

4.4 Strahlungsquellen

Zur Beschreibung der Ergiebigkeit einer Strahlungsquelle ist der Fluss definiert. Zur Messung denke man sich einen Zähler mit einem Eintrittsfenster mit einer bestimmten Fläche. Der Fluss ist das Ergebnis der in einer Einheit der Zeit registrierten Ereignisse, bezogen auf eine Flächeneinheit des Zählerfensters. Der Fluss kann z. B. als Funktion des Abstands von der Quelle angegeben sein.

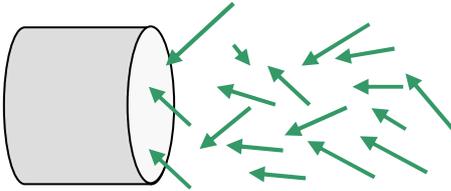
	Einheit		
$\phi = \frac{1}{A \cdot t}$	$\frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$		Definition des Flusses. A Fläche des Fensters, t Messzeit. Die Pfeile zeigen z. B. die Vektoren der Geschwindigkeit von Neutronen

Tabelle 1 Definition des Flusses

Oft möchte man wissen, ob sich der Fluss mit der Art der registrierten Ereignisse, z. B. deren Wellenlänge (bei Neutronen äquivalent ihrer Geschwindigkeit) oder mit der Richtung, aus der die Ereignisse empfangen werden, ändert. Deshalb definiert man „differentielle“ Flussangaben, z. B. als Kurve in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Der Fluss für Strahlung mit Wellenlängen zwischen zwei Grenzen ist dann das Integral über diese Kurve zwischen den Grenzen.. Manchmal wird aber auch der Fluss für eine bestimmte Bandbreite angegeben.

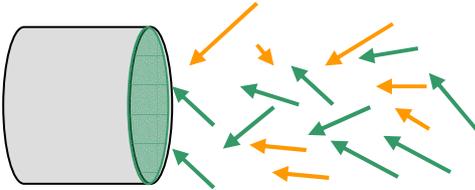
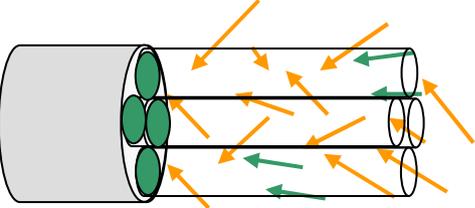
$\left. \frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{1}{A \cdot t} \right _{\lambda=\lambda_0}$	$\frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{nm}}$		Differentieller Fluss pro Wellenlänge: Der Zähler lässt nur das Band der Breite $d\lambda$ um die Wellenlänge λ_0 durch das Fenster
$\left. \frac{d\phi}{d\Omega} = \frac{1}{A \cdot t} \right _{\Omega=\Omega_0}$	$\frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}}$		Differentieller Fluss pro Raumwinkel, z. B. durch einen Kollimator, der nur Strahlung im Raumwinkel zwischen Ω_0 (im Bild 0) und $\Omega_0 + d\Omega$ erfasst

Tabelle 2 Definition des differentiellen Flusses. Die Pfeile stehen für Geschwindigkeitsvektoren von Neutronen. Nur Teilchen mit grünen Vektoren werden registriert, weil sie in das differentielle „Fenster“ des Zählers passen.

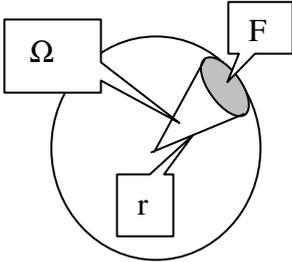
$\Omega = \frac{F}{r^2}$		Definition des Raumwinkels, eine dimensionslose, „Steradian“ (abgekürzt : sr) genannte Zahl
--------------------------	---	---

Tabelle 3 Definition Raumwinkels Steradian

4.4.1 Röntgenstrahlung

Für Röntgenstrahlung gibt es zwei Arten von Quellen: die Röntgenröhre und das Synchrotron. In beiden Quellen strahlen beschleunigte Elektronen elektromagnetische Strahlung ab. In der Röntgenröhre wird der wesentliche Anteil aber von der charakteristischen Strahlung geliefert, deren Ursache elektronische Übergänge in den inneren Schalen des Anodenmaterials sind. Im Synchrotron wird die Strahlung von beschleunigten Elektronen emittiert, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

4.4.1.1 Strahlung aus Röntgenröhren

Eine Röntgenröhre besteht aus einem evakuierten Zylinder mit Glühkathode und metallischer Anode. Zwischen Kathode und Anode wird eine Spannung von 50 kV gelegt. Die glühende Kathode erzeugt Elektronen, die durch das elektrische Feld zwischen Kathode und Anode beschleunigt werden.

	Dimension	
$W = e \cdot U$	J	Energie der Elektronen beim Auftreffen auf der Anode
$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$	C	Elementarladung, Ladung des Elektrons
1 eV	$1,6 \cdot 10^{-19}$ J	Energie Umrechnung von Elektronenvolt auf Joule
$\lambda [\text{Å}] = \frac{12,4}{U[\text{kV}]}$		Kürzeste Wellenlänge λ , die mit der Anregungsspannung U erreichbar ist (vgl. http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/VK3_Strahlungen.DOC)

