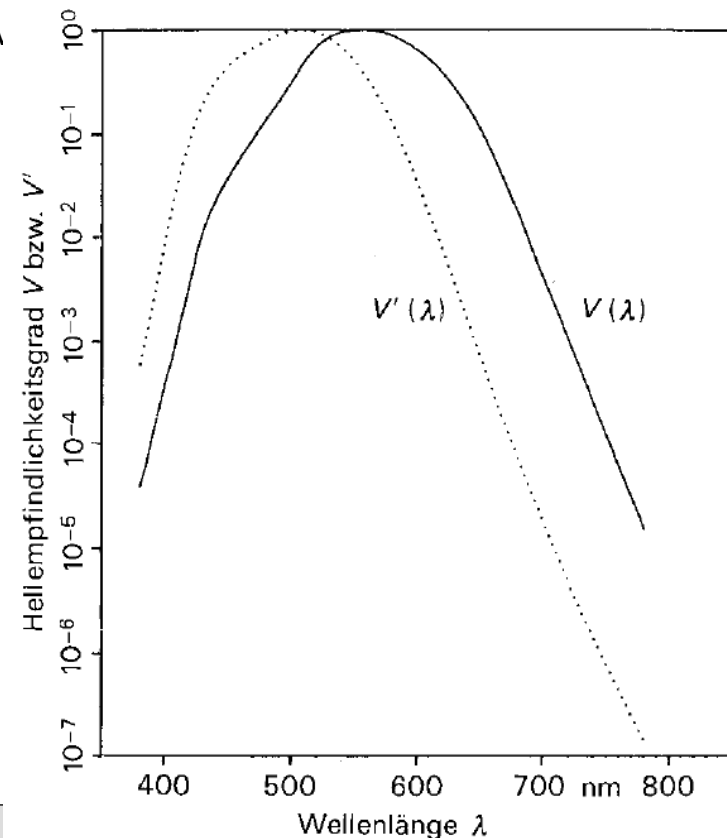


http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_c.sv

Licht als elektromagnetische Strahlung

Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges

Aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"



6.2 Geometrische Optik

6.2.1 Lichtstrahlen

Licht breitet sich in homogenen Medien geradlinig aus

→ durch Strahlen beschrieben !

Im Wellenbild:
Normalen auf Wellenfronten

Pfeilspitzen bedeutungslos !

Der Lichtweg ist
grundsätzlich umkehrbar !

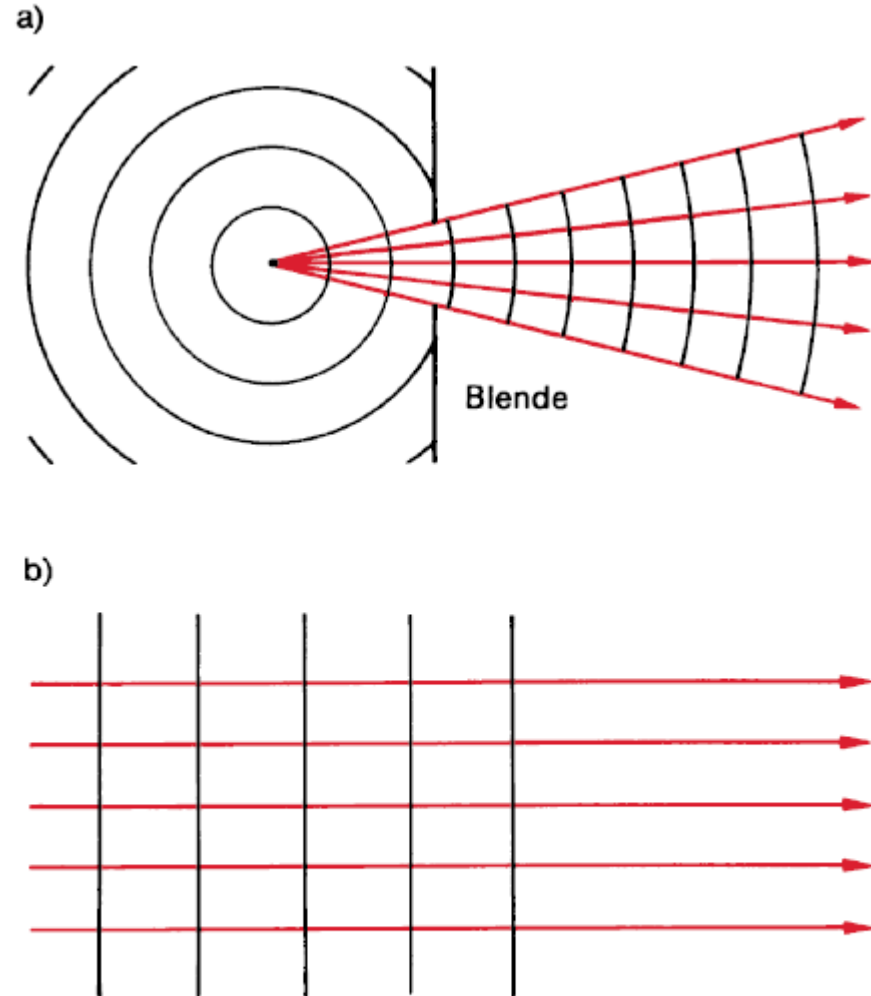


Abb. 6.3 Strahlen- und Wellenflächen:
a) Homozentrisches Strahlenbündel und Kugelwellen,
b) paralleles Strahlenbündel und ebene Wellen

Anwendbar solange Dimensionen der Spiegel, Linsen und Blenden groß gegen λ sind (Beugung vernachlässigbar).

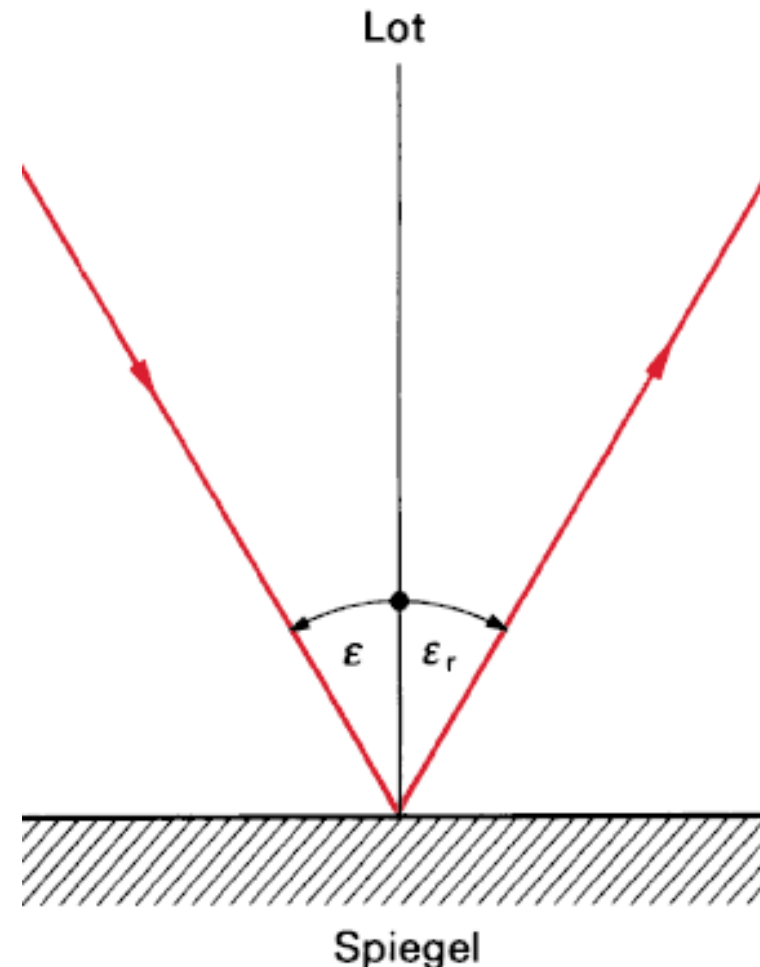
6.2.2 Reflexion

Reflexionsgesetz:

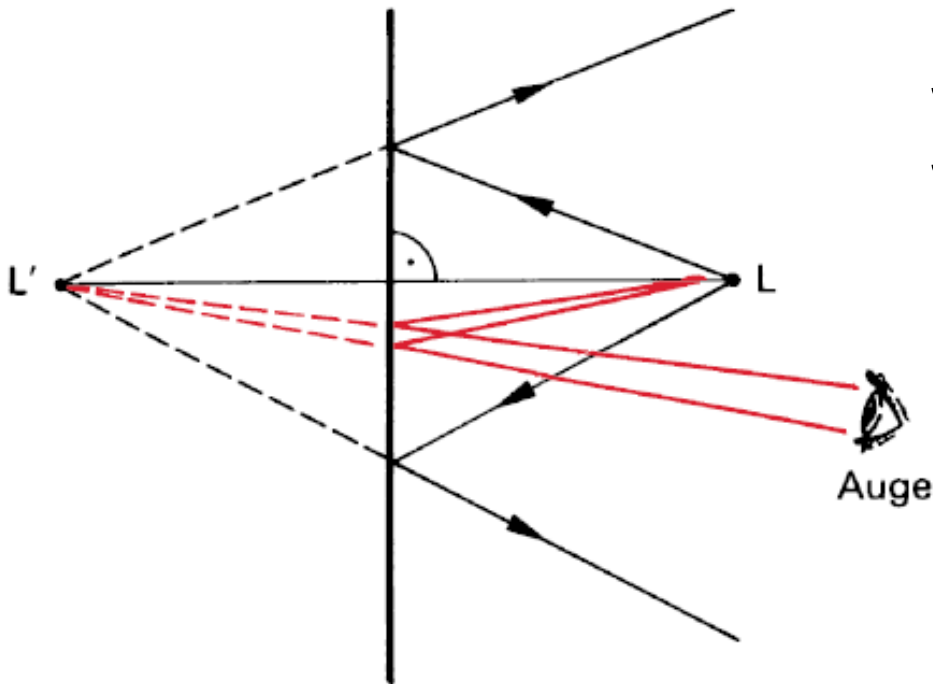
- Einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Einfallslot (Flächennormale) liegen in einer Ebene.
- Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich

Aus Huygens Fresnel'schem Prinzip ableitbar

Aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"



Bildentstehung beim Spiegel:



Für Beobachter scheinen alle Strahlen von hinter dem Spiegel zu kommen.

- → **L' virtuelles Bild** von L
- Kann nicht auf einem Schirm sichtbar gemacht werden !

Reelles Bild: Wäre auf Schirm darstellbar.

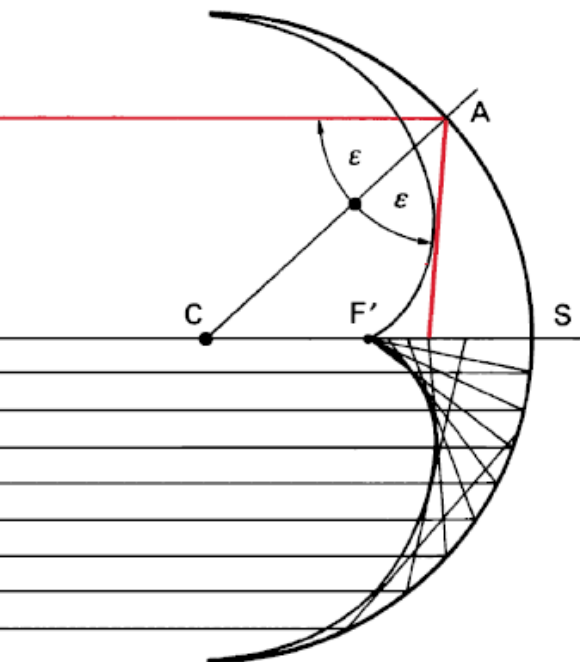
Aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Reflexion an gekrümmten Flächen:

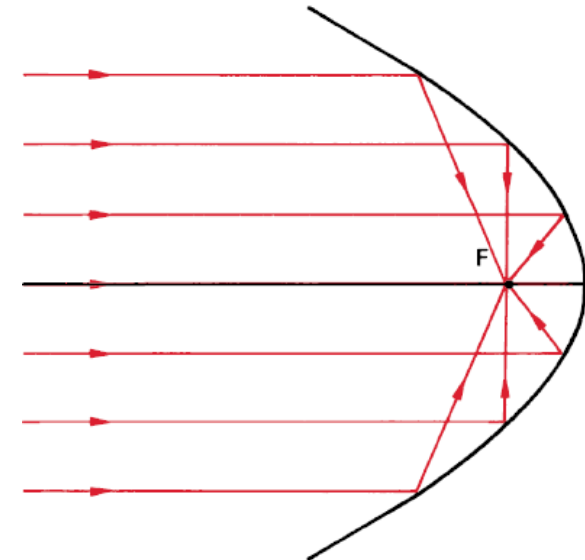
**Generelle Strategie: lokales Lot normal zur Tangentialfläche
→ Reflexionsgesetz**

Spezialfälle:

Parabolspiegel



**Achsparallele Strahlen
werden in einem
Brennpunkt F gesammelt**



Sphärischer Hohl- oder Konkavspiegel

- **Nicht alle Strahlen treffen sich in einem Punkt**
- **Für achснаhe Strahlen (Paraxialstrahlen)
näherungsweise gegeben**

Brennweite des Hohlspiegels (für Paraxialstrahlen)

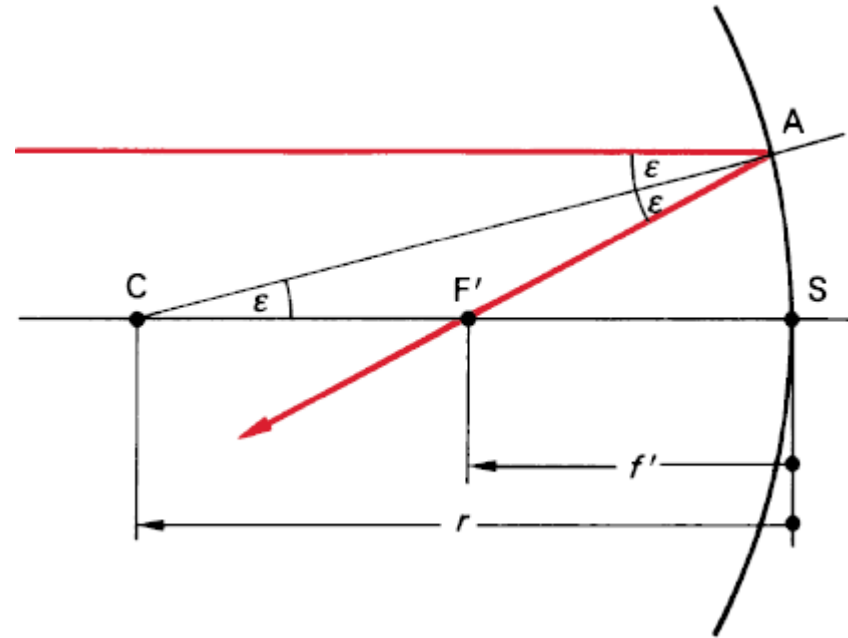
Ableitung aus Reflexionsgesetz:

$$f' = r - CF'$$

gleichschenkeliges Dreieck:

$$\cos \varepsilon = \frac{r}{2CF'}$$

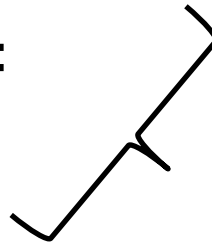
$$f' = r \left(1 - \frac{1}{2 \cos \varepsilon} \right)$$



Aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Für achснаhe Strahlen:

$$\cos \varepsilon \approx 1$$



$$f' = -\frac{r}{2}$$

$f' < 0$, weil links vom Scheitel

Bildentstehung beim Hohlspiegel (für Paraxialstrahlen):

Es gilt (aus Reflexionsgesetz):

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'}$$

a ... Gegenstandsweite

a' ... Bildweite

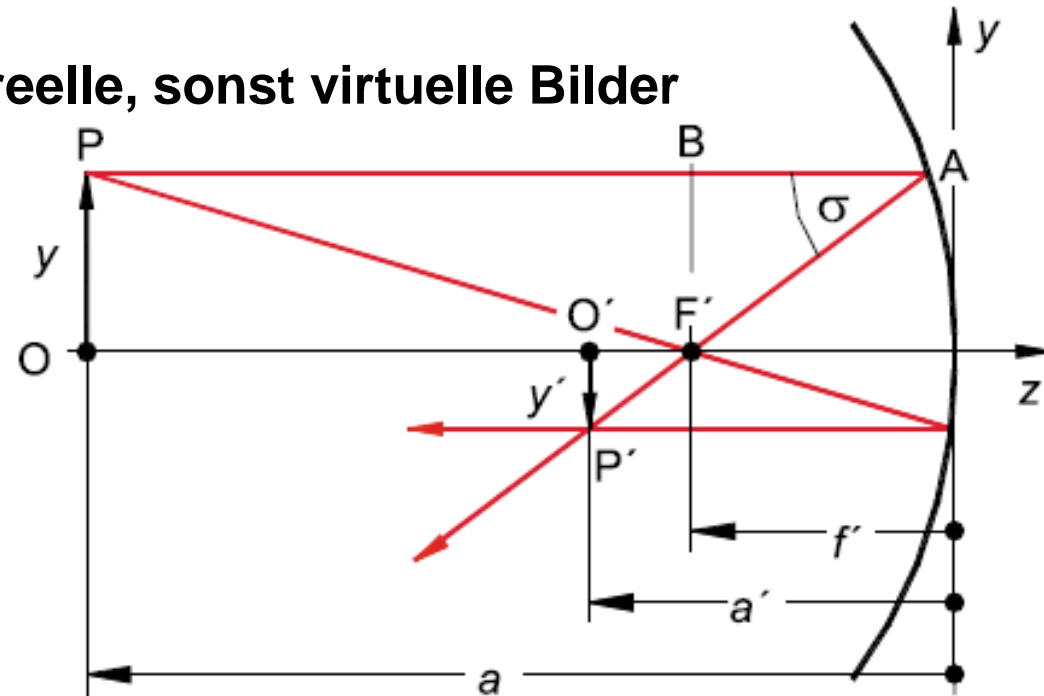
f' ... Brennweite

Abbildungsmaßstab:

Verhältnis von Bildgröße, y' ,
zu Gegenstandsgröße, y

$$\frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = \frac{f'}{f' - a}$$

reelle, sonst virtuelle Bilder



Vorzeichen der verschiedenen Längen beachten (links vom Scheitel <0)!

