



# XFEL

## Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich

Stephan Scholz

Institut für Physik  
Humboldt-Universität zu Berlin

6. Juni 2011

# Gliederung

## 1 Synchrotronstrahlung

## 2 XFEL

Funktionsweise

Anwendung

Ausblick

# Gliederung

## 1 Synchrotronstrahlung

## 2 XFEL

Funktionsweise

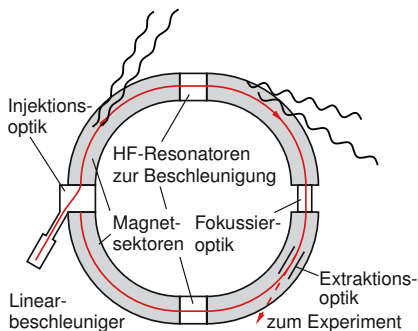
Anwendung

Ausblick



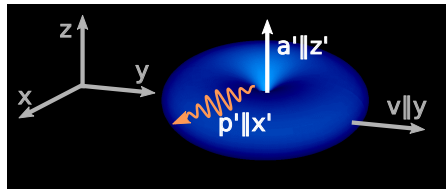
# 1<sup>te</sup> Generation - Synchrotronstrahlung von Dipolmagneten

- 1947: Nebenerscheinung an Ablenkmagneten von Synchrotronen



Synchrotron [Demtröder]

Winkelverteilung im Ruhesystem  
 $\approx$  wie Dipolstrahler.

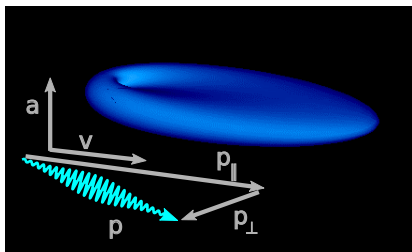


Dipolstrahlung im Ruhesystem

Im Laborsystem:

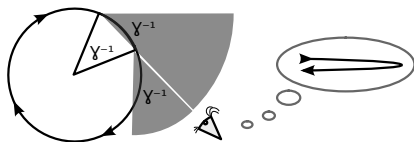
$$p = L' \cdot p' = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & \beta\gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \beta\gamma & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ p_{\perp} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma \frac{E}{c} \\ p_{\perp} \\ \beta\gamma \frac{E}{c} \\ 0 \end{pmatrix} \stackrel{\gamma \approx 10^3}{\approx} \begin{pmatrix} \gamma \frac{E}{c} \\ p_{\perp} \\ \gamma p_{\perp} \\ 0 \end{pmatrix}$$

⇒ Öffnungswinkel von  
Synchrotronstrahlung  $\approx \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}} = \frac{1}{\gamma}$



Dipolstrahlung im Laborsystem  
( $\gamma = 9 \Leftrightarrow \beta = 0.994$ )

Beobachter sieht (anharmonische)  
Halbschwingung → wird Spektrum  
bestimmen

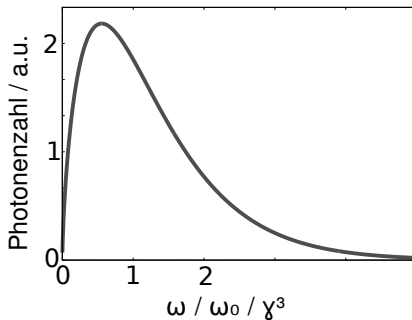


Beobachtungszeit

$$t = \frac{\gamma^{-1}}{2\pi} \cdot \underbrace{T}_{\text{Umlaufperiode}} = \frac{1}{\gamma\omega_0}$$

- im System mit  $v \approx \beta c$  entlang Sichtlinie ist  $t' = \frac{t}{\gamma}$
- $\Rightarrow$  typische Frequenz:  $\omega' = \frac{\omega_0 \gamma^2}{2}$
- durch Boost:

$$\omega_{\text{Synchrotron}} = \frac{\omega_0 \gamma^3}{2}$$



Synchrotronspektrum

## 2<sup>te</sup> Generation - Wiggler

(to wiggle = wackeln)