Tabelle 4 Energie der Bremsstrahlung

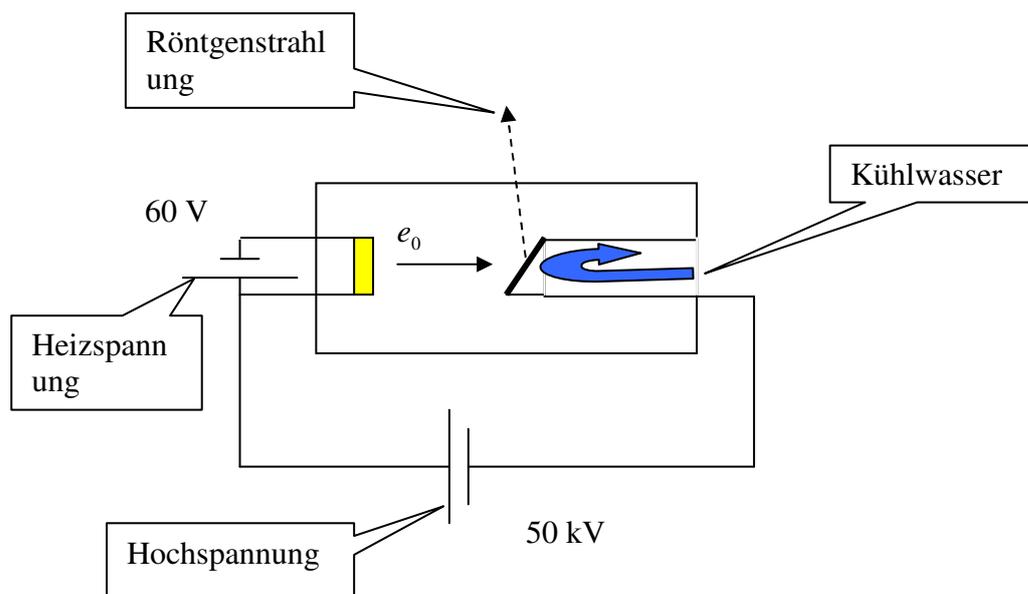


Abbildung 1 Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre

Beim Aufprall der beschleunigten Elektronen auf die Anode gibt es zwei Effekte, die Röntgenstrahlung erzeugen:

- Das im Material der Anode abgebremste, negativ beschleunigte Elektron sendet „Bremsstrahlung“ aus. Die Energieaufnahme im elektrischen Feld der Spannung U bestimmt die kürzeste Wellenlänge:
 - Neben der Bremsstrahlung entsteht eine für das Anodenmaterial „charakteristische Strahlung“: Das beschleunigte Elektron hebt ein Elektron aus einer inneren Bahn eines Atoms bis in das Kontinuum, die entstandene Lücke wird durch Übergänge von benachbarten Bahnen aufgefüllt. Die Frequenz der dabei emittierten Strahlung berechnet sich aus den Energieniveaus des Elements der Anode. Wird die innerste K-Schale ionisiert, dann wird bei einem Übergang aus der benachbarten L-Schale die K_α -Strahlung emittiert. Diese ist die für das Anodenmaterial „charakteristische Strahlung“, für deren Frequenz ergibt das Moseleysche Gesetz mit der Rydberg-Konstanten R :

$$\nu_{K_\alpha} = \frac{3}{4} \cdot R \cdot (Z - 1)^2$$

Man erkennt, dass die Frequenz der Strahlung mit der Elektronenzahl Z zunimmt.

Übergang		Cu (Z=29)	Mo (Z=42)
K	α_1	1,544390	0,75044
	α_2	1,540562	0,74620
	β	1,39 bis 1,38	0,66 bis 0,65

Tabelle 5 Wellenlängen der charakteristischen K-Strahlung aus Kupfer und Molybdän

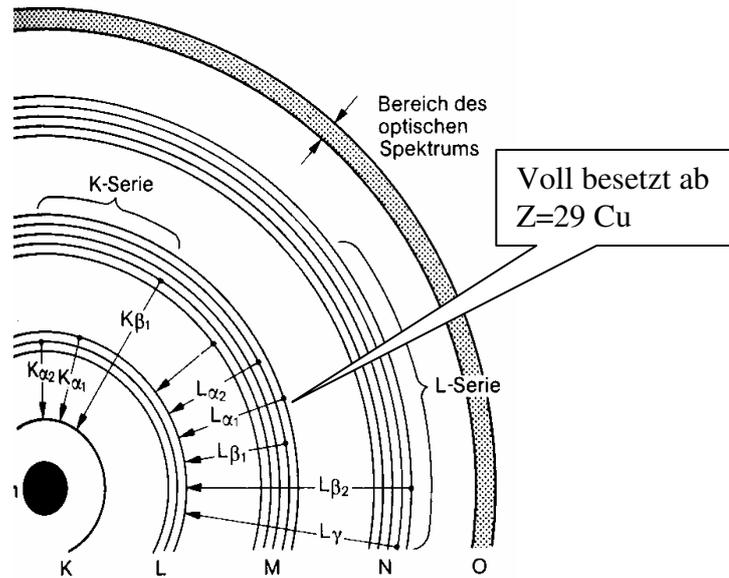


Abbildung 2 Schema der Übergänge bei der Emission der charakteristischen Röntgenstrahlung