$|a| > |f'|$ umgekehrtes Bild

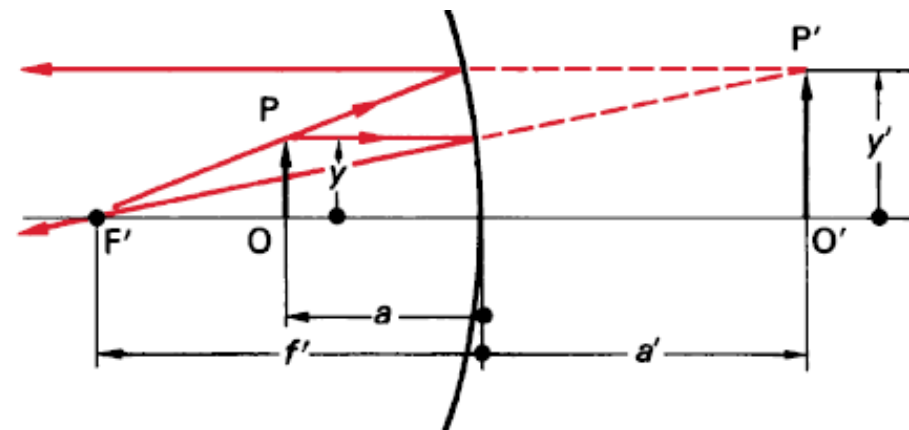
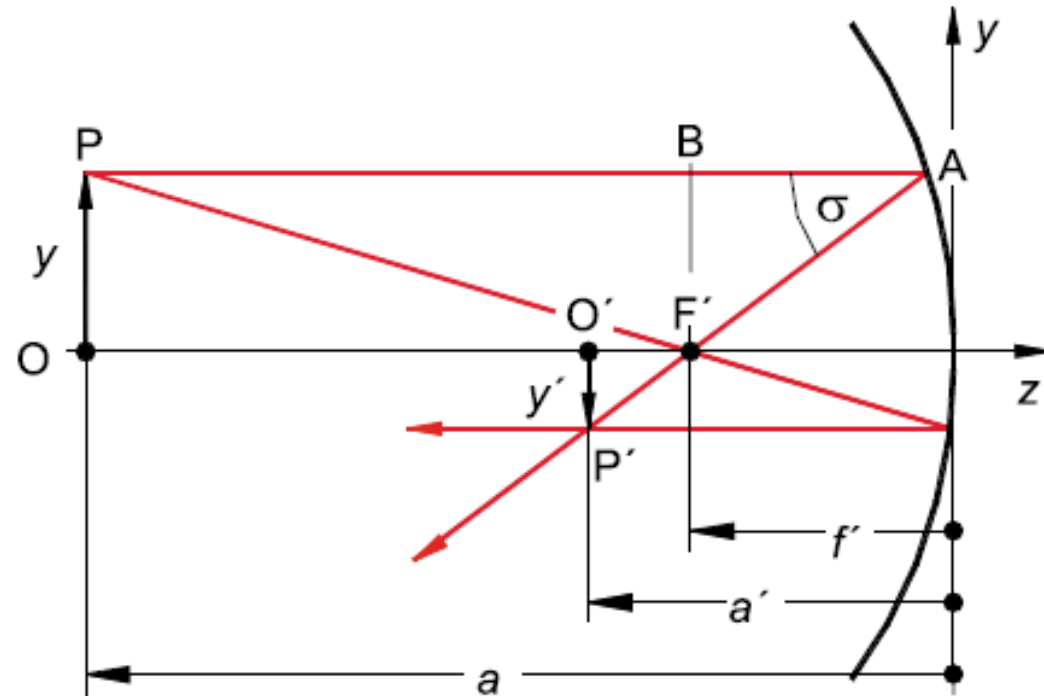
$|a| < |f'|$ aufrechtes, vergrößertes Bild

$$|a| > |f'|$$

reelle, sonst virtuelle Bilder

Bildkonstruktion:

|| zur optischen Achse einfallender Strahl wird durch F' , durch F' einfallender Strahl parallel zur optischen Achse reflektiert.



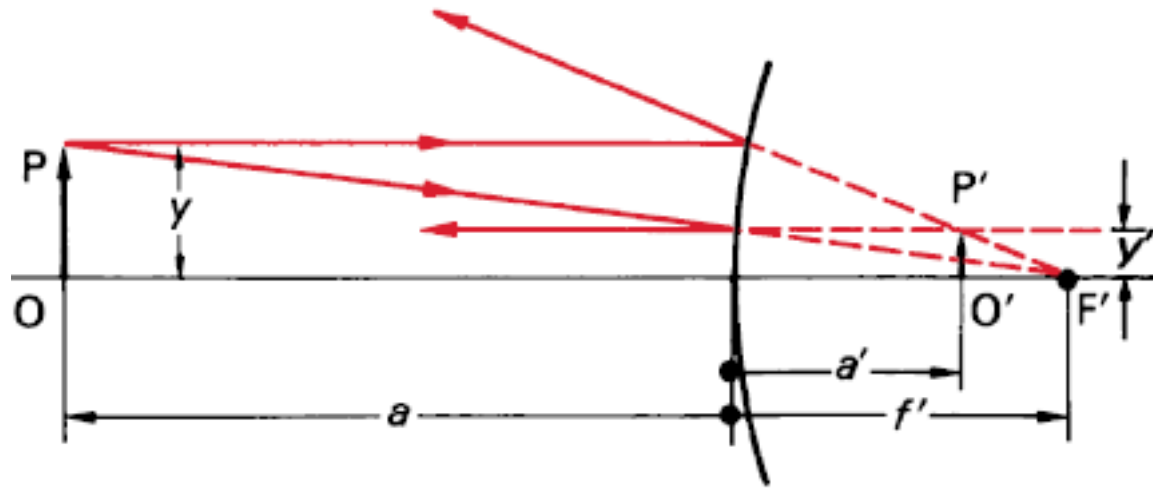
Beispiel: vor einem Hohlspiegel ($f' = -5$ cm) steht im Abstand von $a = -2,5$ cm ein $y = 1$ cm Gegenstand; wo und wie groß ist das Bild ?

Abb. 6.12 Abbildung eines Gegenstandes innerhalb der Brennweite beim Hohlspiegel (zu Beispiel 6.2-2)

Bildentstehung beim Konvexspiegel (für Paraxialstrahlen):

Unterschied zum Konkavspiegel:

- Gegenstand und Brennpunkt auf verschiedenen Seiten des Spiegels
- $\rightarrow f' > 0$ (sonst gleiche Gleichungen)



Aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Bild immer: **aufrecht, verkleinert und virtuell**

Andwendung z.B. Autorückspiegel (Vergrößerung des Gesichtsfeldes)

Gleiche Abbildungsgleichungen wie für Hohlspiegel!

6.2.3 Brechung des Lichts

- Richtung des Strahls wird an der Grenzfläche geändert (Brechung)
 - Ein Teil des Strahls wird reflektiert.
 - Lot, einfallender Strahl, reflektierter Strahl und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.
-
- Optisch dünneres → optisch dichteres Medium:
Brechung zum Lot
 - Optisch dichteres → optisch dünneres Medium:
Brechung vom Lot

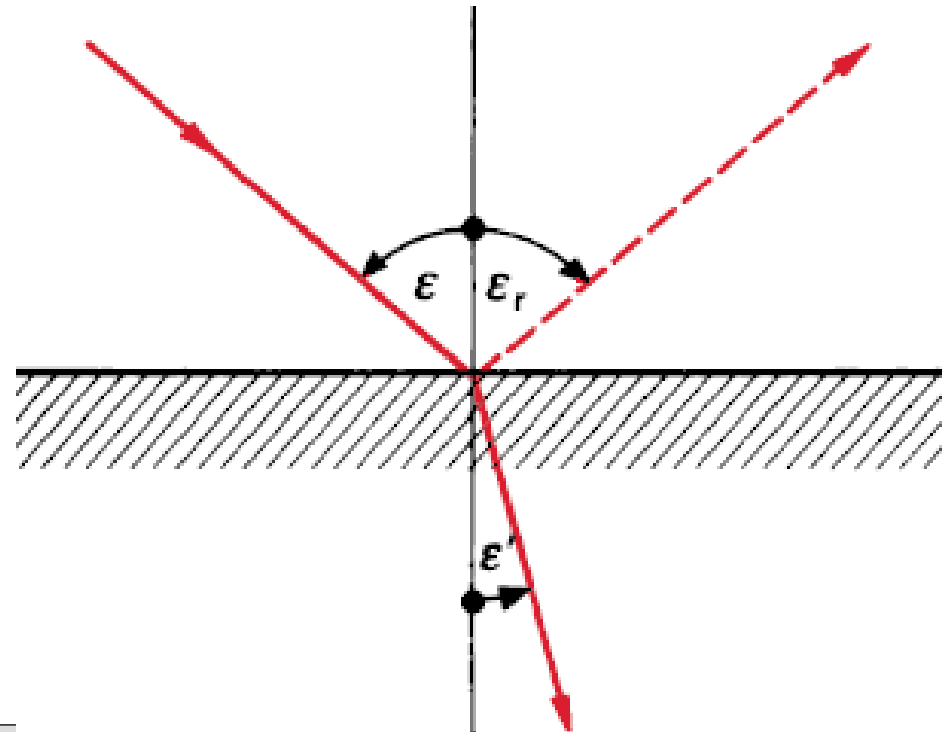


Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Snellius'sches Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon'} = \frac{c}{c'} = \frac{n'}{n}$$

c, c' ... **Phasengeschwindigkeiten**
in den beiden Medien

n, n' ...
Brechungsindices

c_0 ... **Vakuum-
Lichtgeschwindigkeit**

$$n = \frac{c_0}{c}$$

n nimmt typischerweise mit steigender Wellenlänge, λ , ab
(**normale Dispersion**) → **spektrale Zerlegung des Lichts**

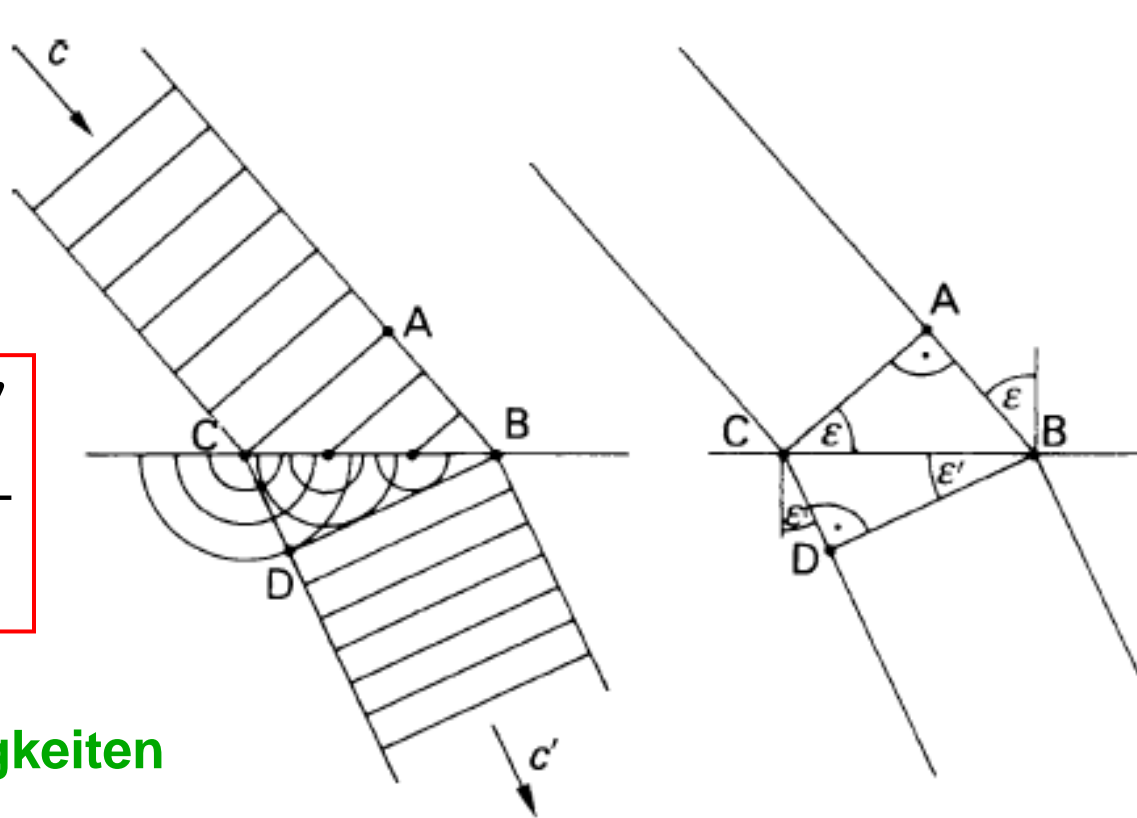


Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

**Erklärbar über Huygens-
Fresnel'sches Prinzip!**

Lichtstrahl durchschreitet Schichtstruktur verschiedener Stoffe:

$$n_1 \sin \varepsilon_1 = n_2 \sin \varepsilon_2 = n_3 \sin \varepsilon_3 = \dots$$

Invariante der Brechung

Grenzwinkel der Totalreflexion:

ε im optisch dünneren Medium wird 90°

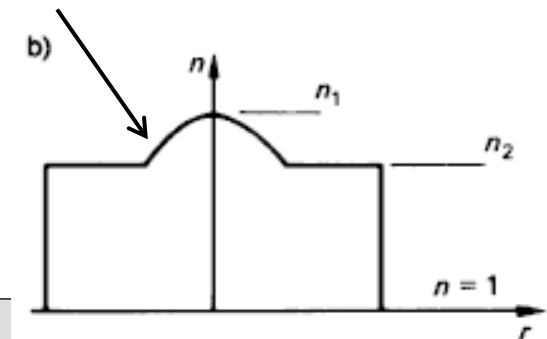
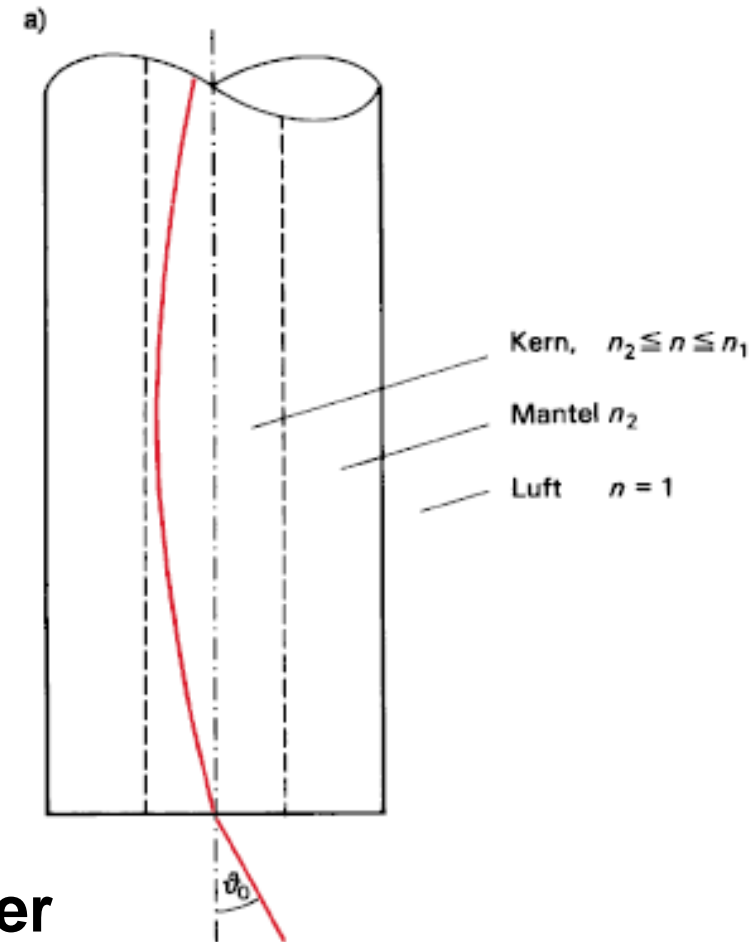
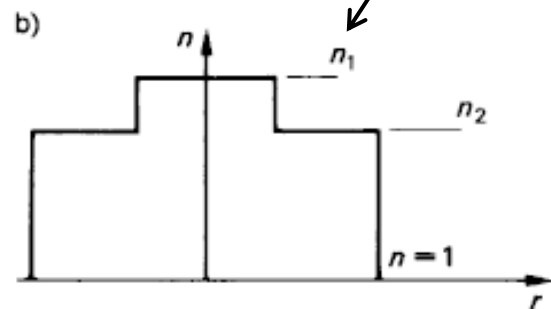
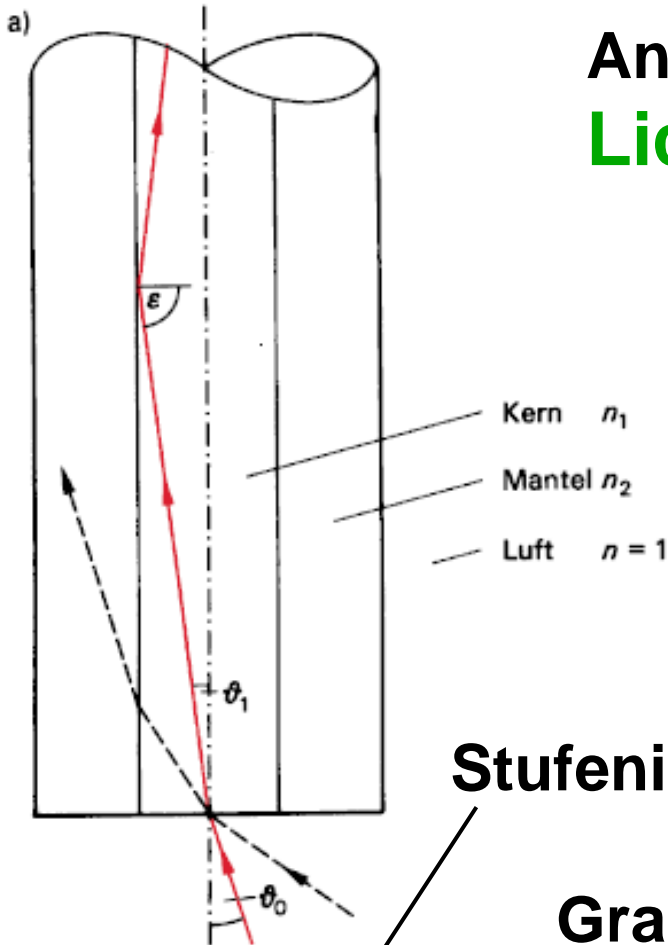
$$\sin \varepsilon'_g = \frac{n}{n'}$$

dünneres Medium
Luft ($n \sim 1$):

$$\sin \varepsilon'_g = \frac{1}{n'}$$

**Für $\varepsilon' > \varepsilon'_g$: Licht kann das optisch dichtere Medium nicht mehr verlassen.
Es wird totalreflektiert.**

Anwendung: Lichtleiter



Brechung an einem Prisma:

Ablenkwinkel δ aus Brechungsgesetz und geometrische Überlegungen.

