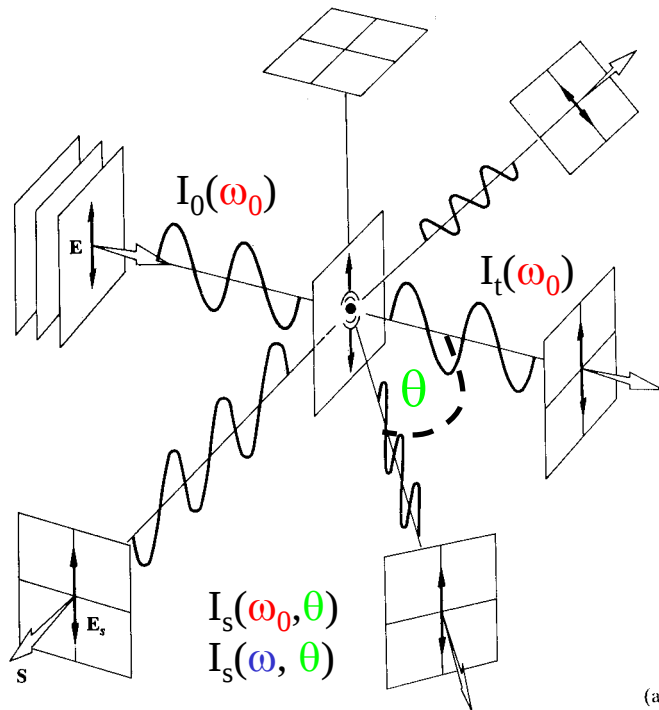


Grundlagen der Streuung: Teil I – Grundbegriffe

Streuung vs. Beugung

Typisches Streuexperiment



$I_0(\omega_0)$ = Einfallende Intensität

$I_t(\omega_0)$ = transmittierte Intensität

$I_s(\omega, \theta)$ = Streuintensität

$\omega = \omega_0$ elastische Streuung

$\omega \neq \omega_0$ inelastische Streuung

$$I_t = I_0 e^{-\varepsilon c d}$$

ε = Extinktionskoeffizient

c = Konzentration

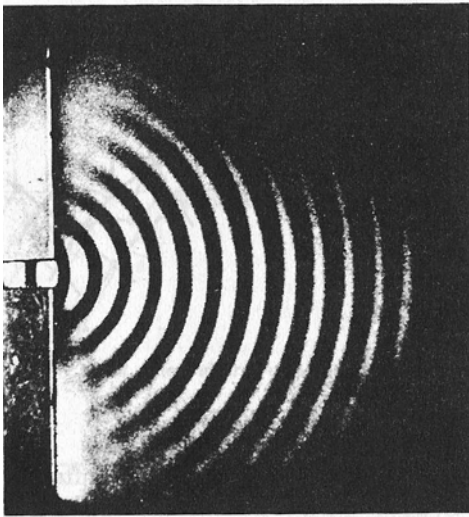
Lambert – Beer

d = Schichtdicke

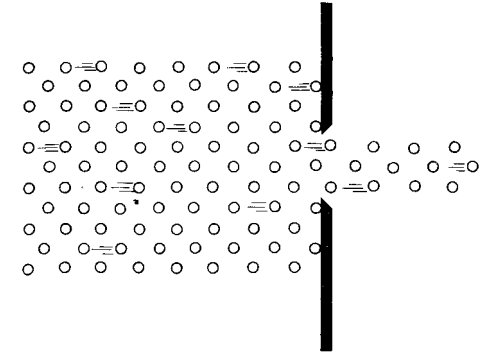
$$I_0 - I_t = I_{\text{ext}} = I_{\text{abs}} + I_s$$

Abbildung 8.36 Streuung von polarisiertem Licht durch ein Molekül.

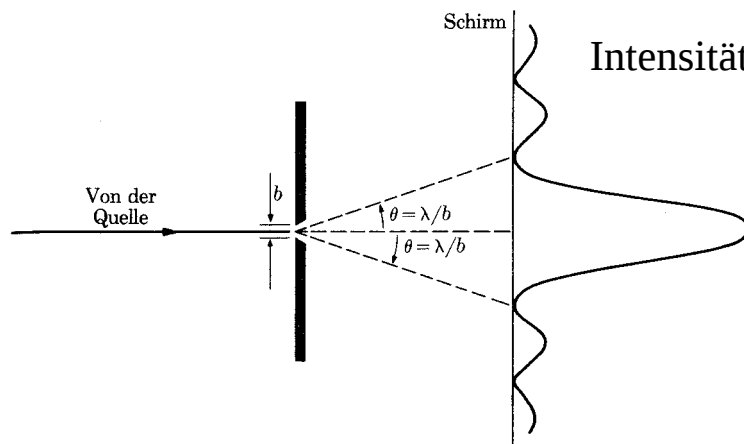
Typisches Beugungsexperiment: Beugung am Spalt



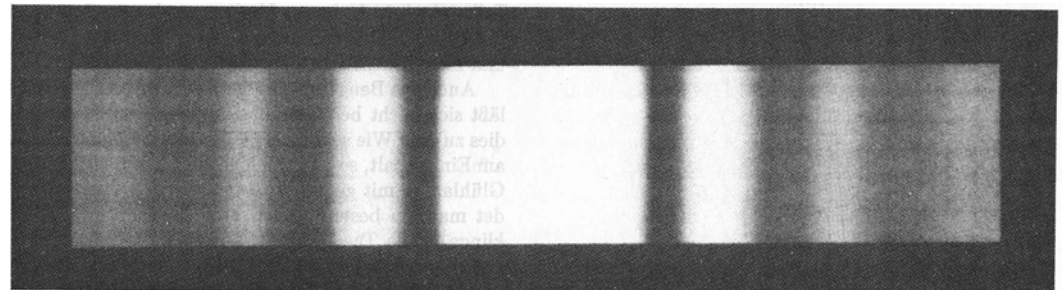
Beugung: Abweichung von der
geradlinigen Ausbreitung
Typisches Wellenphänomen
(Wasserwellen,
Schallwellen
Elektromagnet. Wellen)



Ein Teilchenstrom zeigt diesen Effekt nicht
(solange Teilchengröße $\ll$ Spaltgröße)