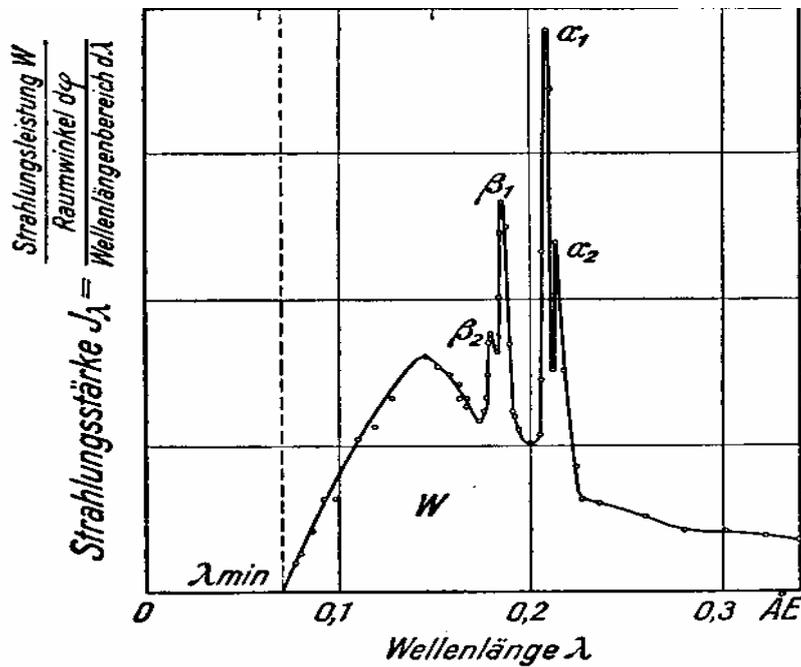


Abbildung 3 Bremsspektrum und charakteristische Strahlung einer W-Anode bei 160 kV Betriebsspannung (für Grobstrukturuntersuchung). Quelle: Pohl, Optik und Atomphysik

4.4.1.2 Strahlung aus Synchrotronquellen

Eine spezielle Quelle für Röntgenlicht sind Synchrotron Strahlungsquellen (http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V6_3Magnet.DOC - Synchrotron). Im Synchrotron werden Elektronen, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, durch starke Magnete abgelenkt. Die beim Flug durch den Magneten kurzzeitig ausgesandte Strahlung ist als Folge des engen Zeitfensters auf der Frequenzskala auf weiß verbreitert und reicht von harter Röntgenstrahlung bis zur Radiofrequenzen. Für jede Anwendung steht damit Licht hoher Intensität der gewünschten Wellenlänge bereit. Im Gegensatz zur Röntgenröhre gibt es keine scharfe kurzwellige Grenze, dagegen eine kritische Wellenlänge, unterhalb der die Intensität schnell abfällt.

Vgl. (http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V9_1Strahlung.DOC)

Die Abstrahlcharakteristik eines auf einer Kreisbahn, also beschleunigt, bewegten Elektrons ändert sich bei Annäherung der Geschwindigkeit an die Lichtgeschwindigkeit ($\beta \approx 1$), ($\beta = v/c$). Weil die Elektronenmasse so klein ist, werden so hohe Geschwindigkeiten – trotz relativistischer Massezunahme – bei Durchlaufen von Spannungen im GV (10^9 V) Bereich erreicht.

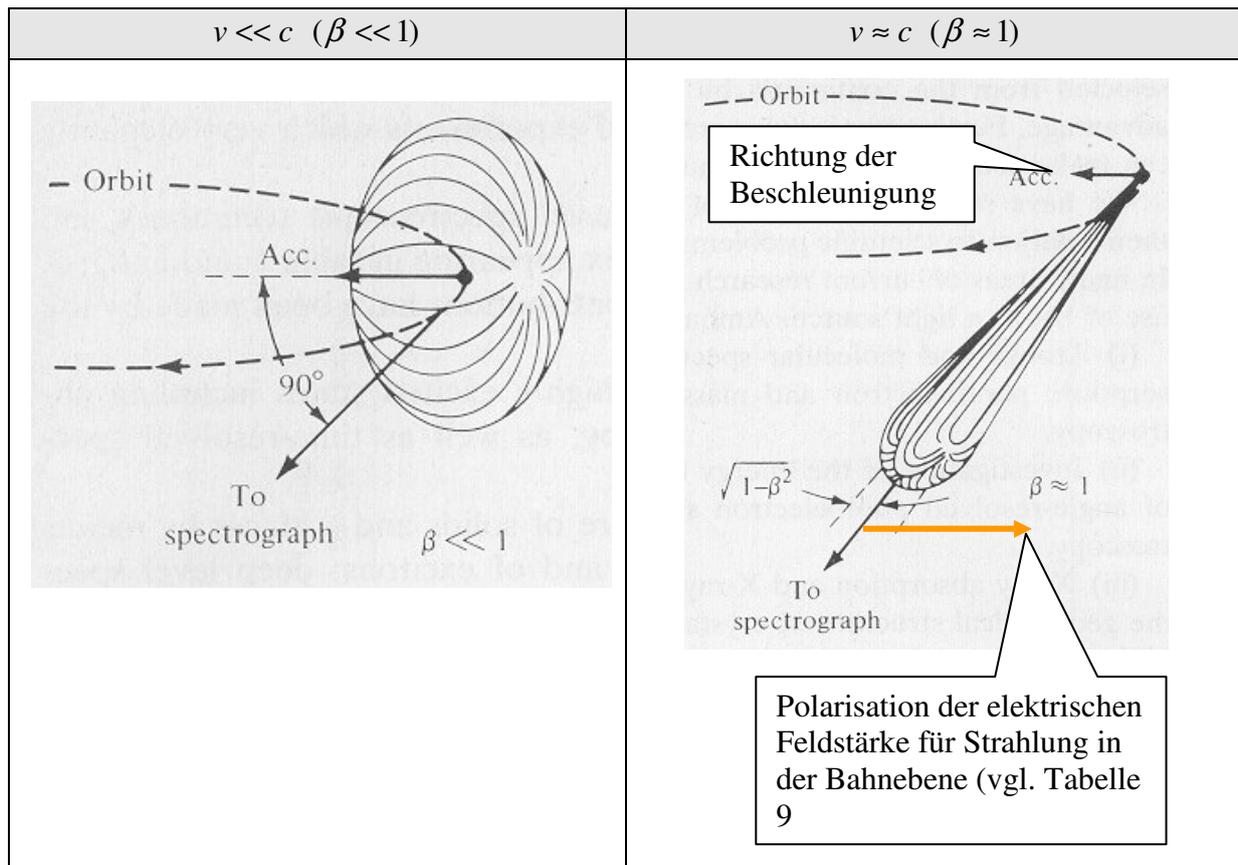


Tabelle 6 Dipolstrahlung beschleunigter geladener Teilchen bei nichtrelativistischer und relativistischer Geschwindigkeit (Quelle für die Bilder in diesem Abschnitt: E. Koch, (1983) Handbook of Synchrotron Radiation, Vol. 1A, North Holland Pub. Comp., Amsterdam, New York, Oxford)