Normale Dispersion:
kurzwelliges Licht stärker
gebrochen \rightarrow

Prismenmonochromator

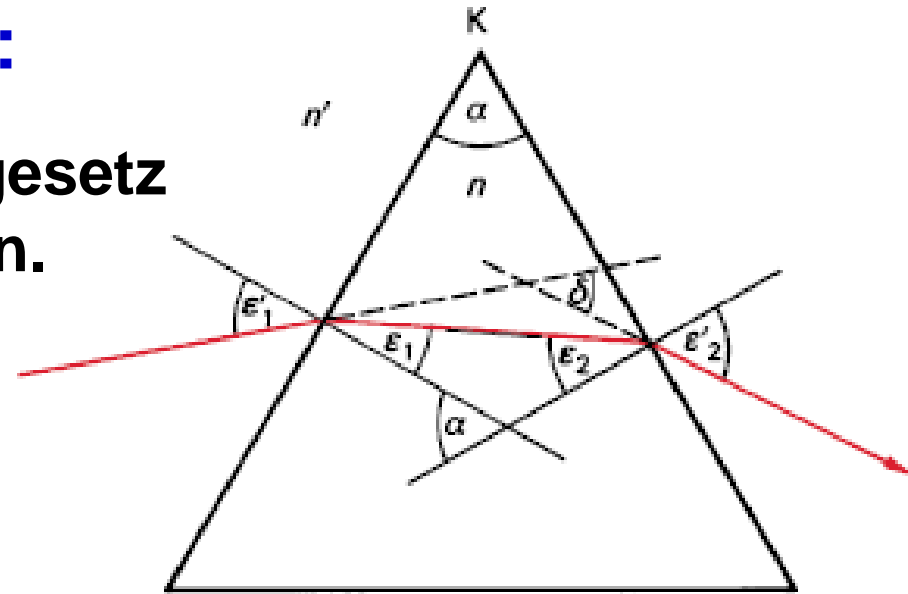
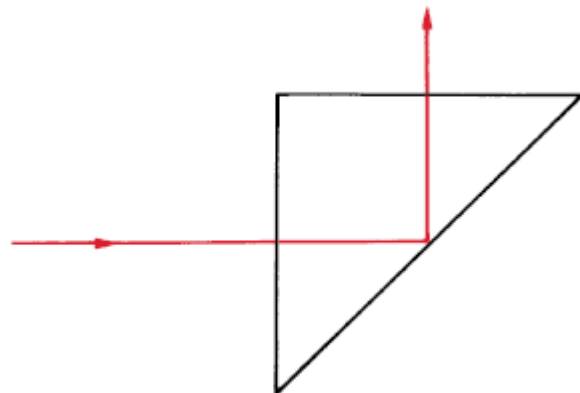


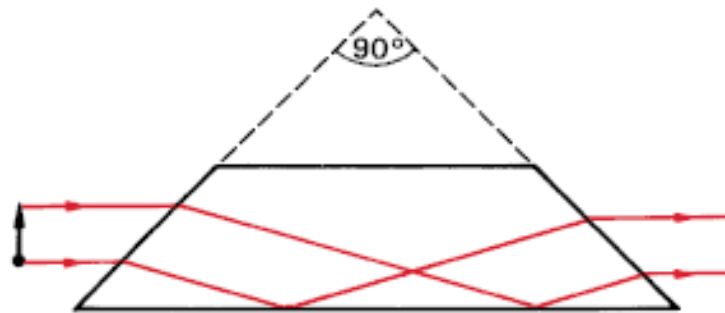
Abb. 6.20 Strahlenverlauf in einem Prisma

z.B. Borkronglas: $n=1,51 \rightarrow \varepsilon_g=41,5^\circ$

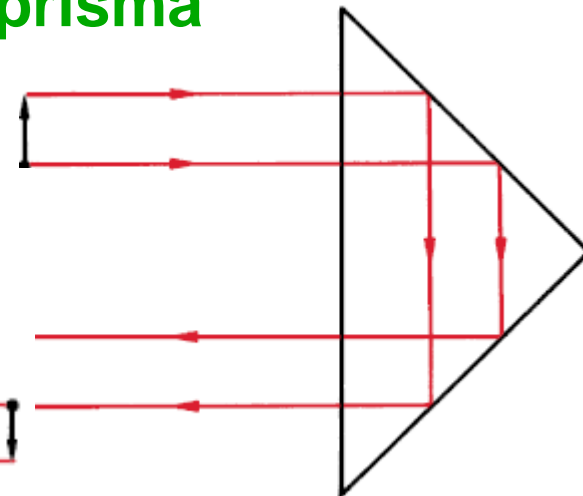
Umlenkprisma



Wendeprisma



Umkehrprisma



6.2.4 Abbildung durch Linsen

Sphärische Linse: Glas, das von zwei kugelförmigen Flächen begrenzt wird

→ 2 x Brechung

**Beschreibung:
Invarianten der
Brechung !**

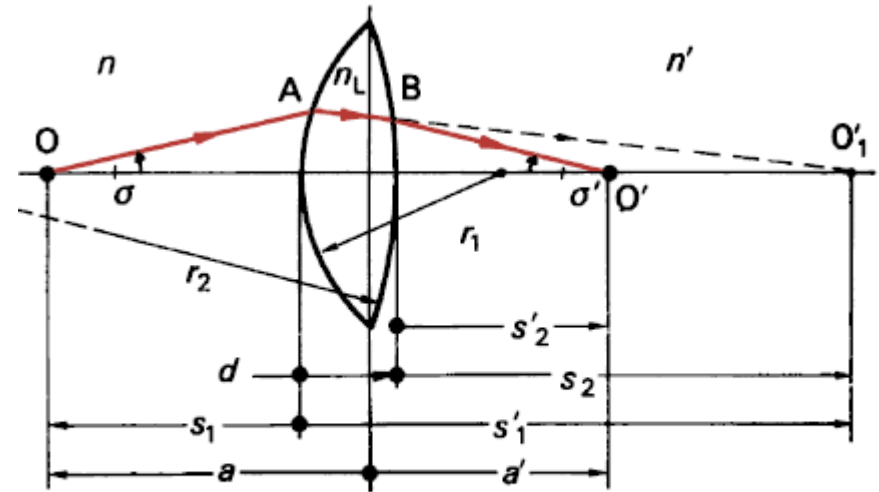


Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Abb. 6.30 Abbildung eines Punktes auf der optischen Achse durch eine Sammellinse

Dünne Linsen:

Linsendicke, d , ist vernachlässigbar klein !

Für dünne, von Luft umgebene Linsen gilt:

Linsefmacherformel:

$$\boxed{\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}} \quad \text{mit:}$$

$$\boxed{\frac{1}{f'} = D' = (n_L - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}$$

a ... Gegenstandsweite

a' ... Bildweite

f' ... (bildseitige) Brennweite

D' ... Brechkraft (in dpt=m⁻¹)

**Größen links (rechts) vom
Linsenmittelpunkt <0 (>0) !**

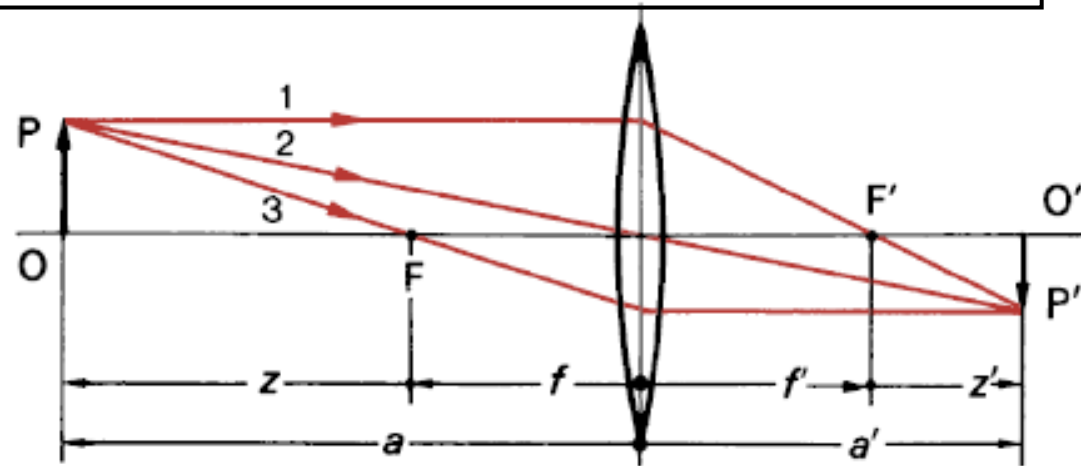


Abb. 6.32 Abbildung eines Gegenstandes mit Hilfe von Brennpunktstrahlen und Mittelpunktsstrahl

$$\mathbf{f = - f' !}$$

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"



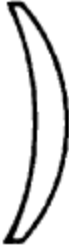


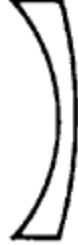
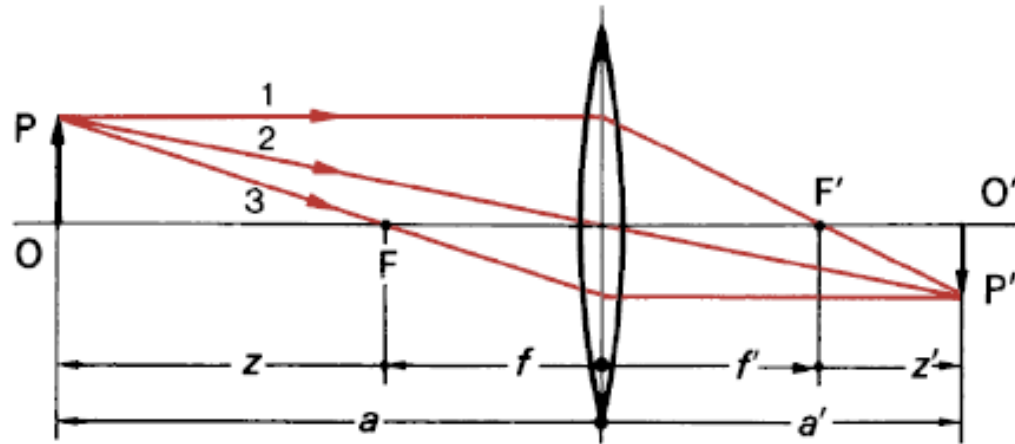
Linsenform						
Bezeichnung	bi-konvex	plan-konvex	konkav-konvex	bi-konkav	plan-konkav	konvex-konkav
Radien	$r_1 > 0$ $r_2 < 0$	$r_1 = \infty$ $r_2 < 0$	$r_1 < r_2 < 0$	$r_1 < 0$ $r_2 > 0$	$r_1 = \infty$ $r_2 > 0$	$r_2 < r_1 < 0$
Brennweite im optisch dünneren Medium	$f' > 0$	$f' > 0$	$f' > 0$	$f' < 0$	$f' < 0$	$f' < 0$

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Abbildungsmaßstab:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}$$

Beispiel: Gegenstand $a = -50\text{ cm}$ vor Sammellinse ($f' = 20\text{ cm}$); Wie groß sind a' und β ?



Beispiel: Gegenstand $a = -60\text{ cm}$ vor Zerstreuungslinse ($f' = -30\text{ cm}$); Wie groß sind a' und β ?

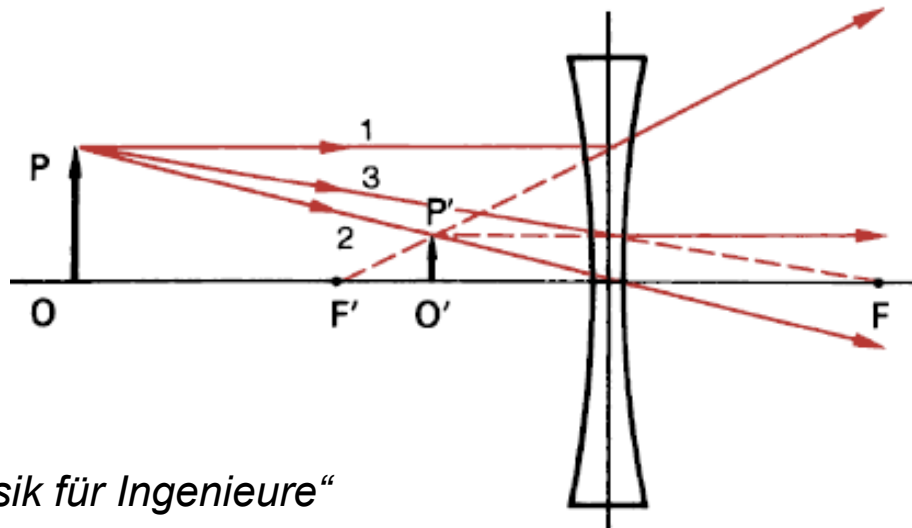


Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Linsensysteme:

In Analogie zu dicken Linsen !

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{e}{f_1' f_2'}$$

**Brennweiten von
Hauptebenen weg
gemessen !**

**(= Ebenen, von denen
Strahlen außerhalb der
Linse zu kommen scheinen)**

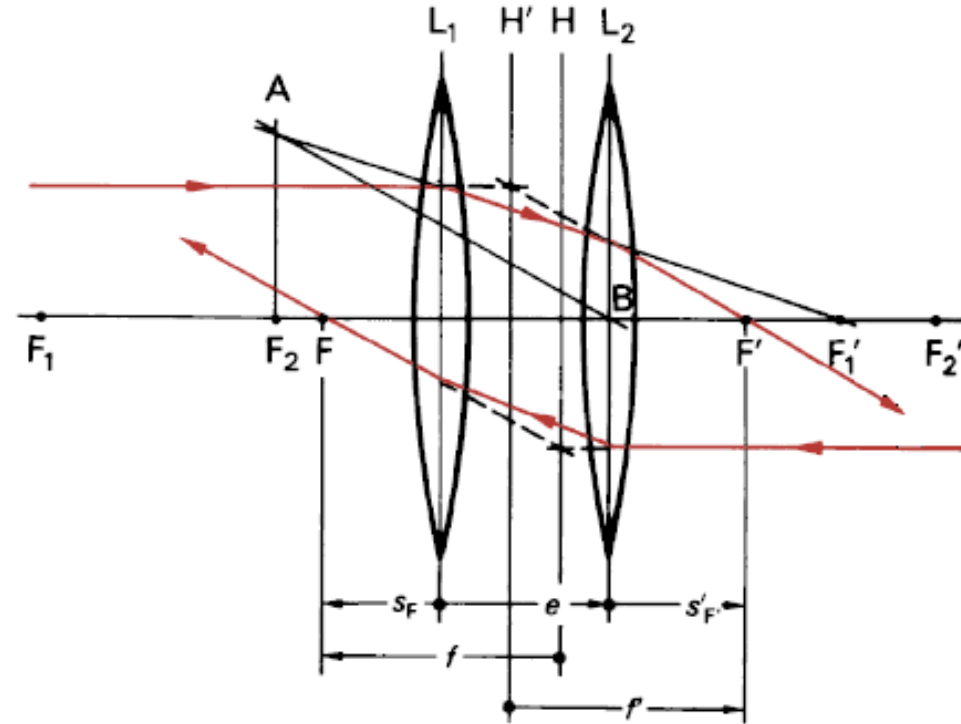


Abb. 6.39 Lage der Hauptebenen bei einem System aus zwei Sammellinsen (zu Beispiel 6.2-11)

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

6.3 Radiometrie und Photometrie

Radiometrie: Messung der Strahlungsleistung mit „unbestechlichem“ Messinstrument.

(**strahlungsphysikalische Größen** – Index e)

Photometrie: „Bewertung“ der Strahlung mit dem Auge.