Intensitätsverteilung hinter einem Spalt



Fraunhoferbeugung an einem Einzelspalt

Materiewellen und Partikelstreuung

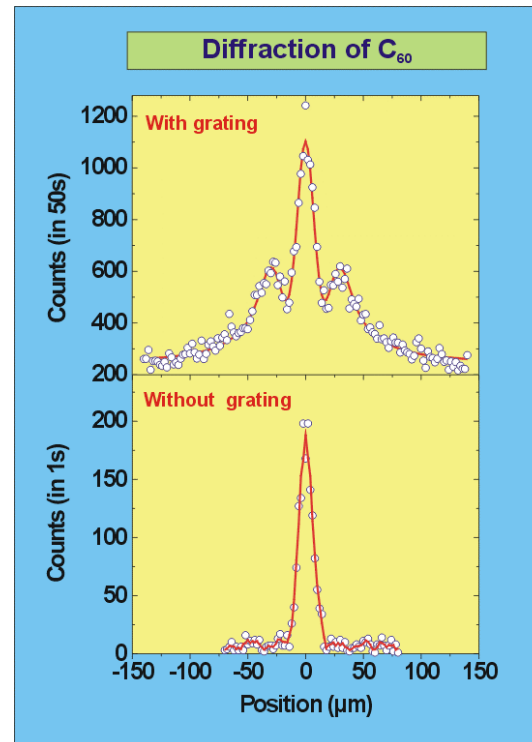
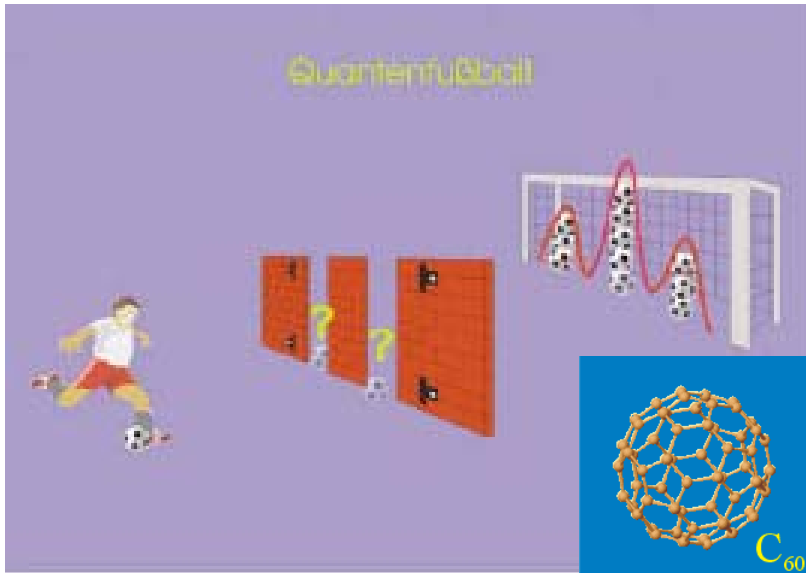
Welle-Teilchen-Dualismus

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

Teilcheneigenschaft (**Impuls**)

Welleneigenschaft (**Wellenlänge**)

Moderner Nachweis der Materiewellen:
Quantenfußball

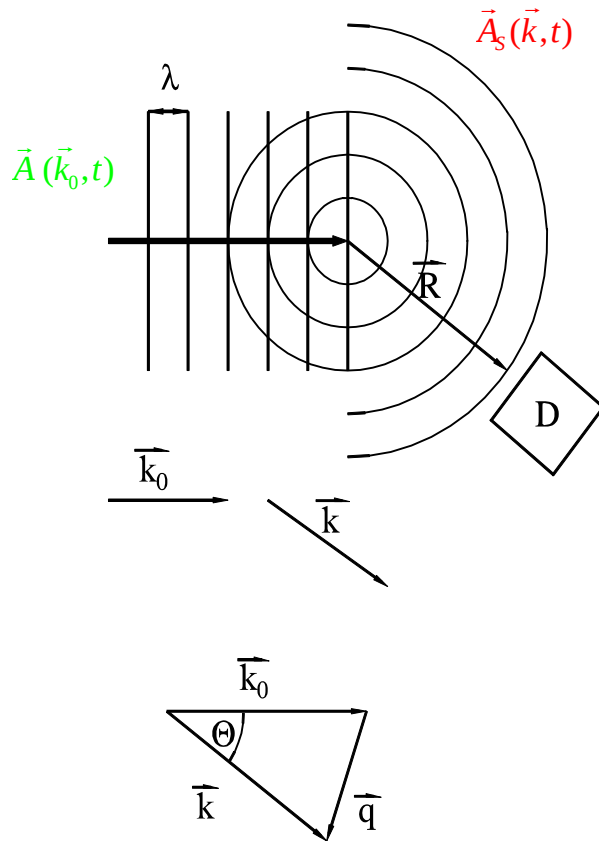


Partikelstremethoden:

Elektronenbeugung
Neutronenstreuung
Myonen-Streuung

Grundlagen der Streuung: Teil II – Von einem Streuer zu N Streuzentren

Ein Streuzentrum – Elementarer Streuprozess :



Einfallende Welle = ebene Welle

$$\vec{A}(\vec{k}_0, t) = \vec{A}_0 \exp \left[i \{ \vec{k}_0 \vec{R} - \omega t \} \right]$$

Gestreuete Welle = Kugelwelle

$$\vec{A}_s(\vec{k}, t) = \frac{\vec{A}_0 b}{R} \exp \left[i \{ \vec{k} \vec{R} - \omega t \} \right]$$

$$|\vec{k}_0| = \frac{2\pi}{\lambda} = |\vec{k}|$$

d.h. elastische Streuung

$$q = \frac{4\pi n_D}{\lambda} \sin \frac{\Theta}{2}$$

(q = Streuvektor, ist die Differenz der Wellenvektoren der einfallenden und der gestreuten Welle)