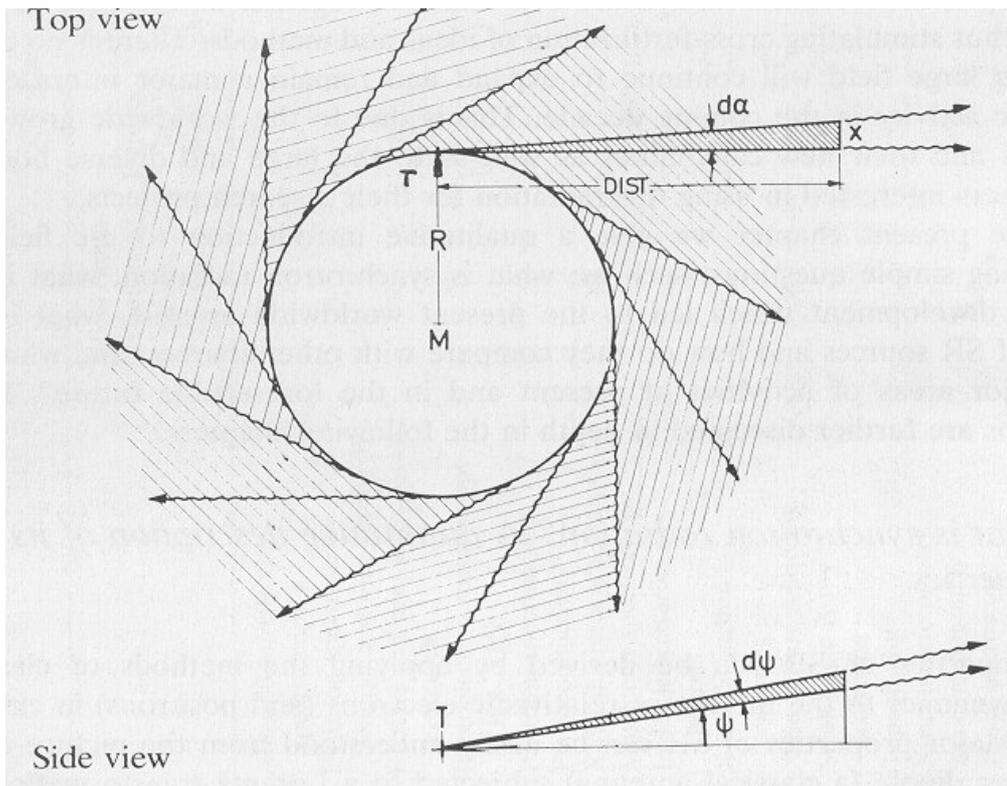


Abbildung 4 Strahlverteilung bei einem auf einer Kreisbahn umlaufenden Elektron mit Geschwindigkeit nahe c . Strahlung gibt es praktisch nur in der Ebene der Kreisbahn. Oben (Top view): Aufsicht auf die Ebene des Rings. Von jedem Punkt der Bahn geht tangential Strahlung aus. Unten: (Side view): Bezeichnung des Höhenwinkels aus der Ebene des Rings.

Bei Ablenkung auf einen Kreisbogen sendet ein Elektron mit relativistischer Geschwindigkeit Strahlung in einen „Strahlungsfächer“ aus, der in der Ebene des Kreisbogens liegt. Mit zunehmendem Höhenwinkel ψ nimmt die Intensität schnell ab.

	Einheit	
$P = \int I(\lambda, \psi) d\lambda d\psi = \frac{2 e^2 c}{3 R^2} \frac{E^4}{(m_0 c^2)^4}$	W	Gesamte, in den Strahlungsfächer abgestrahlte Leistung bei Ablenkung eines relativistischen Elektrons auf eine Kreisbahn, integriert über den Höhenwinkel ψ und die Wellenlänge λ
R	m	Krümmungsradius der Bahn
E	J	Energie des Elektrons

Tabelle 7 Von einem relativistischen Elektron bei Ablenkung auf eine Kreisbahn abgestrahlte Energie

Bei mehreren im Ring umlaufenden Elektronen können die abgestrahlte Leistung, der Emissionswinkel senkrecht zur Bahn und die kritische Wellenlänge in Daten des Ringbetriebs formuliert werden:

	Einheit	
$P = 26,6 \cdot E^3 \cdot B \cdot I$	kW	Gesamte abgestrahlte Leistung
$\lambda_c = \frac{18,64}{B \cdot E^2} = 5,59 \frac{R}{E^3}$	Å	Kritische Wellenlänge
$\psi = \frac{1}{1957 \cdot E}$	rad	Abschätzung des Emissions -Winkels senkrecht zur Bahn-Ebene
E	GeV	Energie des Elektrons
B	T	Magnetfeldstärke zur Ablenkung
I	A	Stromstärke
R	m	Krümmungsradius der Bahn

Tabelle 8 Strahlungsleistung, kritische Wellenlänge und Ausdehnung des Emissionswinkels des Strahls senkrecht zur Bahn in Abhängigkeit von den Betriebsdaten

Die nutzbare Wellenlänge erstreckt bis etwa $0,1 \lambda_c$, allerdings unterhalb λ_c mit stark abnehmender Intensität.

