
Synchrotron-Strahlung
***Vorstellung einer Methode zur
Festkörperuntersuchung***

Dennis Aulich & Daniel Schmidt

Technische Universität Berlin
FAKULTÄT II, Mathematik und Naturwissenschaften
Institut für Festkörperphysik

■ Erzeugung

- Eigenschaften
- Undulatoren und Wiggler
- Komponenten eines Synchrotrons

■ Optische Komponenten

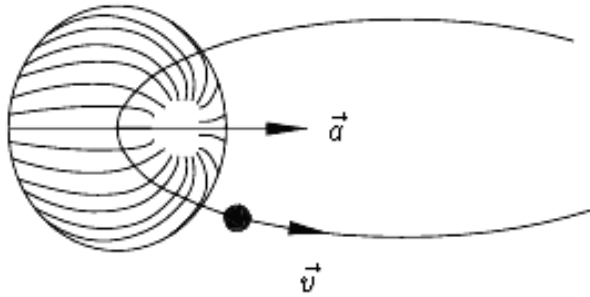
- Monochromatoren

■ Anwendung

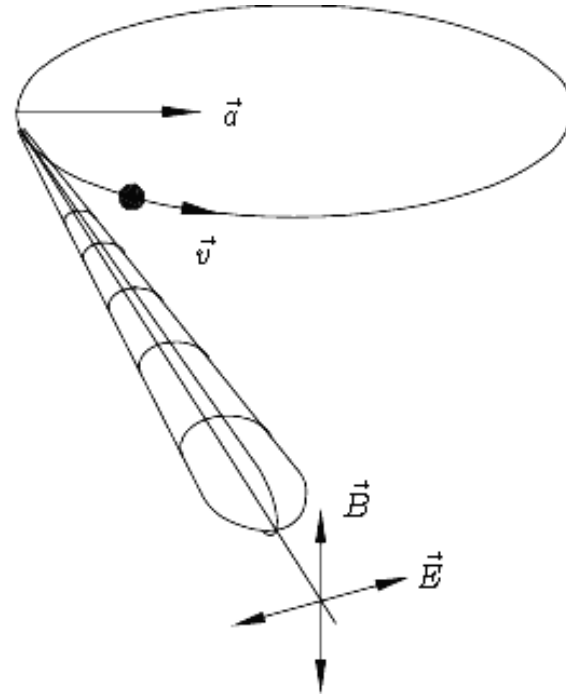
- Experimentierverfahren
- Energiebanduntersuchung

Erzeugung der Synchrotronstrahlung

Beschleunigte Ladungen strahlen
(z.B. Röntgenbremsstrahlung)



$$v \ll c$$



$$v = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ km/s} \approx c$$
$$E \approx 1,7 \text{ GeV}$$

Geschichte

	1940-1950 vorhergesagt
	1947 experimentelle Beobachtung
1. Generation	1956 erste Verwendung in der Spektroskopie
2. Generation	1970 erste dedizierte Quelle
	1978 erste Experimente mit Undulator und Wiggler
3. Generation	1988 erste Nutzung von Undulator und Wiggler

