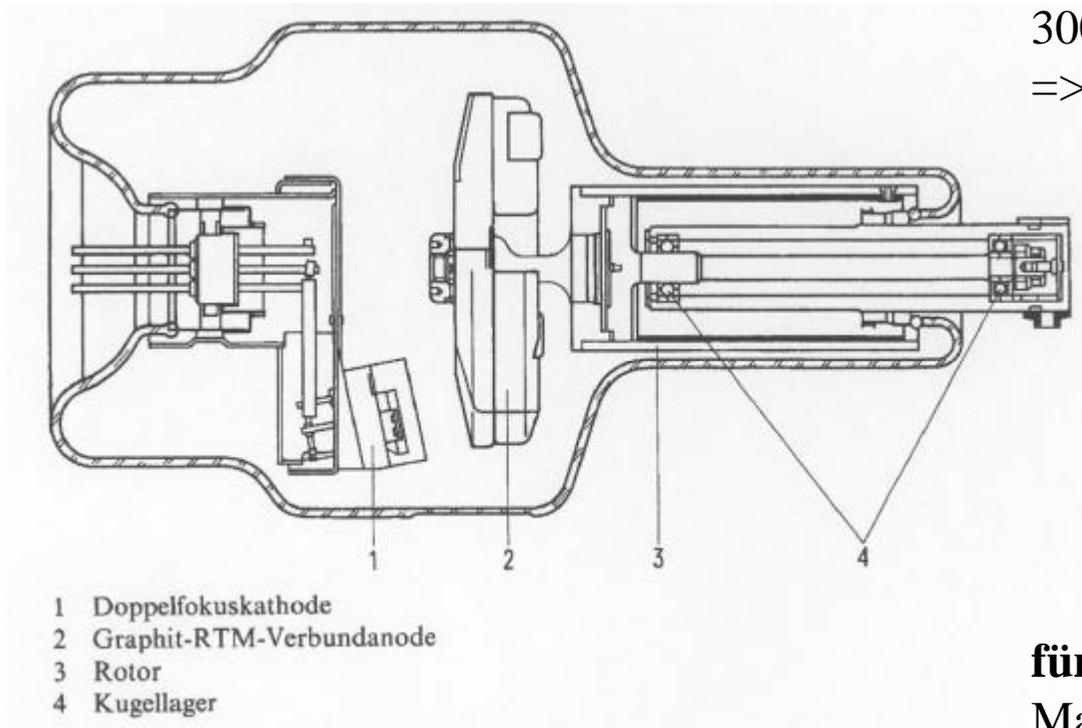


Drehanoden zur Erzeugung von Röntgenstrahlung

Schnitt durch eine Drehanoden-Röntgenröhre



Rotation der Anode

3000 – 17000 Umdrehungen pro Minute
=> Ferrosil-Kugellager

Leistungsdichten in Anoden

Festanoden: 30 – 100 W/mm²
Drehanoden: viel höher; bestimmt durch Rotationsfrequenz, Radius der Anode, Brennfleckgröße, maximale Brennflecktemperatur

Kathode

- 0.2 – 0.3 mm dicker Wolframdraht (Filament)
- Erhitzung führt zum Austritt von Elektronen aus dem Metall ins Vakuum
=> Emissionsstromdichte: $j = AT^2 e^{-W/k_B T}$

für Wolfram gilt

Materialkonstante: $A = 60 \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$

Austrittsarbeit: $W = 4.5 \text{ eV}$

bei typischen Strömen von 100 mA – 2 A ist die Temperatur ca. 2700 °C

Metall verdampft ! => niedrigere Bereitschaftstemperatur (1500 °C)

Drehanoden zur Erzeugung von Röntgenstrahlung

Anodenstrom

Bei niedriger Spannung können die austretenden Elektronen das Potential gegen die anderen austretenden Elektronen abschirmen. => Raumladungen verringern die Intensität der Röntgenröhre.

Anodenstrom I_A nach dem Raumladungsgesetz:

$$I_A = \frac{4}{9} e_0 \sqrt{2 \frac{e}{m} \frac{U_A^{3/2}}{d^2}} \quad \text{Kathoden-Anoden Abstand: } d$$

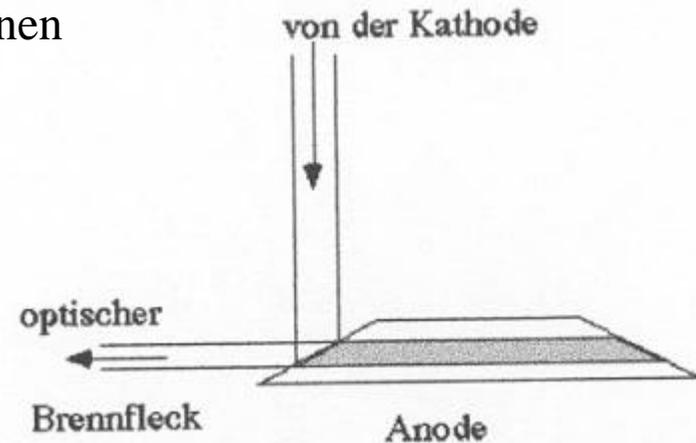
Bei großen Spannungen gilt:

$$I_S = jA_E \quad \begin{array}{l} \text{Sättigungsstrom: } I_S \\ \text{Emitteroberfläche: } A_E \end{array}$$

Fokussierung

Die austretenden Elektronen sind nicht gerichtet. Mit besonders geformten Elektroden (**Wehnelt Elektroden**) kann eine Fokussierung erfolgen.

Brennfleckgeometrie



Röntgenröhren mit großen Strahlungsleistungen wie Drehanoden werden auch bei Computer-Tomographen (medizinische Anwendung) eingesetzt.

Nachteile bei Strahlung aus Röntgenröhren

- Fokussierung
- Intensität
- nicht monochromatisch
- nicht kohärent

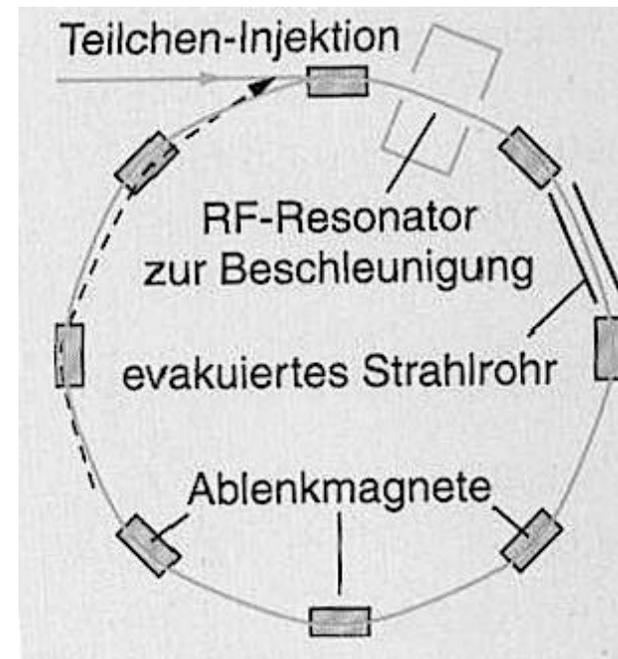
Synchrotronstrahlung

Entstehung der Synchrotronstrahlung

In einem kreisförmigen Beschleunigerring werden geladene Teilchen (z.B. e^- , e^+) auf einer Kreisbahn beschleunigt. Dabei entsteht **tangential zur Kreisbahn** eine Bremsstrahlung die **Synchrotronstrahlung** genannt wird. Da sich die geladenen Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit (nahe c) auf der Kreisbahn bewegen gibt es einen permanenten Richtungswechsel. Dieser Richtungswechsel ist ursächlich für die emittierte Strahlung.