Wiggler =  $2N_U$  hintereinandergesetzte Dipolmagnete wechselnder Orientierung ( $N_U = \mathcal{O}(10 - 10^4)$ )

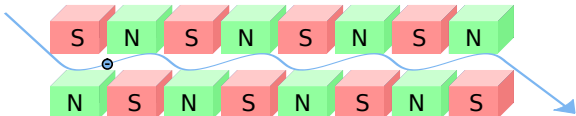
⇒ Peakleistung

$$P_{\text{Wiggler}} \approx N_U \cdot P_{\text{Dipol}}$$

Spektrum ähnlich Dipolsynchrotronstrahlung  
Schwingung nur in einer Ebene

⇒ Synchrotronstrahlung ist polarisiert

auch zirkulare Polarisation realisierbar



# 3<sup>te</sup> Generation - Undulatoren

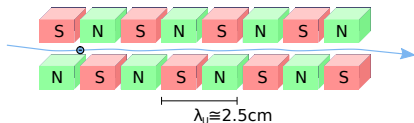
(undulation = Wellenbewegung)

Aufbau wie Wiggler, aber

- Periode  $\lambda_U$  so, dass Strahlung eines  $e^-$  konstruktiv interferiert
- geringere Auslenkung  $\leftrightarrow$  harmonischere Bewegung

$\Rightarrow$  Peakleistung

$$P_{\text{Undulator}} \approx N_U^2 \cdot P_{\text{Dipol}}$$



Fundamentale Wellenlänge:

$$\lambda_1 \approx \frac{\lambda'_U}{\gamma} = \frac{\lambda_U}{\gamma^2}$$

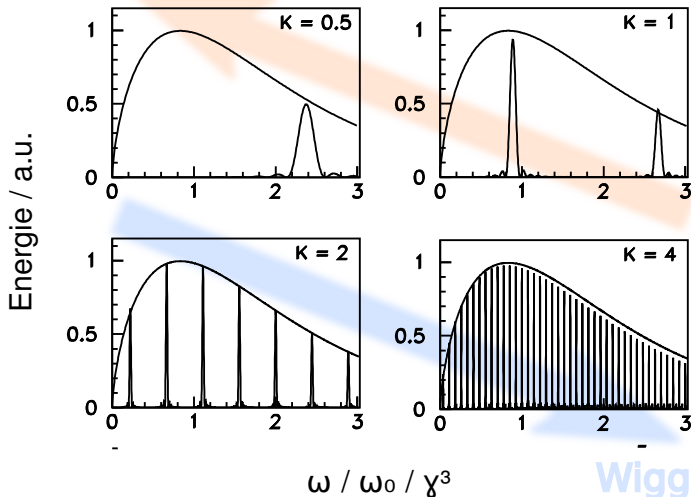
Genauere Betrachtung:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{1}{2} (\underbrace{\lambda_U \cdot B_0 \cdot \text{const.}}_{=:K=\mathcal{O}(0.2-20)})^2 \right)$$

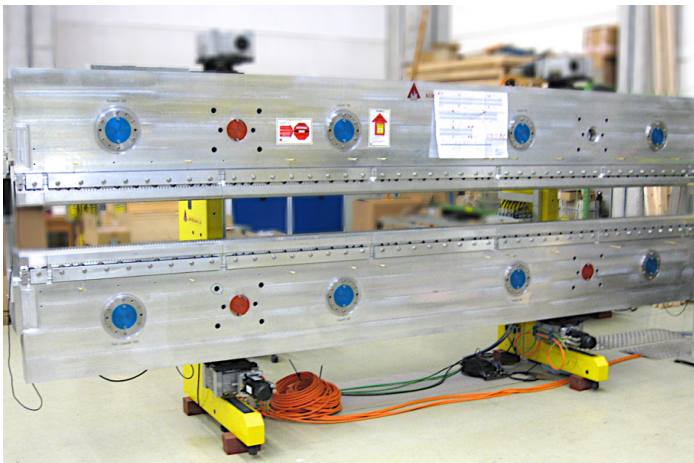
$K$  ist Maß für die Auslenkung

- $K < 1 \leftrightarrow$  Undulator
- $K > 1 \leftrightarrow$  Wiggler

# Undulator



K-Parameter erfasst den Übergang vom Wiggler- zum Undulatorspektrum  
[Khan, geändert]