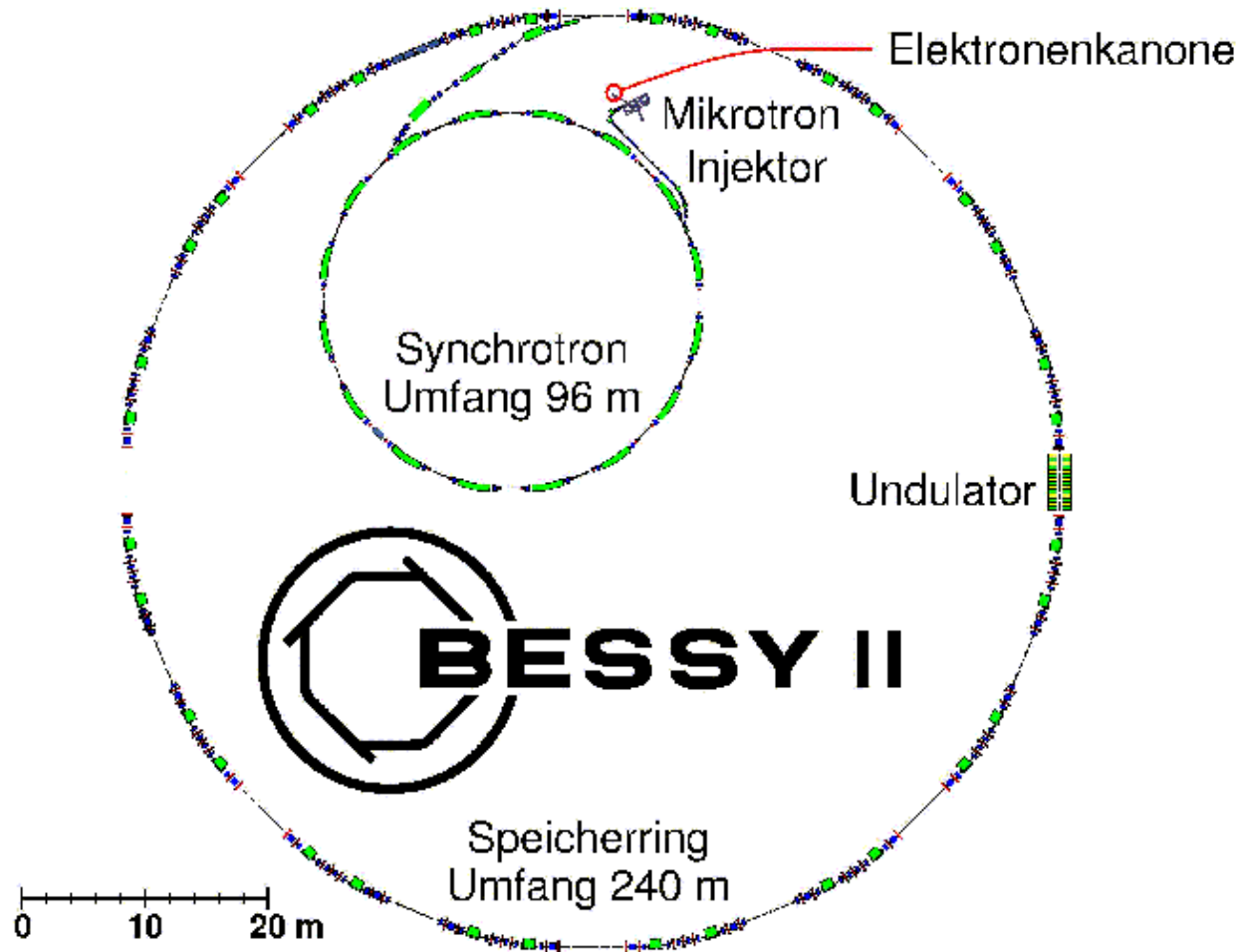
Vorteile der Synchrotronstrahlung

- Kontinuierliches Spektrum von IR bis harter Röntgenstrahlung
- Hohe Intensität
- Hohe Brillianz (Photonenfluss pro Raumeinheit)
- Zeitstruktur
- Polarisation
- exakt berechenbar und -steuerbar

Komponenten eines Synchrotrons

1. Vakuum-System
2. Injektions- und Beschleunigungssystem
3. Hochfrequenz-Resonator
4. Ablenk- und Fokussiermagnete
5. Strahlungserzeugung
6. Kontrollsystem
7. Strahlenschutz
8. Beam-Line