Eigenschaften der Synchrotronstrahlung

- sehr hohe Intensität
- Da die geladenen Teilchen in kleinen Paketen (bunches) den Ring durchlaufen ist die emittierte Strahlung gepulst.
- Synchrotronstrahlung zeigt eine breite Wellenlängenverteilung (sichtbares Licht bis harte Röntgenstrahlung)
- linear polarisiert



Prinzip eines Synchrotrons

Beschleunigung geladener Teilchen auf einer Kreisbahn

Man betrachte dazu Elektron auf Kreisbahn im Magnetfeld:

$$evB = F_L = F_Z = \frac{mv^2}{r}$$

F_L : Lorentzkraft
 F_Z : Zentrifugalkraft

U : Beschleunigungsspannung

Für den Radius der Kreisbahn ergibt sich:

$$r = \frac{mv}{eB} \quad \text{relativistisch: mit } \mathbf{g} \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \mathbf{b}_e^2}}$$

$$\longrightarrow r = \frac{\mathbf{g}mv}{eB} \quad \longrightarrow r[m] \approx 3.3 \frac{E_e[GeV]}{B[T]}$$

Wenn Elektronen auf der Kreisbahn mit konstantem Radius zu hohen Energien beschleunigt werden sollen (mit Beschleunigungsspannungen bis zu 10^9 V; GV), so muss das magnetische Feld B **synchron** dazu erhöht werden.

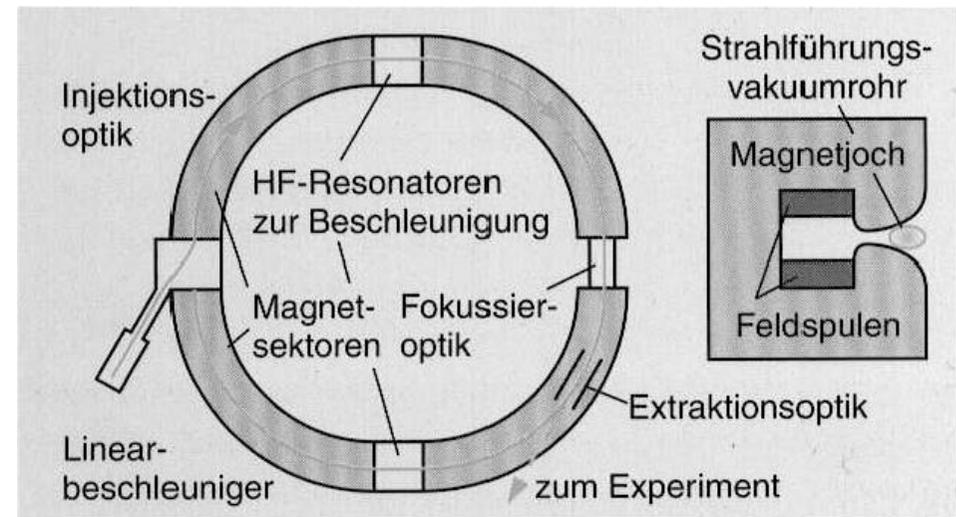
=> **Synchrotron** (erste Anwendungen in der Hochenergiephysik)

Teilchenbeschleunigung

Aus der Betrachtung der Energien folgt:

$$e \cdot U = \frac{m}{2} v^2 \quad \longrightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}$$

Schematischer Aufbau eines Synchrotron

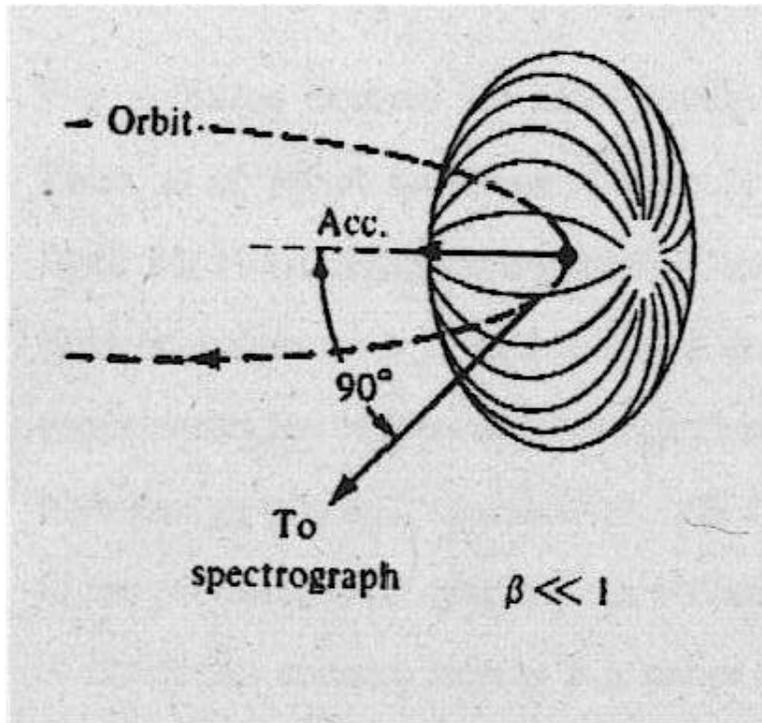


Prinzip eines Synchrotrons

Abstrahlcharakteristik beschleunigter Ladung

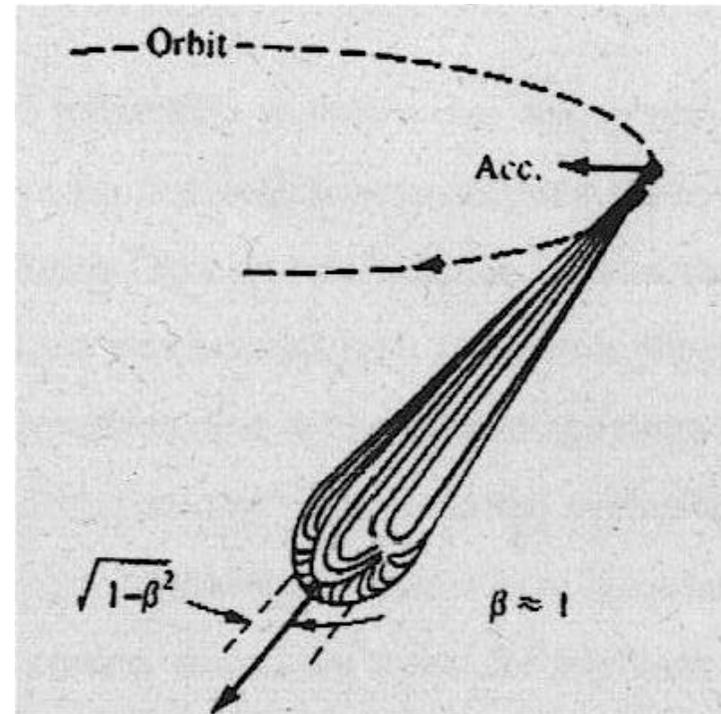
Die Abstrahlcharakteristik im Speicherring hängt stark von der Geschwindigkeit der bewegten Ladung ab.