Θ

Streuwinkel

n_D

Brechungsindex des Mediums

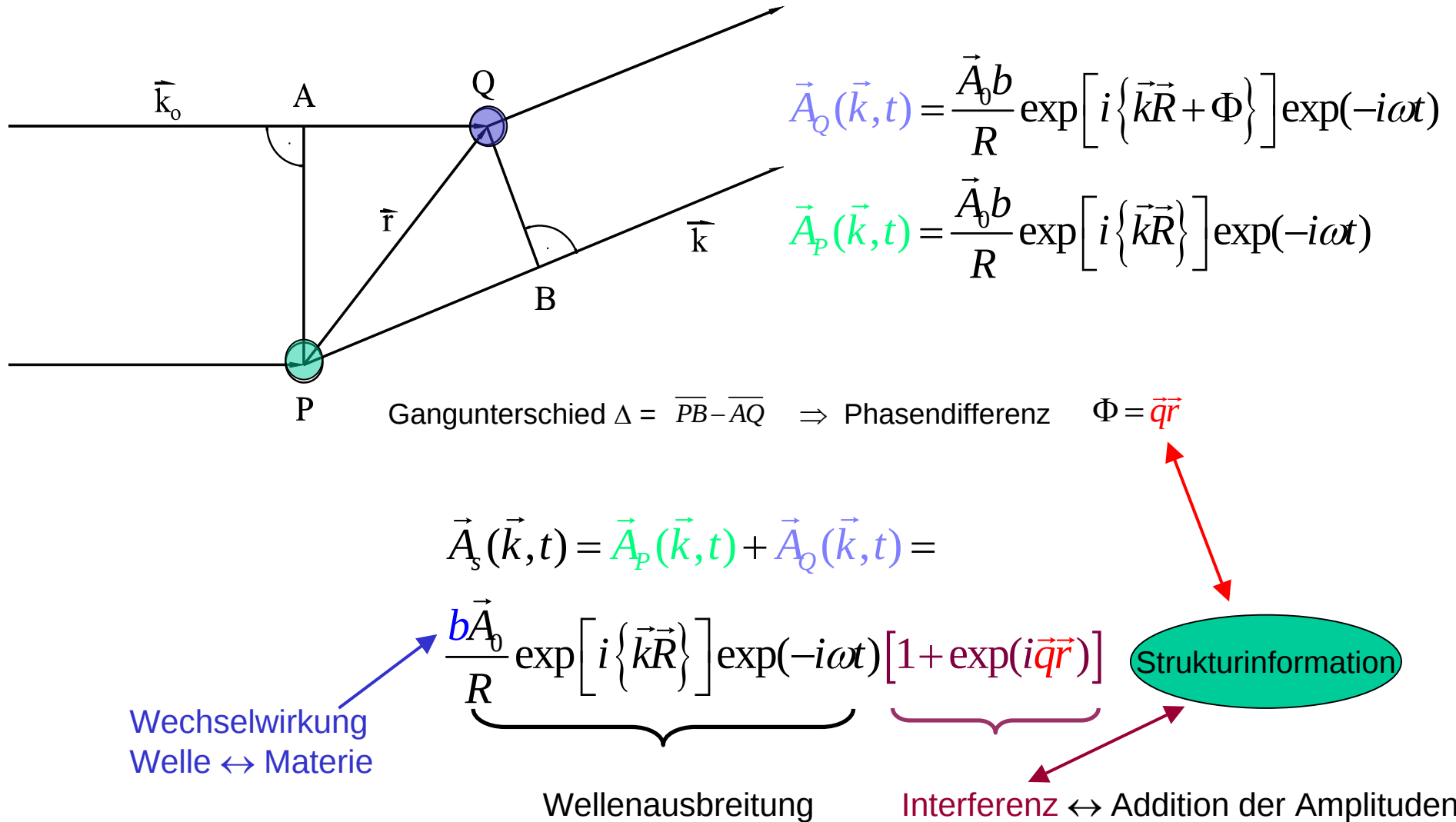
λ

Wellenlänge

b

Streuvermögen (abhängig von Art der Streuung – Licht, Xray etc.)

Streuung an zwei Streuzentren: Interferenz

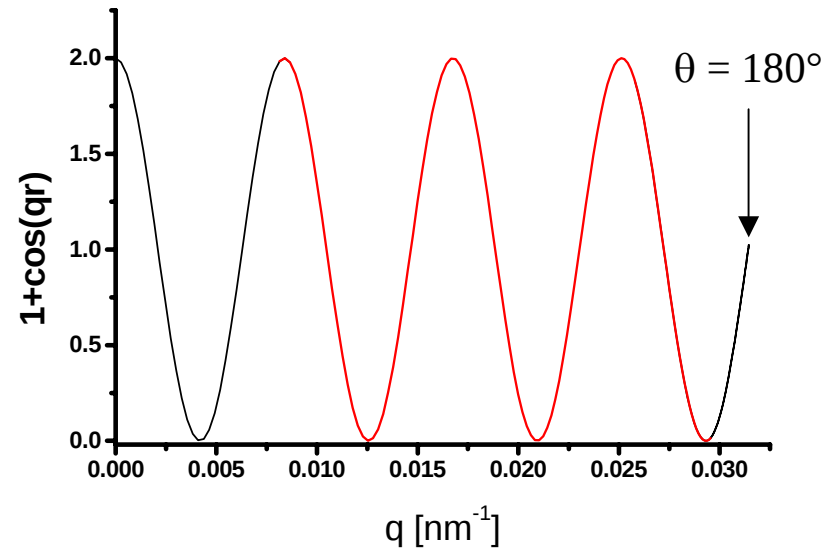
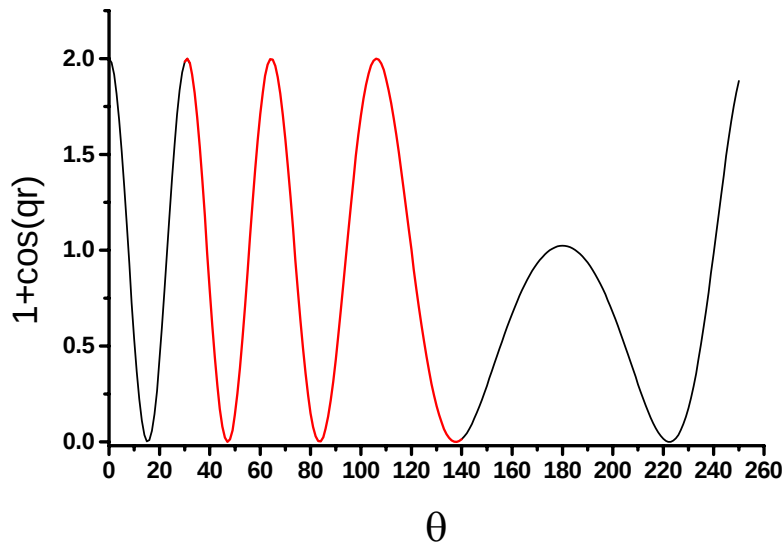


Streuintensität für 2 Streuzentren (N = 2):

$$I(q,t) = \left| \vec{A}_s(\vec{k},t) \right|^2 = \frac{\vec{A}_0^2 b^2}{R^2} (1 + e^{i\vec{q}\vec{r}}) (1 + e^{-i\vec{q}\vec{r}}) = \frac{2\vec{A}_0^2 b^2}{R^2} (1 + \cos(\vec{q}\vec{r}))$$

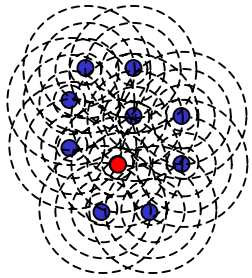
Streuintensität oszilliert mit

$$\vec{q}(\theta)\vec{r} \leftrightarrow I = I(q) \hat{=} I(\theta)$$



Berechnet mit $\lambda = 532 \text{ nm}$, $r = 750 \text{ nm}$, $n_D = 1.332$ (H_2O)

Streuung an vielen Streuzentren: N **diskrete**, **statische** **Punktstreuer**



Jede Sekundärwelle interferiert mit allen anderen $\Rightarrow$ kompliziertes Interferenzmuster