Das Injektions- und Beschleunigungssystem

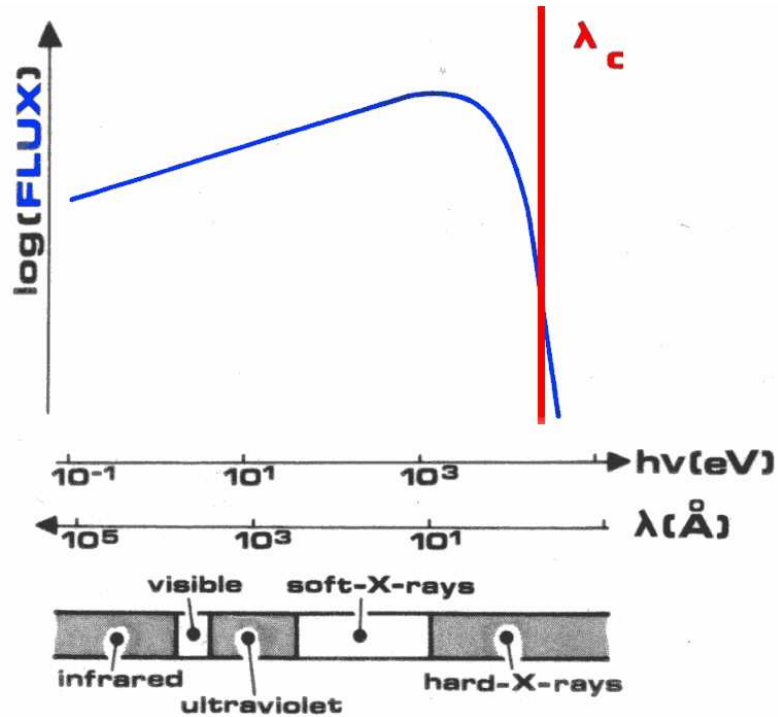


Glühkathode
Linearbeschleuniger
Synchrotron

100 keV
50 MeV
1,7 GeV

Erzeugung der Synchrotronstrahlung

Durch Ablenkmagnet



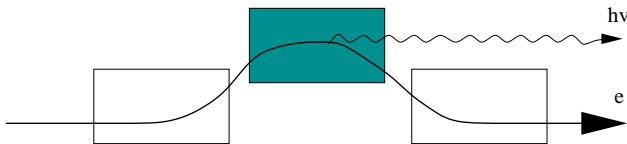
kritische Wellenlänge

$$\lambda_c = \frac{4\pi\rho}{3\gamma^3}$$

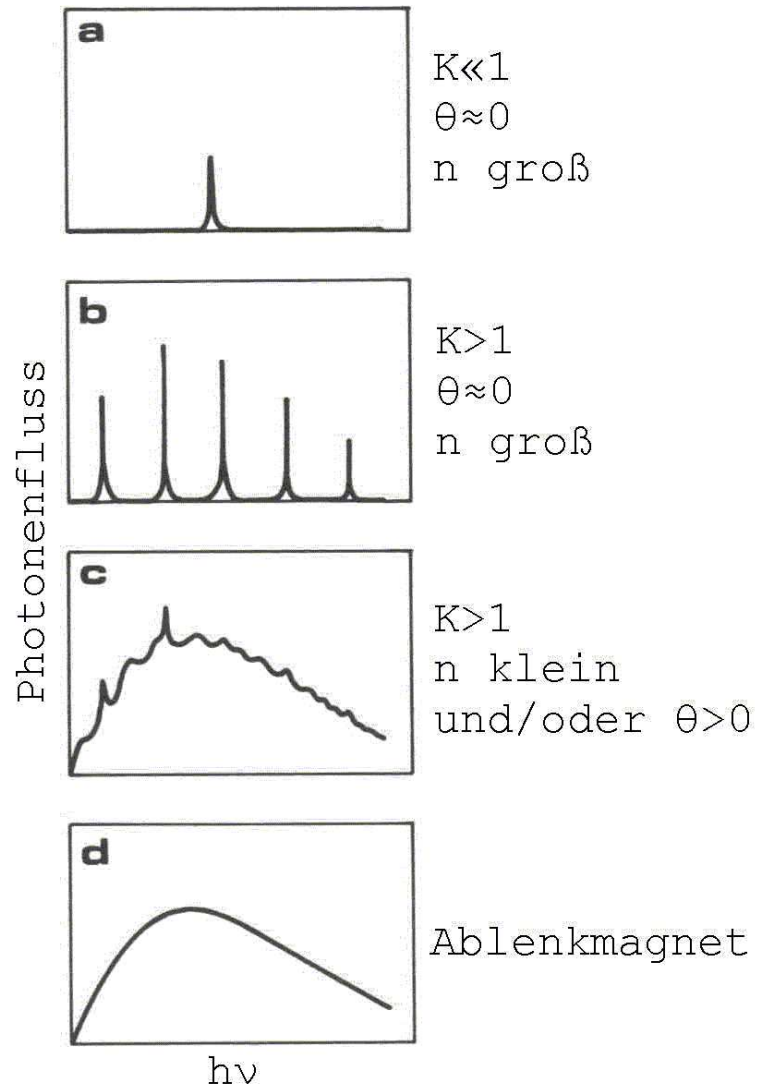
ρ Ablenkradius

$\gamma = \frac{E_{kin}}{E_0}$ Energieverhältnis

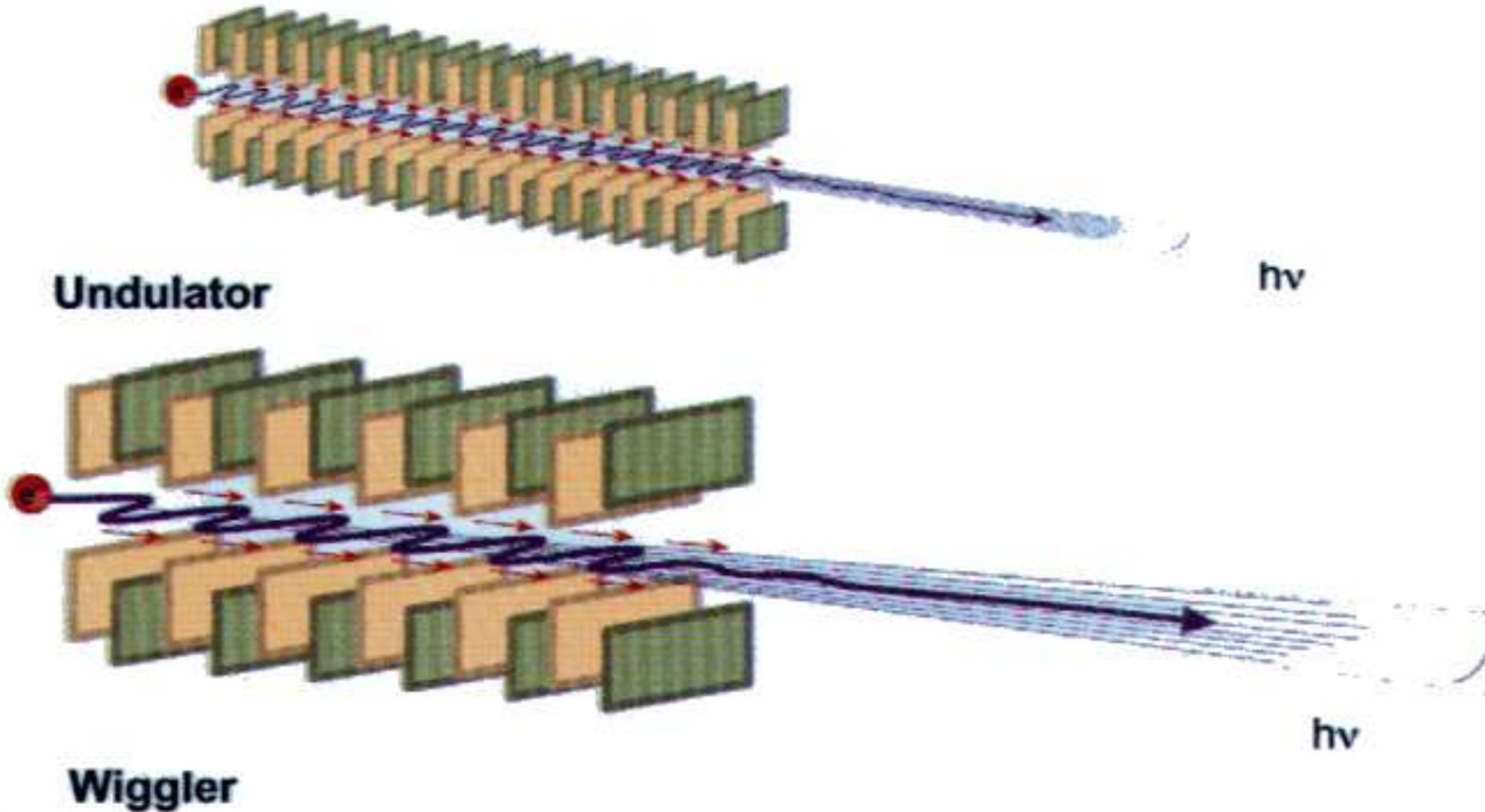
kürzere Wellenlänge durch Wellenlängenschieber (Shifter)