(**lichttechnische Größen** – Index v)

6.3.2 Strahlungsphysikalische Größen (Beispiele)

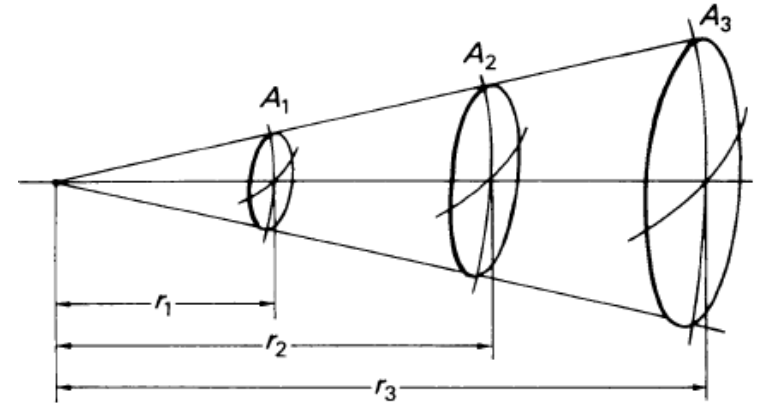
Strahlungsleistung Φ_e [W]:

Strahlungsenergie, dQ_e , pro Zeit, dt

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Strahlstärke, I_e [W/sr]: Strahlungsleistung pro Raumwinkel

Definition des Raumwinkels: $\Omega = \frac{A}{r^2}$



Lambert'scher Strahler: Körper mit $I_e(\varepsilon_1) = I_e(0) \cos \varepsilon_1$

z.B.: diffus reflektierende
Flächen

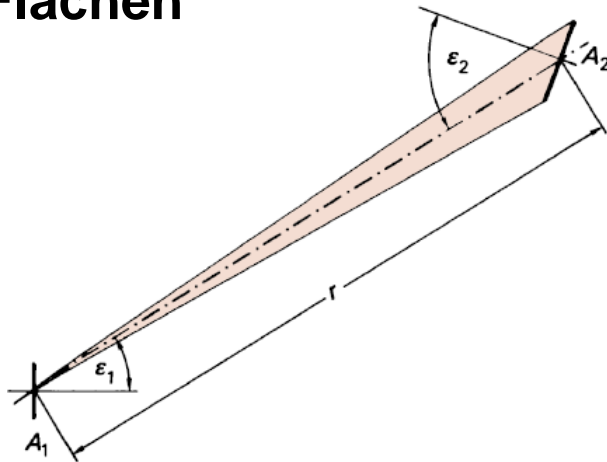


Abb. 6.63 Strahlenkegel, der vom Sender auf den Empfänger fällt

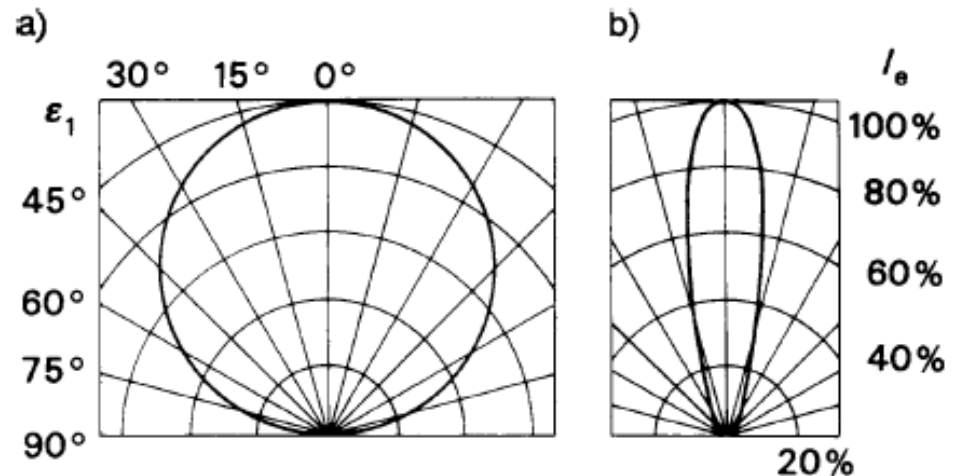


Abb. 6.64 Strahlstärke I_e in Abhängigkeit vom Abstrahlwinkel ε_1 im Polardiagramm a) beim Lambert'schen Strahler, b) bei einer Leuchtdiode

Strahldichte L_e [W/(sr m²):

I_e pro Emitterfläche senkrecht auf Beobachtungsrichtung

Bestrahlungsstärke E_e [W/m²):

Strahlungsleistung pro Empfängerfläche

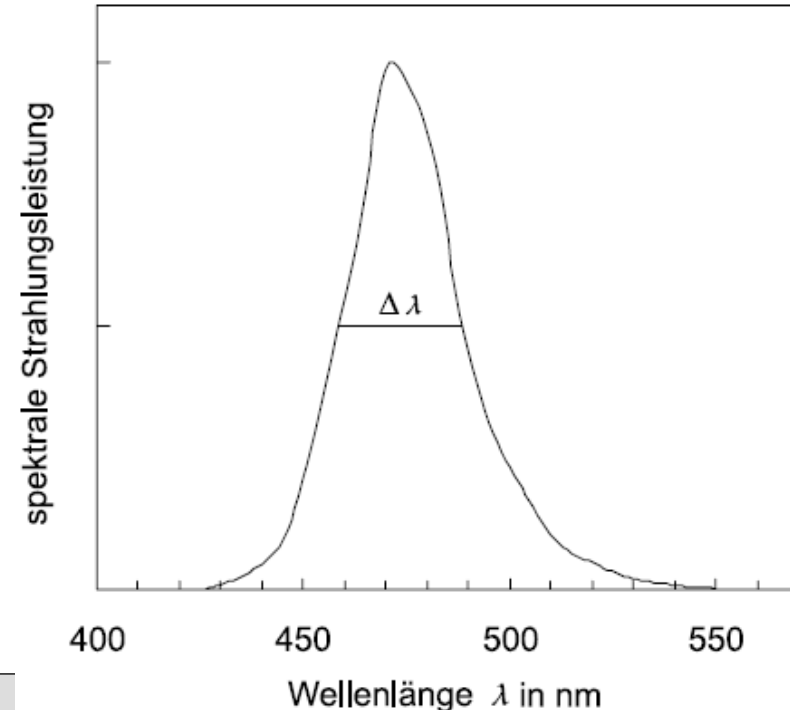
Spektrale Größen:

Charakterisierung der **Wellenlängenabhängigkeit** der Strahlung (Strahlungsphysikalische Größe X_e pro Wellenlängeneinheit)

$$X_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{dX_e}{d\lambda}$$

$$X_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

Beispiel: Spektrum einer blauen LED



Strahlung des schwarzen Körpers

(absorbiert alle auftreffende Strahlung → gibt alle Strahlung ab)

Planck'sches Strahlungsgesetz:

(spektrale Strahldichte des schwarzen Körpers als Funktion der Temperatur, T))

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}$$

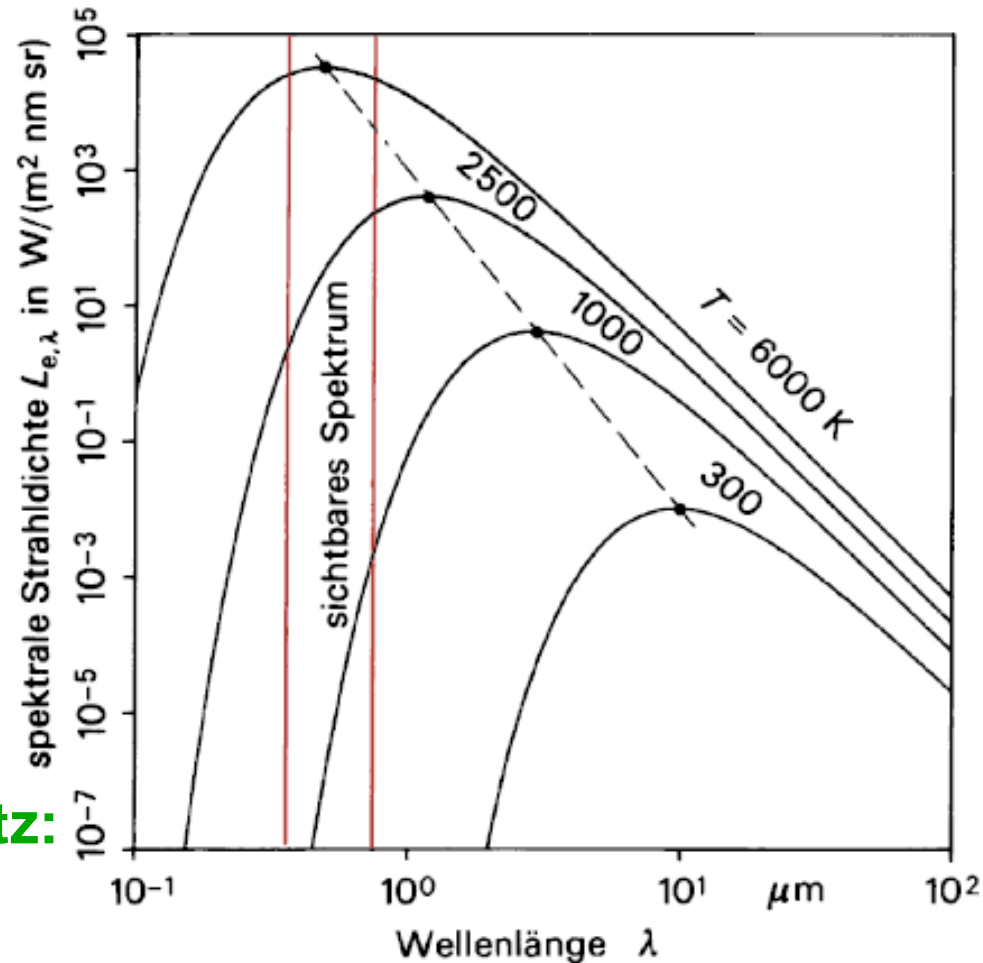
mit: $c_1 = 2hc^2$; $c_2 = hc/k$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Planck'sches Wirkungsquantum

Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} T = \text{const.}$$



6.3.3 Lichttechnische Größen

Berücksichtigung der Helligkeitsempfindlichkeit des Standardbeobachters

$$X_{v,\lambda}(\lambda) = K_m X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda)$$

$$X_v = K_m \int_{380nm}^{780nm} X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

$$K_m = 683 \text{ lm/W}$$

$X_{e,\lambda}$... strahlungsphysikalische Größe („pro Wellenlänge“)

$X_{v,\lambda}$... lichttechnische Größe („pro Wellenlänge“)

„separate Konversion“ für jede Wellenlänge !

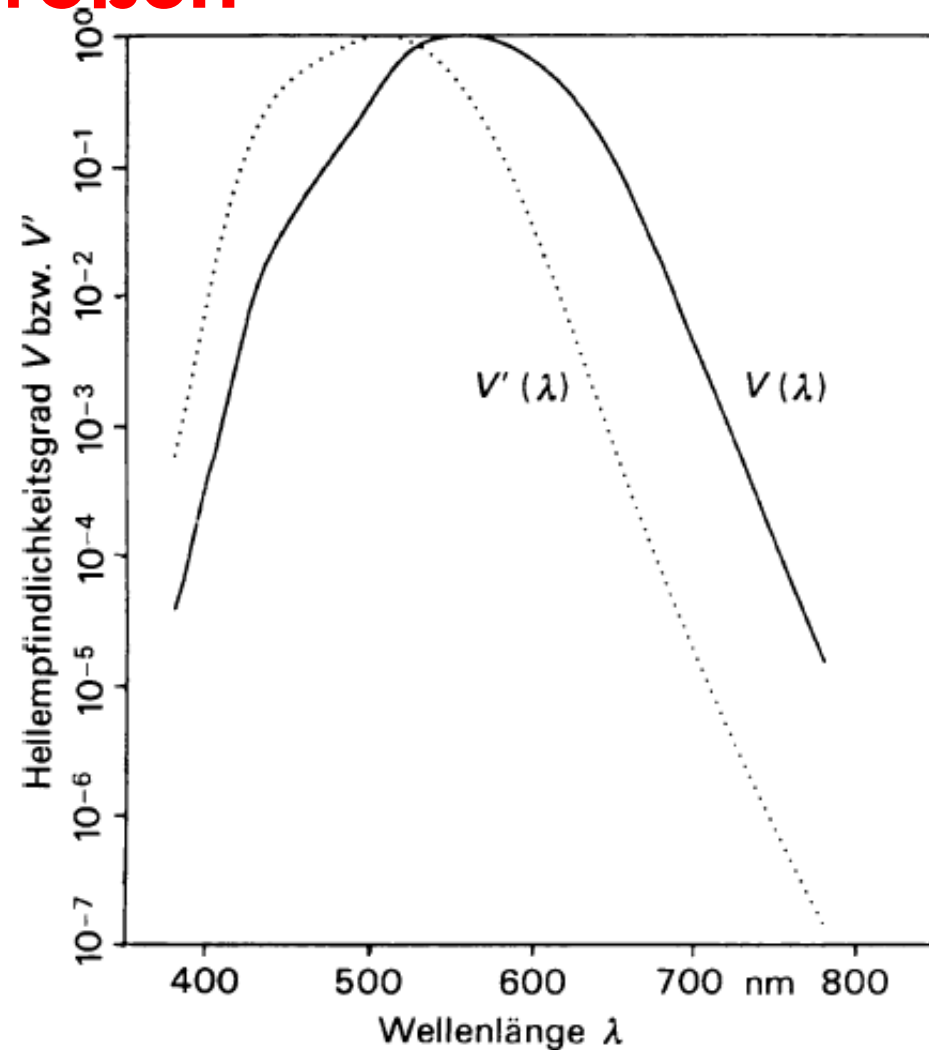


Abb. 6.71 Hellempfindlichkeitsgrad des Standard-Beobachters. $V(\lambda)$: Tagessehen, fotopische Anpassung
 $V'(\lambda)$: Nachtsehen, skotopische Anpassung

Frage: Rote ($\lambda = 660 \text{ nm}$) und grüne ($\lambda=560 \text{ nm}$) LED mit gleicher Strahlungsleistung - welche erscheint heller ?

Tabelle 6.5 Fotometrische Größen

Strahlungsphysikalische Größen			lichttechnische Größen		
Benennung	Zeichen	Maßeinheit	Benennung	Zeichen	Maßeinheit
Strahlungsenergie	Q_e	W s	Lichtmenge	Q_v	lm s
Strahlungsleistung	Φ_e	W	Lichtstrom	Φ_v	lm
spezifische Ausstrahlung	M_e	W/m ²	spezifische Lichtausstrahlung	M_v	lm/m ²
Strahlstärke	I_e	W/sr	Lichtstärke	I_v	cd = lm/sr
Strahldichte	L_e	W/(m ² sr)	Leuchtdichte	L_v	cd/m ²
Bestrahlungsstärke	E_e	W/m ²	Beleuchtungsstärke	E_v	lx = lm/m ²
Bestrahlung	H_e	W s/m ²	Belichtung	H_v	lx s

Tabelle aus: Hering et al., “Physik für Ingenieure“

Lichttechnische SI-Basiseinheit: 1 cd (1 Candela)
Abgeleitete Einheiten: Lumen (lm), Lux (lx)

6.4 Wellenoptik

6.4.1 Interferenz und Beugung

**Konstruktive
Interferenz:**

$$\Delta = m \lambda$$
$$\varphi = m 2\pi$$

Destruktive Interferenz:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$
$$\varphi = (2m + 1) \pi$$

$$m=0, 1, 2, 3, \dots$$

Δ ... Gangunterschied
 φ ... Phasenverschiebung

Solche Interferenzeffekte für Licht oft schwer zu beobachten !

Kohärenz

Wellen kohärent, wenn die gegenseitige Phasenbeziehung während der Beobachtung konstant bleibt.

Licht von verschiedenen Quellen: Praktisch immer **inkohärent → Interferenzeffekte praktisch nicht beobachtbar**

Spontane Emission:

Licht eines heißen Körpers von unabhängigen Atomen → Wellenzüge endlicher Länge.

sehr geringe **Kohärenzlänge** (größter Gangunterschied, bei dem gerade noch Interferenz beobachtet werden kann)

– **zeitliche Kohärenz**

Räumliche Kohärenz: Bei ausgedehnten Lichtquellen relevant.

Hoch kohärente Lichtquelle: **Laser** (**stimulierte Emission**)

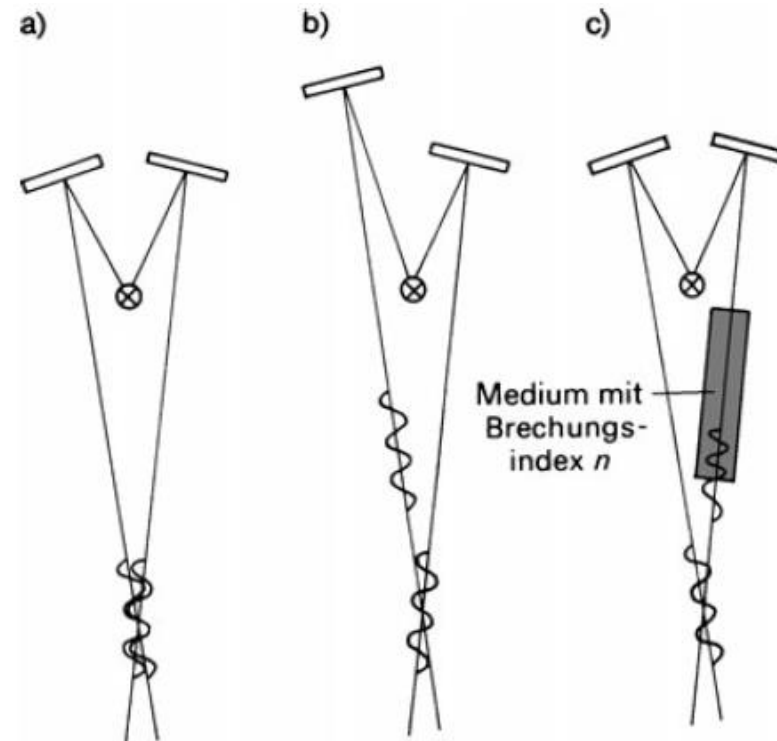


Abb. 6.75 Erzeugung kohärenter Wellenzüge durch Reflexion: a) konstruktive Interferenz, b) keine Interferenz, zu große geometrische Wegdifferenz, c) keine Interferenz, zu große optische Wegdifferenz

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Interferenz an dünnen Schichten:

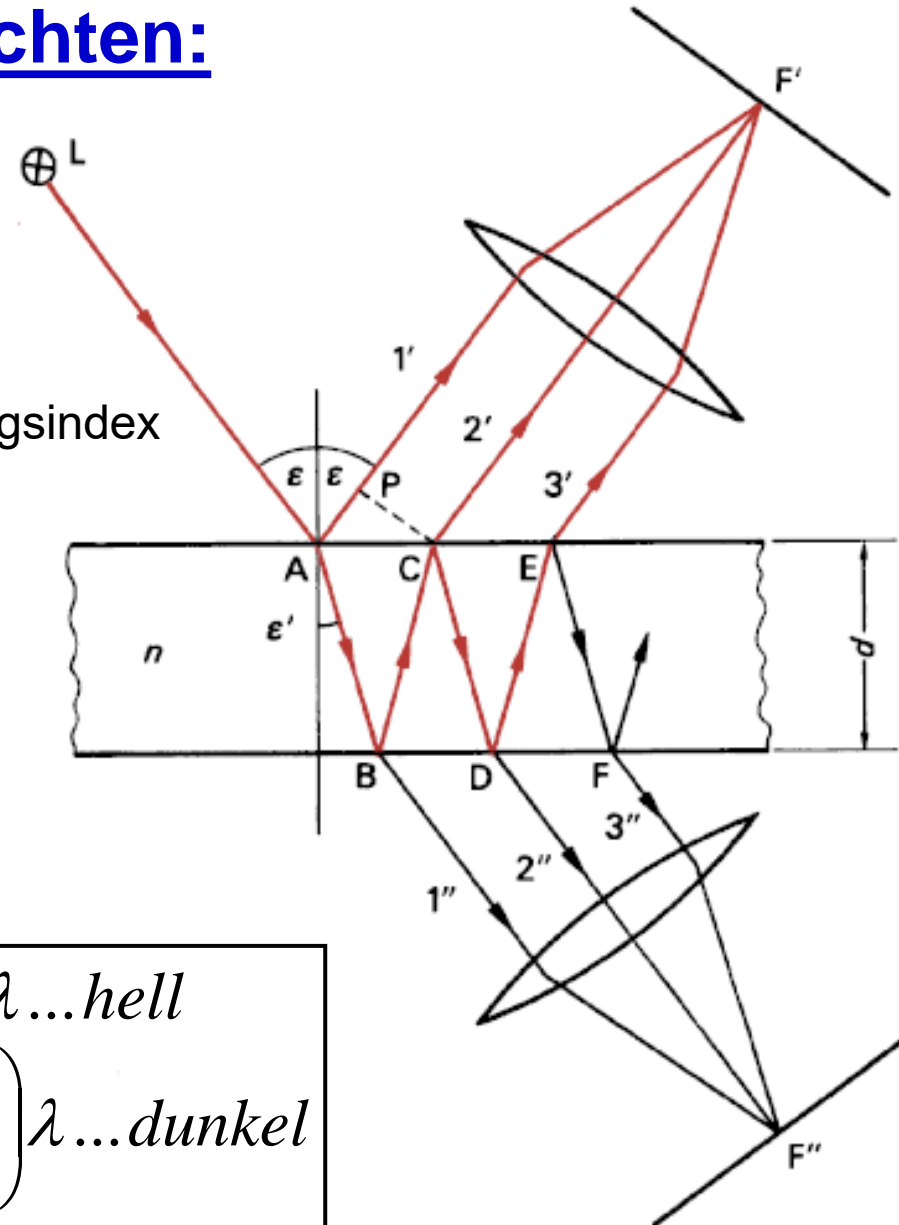
Interferenzen gleicher Neigung:

Optischer Gangunterschied
zwischen Teilstrahlen 1' und 2':

$$n(AB+BC)-AP \quad n \dots \text{Brechungsindex}$$

Zusätzlich: Phasensprung
um π (Gangunterschied $\lambda/2$)
für Reflexion am optisch
dichteren Medium (= Teilstrahl
1' bei Reflexion bei A)

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon} - \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} m\lambda \dots \text{hell} \\ \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \dots \text{dunkel} \end{cases}$$



Interferenzbedingung nur für bestimmte Einfallswinkel ε erfüllt !