nicht relativistisch: für $v \ll c$ oder $\beta = v/c \ll 1$



Die beschleunigten Ladungen strahlen in eine Ellipsenform ab

relativistisch: für $v \approx c$ oder $\beta \approx 1$

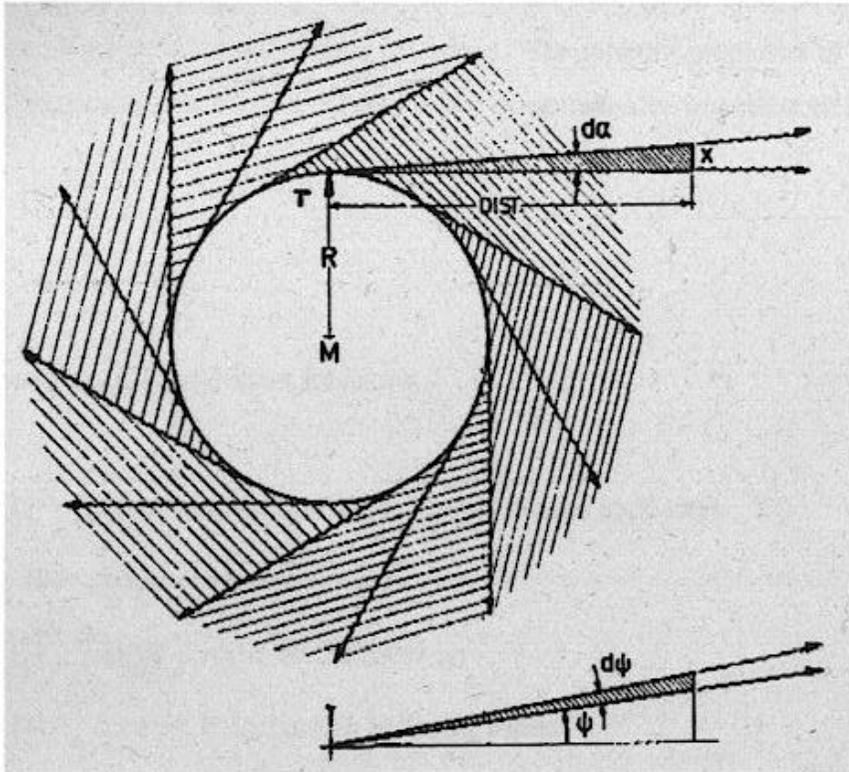


Die beschleunigten Ladungen strahlen trichterförmig in Tangentialrichtung ab

Synchrotronstrahlung

Bei Ladungen mit $v \approx c$ führt jede weitere Beschleunigung zur Erhöhung der effektiven Masse (relativistische Massenzunahme) nicht aber zur Erhöhung der Geschwindigkeit. Dieser Effekt wird in der Hochenergiephysik zur Erzeugung schwerer Teilchen genutzt.
 $\Rightarrow (E = mc^2)$.

Strahlungsfächer eines beschleunigten Elektrons



- Die Strahlverteilung erfolgt fächerförmig in der Ringebene.
- Abweichend von der Ringebene nimmt die Strahlintensität schnell ab.
- Die Strahlung ist stark linear polarisiert (in der Ringebene).
- Öffnungswinkel: $\tan \alpha = g^{-1} = \frac{m_0 c^2}{E_e}$

Abgestrahlte Leistung (pro Längenabschnitt L) eines relativistischen Elektrons:

$$P = \int I(I, \mathbf{y}) dI d\mathbf{y} = \frac{e^2 c}{6\pi \epsilon_0 r^2} \frac{E^4}{(m_0 c^2)^4}$$

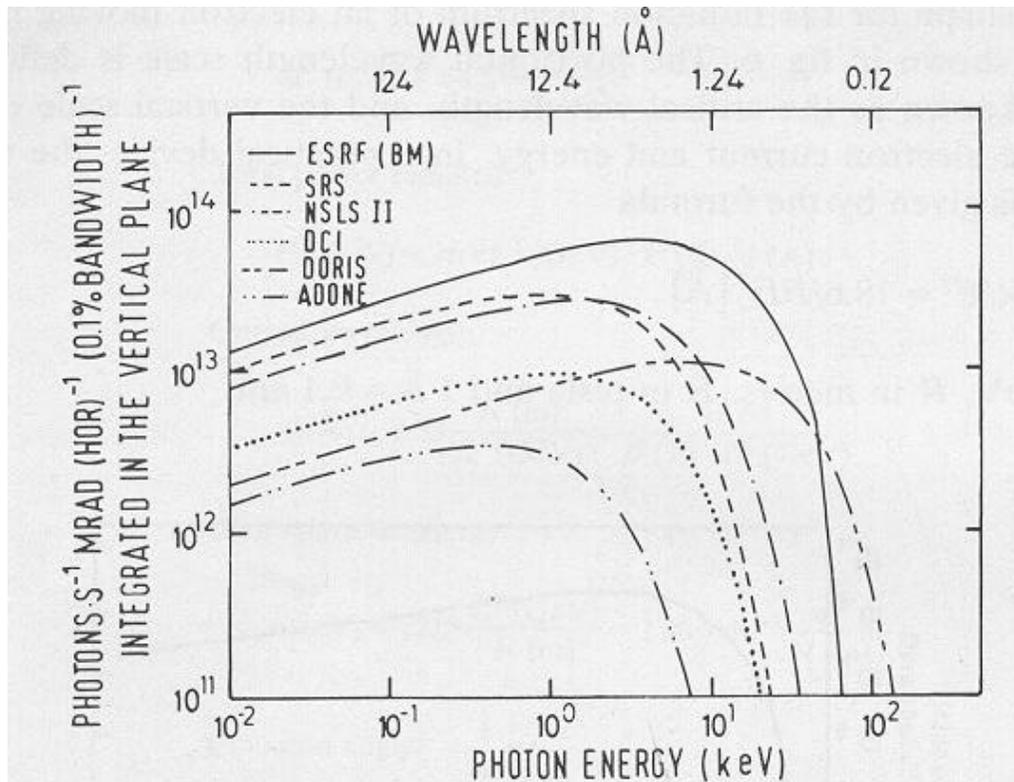
r : Krümmungsradius	\mathbf{Y} : Höhenwinkel
E : Energie des Elektrons	λ : Wellenlänge der Strahlung
L : Längenabschnitt	

Synchrotronstrahlung

Die Zahl der Ladungsträger (konzentriert in den bunches) im Ringbeschleuniger bestimmt den Ringstrom, der eine wichtige Größe für die **abgestrahlte Leistung** ist:

Wellenlängenabhängigkeit der Intensität (Brillanz)

$$P[kW] \approx 1.266 E_e^2 [GeV] B^2 [T] L [m] I [A]$$



Der nutzbarer Energiebereich der Strahlung wird durch eine kritische Frequenz bestimmt:

$$\omega_c = \frac{2}{3} g^3 \omega_0 \quad \omega_0: \text{Kreisfrequenz}$$

mit $\omega_0 = \frac{2p}{T} = \frac{r}{c}$ und $r [m] \approx 3.3 \frac{E_e [GeV]}{B [T]}$