Undulatoren und Wiggler



Undulatoren und Wiggler



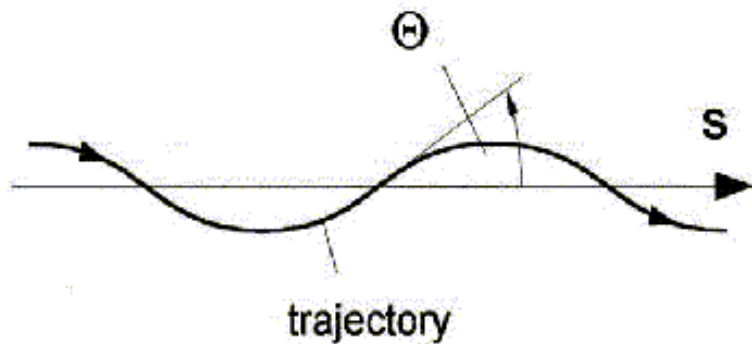
Undulatoren und Wiggler

(insertion devices)

Unterscheidung durch Undulatorparameters

$$K = \frac{\lambda_U e B}{2\pi m_0 c}$$

$$\Theta = \frac{K}{\lambda}$$



Undulator

$$K \leq 1, \Theta \leq \frac{1}{\gamma}$$

n^2 -fache Intensität

Wiggler

$$K > 1, \Theta > \frac{1}{\gamma}$$

$2n$ -fache Intensität

Nachbeschleunigungssystem

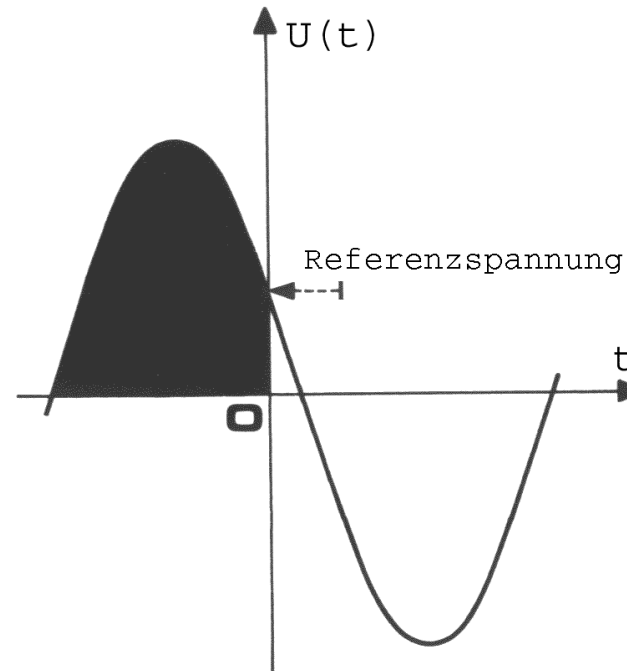
(Hochfrequenzresonator)

Abgestrahlte Energie pro Elektron und Umlauf:

$$\Delta E = \frac{e^2 \gamma^4}{3 \epsilon_0 r_0}$$

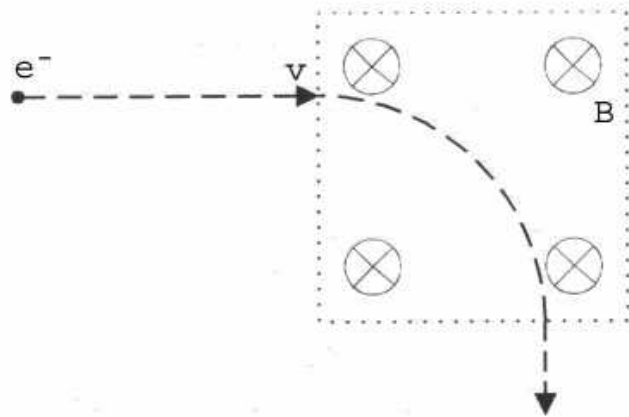
⇒ Rückführung von Energie

Resonatorfrequenz Einteilung der Elektronen in Bunches
Frequenz 500 Mhz
Länge eines Bunches $\approx 10\text{cm} \cong 0,02\text{ ns}$