Durchgelassenes Licht (kein Phasensprung !):

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon} = \begin{cases} m\lambda \dots \text{hell} \\ \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \dots \text{dunkel} \end{cases}$$

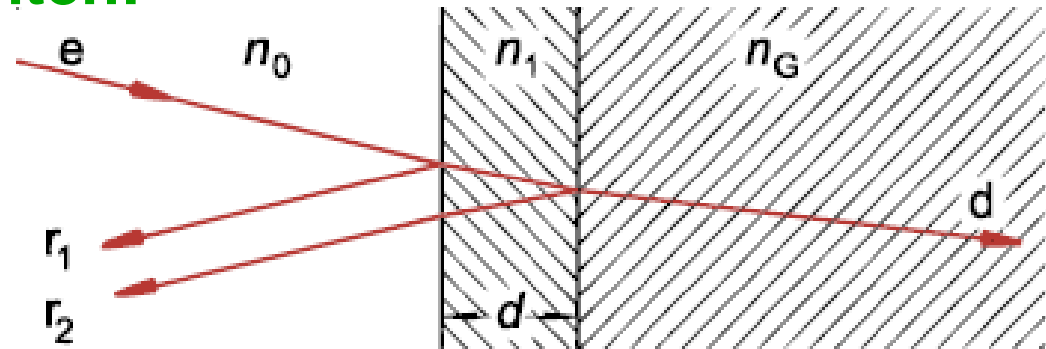
**komplementär zu Interferenz des reflektierten Lichts
(Energieerhaltung !)**

Farben dünner Schichten (z.B. Interferenzfarben von Seifenblasen): ε und d verändern sich.

Reflexvermindernde Schichten:

für $n_G > n_1 > n_0$:

Phasensprünge für beide Reflexionen !



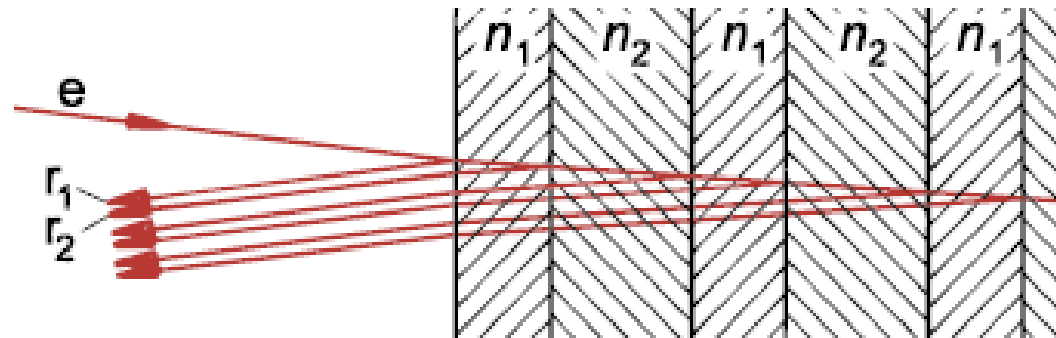
Minimale Reflexion (= maximale Transmission) für senkrechten Einfall:

$$\Delta = 2n_1d = \frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad d = \frac{\lambda}{4n_1} \quad \text{„}\lambda/4 \text{ Schicht“}$$

Dielektrische Spiegel: Reflexionsgrade $> 99,9 \%$ (für bestimmtes λ)

Vielschichtsystem mit:

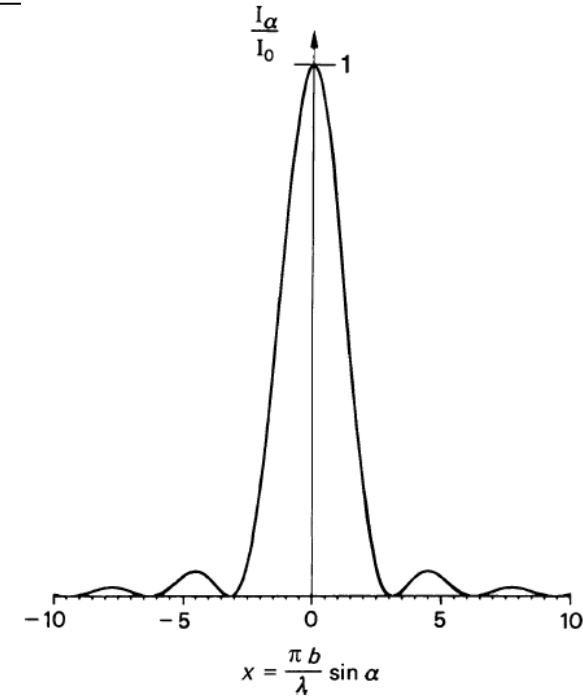
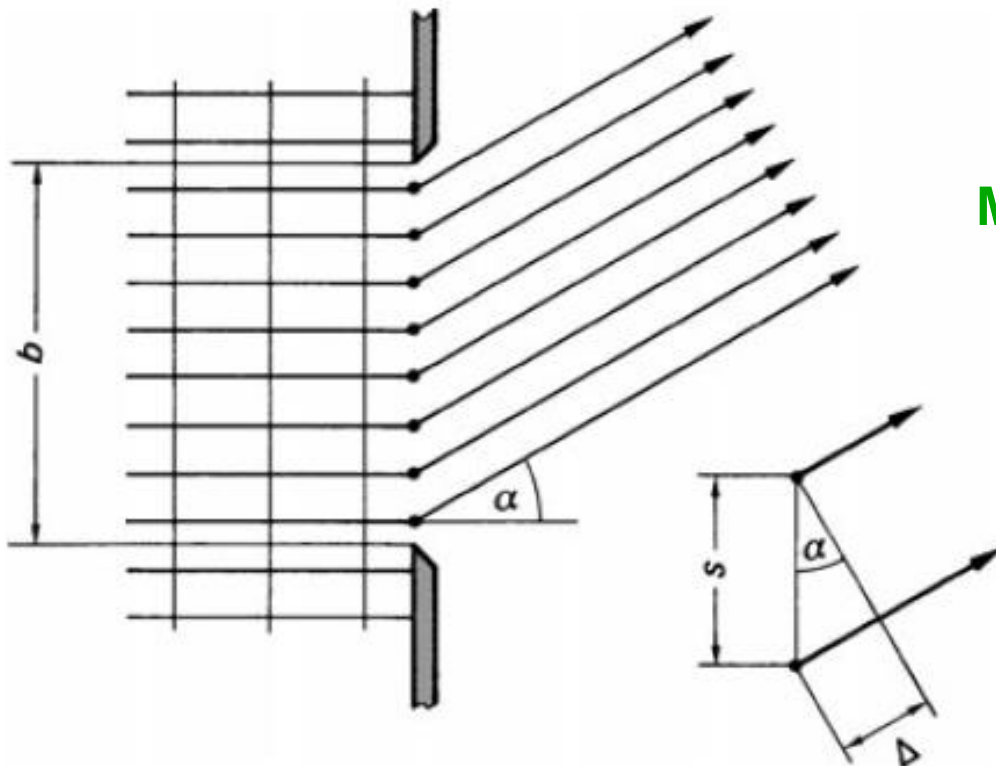
$$n_1d_1 = n_2d_2 = \frac{\lambda}{4}$$



Reflexion weil nur jeder zweite Teilstrahl einen Phasensprung erfährt

Beugung am Spalt:

Parallelstrahlbündel tritt durch Spalt mit $d \sim \lambda \rightarrow$ keine einfache Begrenzung sondern Beugung



Minima für:

$$\Delta = \frac{b}{2} \sin \alpha = m \frac{\lambda}{2}$$

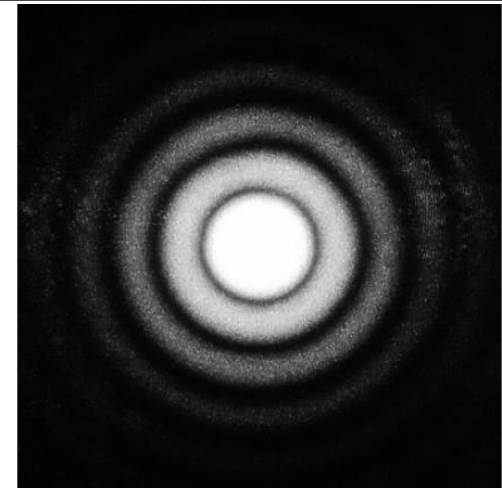
$$\sin \alpha_m = \pm m \frac{\lambda}{b}$$

dazwischen Maxima

Beugung an kreisförmiger Blende (**Lochblende**) mit Durchmesser d :

Erster dunkler Ring unter:

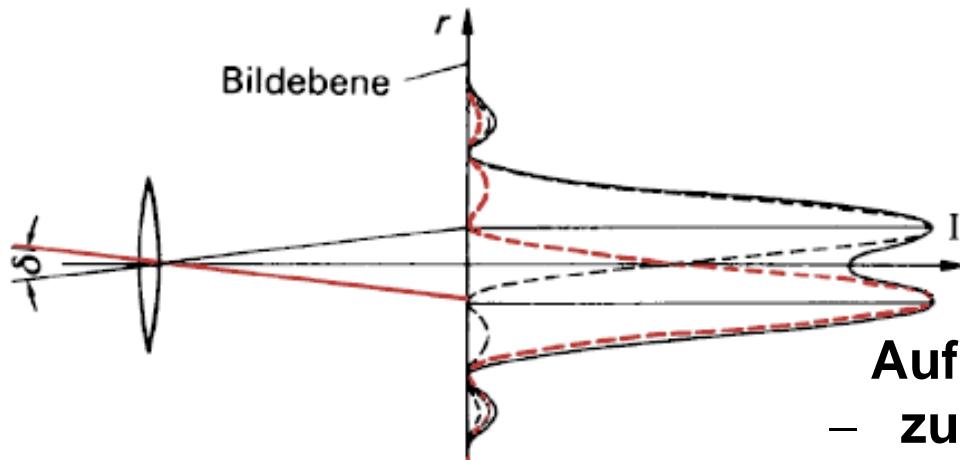
$$\sin \alpha_I = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$



Auflösungsvermögen optischer Instrumente:

Zwei Objektpunkte unter dem Winkel δ können aufgelöst werden, wenn gilt:

$$\delta \geq 1,22 \frac{\lambda}{d}$$



Auflösungsvermögen steigt mit:

- zunehmendem **Objektivdurchmesser, d**
- abnehmender **Wellenlänge, λ**

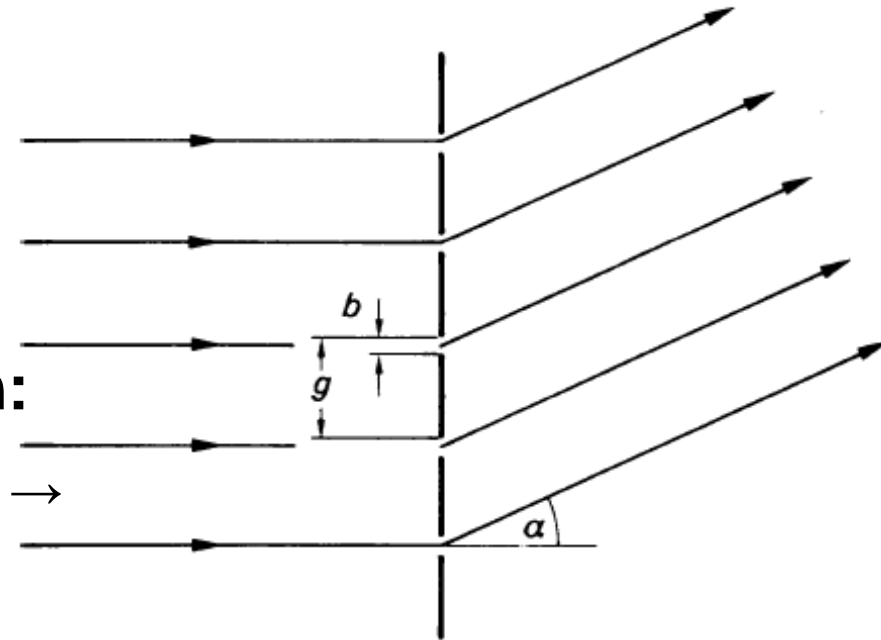
Beugung am Gitter - Vielstrahlinterferenz

Grundsätzlich:

Kombination der Interferenz am Einzelspalt mit Interferenz von Licht benachbarter Spalte

Typische Gitter in Spektrometern:

~1000 Striche / mm; Breite von ~50 mm →
~50000 interferierende Teilstrahlen



Interferenzeffekte aufgrund benachbarter Spalte dominant !

Konstruktive Interferenz für:

$$\sin \alpha_m = \pm m \frac{\lambda}{g}$$

n ... Beugungsordnung; g ... Abstand zwischen den Gitterlinien

Je mehr Spalte, p , zur Interferenz beitragen, umso schärfer werden die Maxima !

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

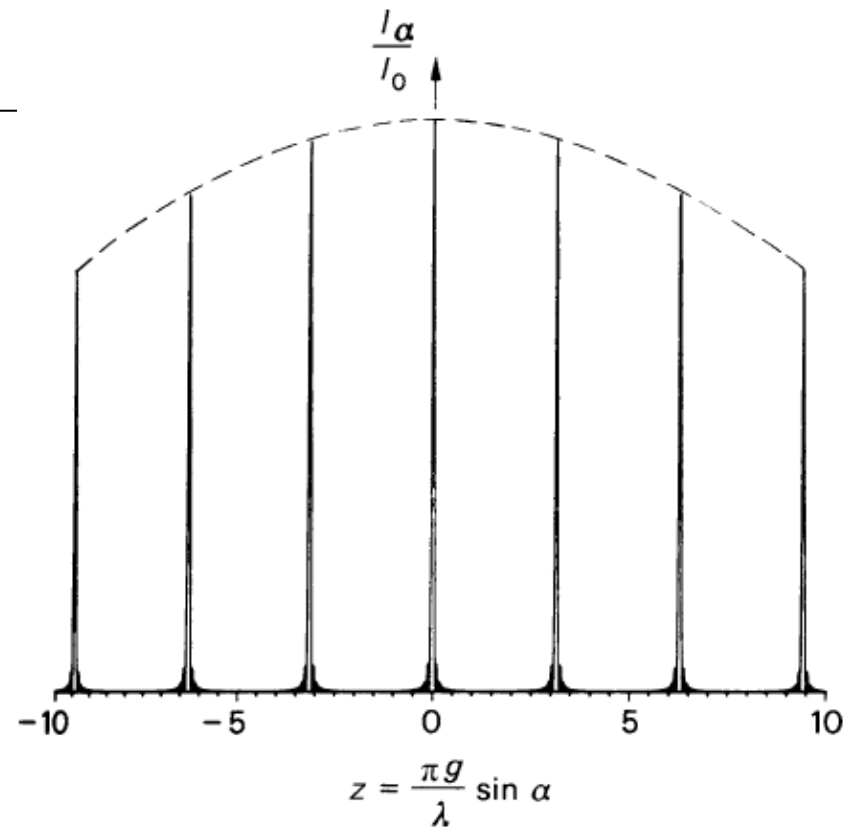
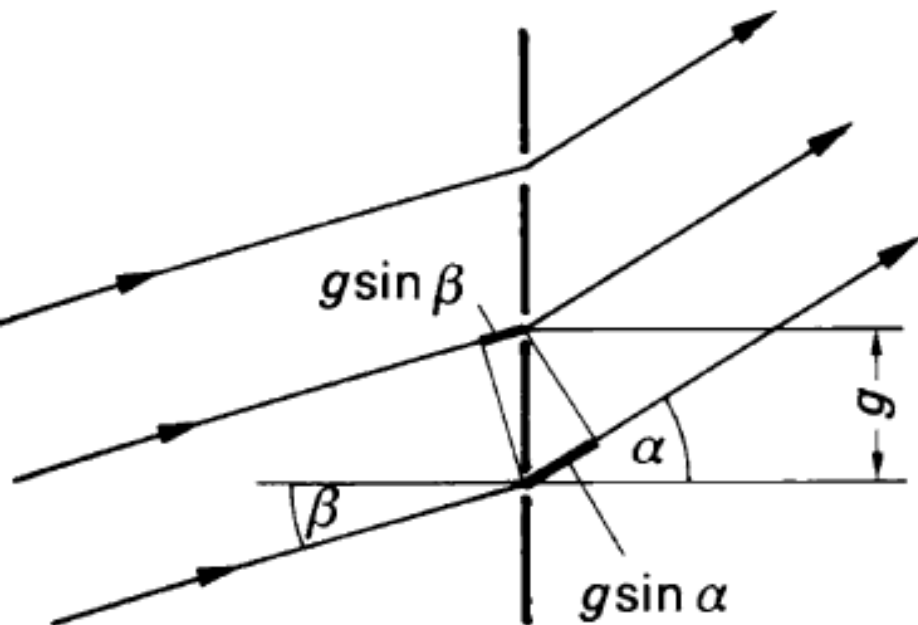


Abb. 6.94 Beugungsfunktion eines Gitters mit $p = 40$ Spalten

Schräger Einfall:

Abstand der Beugungsmaxima steigt !

$$\sin \alpha_m - \sin \beta = \pm m \frac{\lambda}{g}$$

Spektralapparate

Zentrales Element: Monochromator, der eine spektrale Zerlegung des Lichts durchführt.