→ $\hbar \omega_c [keV] \approx 0.665 E_e^2 [GeV] B [T]$

Speicherringe

ERSF (Grenoble): 5 GeV; 565 mA

Doris (Hamburg): 5 GeV; 100 mA

$$\text{Brillanz} = \frac{\text{Photonen}}{\text{Zeit, (Raum)Winkel, Quellfläche, Spektralanteil(\%)}}$$

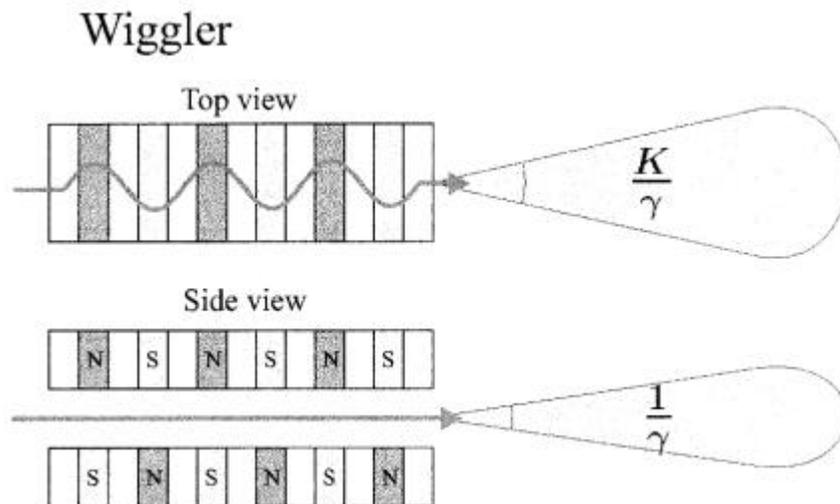
Spektralanteil:

$$\frac{\Delta I_{mon}}{I_{BW}} \equiv 0.1\%$$

Insertion Devices: Wiggler und Undulatoren

Um eine noch höhere Intensität der Synchrotronstrahlung zu erhalten, kann man zwischen den Ablenkmagneten des Kreisbeschleunigers **zusätzlich weitere Ablenkmagneten mit wechselnder Polarität** einzufügen. Diese Anordnung führt zu einer oszillierenden Elektronenbahn, wobei dann bei jeder Welle ein Strahlungsfeld entsteht (in Tangentenrichtung). Für mehrfach oszillierende Elektronen addieren sich die Strahlungsfelder, die alle in die gleiche Richtung zeigen (\Rightarrow **hohe Intensität der Synchrotronstrahlung**).

Prinzip des Wigglers



Im Wiggler ist die abgestrahlte Leistung im Prinzip wie im Ablenkmagnet, nur kann eine viel größere Abschnittlänge L angesetzt werden (m statt mm!). Darüber hinaus ist das B -Feld beim Wiggler variabel und die emittierte Strahlung damit einstellbar.

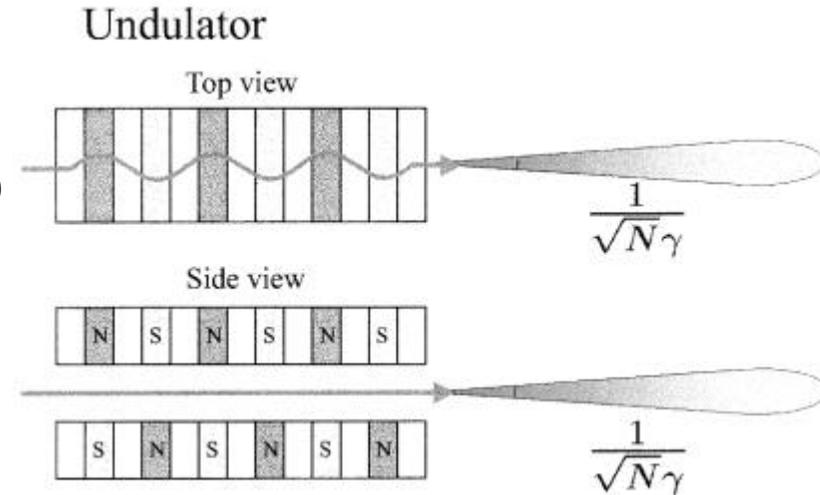
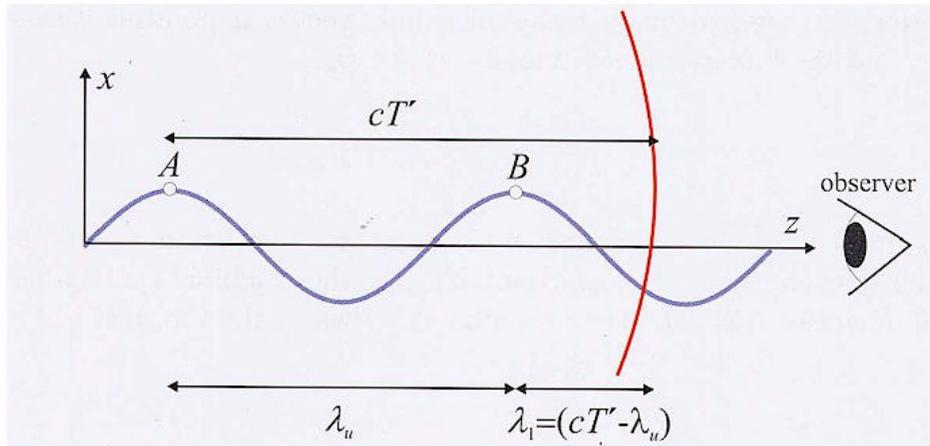
Allerdings:

- polychromatische Strahlung
- geringe Kohärenz der Strahlung

Insertion Devices: Wiggler und Undulatoren

Undulatoren

Im Prinzip wie ein Wiggler nur mit einer Phasenbeziehung zwischen emittierter Strahlung (λ_l) und der Elektronenoszillation (λ_u)



Diese Phasenbeziehung kann näherungsweise durch die folgende Relation angegeben werden:

mit der Undulatorkonstanten K :

$$I_l \approx \frac{I_u}{2g} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad K = \frac{eB_0}{mck_u} = 0.934 I_u [m] B_0 [T]$$

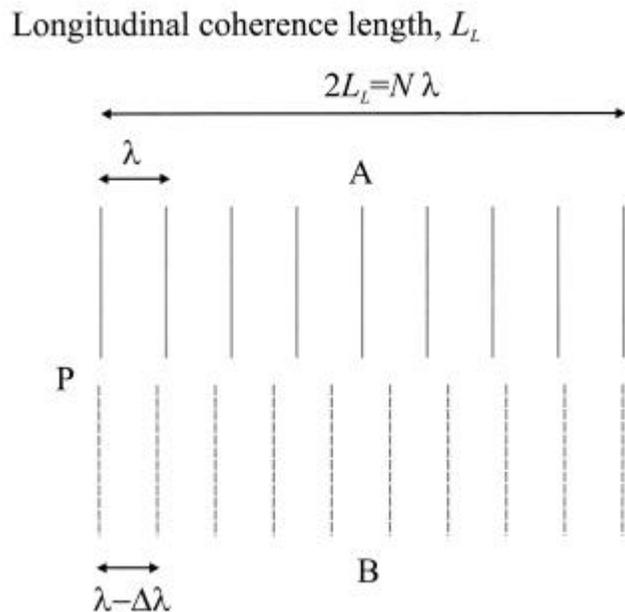
Eigenschaften

- unabhängig von den Ablenkmagneten durchstimmbar
- **quasi**monochromatische
- **quasi**kohärent