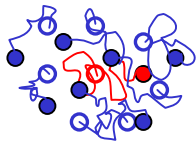
$$I(q) = \sum_j^N \sum_k^N \frac{\vec{A}_0^2 b_j b_k}{R^2} e^{i\vec{q}\vec{r}_j} e^{-i\vec{q}\vec{r}_k}$$

Winkelabhängigkeit der Streuintensität $I(q)$



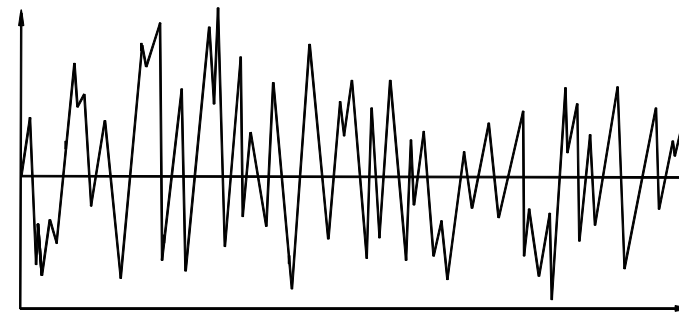
Anordnung der Streuzentren
(z.B. Kristallstrukturen)

Streuung an vielen Streuzentren: N **diskrete**, **dynamische** **Punktstreuer**



$$I(q, t) = \sum_j^N \sum_k^N \frac{\vec{A}_0^2 b_j b_k}{R^2} e^{i\vec{q}\vec{r}_j(t)} e^{-i\vec{q}\vec{r}_k(t)}$$

$I(q, t)$



$\langle I(q, t) \rangle_T$

Zeitlich fluktuierende Streuintensität $\Leftrightarrow$ Bewegung der Streuzentren

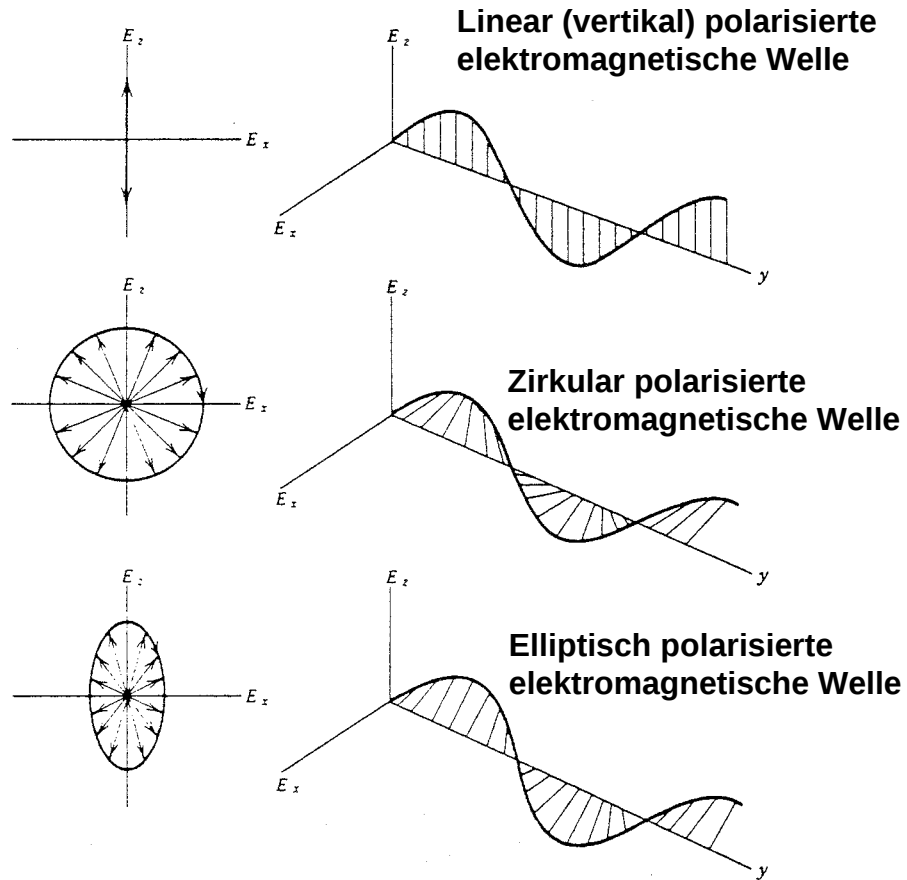
i) Statische Streuung:	Messung der zeitlich gemittelten Streuintensität $\langle I(q,t) \rangle_T$
	$\Rightarrow$ Bestimmung der zeitlich gemittelten Anordnung der streuenden Objekte
Verdünnte Systeme	Teilchenformfaktor $P(q) \rightarrow$ Struktur von Molekülen und Makromolekülen;
Dichte Systeme	statischer Strukturfaktor $S(q) \rightarrow$ Nahordnung von Flüssigkeiten und konzentrierten Polymersystemen)
ii) Dynamische Streuung:	zeitliche Analyse der Intensitätsfluktuationen über Spektren $S(q,\omega)$ und Korrelationsfunktionen $f(q,t)$
Verdünnte Systeme:	Bestimmung von Diffusionskoeffizienten
Dichte Systeme:	Zeitliche Veränderung von Strukturen (Strukturrelaxation)

Experimentell zugänglich $\langle I(q,t) \rangle_T = \langle I(q,t) \rangle_E$ Theoretisch zugänglich

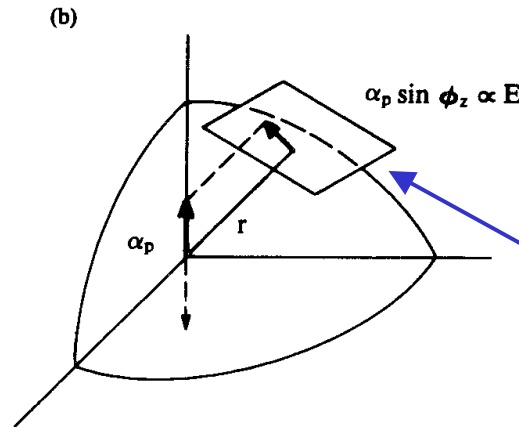
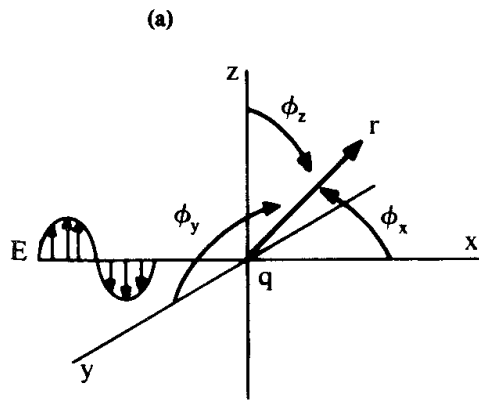
Zeitmittel Ensemblemittel (Scharmittel)

Grundlagen der Streuung: Teil III – Wechselwirkung zwischen Elektron und Elektromagnetischem Feld

- Polarization des E-Felds



Wechselwirkung zwischen Elektron und Elektromagnetischem Feld: Hertzsche Dipolstrahlung



Amplitude des abgestrahlten E-Felds ist proportional zur Projektion der Beschleunigung in die **Detektionsebene**

Figure 5.3 (a) The coordinates of an electric field $\mathbf{E}$ relative to an oscillating charge located at the origin. (b) Projection of the acceleration in the plane perpendicular to the line of sight.