Gittermonochromator:

(Beugung und Interferenz)

Winkelstellung des Gitters bestimmt, Licht welcher Wellenlänge den Monochromator passieren kann.

Bevorzugung einer bestimmten Beugungsordnung:

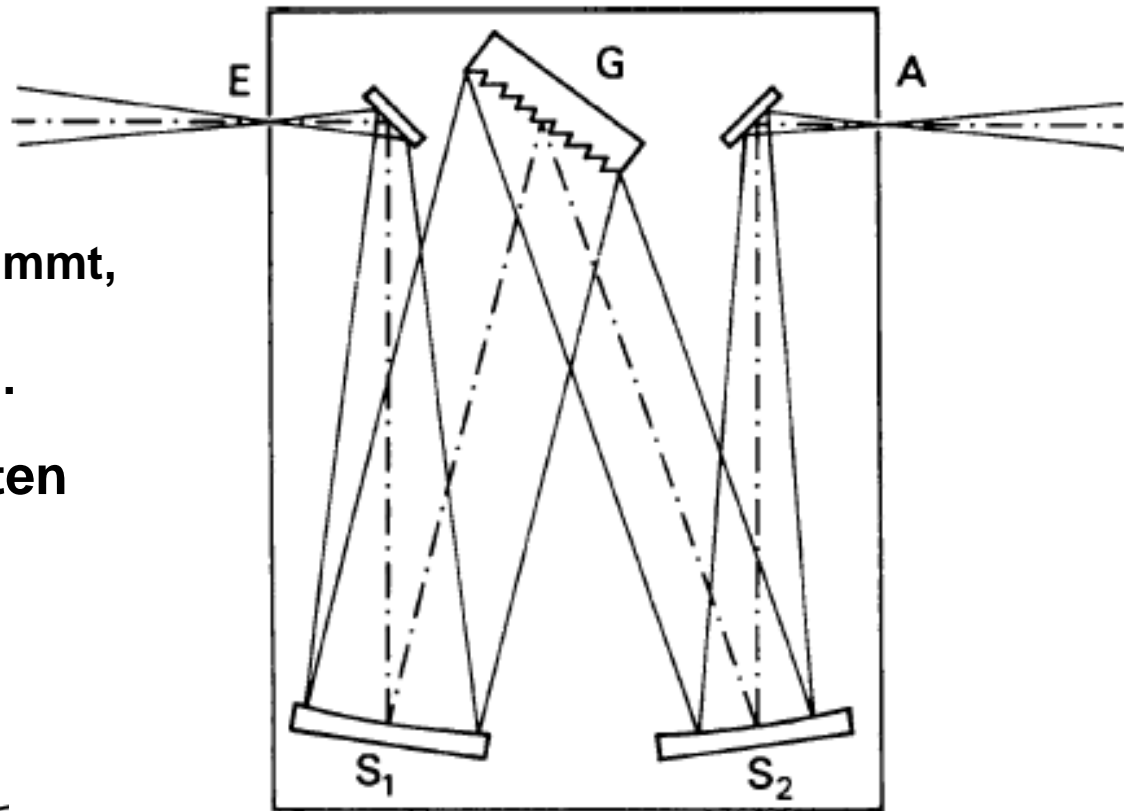


Abb. 6.97 Gittermonochromator, schematisch

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

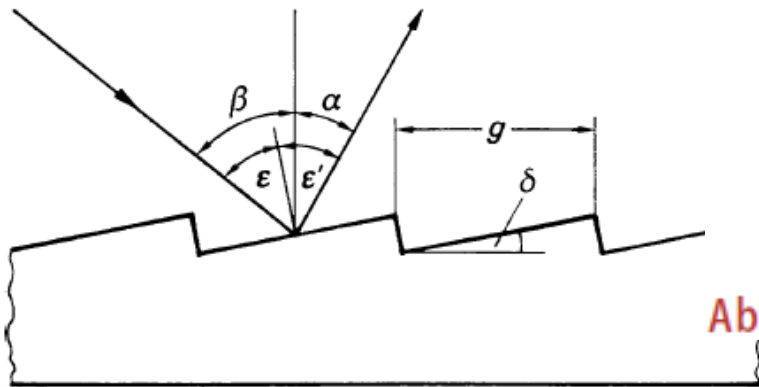


Abb. 6.98 Echelette-Gitter

Prismenmonochromator:

Ablenkwinkel = $\delta(n)$

Dispersion: $n = n(\lambda)$

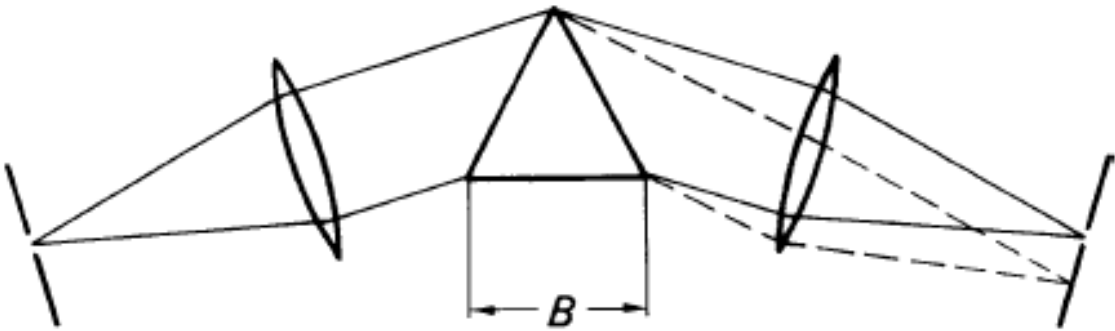


Abb. 6.100 Schema eines Prismenspektrometers

Röntgenbeugung am Kristallgitter:

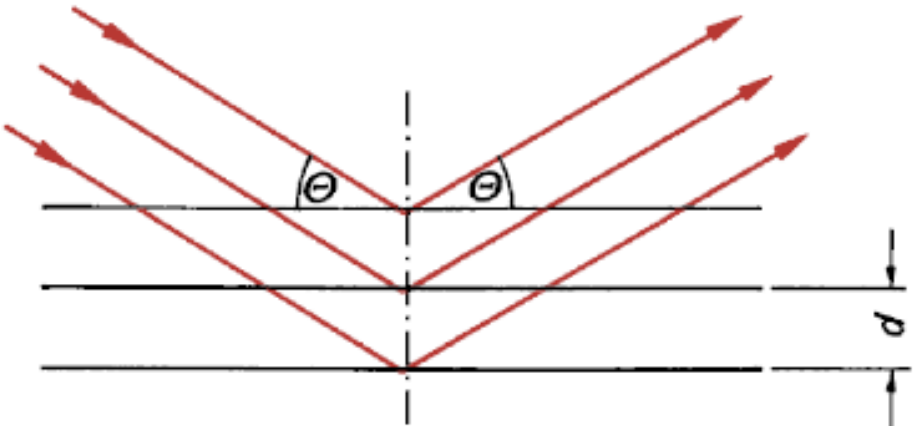


Abb. 6.105 Reflexion von Röntgenstrahlen an einer Netzebenenschar

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Netzebenenabstände im Kristallgitter
 $\sim \text{\AA} (10^{-10} \text{ m}) \rightarrow$

elektromagnetische Strahlung
entsprechend kurzer Wellenlänge !

Bragg'sche Bedingung:
(konstruktive Interferenz)

$$2d \sin \Theta = m\lambda$$

6.4.2 Polarisation des Lichts

Licht ist eine Transversale elektromagnetische Welle

Natürliches Licht typischerweise: kurze Wellenzüge mit zufälliger Polarisation (i.e., alle Schwingungsrichtungen kommen vor)

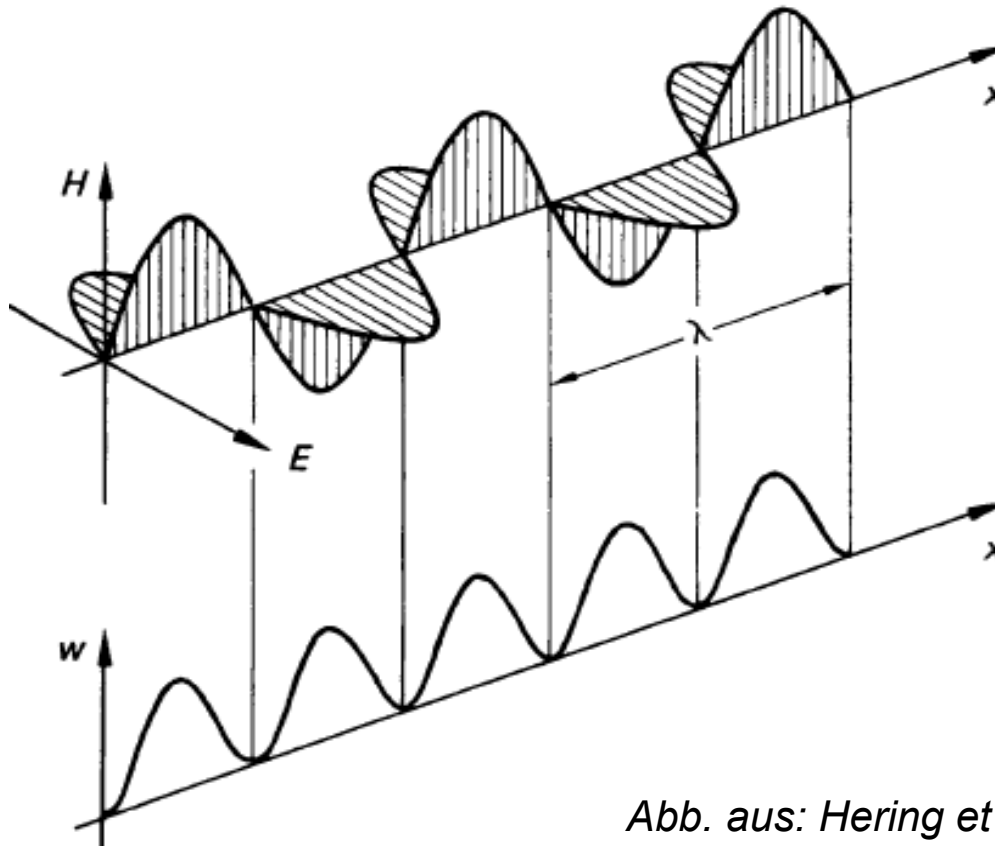


Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Polarisator:

- Erzeugt **linear polarisiertes Licht**
- E-Vektor schwingt in von Polarisator vorgegebener Ebene

Analysator:

Analysiert
Polarisationszustand

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$

I ... Intensität nach den optischen Elementen
 I_0 ... Intensität vor den optischen Elementen
 φ ... Winkel zwischen Polarisationsrichtungen
 von Polarisator und Analysator

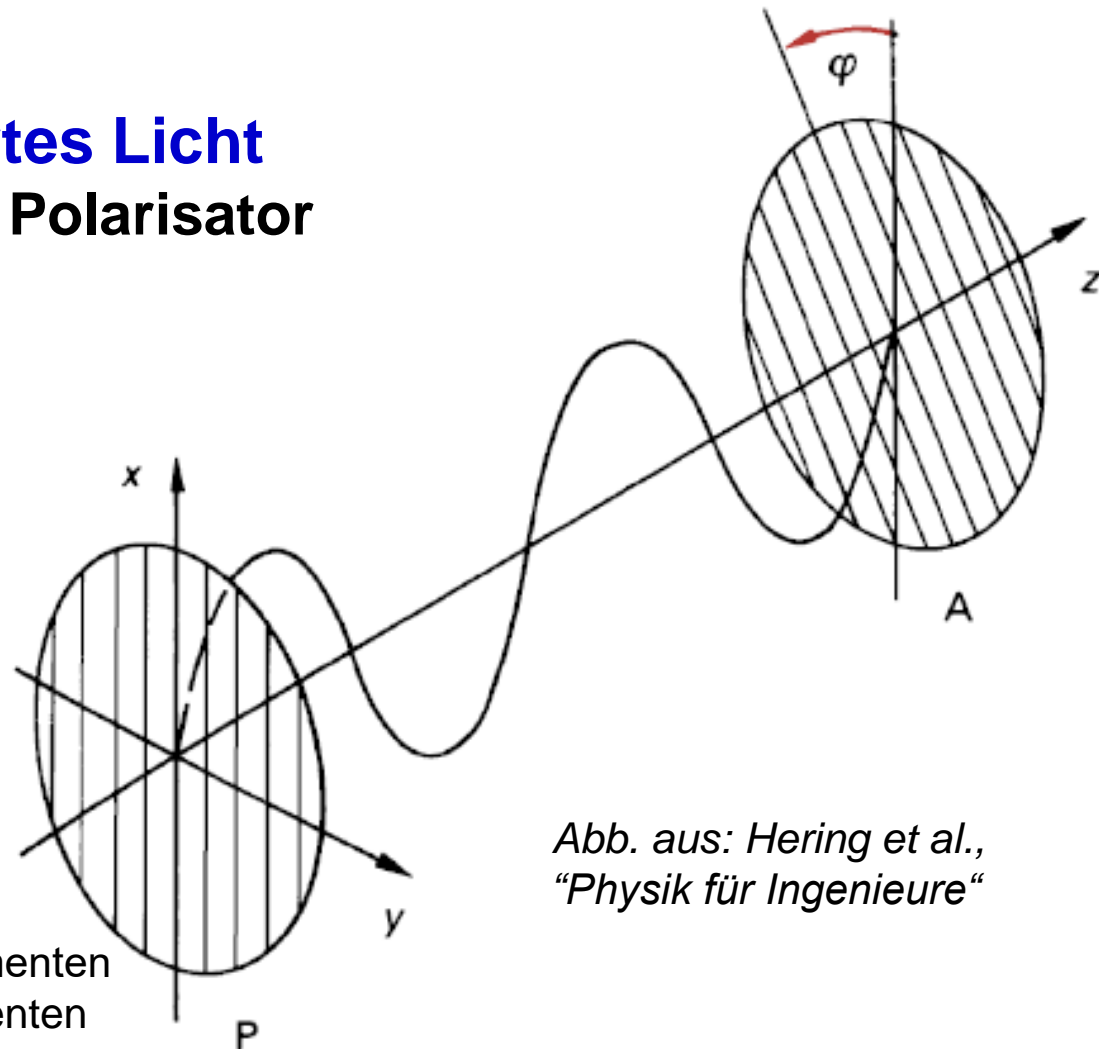


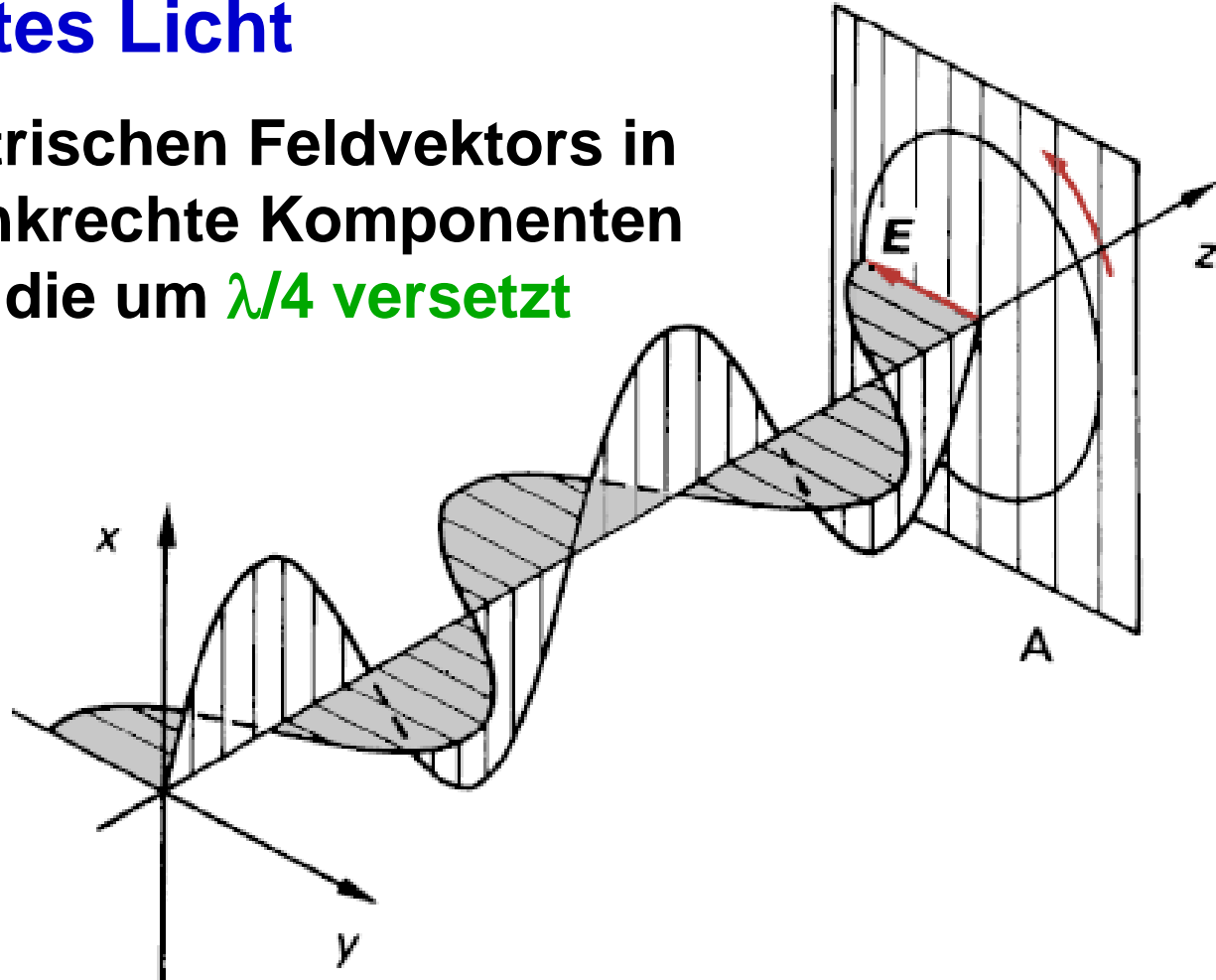
Abb. aus: Hering et al.,
"Physik für Ingenieure"

Abb. 6.112 Linear polarisiertes Licht

Senkrecht zueinander polarisierte Wellen interferieren nicht !