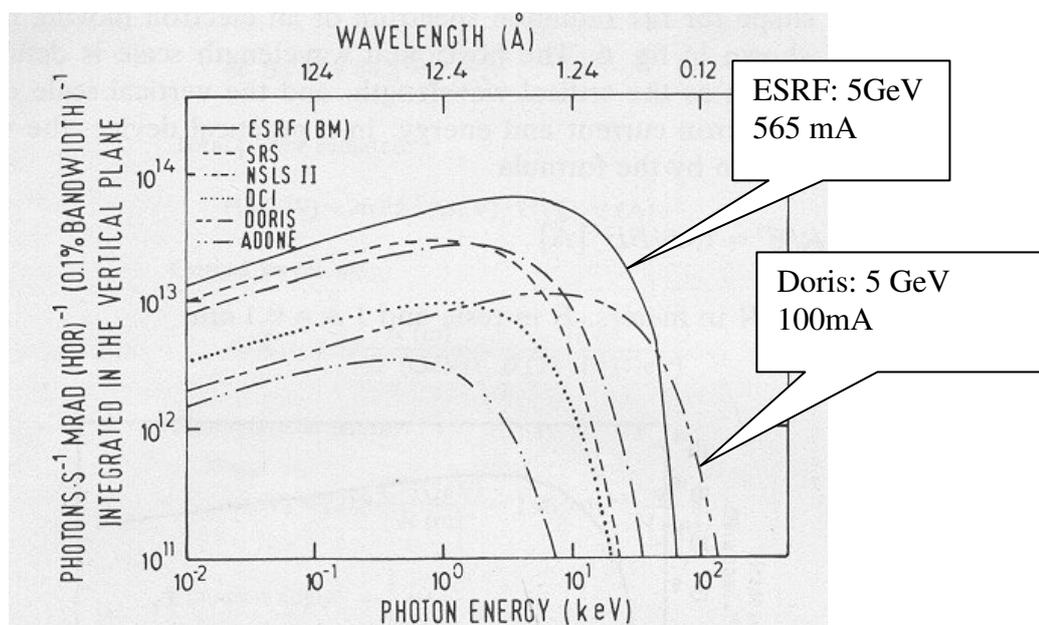


Abbildung 5 Photonenfluss in Abhängigkeit von der Photonenenergie für einige Synchrotron-Anlagen

Im Ring des Synchrotrons sammeln sich die Elektronen in „Bunches“ genannten Gruppen, so dass die Strahlung gepulst erscheint. Bei Doris hat jeder Lichtblitz eine Halbwertszeit von etwa 140 ps.

Strahlung kann außer von einzelnen Krümmungsmagneten auch von speziellen Anordnungen mit mehreren Magneten, den Wigglern und Undulatoren, erzeugt werden.

Eine wichtige Eigenschaft der Synchrotronstrahlung ist ihre lineare Polarisation in der Ebene der Elektronenbahn. Mit zunehmendem Winkel senkrecht zur Elektronenbahn mischt sich zur horizontalen Komponente der Feldstärke noch eine vertikale, so, dass die lineare Polarisation in eine zirkuläre übergeht:

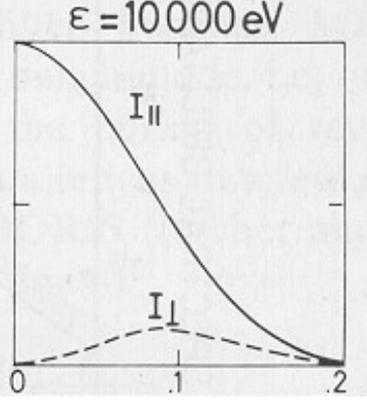
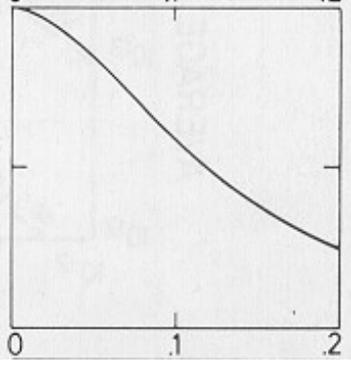
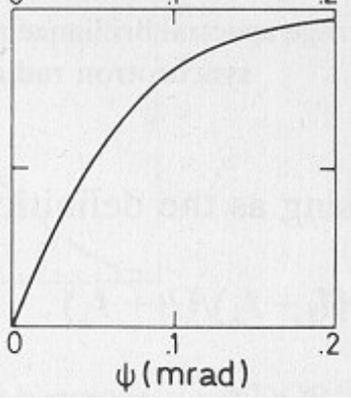
Intensität horizontal - und vertikal polarisierter Strahlung	Abnahme des Anteils linear polarisierten Lichts	Zunahme des Anteils vertikal polarisierten Lichts
		
Abszisse: Höhenwinkel aus der Ebene des Rings		

Tabelle 9 Polarisation des Synchrotronlichts, bei $E=3,5$ GeV, $R=12.2$ m. ($1\text{mrad} = 1\text{mm}$ Höhe bei 57 m Radius)

Aktuelle Information zur Europäischen Synchrotronquelle: <http://www.esrf.fr/>.

4.4.2 Neutronenquellen

Neutronen entstehen bei Kernreaktionen. Für die Anwendung in Beugungsversuchen gibt es zwei Möglichkeiten, Neutronen zu erzeugen:

- Mit Kernreaktor, in ihnen entsteht ein kontinuierlicher Neutronenfluss
- Mit Spallationsquellen, sie erzeugen Neutronen Pulse

4.4.2.1 Kernreaktoren

Der fundamentale Prozess im Reaktor ist die Kernspaltung von $^{235}_{92}\text{U}$. Im Natururan ist $^{235}_{92}\text{U}$ nur zu etwa 0,7 % enthalten, 99,3% sind $^{238}_{92}\text{U}$, ein kleiner Anteil, 0,006%, $^{233}_{92}\text{U}$. Weil nur $^{235}_{92}\text{U}$ unmittelbar spaltbar ist, wird in den Reaktoren mit diesem Isotop angereichertes Material verwendet. Um einen hohen Fluss an thermische Neutronen zu erhalten, ist für Forschungsreaktoren hochangereichertes Uran mit einem $^{235}_{92}\text{U}$ Anteil von ca. 93%, besonders geeignet („HEU“ für High Enriched Uranium). Leistungsreaktoren zur Stromerzeugung arbeiten mit nieder angereichertem Uran, $^{235}_{92}\text{U}$ Anteil etwa 2% („LEU“ ..Low...).