Keine Abstrahlung in Richtung der Beschleunigung (Antennenstrahlung)

Vertikal (linear) polarisiertes Licht:

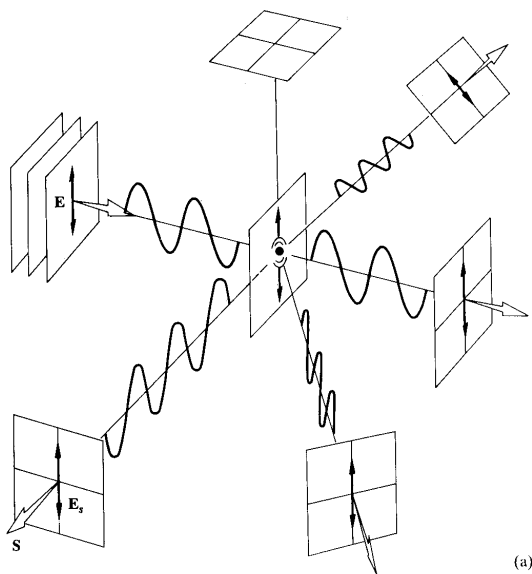
$$\vec{E}_s = \frac{q a_p \sin \phi_z}{4\pi\epsilon_0 c^2 r}$$

q = Ladung
 a_p = periodische Beschleunigung

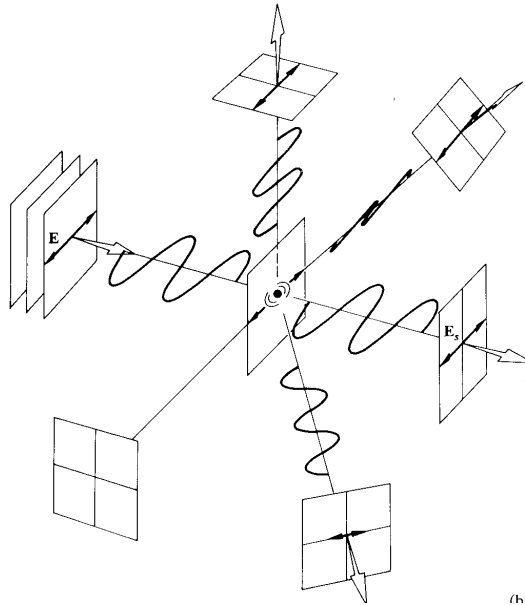
c = Lichtgeschwindigkeit
 ϵ_0 = elektrische Feldkonstante

Wechselwirkung zwischen Elektron und Elektromagnetischem Feld:

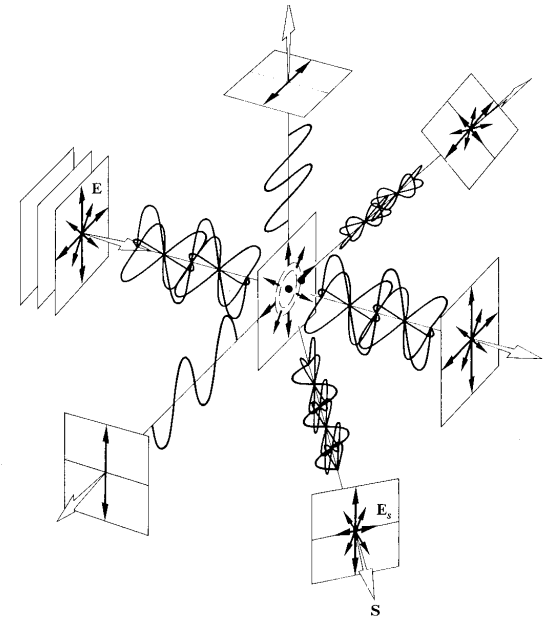
Polarisation des Streulichts



Vertikal polarisiert



Horizontal polarisiert



Unpolarisiert – Darstellbar
als Überlagerung von vertikal
und horizontal polarisierter
Strahlung (**Streulicht teilweise
polarisiert**)

Polarisation des Streulichts: Darstellung über Polfiguren

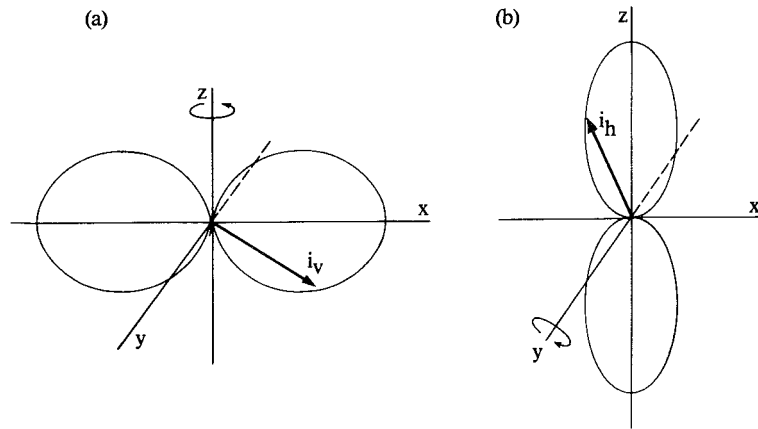


Figure 5.4 The intensity pattern for light scattered by a particle located at the origin. The incident and the scattered light are vertically polarized in (a) and horizontally polarized in (b). The length of the radius vector is proportional to the scattered intensity at each angle.