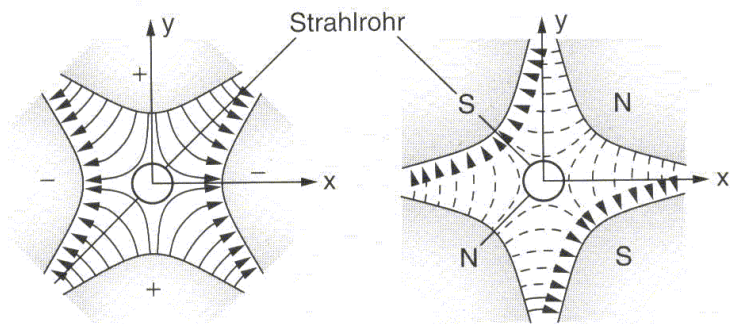


Strahlfokussierung

Lorentzkraft

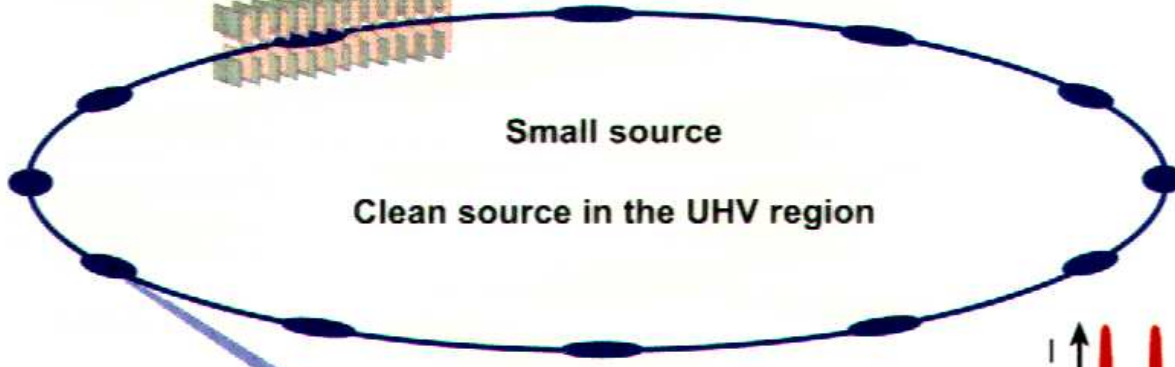
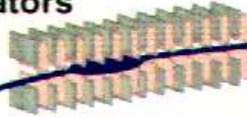


Elektrische und Magnetische Quadrupole



Synchrotron-Strahlung

Wigglers + Undulators



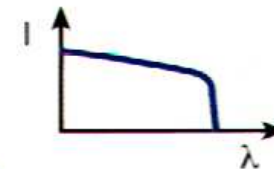
Strongly bundled

Temporal structure



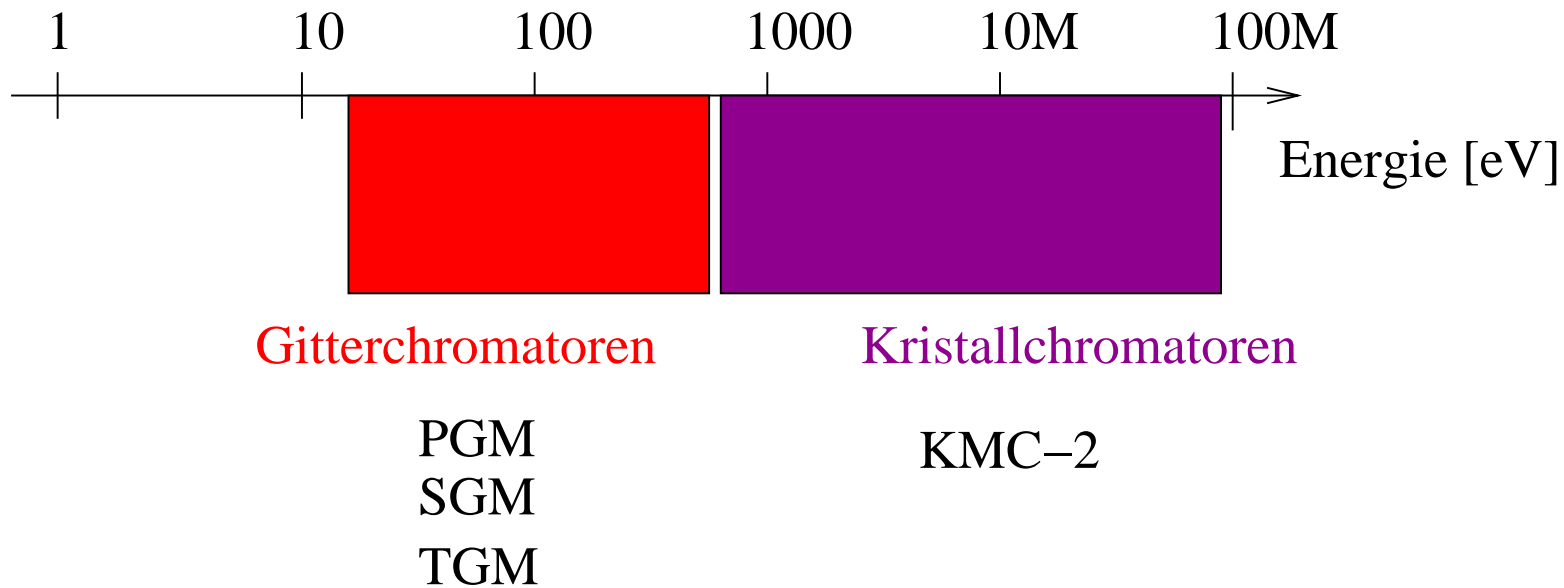
Can be precisely calculated $I = f(\lambda, \psi, E, \rho)$