Zirkular polarisiertes Licht

Aufteilung des elektrischen Feldvektors in zwei zueinander senkrechte Komponenten gleicher Amplitude, die um $\lambda/4$ versetzt schwingen.



Elliptisch polarisiertes Licht:

Gangunterschied $\neq \lambda/4$ oder unterschiedliche Amplituden

Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Erzeugung von polarisiertem Licht:

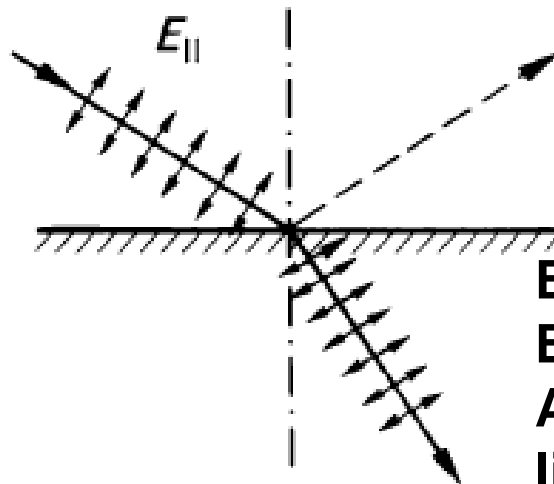
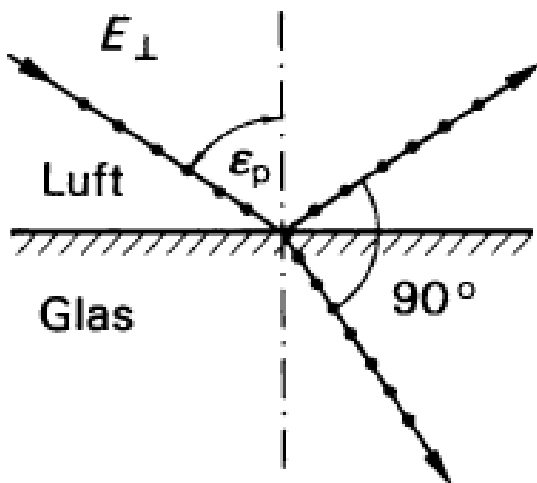
Reflexion und Brechung

An dielektrischer Oberfläche reflektiertes Licht ist teilweise polarisiert (präferentiell senkrecht auf Einfallsebene)

Polarisation vollständig, wenn reflektierter und transmittierter Strahl senkrecht aufeinander.

$$\sin \varepsilon_p = n \sin(90^\circ - \varepsilon_p) = n \cos \varepsilon_p$$

Brewster'sches Gesetz:



$$\tan \varepsilon_p = n$$

Erklärung: angeregte Elektronen haben Abstrahlcharakteristik wie lineare Antenne

Doppelbrechung z.B. isländischer Kalkspat (CaCO_3)

Anisotrope Lichtausbreitung (i.e. richtungs- und polarisationsabhängiges c im Material)

Ordentlicher (o) und außerordentlicher (e) Strahl:

- unterschiedliche Polarisation
- unterschiedliche Ausbreitungsrichtung

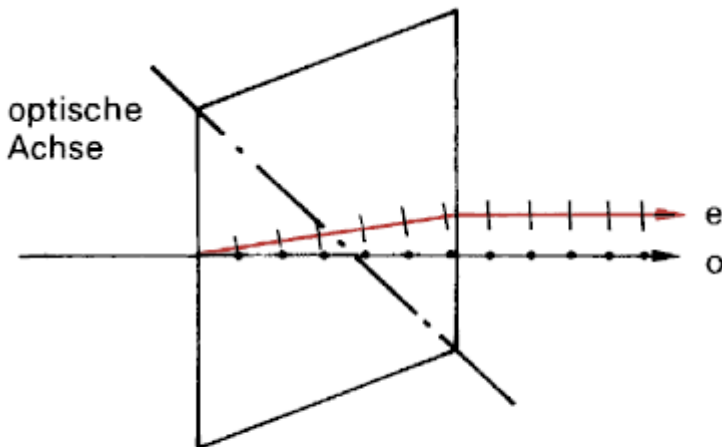


Abb. 6.117 Strahlenverlauf im Hauptschnitt eines Kalkspats

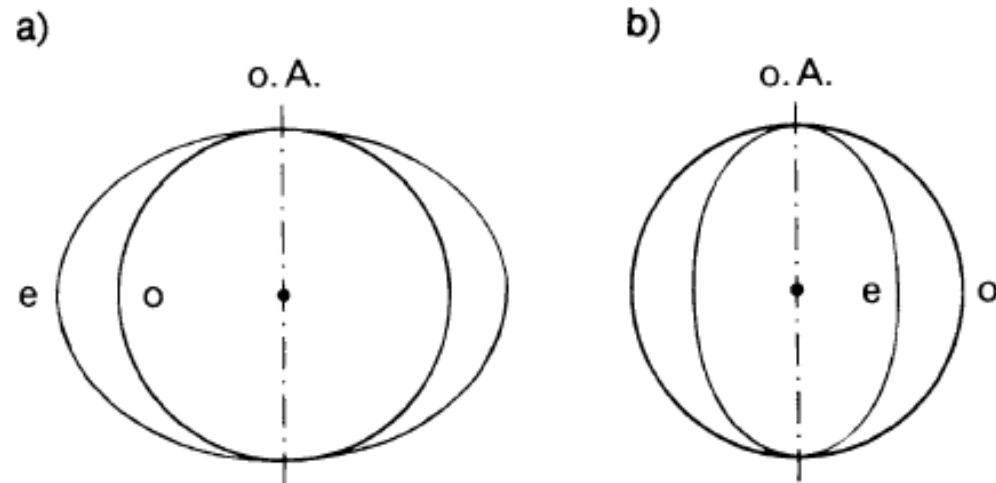
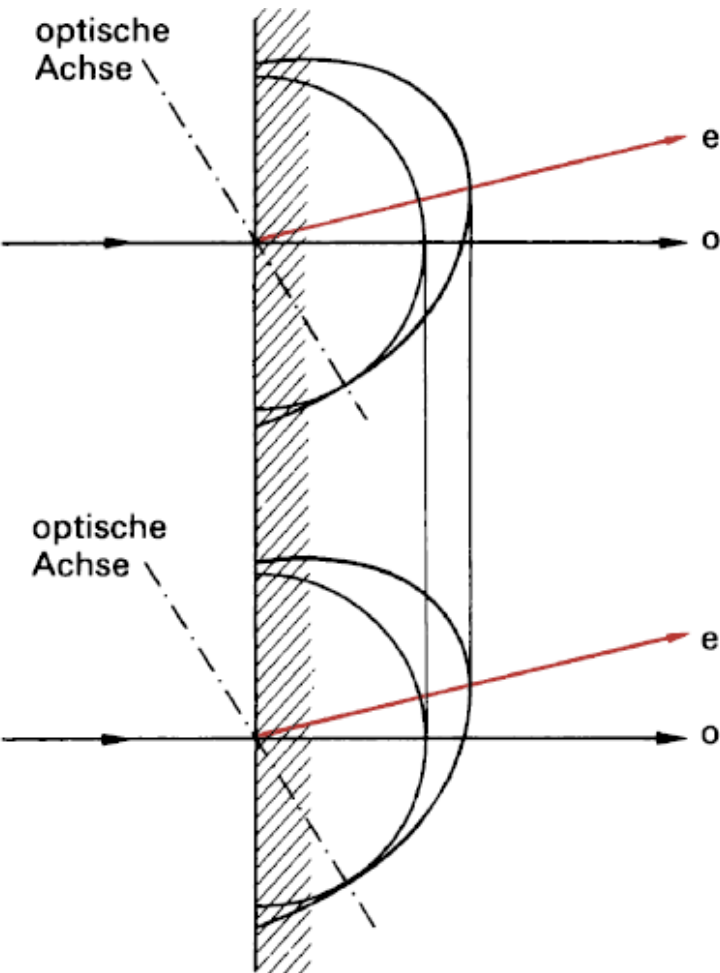


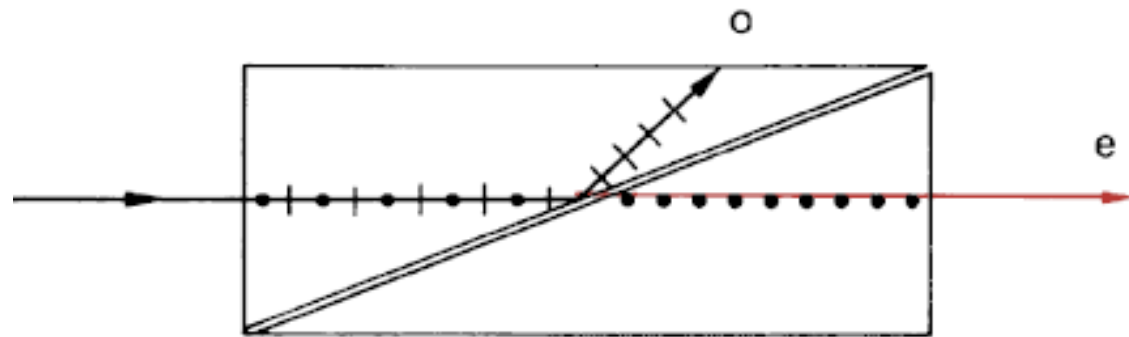
Abb. 6.118 Wellenflächen in einachsigen Kristallen. a) negativer Kristall (z. B. Kalkspat) b) positiver Kristall (z. B. Quarz)

Optische Achse: Richtung in die c für o- und e-Strahl gleich ist

Erklärung: Ausbreitungsrichtungen



Erzeugung linear polarisierten Lichts: Glan-Thompson Prisma



- optische Achse senkrecht auf Zeichenebene
- o-Strahl durch Totalreflexion abgelenkt

Abb. 6.119 Aufspaltung von Strahlen, die schräg zur optischen Achse auf einen Kalkspat fallen

$\lambda/4$ Plättchen zur Erzeugung zirkular polarisierten Lichts

Keine Doppelbrechung !

Bedingung für zirkular polarisiertes Licht bei Bestrahlung mit 45° zur optischen Achse linear polarisierten Lichts:

$$d(n_o - n_e) = (2k + 1)\frac{\lambda}{4}$$

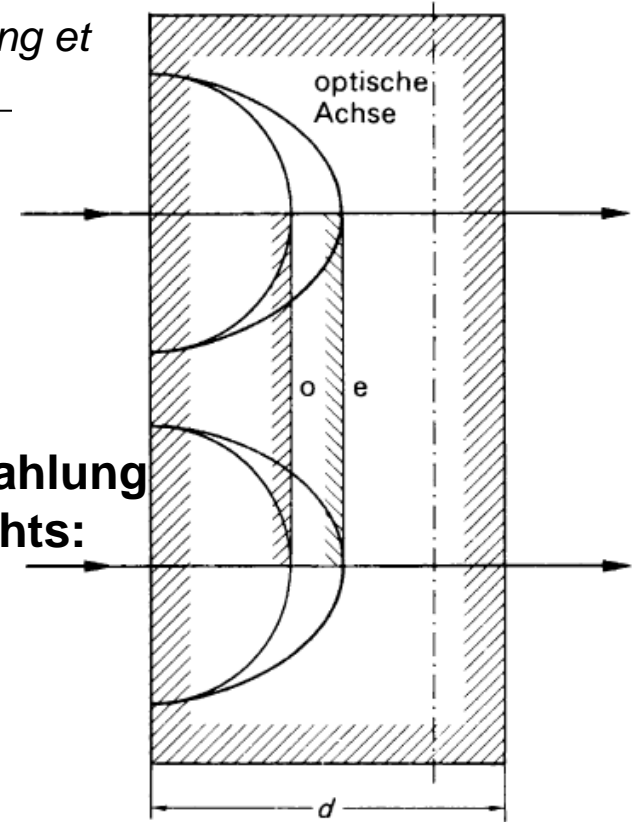


Abb. 6.121 Senkrechter Lichteinfall auf einen Kalkspat, der parallel zur optischen Achse geschnitten ist

Dichroismus:

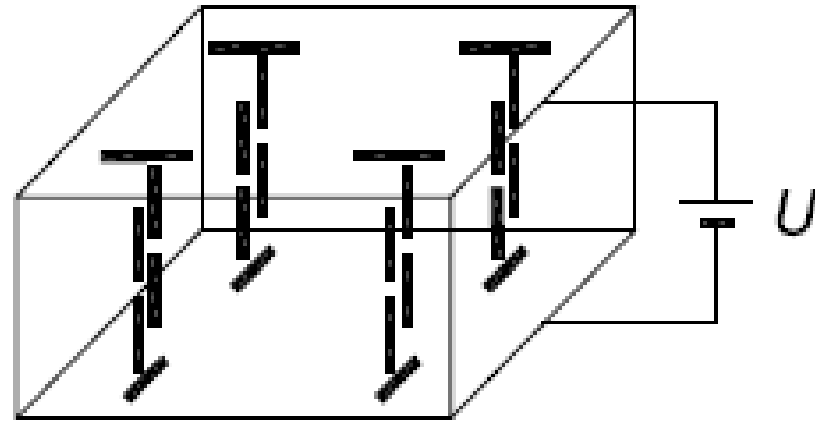
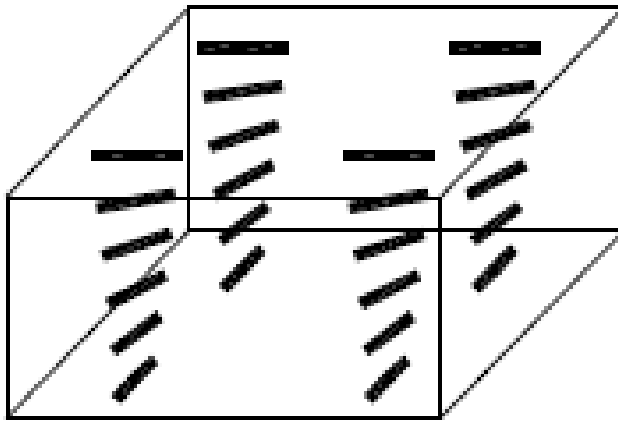
Material mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten für unterschiedliche Polarisation

- z.B. doppelbrechende Materialien mit unterschiedlichen λ -abhängigen Absorptionskoeffizienten für o- und e-Strahl
- Folien mit orientierten stark anisotropen Molekülen

Polarisationsgrad typischerweise $< 99\%$

Flüssigkristallanzeige:

Flüssigkristalldrehzelle zwischen gekreuzten Polarisatoren



Flüssigkristallmoleküle durch anisotrope Oberflächen ausgerichtet (verdrillte nematische Phase)

Ausrichtung durch mittels angelegter Spannung erzeugtem elektrischen Feld zerstört

- Material doppelbrechend (|| zur Molekülachse polarisierte Komponente des Lichts langsamer)
- Richtige Dimensionierung: Drehung der Polarisationssebene um 90°

sehr geringe Leistungsaufnahme ($\sim 5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)

Optische Aktivität:

Fähigkeit eines Materials die Polarisationssebene linear polarisierten Lichtes zu drehen.

z.B. in Quarz in bestimmten Geometrien – schraubenförmige Anordnung der Atome

Modellvorstellung: Einfallendes linear polarisiertes Licht in links und rechts zirkular polarisierte Komponenten aufgespalten, die sich unterschiedlich schnell ausbreiten.

Drehwinkel proportional zu Kristalldicke: $\alpha = [\alpha]d$

Optische Aktivität auch in Lösungen chiraler Moleküle (z.B. verschiedene Zucker → konzentrationsabhängig (Konzentrationsmessung**))**

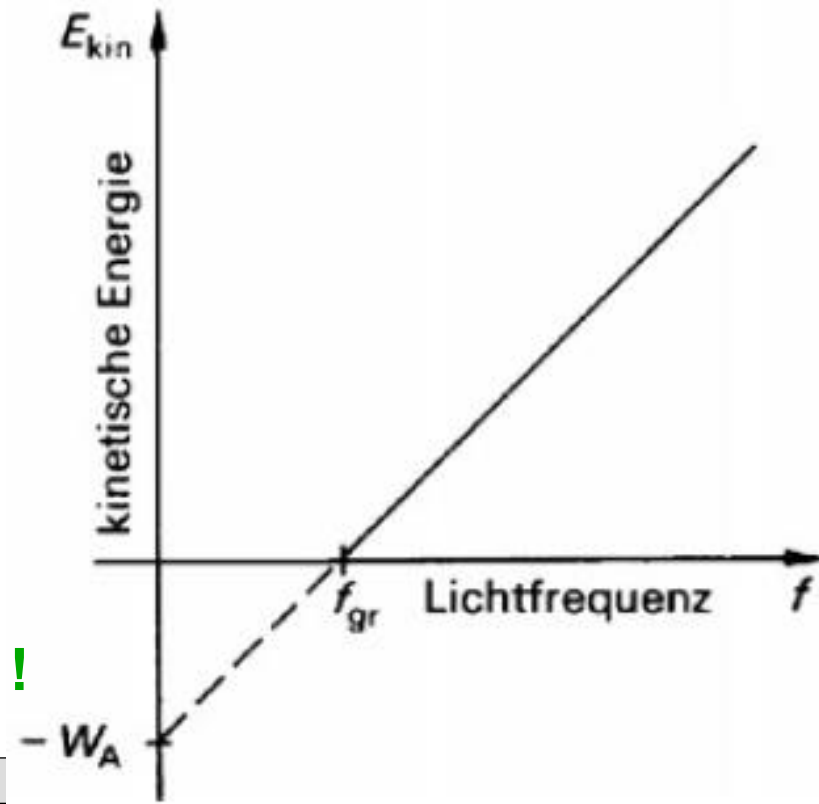
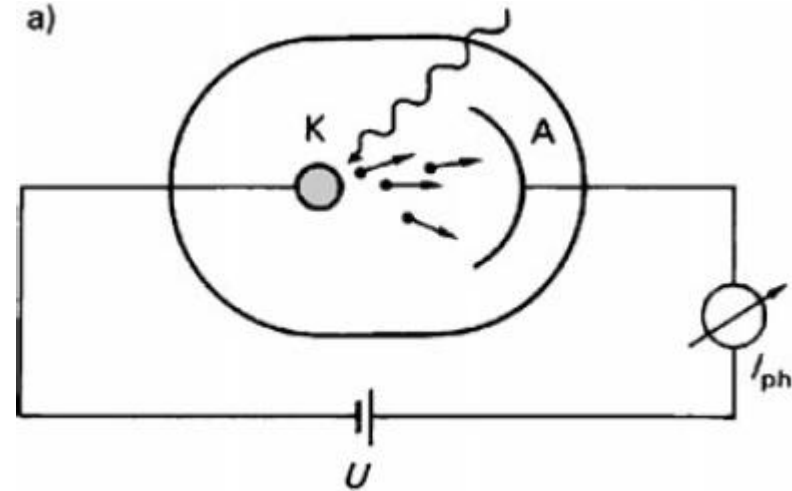
6.5 Quantenoptik

6.5.1 Lichtquanten

Photoelektrischer Effekt:

- E_{kin} der Photoelektronen abhängig von Frequenz des eingestrahlten Lichts, nicht von der Intensität !
- Es gibt eine Grenzfrequenz f_{gr} unterhalb der Licht keine Photoelektronen erzeugt
- Erhöhung der Lichtintensität: Strom der emittierten Photoelektronen nimmt zu.