Kohärenz der Strahlung

Im Gegensatz zu idealen Röntgenstrahlen haben reale Strahlen weder eine **exakte Wellenlänge** noch eine **genau definierte Ausbreitungsrichtung**. In der Praxis haben diese Unzulänglichkeiten Einfluss auf die sogenannte **Koheränzlänge**.

longitudinale Kohärenzlänge



Zwei Wellen breiten sich mit der Wellenlänge λ (Welle A) und $\lambda + \Delta\lambda$ (Welle B) aus:

Die longitudinale Kohärenzlänge L_L gibt an welche Strecke man entlang der Wellenausbreitungsrichtung gehen muss, damit die Wellen außer Phase sind, wenn sie am Bezugspunkt P in Phase sind. Wenn man davon ausgeht, dass beide Wellen dann nach $2L_L$ wieder in Phase sind gilt: $(N+1)\Delta\lambda = \lambda$ und damit

$$L_L = \frac{1}{2} \frac{I^2}{\Delta I}$$

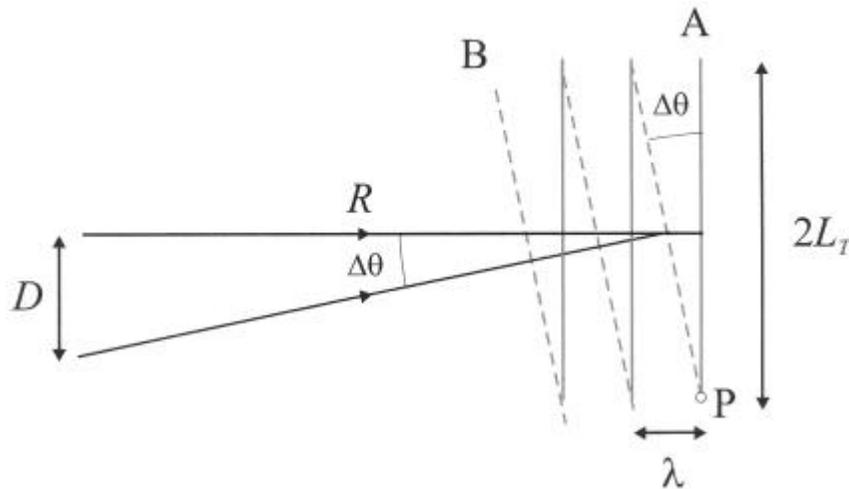
Im Experiment sorgen z.B. Monochromatoren für eine möglichst genau definierte Wellenlänge.

Kohärenz der Strahlung

transversale Kohärenzlänge

Innerhalb einer Röntgenquelle werden die Wellen von unterschiedlichen Orten mit einem Abstand D voneinander entfernt emittiert. Im Abstand R von den Quellpunkten sind die beiden Wellen A und B noch in Phase. Die transversale Kohärenzlänge L_T gibt nun an, weit man sich auf einer Verbindungslinie längs der Wellenfron von A bewegen muss, um mit der Welle B außer Phase zu sein. Die Wellenfronten von A und B schließen einen Winkel $\Delta\theta$ ein. Für kleine Winkel gilt $\Delta\theta = \tan \Delta\theta$.

Transverse coherence length, L_T

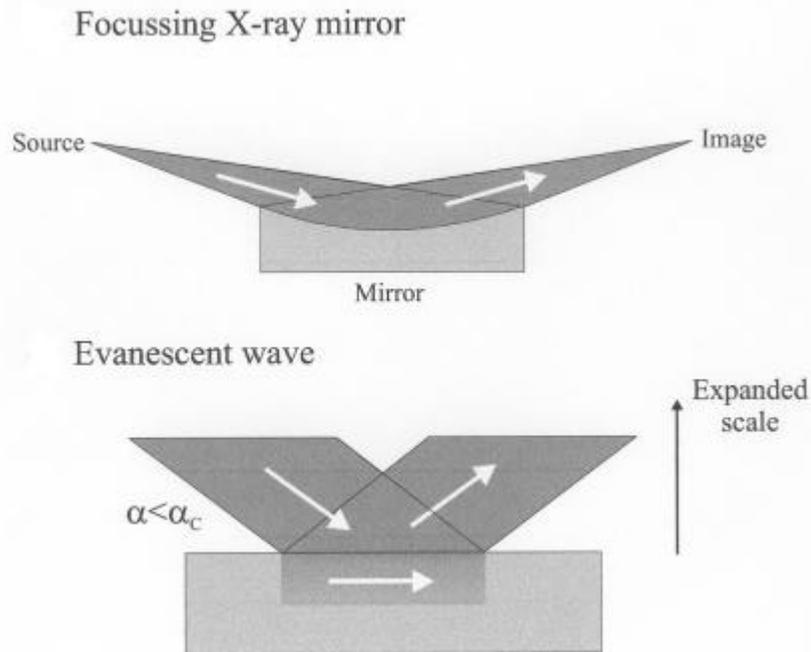


Damit ergibt sich für $\lambda = 2 L_T \Delta\theta$ und

$$L_T = \frac{1}{2} \frac{R}{D}$$

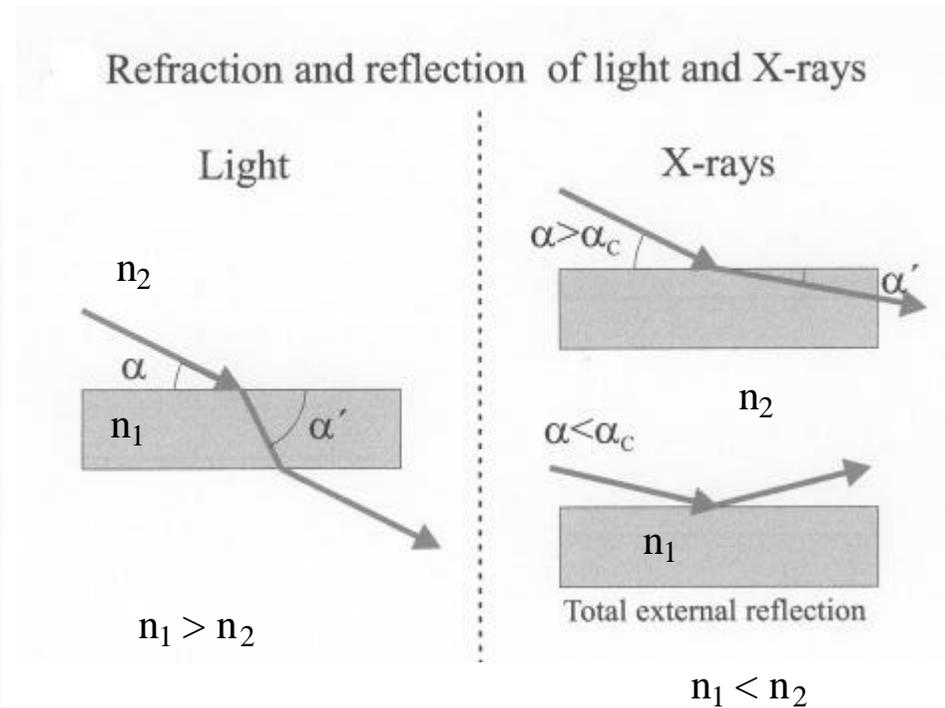
Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