Polarized

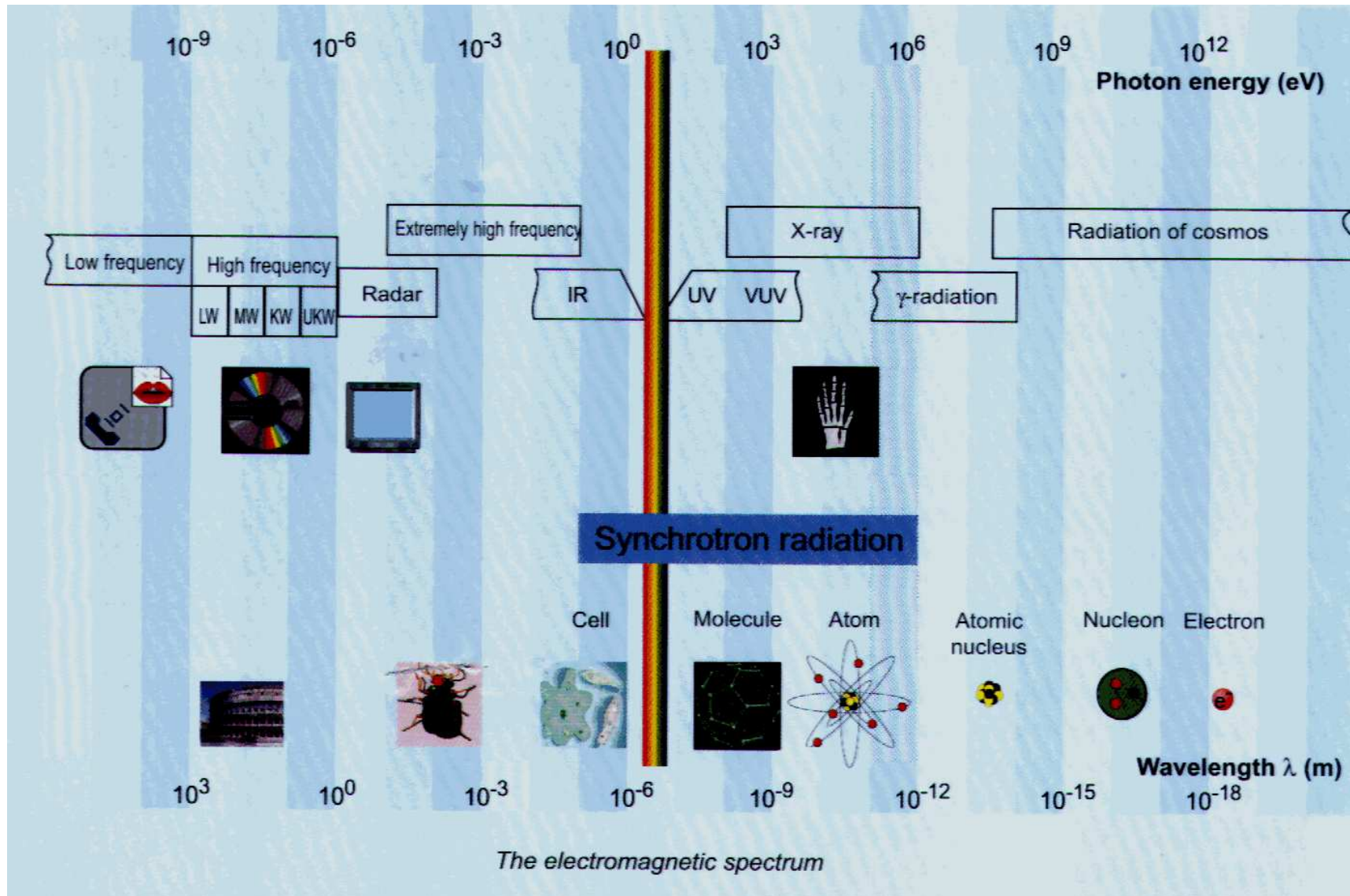


Large range of wavelength

Optische Komponenten (beamline)