Inkompatibel mit Erwartungen aufgrund der Wellennatur des Lichts !



Lichtquantenhypothese (von Einstein)

Energie wird in diskreten Paketen (Lichtquanten oder Photonen) transportiert.

$$E_{ph} = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

praktischer
Zusammenhang: $E[eV] = \frac{1239}{\lambda[nm]}$

Erklärung des Photoelektrischen Effekts:

$$E_{kin} = hf - W_A$$

E_p ... Energie des Photons; h ... Plancksches Wirkungsquantum
 f ... Lichtfrequenz; λ ... Lichtwellenlänge; c ... Lichtgeschwindigkeit

W_A ... **Austrittsarbeit** des Metalls, die überwunden werden muss, um das Elektron vom Metall zu „lösen“

Beispiel: Lichtelektrischer Effekt in Na: für $\lambda > 451 \text{ nm}$ detektiert man keine Photonen mehr. Wie groß ist W_A für Na ?

Impuls eines Photons

Photonen haben keine Ruhemasse, aber dynamische Masse:

$$E_{ph} = hf = mc^2 \quad \Rightarrow \quad m_{ph} = \frac{hf}{c^2}$$

$$p_{ph} = mc \quad \Rightarrow \quad \boxed{p_{ph} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}}$$

6.5.2 Welle-Teilchen Dualismus des Lichts

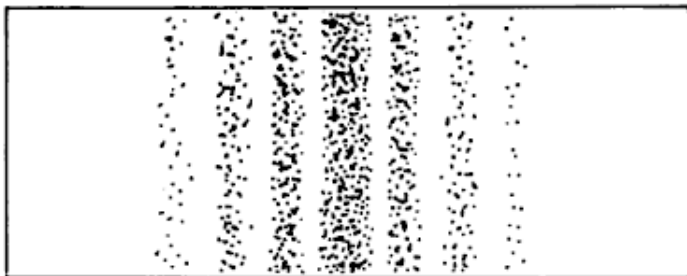
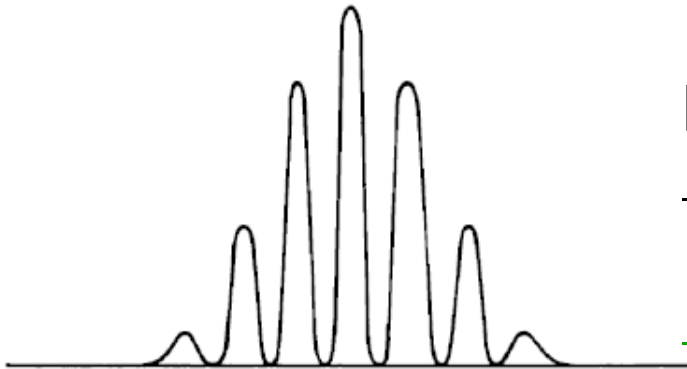
Licht zeigt bei verschiedenen Effekten (Beugung, Interferenz) **Wellencharakter**, bei anderen (lichtelektrischer Effekt, Stoßprozesse) **Teilchencharakter**.



Vereinheitlichende Theorie:
Quantenelektrodynamik

Beispiel: Beugung am Doppelspalt

- Am Detektor werden an diskreten Punkten einzelne (ungeteilte) Photonen beobachtet
- **Wahrscheinlichkeitsfunktion** für Auftreffen folgt Erwartung aus der Wellenoptik !



6.5.3 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Vereinfachtes Bild: Es gibt zwei energetisch unterschiedliche Zustände = **Grundzustand** und **angeregter Zustand**; z.B.: Elektron mit zwei möglichen diskreten Zuständen.

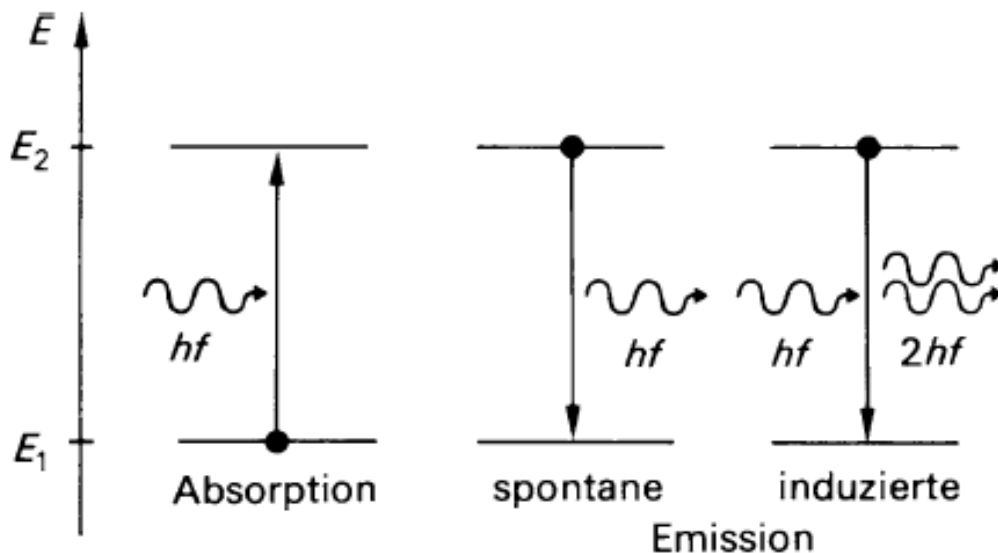


Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

$$E_{ph} = hf = E_2 - E_1$$

Absorption:

Photon verschwindet und regt Elektron von E_1 zu E_2 an.

Emission:

Nach mittlerer Lebensdauer t fällt Elektron von E_2 zu E_1 und ein Photon wird emittiert.

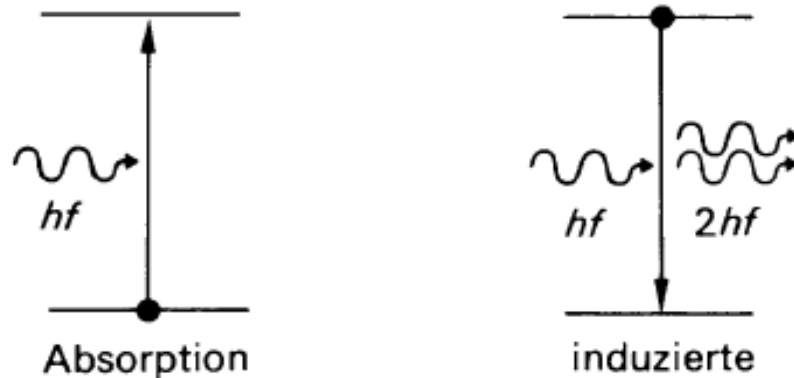
Stimulierte (induzierte) Emission:

Photon stimuliert Übergang von E_2 zu $E_1 \rightarrow 2$ Photonen.

6.5.4 Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Stimulierte Emission: Licht gleicher Frequenz, gleicher Polarisation und gleicher Phasenlage (kohärent)



Problem: in 2-Level System im thermodynamischen Gleichgewicht wird immer die Absorption überwiegen !



Besetzungsinversion

Besetzungsinversion:

ausreichende Anregung:

- Festkörperlaser - optisches Pumpen (starke Lampen)
- Gaslaser - Stöße in Gasentladungsröhre

3- oder 4-level System

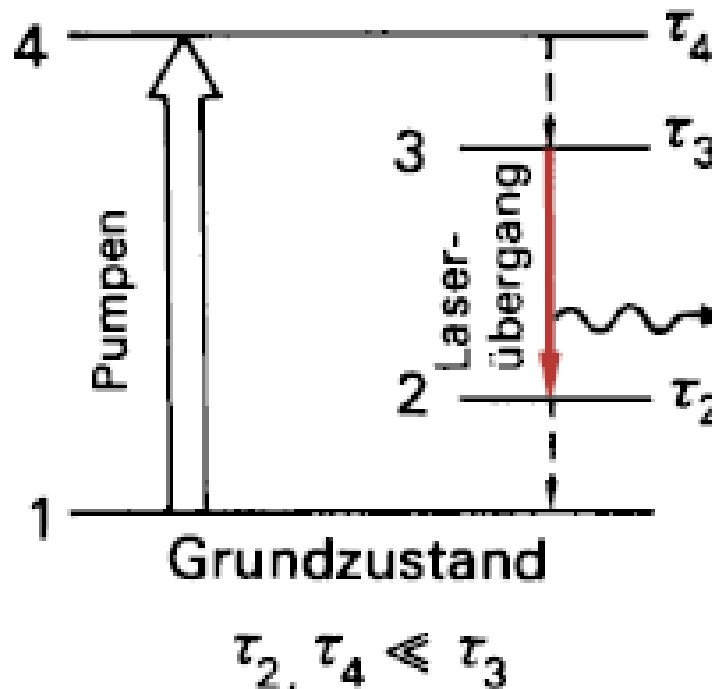
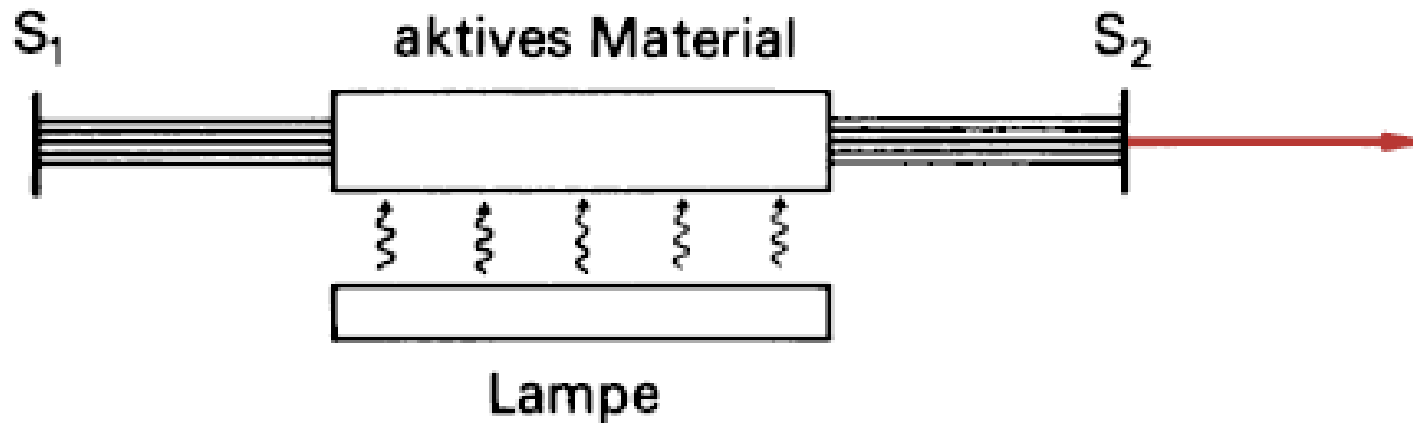


Abb. aus: Hering et al., "Physik für Ingenieure"

Photon wird durch spontane Emission emittiert → erzeugt durch stimulierte Emissionen kohärente Photonen, solange Besetzungsinversion aufrechterhalten → **Photonenlawine** → einbringen in **optischen Resonator**



Auskoppelspiegel teildurchlässig

Im Resonator bildet sich eine stehende Welle aus !

Erzeugtes Licht: **hoch monochromatisch, polarisiert, zeitlich und räumlich hoch kohärent**

Anwendungen:

optische **Messtechnik**, **Materialbearbeitung**, **Nachrichtentechnik**
(Glasfaserkommunikation, Datenspeicherung), **Medizin und Biologie**

Lasertypen: Gepulste Laser ↔ Dauerstrichlaser

Gaslaser: gepumpte Gasentladung

Festkörperlaser: Kristalle oder Gläser, die mit Farbzentren dotiert werden; mit Lampen oder Diodenlaser gepumpt

Halbleiterlaser: p-n Übergang unter hohen Stromdichten; häufig Heterostrukturen aus verschiedenen Halbleitermaterialien um Besetzungsinversion zu erleichtern.

Flüssigkeitslaser: Organische Farbstoffe, die optisch (Blitzlampen oder Laser) gepumpt werden – typischerweise durchstimmbar

6.5.5 Materiewellen

Elektromagnetische Wellen → Teilchencharakter

Warum nicht: **Teilchen** → **Wellencharakter**

De Broglie Beziehung:

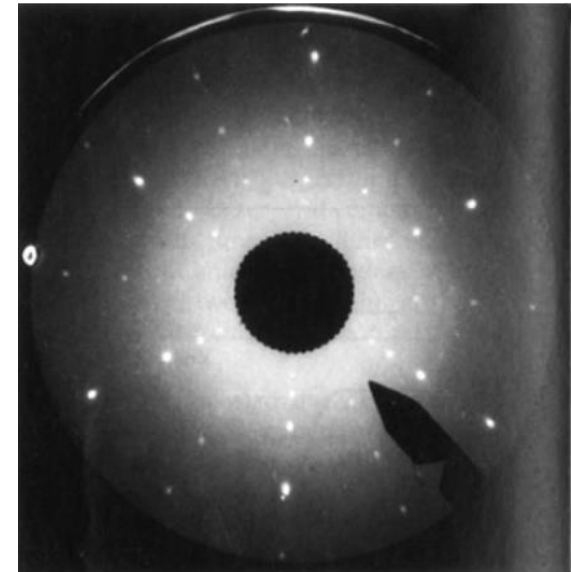
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

λ ... Wellenlänge des Teilchens
 h ... Plancksches Wirkungsquantum
 p ... Impuls des Teilchens

z.B.: Elektronenbeugung am Kristallgitter

Mittlerweile alle Beugungsphänomene
 auch mit Elektronen beobachtet und z.B.
 auch C60 an Gittern gebeugt !

**Alle Teilchen tragen auch Wellencharakter
 in sich** (je größer m , umso kleiner λ) !



Heisenberg'sche Unschärferelation:

Wellenbild - Beugung am Spalt: je schmaler Spalt umso breiter Beugungsfigur !

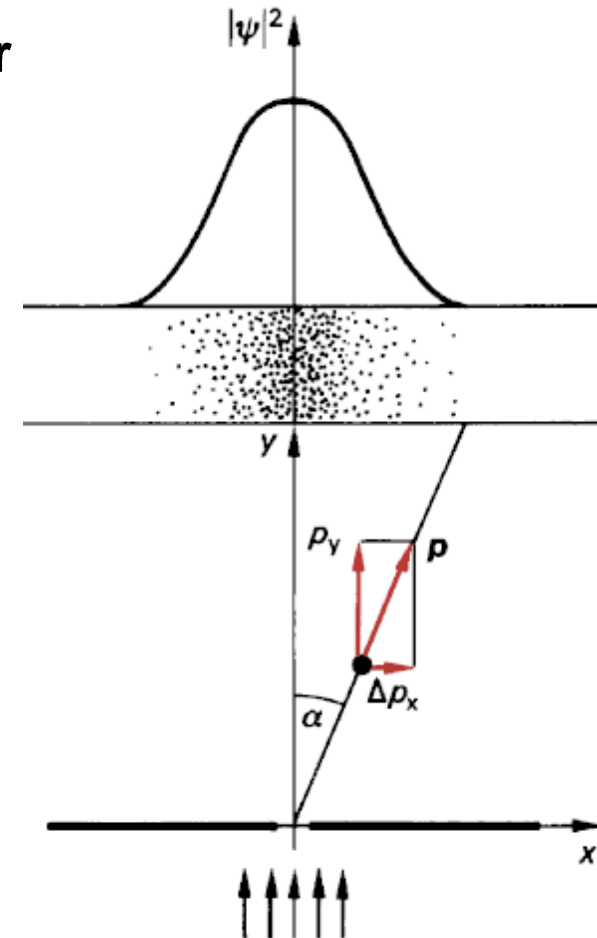
Elektronenstrahl durch Spalt:

Auftreffwahrscheinlichkeit entspricht „klassischer“ Beugungsfigur !

→ Durchtritt durch Spalt bewirkt horizontale Impulskomponente Δp_x

→ Δp_x steigt mit abnehmender Spaltbreite

**örtliche Einschränkung Δx →
Unbestimmtheit des Impulses Δp_x**



$$\frac{\Delta p_x}{p} = \sin \alpha = \frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{h}{p \Delta x}$$

allgemein gilt (Impuls-Orts Unschärfe):

$$\Delta p_x \Delta x \geq h$$

Je genauer der Ort eines Teilchens festgelegt wird, umso unbestimmter wird sein Impuls !

Analoge Beziehung z.B. auch für Energie und Zeit !