XFEL-Undulator [tesla]

Präzisionsarbeit, z.B. LCLS-FEL-Undulator in Stanford:  
transversale Ungenauigkeit  $< 5 \mu\text{m}$  auf 130 m

bisher: Beschreibung eines einzelnen  $e^-$   
mehrere Elektronen:

$$P \propto \left| \sum_{j=1}^N E_j e^{i\phi_j} \right|^2 = \sum_{j=1}^N E_j^2 + \underbrace{\left| \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N E_j E_k e^{i(\phi_j + \phi_k)} \right|^2}_{\propto N^2(!!!)}$$

der zweite Summand hebt sich im Mittel heraus



# Gliederung

## ① Synchrotronstrahlung

## ② XFEL

Funktionsweise

Anwendung

Ausblick

# 4<sup>te</sup> Generation - FEL

Freie Elektronen Laser

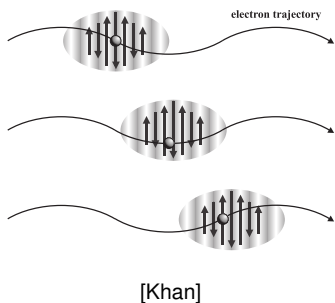
## SASE (Self Amplified Spontaneous Emission)

Laserprinzip:

- Abstrahlung von einer beschleunigten Ladung ist induzierbar
- Wellenlänge der Strahlung durch Undulatorengeometrie bestimmt
- $\Rightarrow$  am Undulatoreingang: "totale Inversion"
- $\Rightarrow$  exponentielle Verstärkung spontan emittierter Photonen

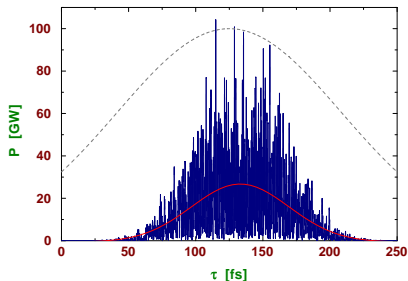
Unterschied zum Atomlaser:

- keine Spiegel für  $\lambda < 100$  nm  $\Rightarrow$  nur ein Durchlauf für Verstärkung
- $\lambda_1 = \lambda_1(\gamma, B) \Rightarrow$  Energie durchstimmbare



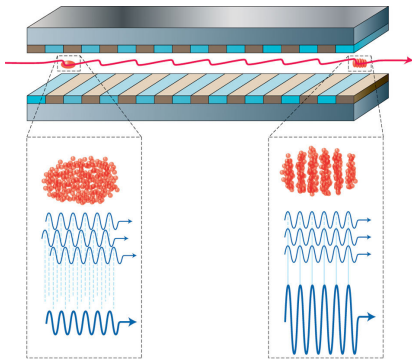
- für Energieübertrag im Mittel: transversale  $e^-$ -Bewegung in  $\vec{E}$ -Orientierung des Strahlungsfeldes
- $\Rightarrow$  Licht muss  $e^-$  um eine Wellenlänge pro Undulatorperiode vorausseilen
- $\Rightarrow$  Licht kann nur Elektronen im Bereich von  $\lambda_1 \cdot N_U$  erfassen  
z.B. LCLS: 1.5 fs von 200 fs  $e^-$ -Packetlänge

- + Verstärkungsanfang ist intrinsisch statistisch
- $\Rightarrow$  geringe zeitliche Kohärenz

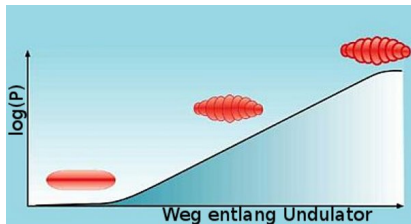


# Microbunching

Idee: leicht phasenkorrelierte Strahlung durch  $e^-$ -Dichteschwankung  
→ Dichtemodulation davorliegender  $e^-$  → Strahlung höherer Kohärenz → höhere Dichtemodulation ...