Optik mit Röntgenstrahlung



Optik

- Monochromatoren
- Fokussierung über gekrümmte Spiegel
- Spiegel: externe Totalreflexion
- Oberflächenmessungen: evaneszente Welle

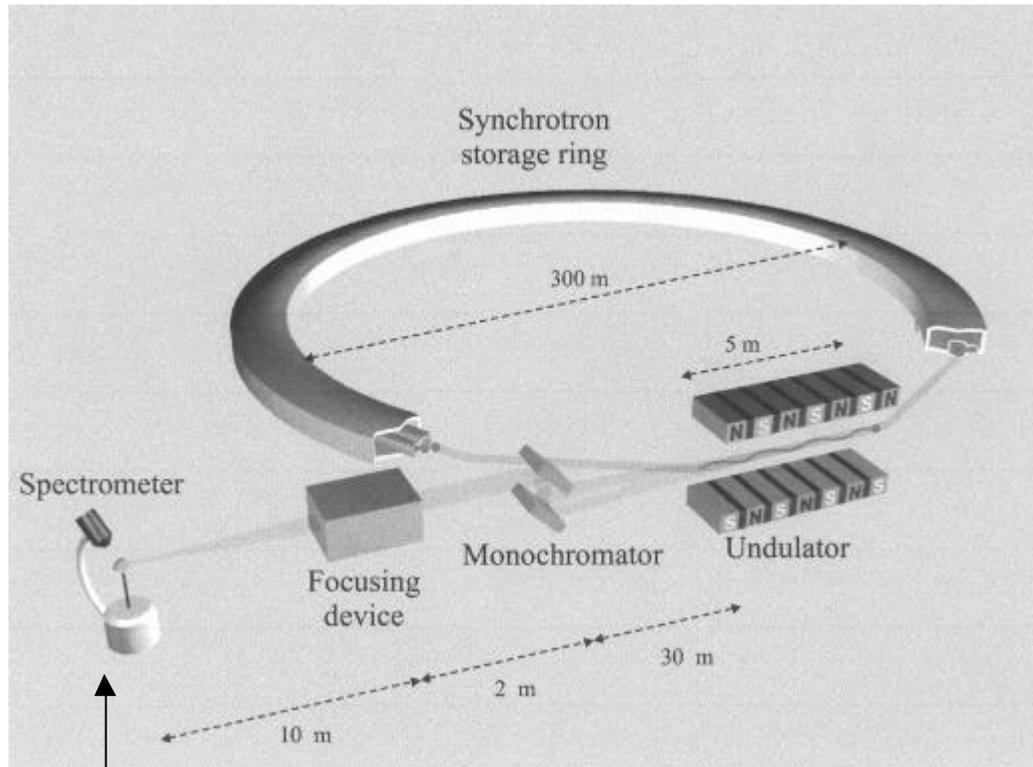


kritischer Winkel: groß bei Röntgenstrahlung
=> fast immer Totalreflexion !

Nebeneffekt: Im optisch dünneren Medium klingt die Welle exponentiell mit dem Abstand von der Grenzfläche ab. => evaneszente Welle planparallel zur Grenzfläche.

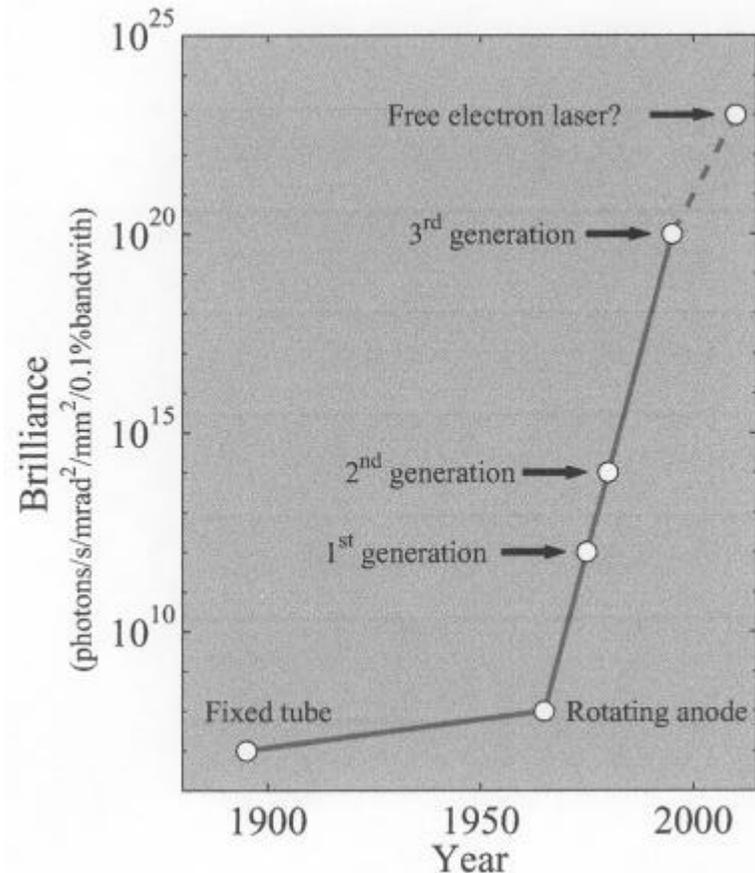
Synchrotronstrahlung

Schematische Darstellung eines Synchrotrons optimiert für die Nutzung der Synchrotronstrahlung (=> „dedicated ring“)



Messplatz z.B. für
Diffraktionsexperimente

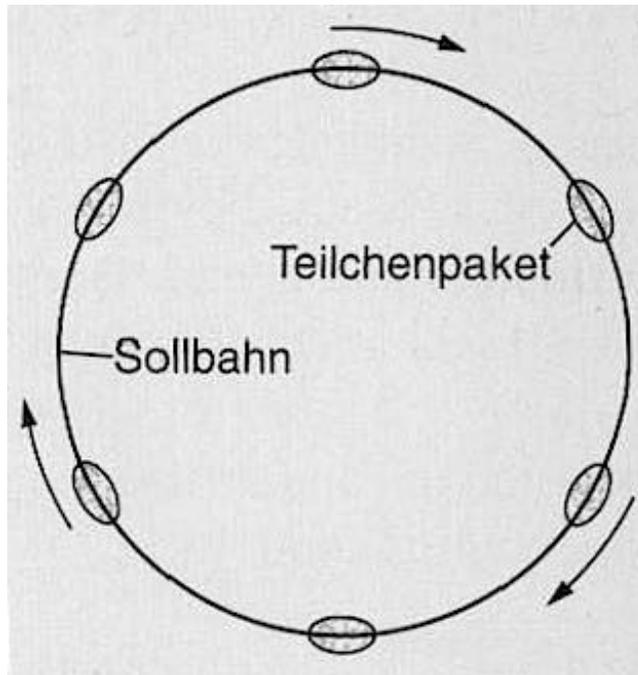
Entwicklung der Leistungsstärke von Röntgenquellen



Synchrotronstrahlung

Ausblick: Free Electron Laser

In einem Speicherring bewegen sich nun tatsächlich keine einzelnen Elektronen auf der Kreisbahn:



Sie sind in mehreren Paketen, sog. *bunches* angeordnet

Warum ?