Isotop	Anteil im Natururan	Anmerkung
$^{238}_{92}\text{U}$	99,3%	<p>Nimmt Neutronen mittlerer und hoher Geschwindigkeit auf und verwandelt sich über $^{239}_{92}\text{U}$ (HWZ 23,5 Min) und Neptunium $^{239}_{93}\text{Np}$ (HWZ 2,355 Tage) in Plutonium $^{239}_{94}\text{Pu}$ um. Plutonium (HWZ 24110 Jahre) ist durch langsame und, noch besser aber durch schnelle Neutronen spaltbar (Diese Reaktion wird in der „Brüter“ Technik eingesetzt)</p> $^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + ^{239}_{93}\text{Np}, \quad ^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + ^{239}_{94}\text{Pu}$
$^{235}_{92}\text{U}$	0,7%	<p>Nimmt langsame Neutronen auf und zerfällt unter der Abgabe von 2 oder 3 Neutronen in zwei leichtere Kerne. Alle Reaktionsprodukte sind zusammen leichter als der Ausgangskern: Dieser Massendefekt entspricht der freiwerdenden Energie.</p> <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD A["^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ^{89}_{36}\text{Kr} + ^{144}_{56}\text{Ba} + 3{}^1_0\text{n} + Energie"] B["Langsame Neutronen spalten"] C["Schnelle Neutronen: 1\text{MeV} \le E_{\text{kin}} \le 10\text{MeV}"] D["Der Moderator bremst die Neutronen auf E_{\text{kin}} im meV"] B --> A C --> A D --> B D --> C </pre> </div>

Tabelle 10 Bestandteile des natürlich vorkommenden Urans

Der entscheidende Effekt bei der $^{235}_{92}\text{U}$ Spaltung ist die Kettenreaktion, weil ein Neutron 2-3 Neutronen auslöst, von denen jedes, auf entsprechend langsame Geschwindigkeit gebracht, eine weitere Reaktion auslösen kann. Die Anzahl der Neutronen erhöht sich exponentiell mit der Zahl der Zerfalls-Generationen, im Mittel wird mit $2,5^n$ Neutronen in der n . Generation gerechnet.

Bei dem Zerfall von $^{235}_{92}\text{U}$ entstehen unterschiedliche Trümmer-Elemente, deren Massenzahlen sich meist wie 2:3 verhalten. Aufgrund des Neutronenüberschusses im Kern sind die Spaltprodukte zum großen Teil radioaktiv. Sie verwandeln sich unter Aussenden von Beta Strahlen über Zerfallsreihen in stabile Kerne, oft werden dabei weitere Neutronen emittiert.

Während bei Leistungsreaktoren die Energieerzeugung im Vordergrund steht, ist bei Forschungsreaktoren hoher Neutronenfluss angestrebt. Beim Zerfall $^{235}_{92}\text{U}$ entsteht in jedem Fall Energie, sie wird in Forschungsreaktoren durch Kühlung abgeführt.

	Einheit	
$E = m \cdot c^2$	J	Energie-Masse Äquivalenz (A. Einstein)
$c = 299792458$	$m \cdot s^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
0,001	kg	Massendefekt bei vollständiger Verbrennung von 1 kg $^{235}_{92}\text{U}$

Tabelle 11 Energie- Masse Äquivalenz

In Forschungsreaktoren liegt der Kern in einem offenen, mit schwerem Wasser gefüllten Bassin. Wollte man die entstehende Energie sie nutzen um etwa Strom zu erzeugen, dann müsste der Kessel, wie in Leistungsreaktoren, unter Druck gesetzt werden. Druck ist zum Betrieb von Turbinen nötig.