[McNeil]



Verstärkung nimmt exponentiell zu bis zum vollständigen Microbunching  
[tesla.desy.org]

# Chicanes

chicane = Schikane (Bodenwelle zur Geschwindigkeitsbegrenzung im Straßenverkehr)

Lasing im Röntgenbereich nur bei extrem hoher

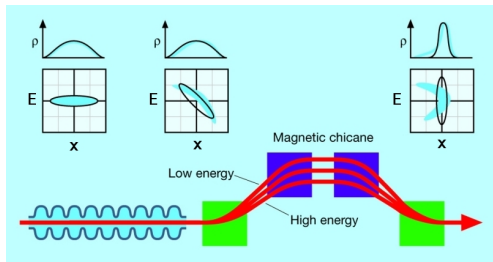
- $e^-$ -Strahlgüte  $\Rightarrow$  Linearbeschleuniger (Linac)
- $e^-$ -Dichte  $\Rightarrow$  **Bunchcompression**

Eingangspuls: 10 ps,  $I_{\max} = 50$  A

- 1 Energieaufprägung in  
Abhängigkeit der  $e^-$ -Position
- 2  $qvB = m\gamma \frac{v^2}{R} \Rightarrow$  Durchlaufen  
energieabhängiger Bahn

Ausgangspuls: 100 fs,  $I_{\max} = 10^3$  A

Nebeneffekt: 100 fs-Röntgenpulse



magnetischer Pulskompressor (Chicane)  
[hasylab.desy.de]

## ⇒ Peakleistung

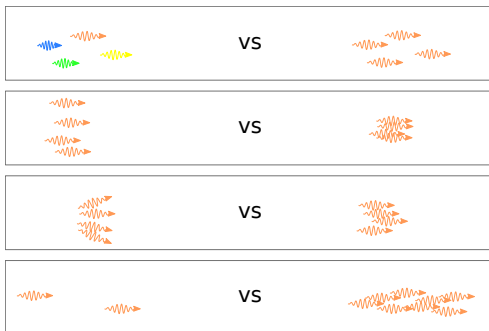
$$P_{\text{FEL}} \propto 100 \frac{I_{\text{max, FEL}}}{I_{\text{max, Synchrotron}}} N_U^2 \underbrace{N_e}_{\text{realistisch: } 10^6} P_{\text{Dipol}} = 10^{10} P_{\text{Undulator}}$$

Maß für Strahlgüte (vgl. Emmitanz), nicht durch optische Elemente zu vergrößern

Brillanz=

Photonen

$(s)(\text{mrad})^2(\text{mm}^2 \text{ Fläche der Strahlungsquelle})(0.1\% \text{ der Bandbreite})$



	ESRL Synchrotron	LCLS Stanford	XFEL Hamburg
Beschleuniger	Raumtemperatur	Raumtemperatur	Supraleitend
Pulse pro Sekunde	$3 \cdot 10^6$	120	27000
Elektronenenergie	6.3 GeV	14.3 GeV	17.5 GeV
min( $\lambda_{\text{Photon}}$ )	0.7 nm	0.15 nm	0.1 nm
Länge	270 m( $\varnothing$ )	3 km	3.4 km
Experimentierplätze	47	3-5	6-10
max(Brillanz)	$8 \cdot 10^{23}$	$8.5 \cdot 10^{32}$	$5 \cdot 10^{33}$
Brillanz	$6 \cdot 10^{20}$	$2.4 \cdot 10^{22}$	$1.6 \cdot 10^{25}$
Kosten			$1.08 \cdot 10^9$ €