Tatsächlich sind die Elektronen innerhalb dieser *bunches* recht stabil:

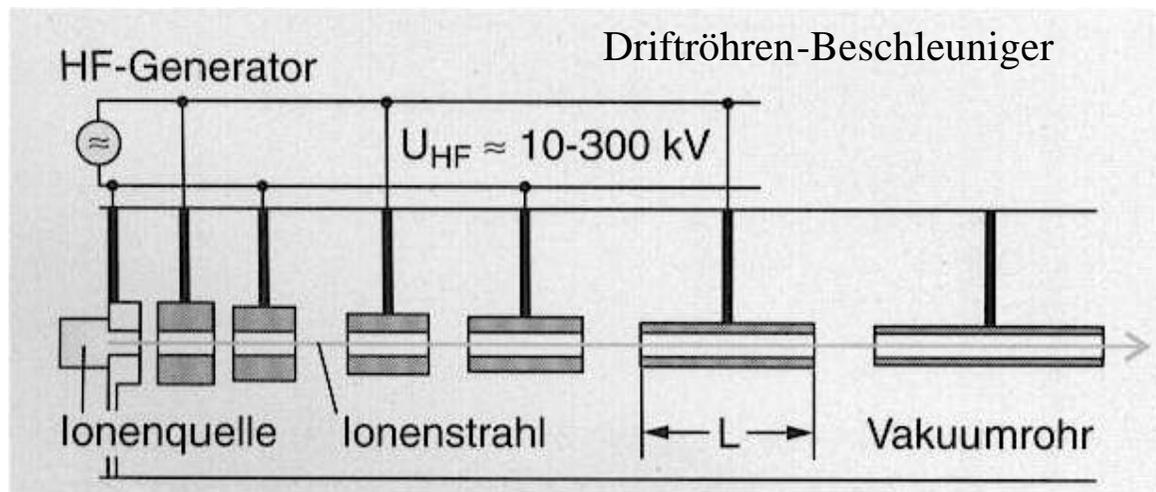
- schnellere Elektronen werden verlangsamt, langsamere zusätzlich beschleunigt.
- Auch Abweichungen von der Sollbahn werden innerhalb der *bunches* korrigiert.

Doch eine endliche Ausdehnung der Elektronenpakete bleibt. Diese Ausdehnung, wenn auch gering, erklären die „quasi“-Silbe bei den Undulator-Eigenschaften !!

=> d.h. auch das Problem Kohärenz bleibt !!

Ausblick: Free Electron Laser

Tatsächlich arbeiten fast alle Speicherringe nicht „genau“ genug, um die erforderlichen Dichten von Elektronen zu erzeugen. Es bleibt für wirklich gute Kohärenzlängen eine zu große Ungenauigkeit im „bunch“. Daher greift zur Beschleunigung und Bündelung wieder auf Linierbeschleuniger (*LINACS*) zurück.

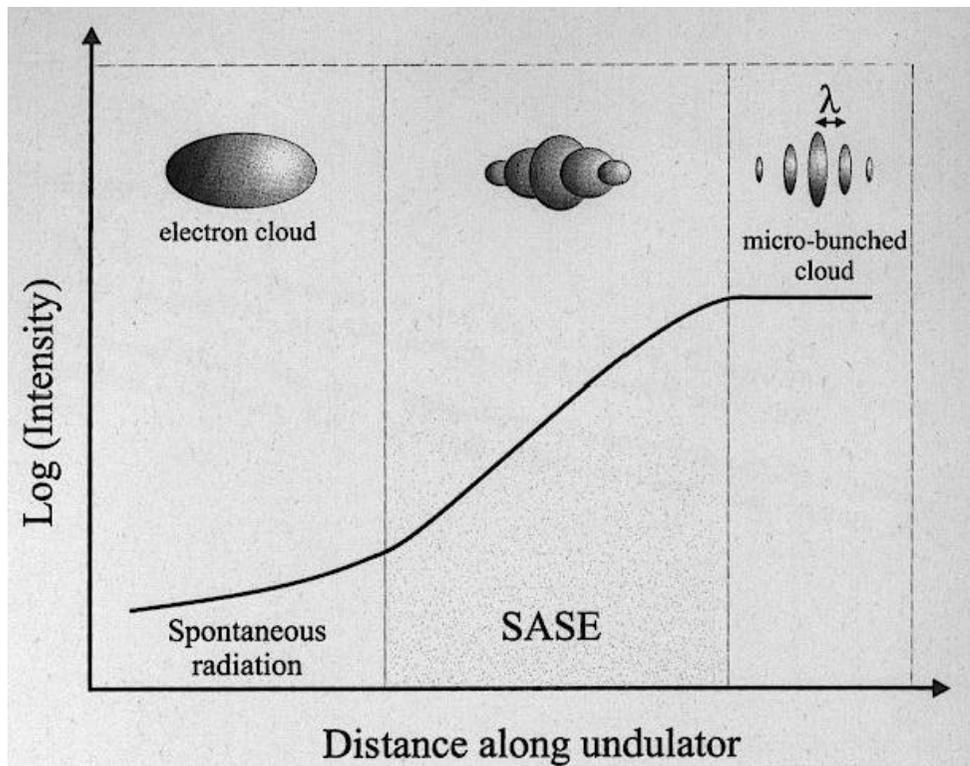


Beschleunigung auf über 10 MeV ist wegen sehr hoher benötigter Spannungen nicht mit elektrostatischen Feldern möglich.
=> Elektromagnetisches Wechsel-feld wird synchron zur Teilchen-geschwindigkeit in seiner Frequenz geregelt.

Linearbeschleuniger

- Hochfrequenz el. magn. Wechselfeld
- vorgegeben Richtung der Elektronen im Beschleuniger Rohr
- überall im Rohr gleich Phasengeschwindigkeit der el.magn. Welle, die gleich der Teilchengeschwindigkeit ist

Ausblick: Free Elektron Laser



Sollte es nun gelingen, die Elektronendichte in den bunches innerhalb eines Undulators derart zu erhöhen, dass (statt spontaner) **stimulierte Emission** dominiert, hätte man einen **echt monochromatischen** sowie **kohärenten** Laser.

SASE: self amplified stimulated emission

ein erst spontan erzeugtes Photon (bzw. em-Welle) verstärkt sich bei der nächsten Ablenkung im *Undulator* selber.