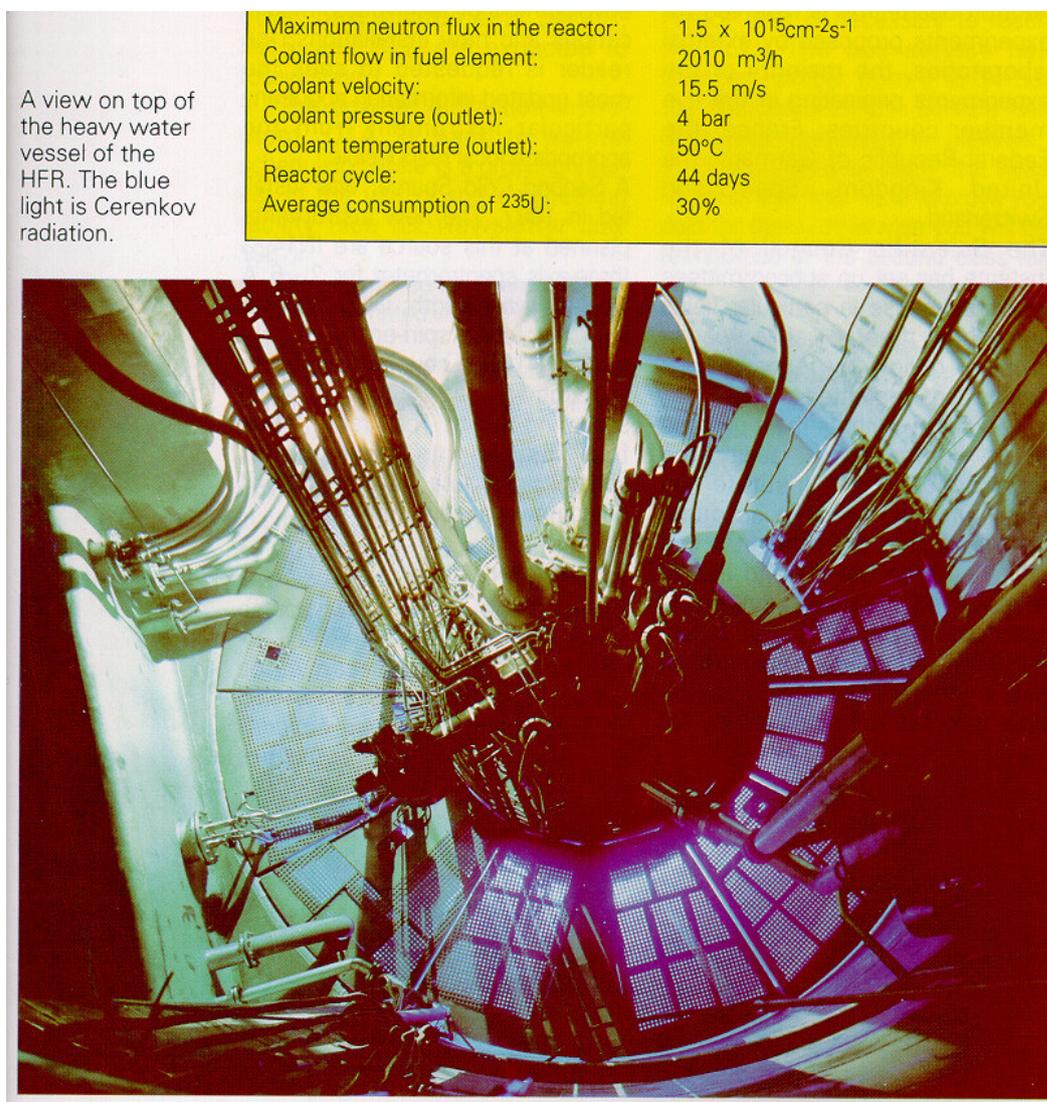


Abbildung 6 Blick in das oben offene Reaktorbecken des Forschungsreaktors am ILL Grenoble mit 57 MW thermischer Leistung. Der Durchmesser des Beckens beträgt 2,5m.

Die bei der Reaktion entstehenden Neutronen gleichen sich durch Stöße mit den Teilchen des schweren Wassers im Becken, das auf der Temperatur von 300 K gehalten wird, einer Maxwellverteilung für 300K an, der Mittelwert der Verteilung entspricht $1,2 \text{ \AA}$. Schweres Wasser wird verwendet, weil der Wasserstoff Neutronen einfängt, also absorbiert, und zu He wird.

Schweres Wasser wird durch Elektrolyse aus natürlichem Wasser gewonnen, im Rückstand des Elektrolyten kann sich schweres Wasser bis auf 98% anreichern. Es ist wegen seiner guten Bremswirkung und nur geringen Neutronen Absorption der beste Moderator für Kernreaktoren (verwendet in sog. Schwerwasser-Reaktoren).

Natürliches Wasser	Schweres Wasser	
0,015% ^2_1D , 99,985% ^1_1H		Anteil von Deuterium
1,000 g/cm ³ bei 4°C	1,107 g/cm ³ bei 11,6°C	Größte Dichte
0° C	3,72° C	Schmelzpunkt bei Normaldruck
100° C	101,42° C	Siedepunkt bei Normaldruck (101325 Pa = 760 Torr)

Tabelle 12 Natürliches und schweres Wasser: Einige Daten

Um Verteilungen mit Mittelwerten um $0,6 \text{ \AA}$ oder über 4 \AA zu erhalten, wird ein Graphitblock im Becken (Volumen 10 dm³) auf 2400K gehalten, als sogenannte „heiße Quelle“, für die langen Wellenlängen steht ein entsprechendes Volumen (25 dm³) kochendes Deuterium mit 25K bereit.

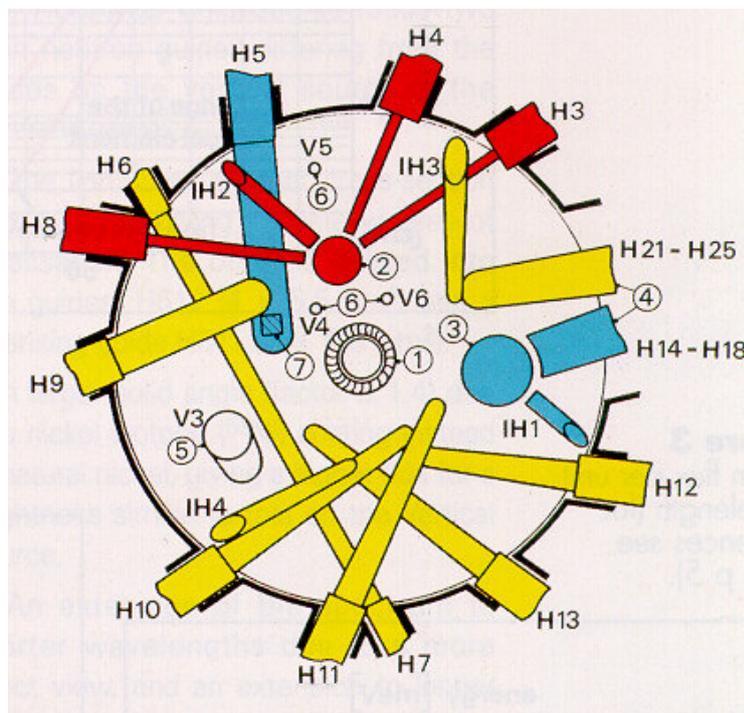


Abbildung 7 Strahlrohre am Reaktor im ILL: Gelb: Beginn der Strahlrohre für Neutronen aus der Maxwellverteilung für 300K, Rot: für kurzwellige Neutronen (2400K), Blau: für

langwellige Neutronen (25 K). (Quelle für die Bilder in diesem Abschnitt: „The Yellow Book“, Institut Max von Laue-Paul Langevin)