Vergleich technischer Parameter verschiedener Röntgenstrahlungsquellen

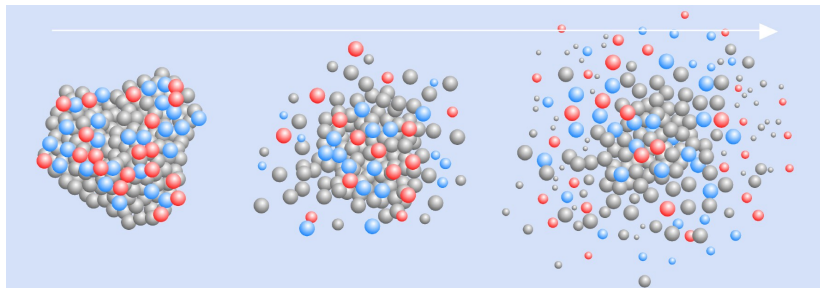


# Anwendungsgebiete

- Festkörperphysik: Schmelzvorgang an Oberflächen
- Astrophysik: Plasmaeigenschaften
- Femtochemie: zeitaufgelöste Beobachtung chemischer Reaktionen
- Traum in **Biologie**: Strukturanalyse nichtkristalliner Moleküle, Viren ...

## Problem

*benötigte Intensität für auswertbares Signal zerstört das Objekt bevor Datenaufnahme abgeschlossen ist*



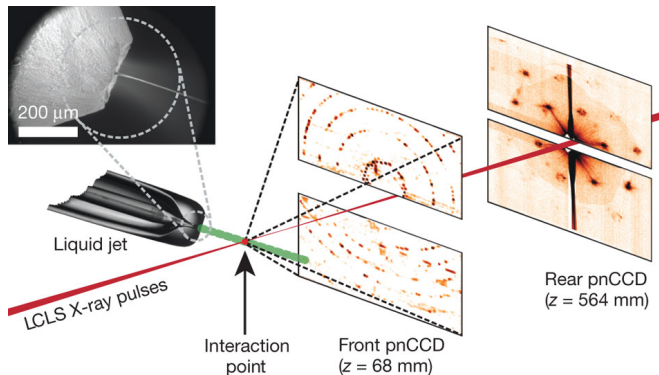
Coulombexplosion während hochintensiver Röntgenbeugung [hasylab.desy.de]

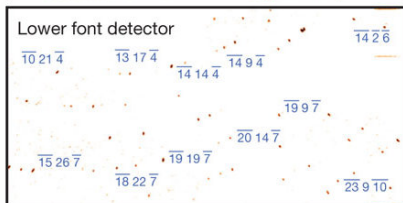
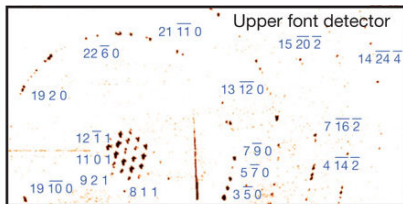
## Lösung

*Verwende Pulslängen unter Zeitskala der Zerstörung*

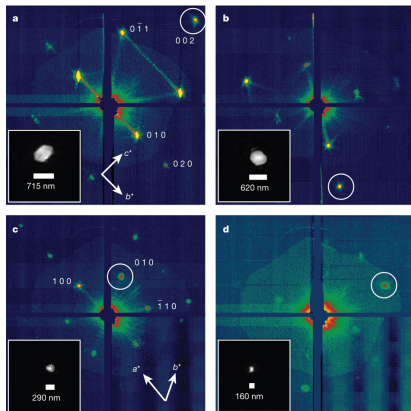
Untersuchung des Photosystem I  $[(281 \text{ \AA})^2 \times 165 \text{ \AA}]$  am LCSL

- $\lambda = 6.9 \text{ \AA}$ ,  $E_\gamma = 1.8 \text{ keV}$
- $10^{12}$  Photonen pro Puls
- Pulsrate 30 Hz
- Pulsdauer  $\in \{10 \text{ fs}, 70 \text{ fs}, 200 \text{ fs}\}$
- Kristallgröße  $200 \text{ nm} - 2 \text{ \mu m} \Rightarrow$  Kantenlänge ab 10 Moleküle
- Kristalle werden bei Belichtung zerstört und in Lösung durch Röntgenstrahl gespritzt;  $\Sigma = 3 \cdot 10^6$  Kristallbilder