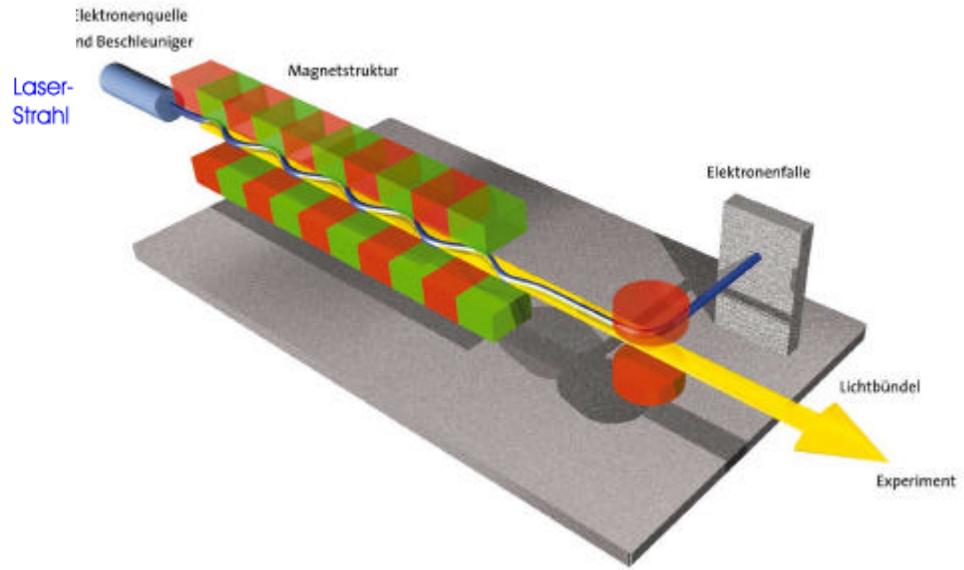
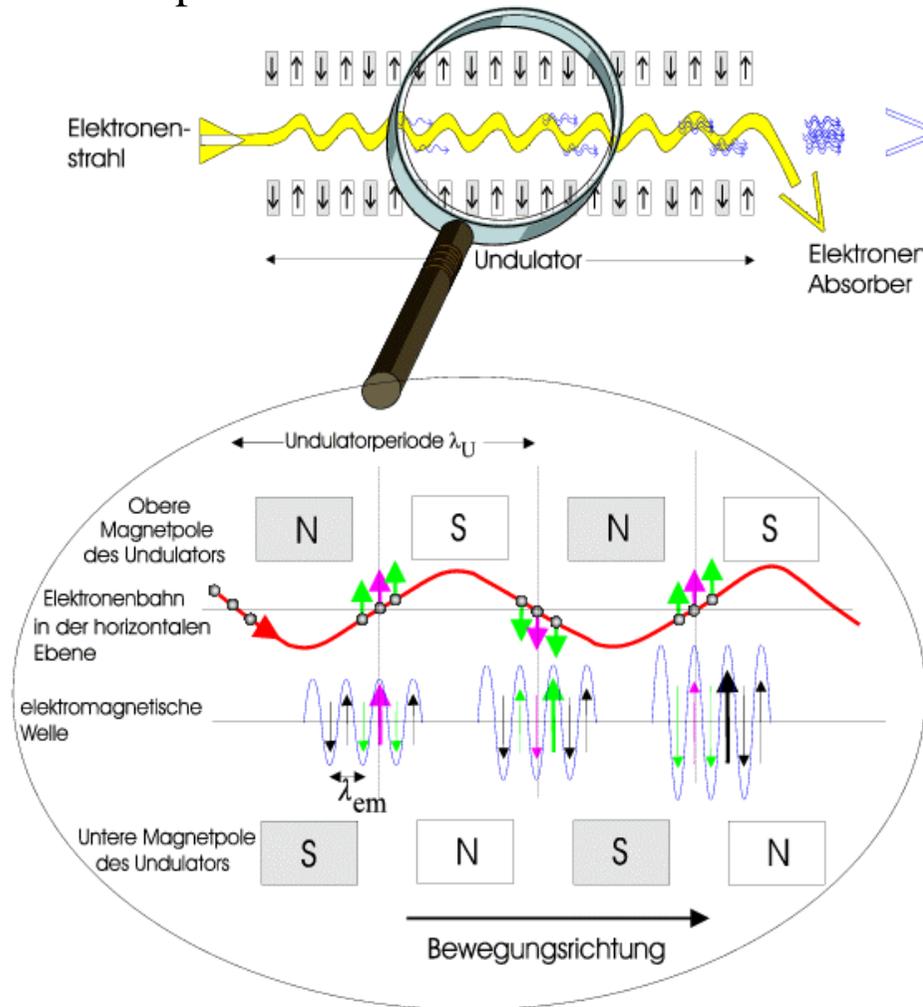
Die Wellenlänge der Elektronenpakete („bunches“) bildet mit der emittierte Strahlung eine Interferenzwelle (ponderomotive wave), die mit der Wellenlänge der Elektronen übereinstimmt.

$$\Rightarrow I \text{ des FEL} \sim (\text{Anzahl der Photonen})^2$$

Ausblick: Free Electron Laser

Prinzip eines FEL

Schema eines FEL



- Um bis zu 10 Größenordnungen höhere Brillianz im Vergleich zu den bisher stärksten Quellen.
- sehr kurze Pulse im Bereich von Femtosekunden (Pulsbreite)
- X-FEL Projekt am DESY (Hamburg), Bauzeit bis ca. 2009

Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

Röntgendetektoren

Die gängigsten Detektorentypen in der Röntgenkristallographie

- Zählrohr (=> Einzelspotmessungen, 0D-Detektor)
- Drahtzähler (=> Radialmessungen, 1D-Detektor)
- Röntgenfilm (2D-Detektor)
- „Image-Plate“- Detektor (2D-Detektor)
- CCD-Kamera (2D-Detektor)

Anforderungen an Detektoren (i.A. Flächenzähler) in der Kristallographie

- gute Ortsauflösung (μm - mm)
- gute Intensitätsauflösung, großer dynamischer Bereich
- schnelle und bequeme Auslesbarkeit der Daten
- i.A. keine Zeitauflösung und keine Energieauflösung, da die Messung eine zeitliche Summation über elastische gestreute Photonen darstellt.
Ausnahme: Zeitaufgelöste Strukturanalysen z.B mit dem Laue-Verfahren unter Verwendung gepulster Strahlquellen.

Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

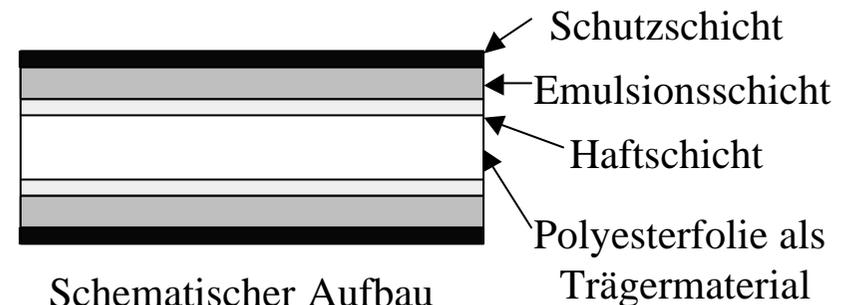
Röntgenfilm

Der Röntgenfilm ist das älteste und billigste Detektormedium zur Analyse von Strahlintensitäten. Das Prinzip des Röntgenfilms basiert auf folgenden Prozessen:

- Absorption der Röntgenquanten von Elementen mit hohen Kernladungszahlen
- Nach der Anregung wird Fluoreszenzlicht im sichtbaren Bereich emittieren.
- Das Fluoreszenzlicht dient zur Schwärzung des Films (Filmemulsion)
- Die Filmschwärzung wird mit einem Mikrodensitometer quantifiziert und gibt ein Maß
- zur Intensitätsbestimmung der gebeugten Strahlintensitäten.

Photoemulsion

- Absorbermaterial: Calciumwolframat, Lanthanoxibromid Gadolinium Oxisulfide (dotiert mit Terbium)
- Filmemulsion: z.B. AgBr
- Effizienz der Röntgenabsorption 20 – 60 %
- Effizienz der Absorption des Fluoreszenzlichts > 90%



Schematischer Aufbau
eines Röntgenfilms