	Einheit	
$1,5 \cdot 10^{15}$	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Neutronenfluss
9	kg	Gesamtgewicht des Brennelements, es ist auf 93% $^{235}_{92}\text{U}$ angereichert
8,57	kg	$^{235}_{92}\text{U}$ Spaltbares Material im Brennelement
57	MW	Reaktorleistung

Tabelle 13 Daten des Forschungsreaktors ILL Grenoble

Die Neutronen werden durch Strahlrohre aus dem Reaktorbecken zu den Aufbauten für die Experimente geführt, die Strahlrohre können bis über 50m lang sein.

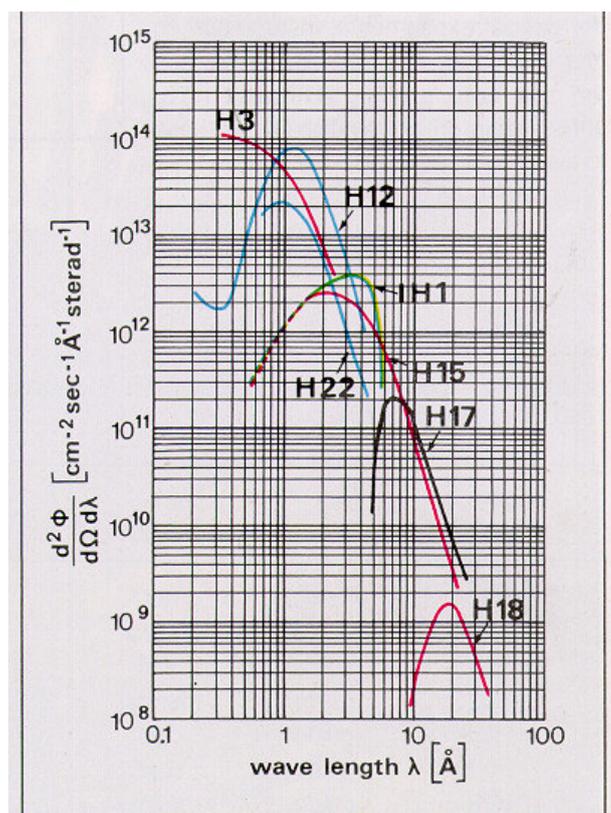


Figure 4 - Mean flux per unit wavelength per unit of solid angle.

Tabelle 14 Differentieller Fluss (Tabelle 2) für einige der in Abbildung 7 gezeigten Strahlrohre. H15, H17, H18 gehören (trotz unterschiedlicher Färbung) zur kalten Quelle, H3 gehört zur heißen Quelle, H12 ein Strahlrohr für thermische Neutronen zu 300K

Die Darstellung des differentiellen Flusses zeigt die Breite der Bänder der Wellenlängen für die Neutronen, die sich im thermischen Gleichgewicht mit dem Material unmittelbar vor dem Eintritt ins Strahlrohr befinden. Aktuelle Information zum ILL Grenoble: <http://www.ill.fr/>.

4.4.3 Zusammenfassung einiger Eigenschaften der Strahlungen aus unterschiedlichen Quellen

Die Strahlungen aus unterschiedlichen Quellen unterscheiden sich einerseits in ihren räumlichen Eigenschaften, in der Quellgröße und in der Korrelation zwischen Ort und Richtung. Andererseits sind auch die Bereiche der nutzbaren Wellenlängen, die Polarisation der Strahlung und die Zeitstruktur unterschiedlich.

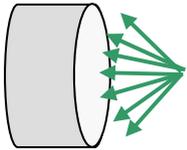
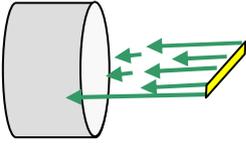
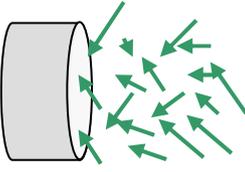
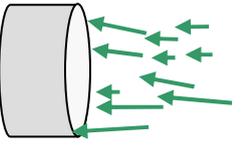
	Röntgen		Neutronen	
	Röhre	Synchrotron	Reaktor	Spallationsquelle
Leuchtende Fläche	Brennfleck der Röhre: ca. 0,4 mm hoch, 8 mm breit	in 10 m Abstand vom Ring : ca. 0,5 mm hoch, 10 mm breit	ca. 100 cm ²	ca. 100 cm ²
Richtungsverteilung	Divergent	Parallel	Breite Verteilung der Richtungen	Divergent
Orts-Richtungs-Korrelation	Hoch	Hoch	Nieder	Mittel
Polarisation	Unpolarisiert	Linear-polarisiert in der Bahnebene	Unpolarisiert	Unpolarisiert
Wellenlängenband	Schmal, charakteristische Linie des Anodenmaterials	Sehr breit	Breit, Maxwell-Verteilung	Sehr breit
Zeitstruktur	Stetig	Gepulst, MHz Takt, Pulsbreite ca. 140 ps	Stetig	Gepulst
Schematisch				

Tabelle 15 Zusammenfassung der Eigenschaften von Strahlung aus unterschiedlichen Quellen. Die Länge der Pfeile zeige die Wellenlänge. Die schematische Zeichnung für Neutronen zeigt die Situation am Austritt des Strahlrohrs aus dem Reaktor, links ist jeweils ein Zähler eingezeichnet.