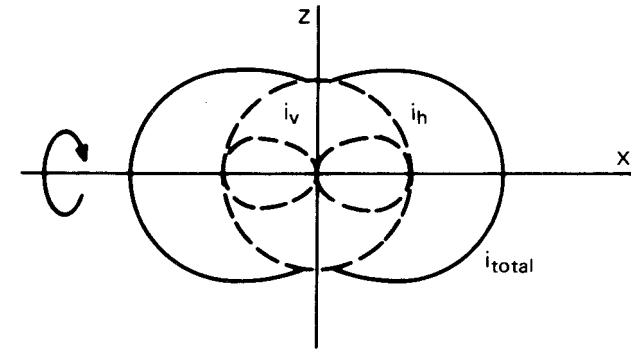
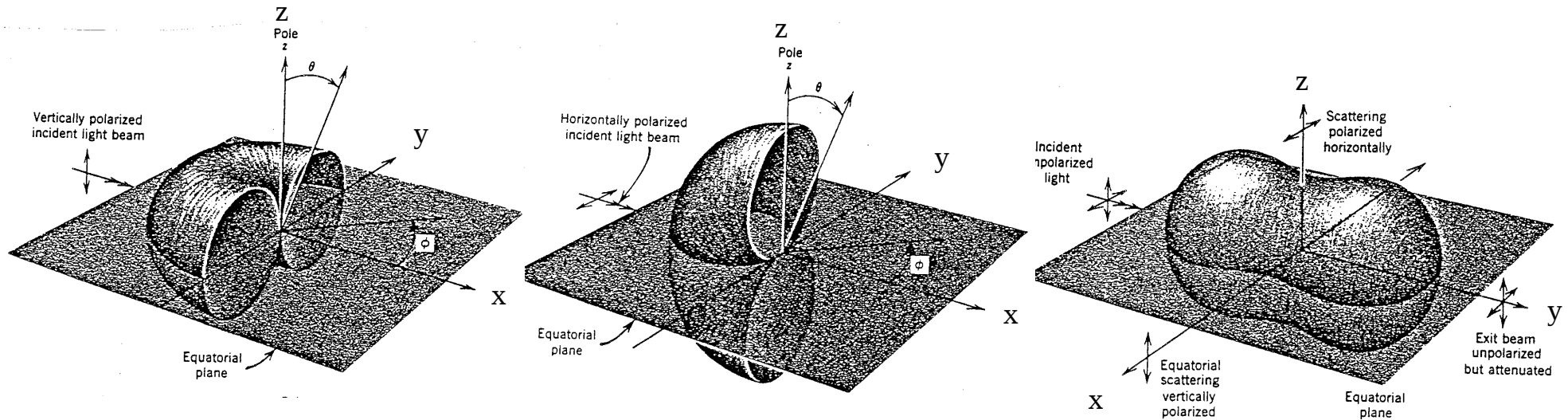


Figure 5.5 Projection in the xz plane of i_v , i_h , and their resultant i_{total} for light scattered by a molecule situated at the origin. The intensity of scattered unpolarized light at any angle ϕ_x is proportional to the length of the radius vector at this angle.



Lichtstreuung an Atomen - Polarisierbarkeiten

Elektrisches Feld polarisiert die Elektronenwolke von Atomen

⇒ Induziertes Dipolmoment $\vec{\mu}_{ind} = \alpha \vec{E}$ $\alpha = \text{Polarisierbarkeit}$

Streufeld E_s ist proportional zur Beschleunigung des induzierten Dipolmoments

$$\vec{E}_s(t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{d^2\mu}{dt^2} \frac{\sin\phi_z}{r} = \frac{\alpha\omega^2 \sin\phi_z}{4\pi\epsilon_0 c^2} E(t)$$

$\alpha/4\pi\epsilon_0$ hat die Dimension eines Volumens

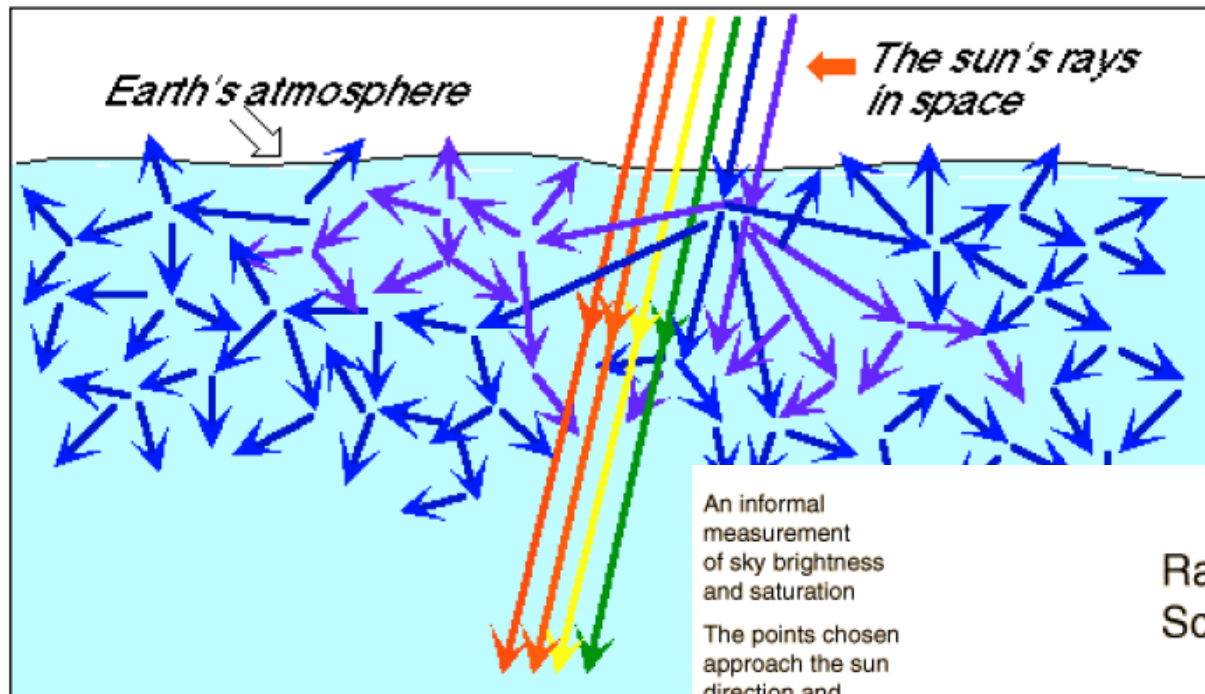
$$I_s = |E|^2 \propto \frac{V_{atom}}{\lambda^4}$$

Rayleighstreuung

Atom	He	Ne	Ar	Kr	Xe
$\alpha/4\pi\epsilon_0 [\text{\AA}^3]$	0.205	0.395	1.64	2.48	4.04

Atom	Li	Na	K	Rb	Cs
$\alpha/4\pi\epsilon_0 [\text{\AA}^3]$	24.3	23.6	43.4	47.3	59.6