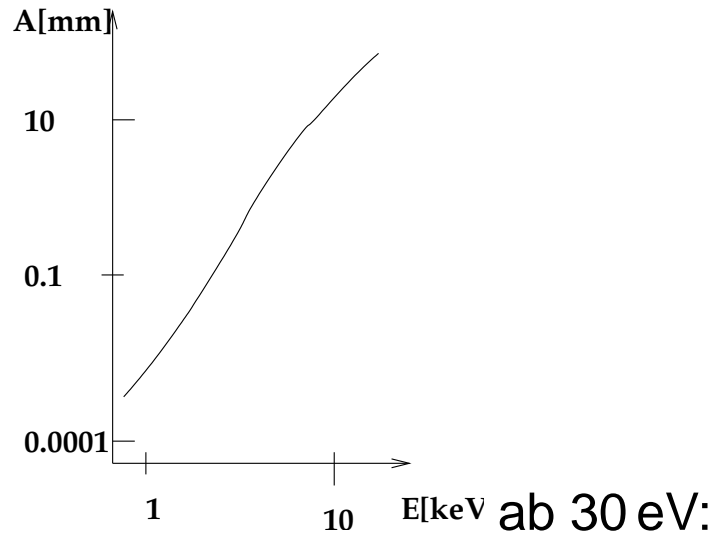


Synchrotron im EM-Spektrum



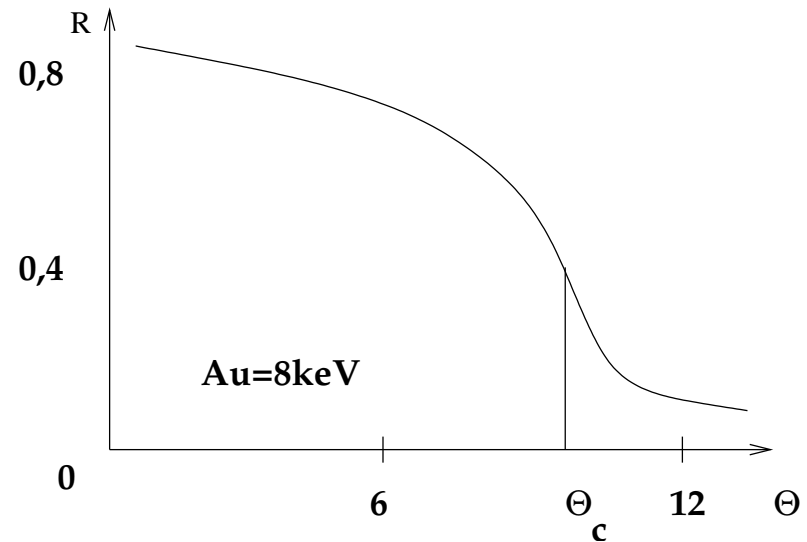
Probleme bei Strahlführung

- Absorptionslänge $A[\text{mm}]$ steigt mit Energie



- streifender (flacher) Winkel
- beamline anpassen

- Reflektivität $R[\%]$ sinkt ab kritischen Winkel



E_{kin}	θ_C
100 eV	10°
1 keV	1°
10 keV	$0,1^\circ$

Gittermonochromatoren

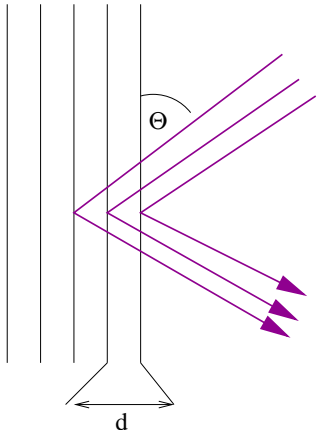
Leitlinien:

- wenig Flächen
- wenig bewegliche Teile
- Spalten ortsfest
- horizontaler Strahlenverlauf

Parameter:

- Abstand d der Strukturen (groß gegen Wellenlänge)
- Anzahl der Strukturen
- Profilform
- Gesalt: eben, sphärisch, unsphärisch, konkav

Kristallmonochromatoren



Prinzip der Bragg-Reflexion

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

Auflösung

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \Delta \Theta \cot \Theta$$

Probleme

- sehr genau Produktion nötig
- Sekundäremission bei schweren Elementen

Methode	KMC-2
Energiebereich	2,1 ... 43 keK
Auflösung	$\Delta E = 2,5 \text{ eV}$
Kristalle	Si(111) symmetrisch und Si(111) asymmetrisch

Einsatz in den Wissenschaften

Biologie	Blutzellen untersuchen
Radiometrie	Kalibrierung von Meßgeräten
Lithographie	Miniaturantriebe
Chemie	Sauerstoffgehalt in Trinkwasser
Radiometrie	Röntgenastronomie
Atomphysik	Doppelionisation von Helium
Festkörperphysik	Cu,In,Ga,Se-Dünnschicht-Solarzellen
Magnetische Untersuchungen	Nanostrukturen für Datenspeicherung

Experimentelle Verfahren

- Photoelektronen-Spektroskopie
- Röntgenspektroskopie
- Röntgenfluoreszenzspektroskopie
- EUV-Lithographie