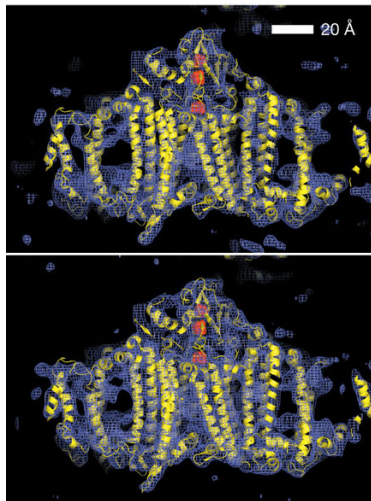




Beispielsignal auf vorderem CCD  
nach 70 fs Impuls[Chapman]

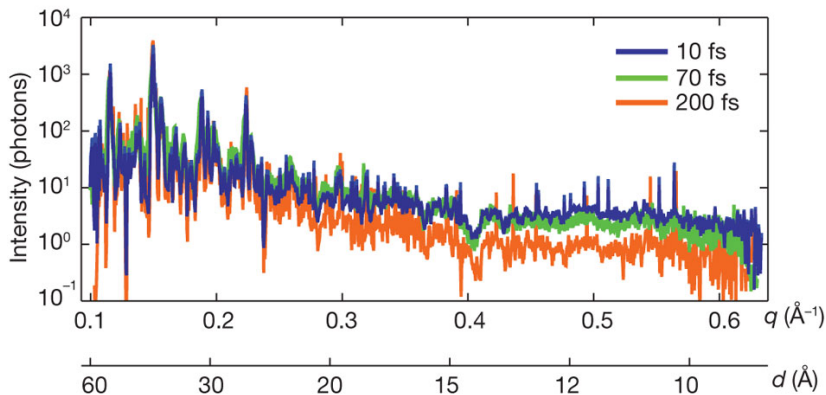


Beispielsignale auf hinterem CCD  
nach 70 fs Puls, Inset: Kristallform aus  
Fouriertransformation und  
Phasenermittlungsalgorithmus[Chapman]



3D-Beugungsbild aus 3 Millionen Einzelbildern [Chapman]

oben: rekonstruiertes Molekül, unten zum Vergleich: Molekülform aus Synchrotronstrahlungsexperimenten [Chapman]

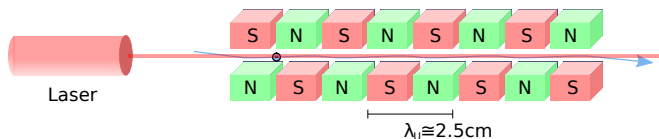


$q$ ... Impulsübertrag,  $d$ ... Auflösung; Signalaufspaltung wird als Strukturänderung gewertet [Chapman]

(optimistische Prognosen)

# Ausblick

- Problem zu kleineren  $\lambda_1$ : Rückstoß auf  $e^-$  ruiniert  $e^-$ -Strahlgüte  
→ bessere Undulatorotechnik
- Ansatz zur Verbesserung der zeitlichen Kohärenz: Strahlung von außen statt spontane Emission (z.B. höhere Harmonische eines Laser)



# Literatur

**Chapman** Fromme, Barty; Nature Volume: 470, Pages: 73-77  
Date published: (03 February 2011) DOI:  
doi:10.1038/nature09750

**Khan** S(2008) 'Free-electron lasers', Journal of Modern  
Optics, 55: 21, 3469 – 3512

**McNeill** Thompson Nature Photonics; Volume: 4, Pages:  
814-821, Year published: (2010) DOI:  
doi:10.1038/nphoton.2010.239

**tesla** [http://tesla.desy.de/new\\_pages/FEL\\_figures/](http://tesla.desy.de/new_pages/FEL_figures/)