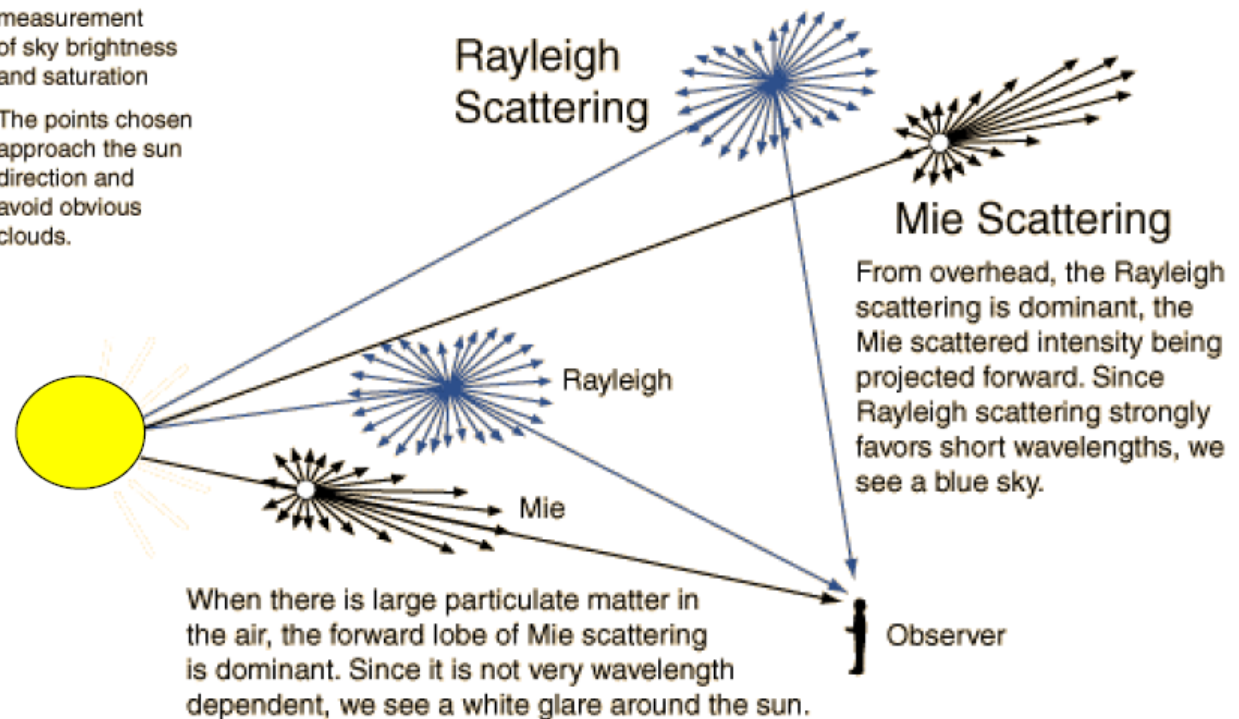
Warum ist der Himmel Blau?



An informal measurement of sky brightness and saturation

The points chosen approach the sun direction and avoid obvious clouds.

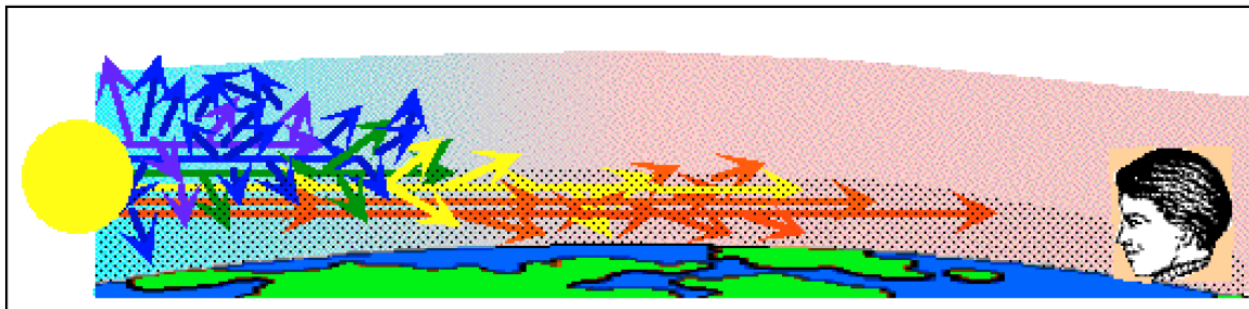
$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$



Abendrot - Morgenrot

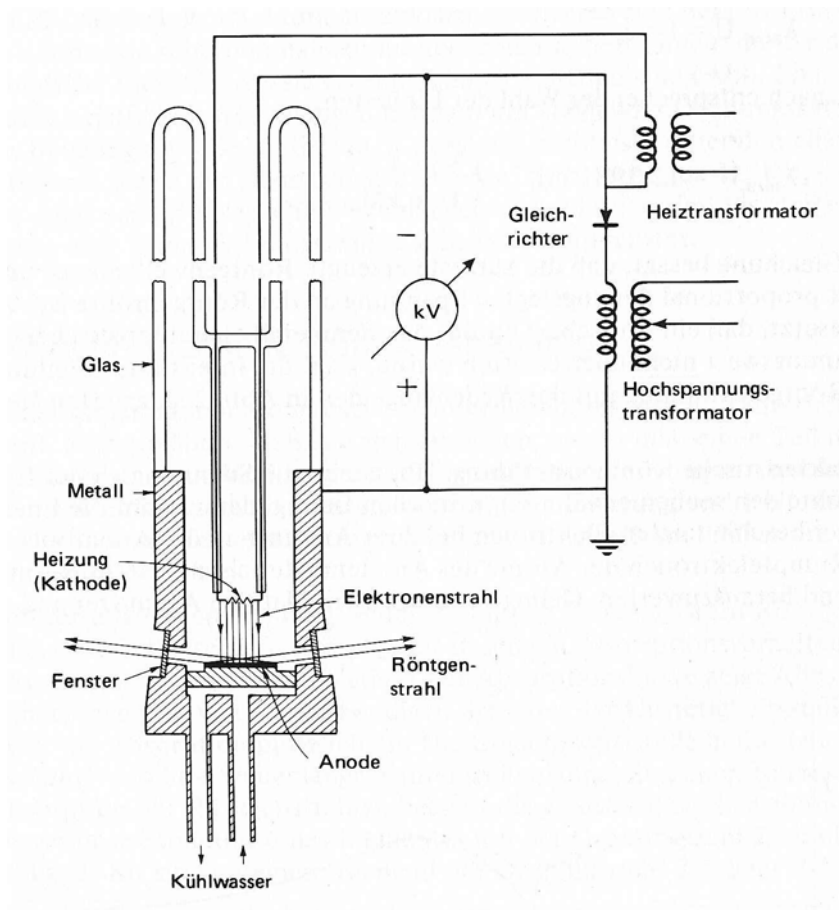
Rayleighstreuung :
das blaue Licht wird auf dem Weg
zum Beobachter weggestreut:

Nur rotes Licht kommt noch an

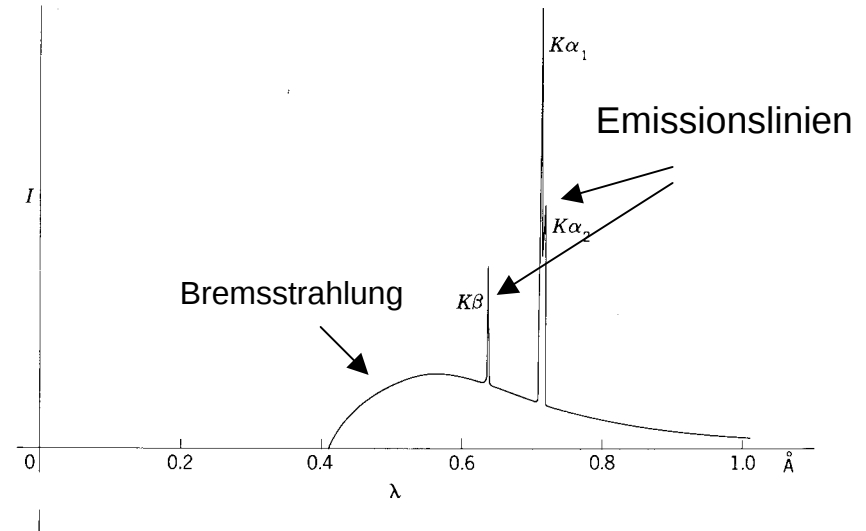


Erzeugung von Röntgenstrahlen (→ SAXS = Small Angle Xray Scattering)

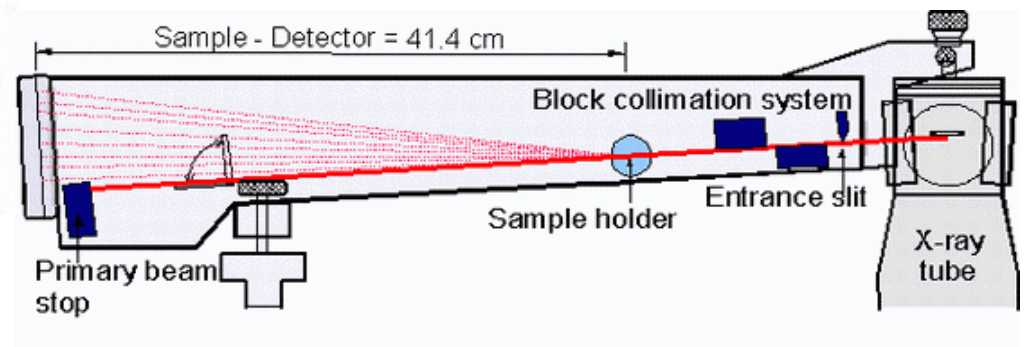
Prinzip der Röntgenröhre



Emissionsspektrum eines Mo Targets



Aufbau einer Röntgenkleinwinkelkamera

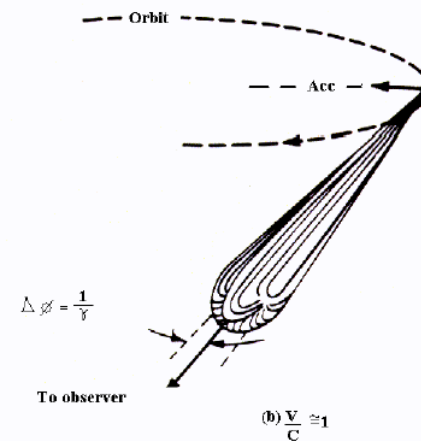
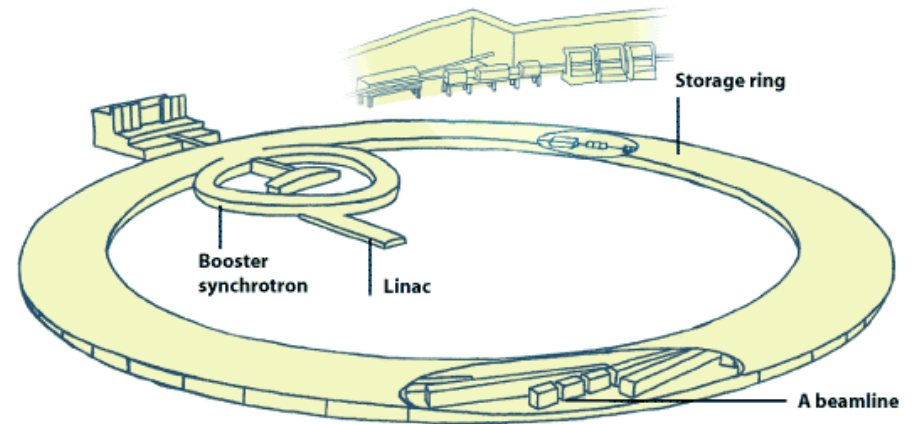


Erzeugung von Röntgenstrahlen

Synchrotronstrahlung: ESRF in Grenoble



ESRF = European Synchrotron Radiation Facility



Elektronenbewegung mit Relativistischer Geschwindigkeit:

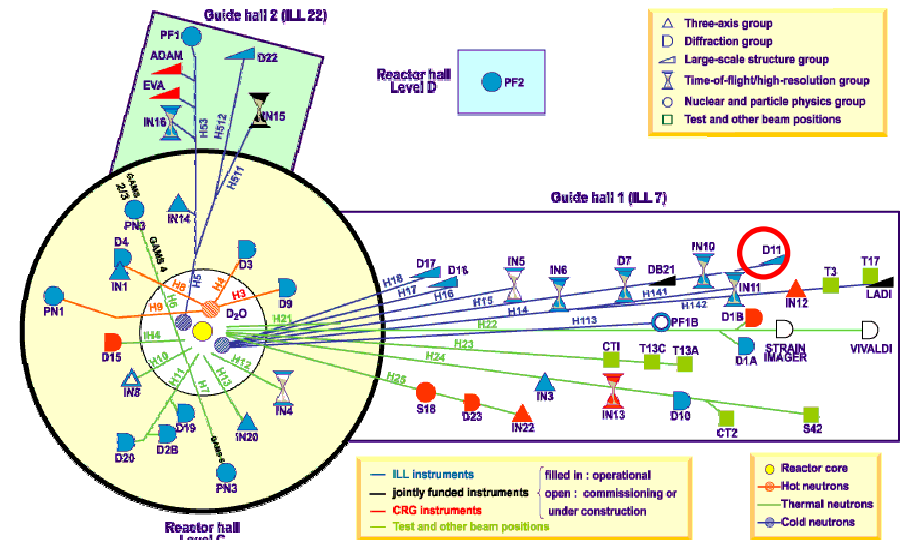
- tangentielle Abstrahlung mit hoher Kollimation
- hohe Leistungsdichte (Intensität)
- kontinuierliches Durchstimmen Wellenlänge

Erzeugung von Neutronen (→ SANS = Small Angle Neutron Scattering)

Neutronen aus dem Reaktor:
ILL in Grenoble



ILL = Institut Laue-Langevin



○ D11