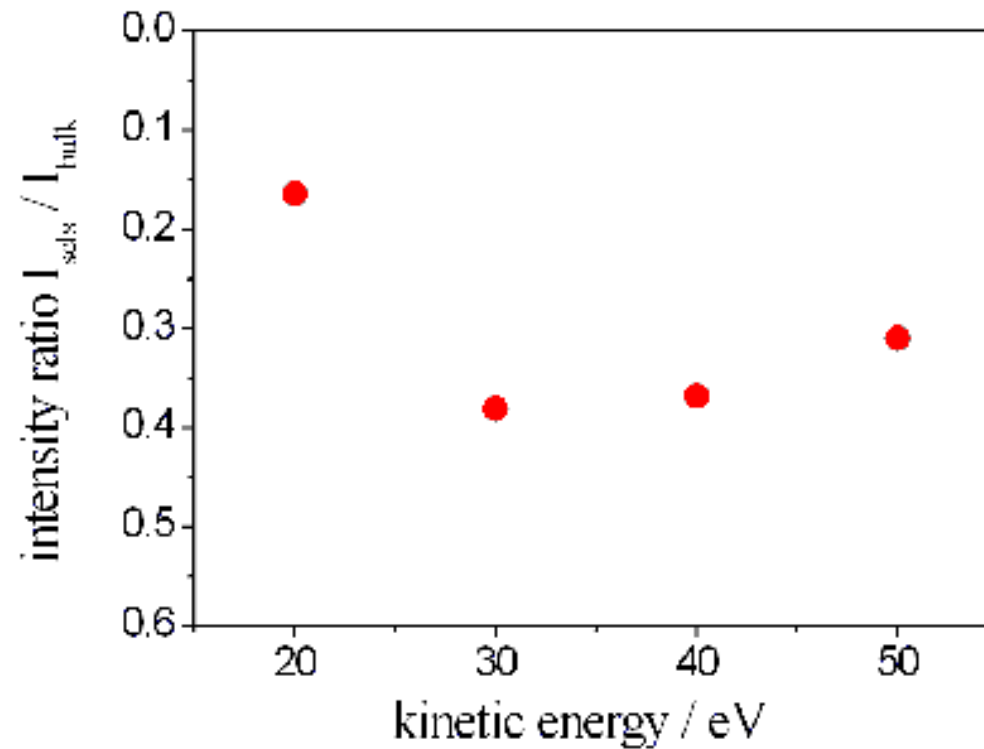
Photoelektronenspektroskopie

Minimum der freien Weglänge $a[\text{\AA}]$

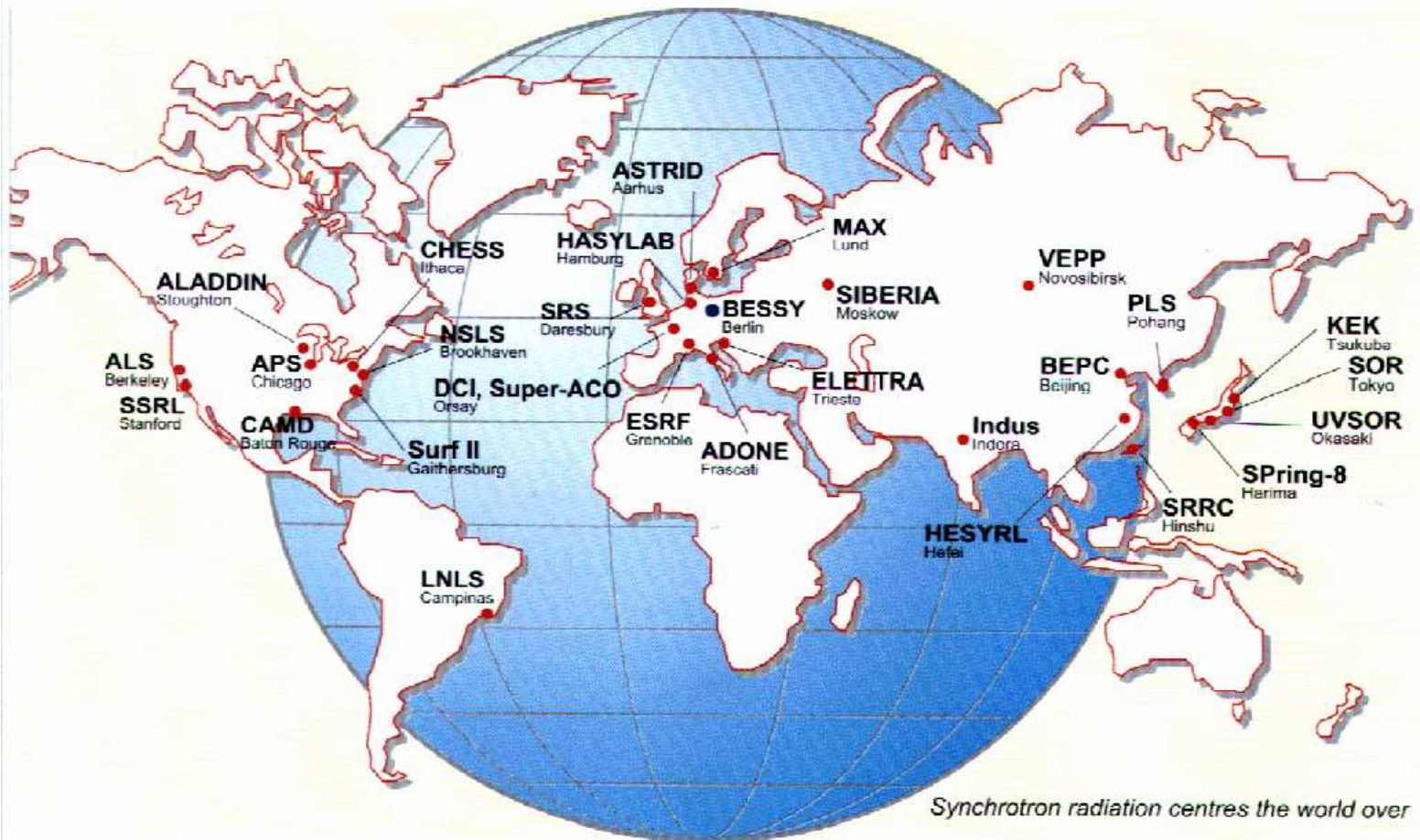
Energiebanduntersuchung

Intensity ratio:

$$I_{\text{scls}} / I_{\text{bulk}}$$



Forschungsorte



Berliner Synchrotronquellen

	Bessy I	Bessy II
Elektronenenergie	0,8 GeV	0,9 ... 1,9 GeV
Elektronenstrom	500 mA	200 mA
Magnetfeld	1,5 T	1,5 T
Kritische Energie	0,63 keV	2,60 keV
kritische Wellenlänge	1,9 nm	0,48 nm
Brilliance	reisefertig	10^{19} Syn*

* Syn = 1 $\frac{\text{Photonen}}{\text{sec mm}^2 \text{ mrad}^2 \text{ 1\%Spektr.Bandbr.}}$

Literatur

- Giorgio Margaritondo, *Synchrotron Radiation*, New Oxford University Press, 1988
- <http://www.bessy.de>, Stand 2002
- Demtröder, *Experimentalphysik IV*, 1998
- Christian Schultz, CdS/InP-Grenzfläche, 1998