

X-FEL: Prinzip und Anwendungen eines freien Elektronenlasers zur Erzeugung kohärenter Röntgenstrahlung

Christopher Weber

Humboldt-Universität zu Berlin

16.06.2010



Inhaltsverzeichnis

- ① Theorie des FEL
- ② Realisierung
- ③ Anwendungsbereiche
- ④ Zusammenfassung
- ⑤ Anhang

Geschichte

- **1946** - Entdeckung der Synchrotronstrahlung
 1. Generation: Synchrotronstrahlung tritt als Abfallprodukt der Elementarteilchenphysik auf

Geschichte

- **1946** - Entdeckung der Synchrotronstrahlung
 1. Generation: Synchrotronstrahlung tritt als Abfallprodukt der Elementarteilchenphysik auf
- **1950er** - Einsatz von *Wiggler*n zur Strahlungserzeugung
 2. Generation: Elektronenspeicherringe werden für die Spektroskopie konstruiert

Geschichte

- **1946** - Entdeckung der Synchrotronstrahlung
 1. Generation: Synchrotronstrahlung tritt als Abfallprodukt der Elementarteilchenphysik auf
- **1950er** - Einsatz von *Wiggeln* zur Strahlungserzeugung
 2. Generation: Elektronenspeicherringe werden für die Spektroskopie konstruiert
- **1990er** - Massiver Einsatz von *Undulatoren*
 3. Generation: Erste Freie-Elektronen Laser im IR bis UV-VIS Bereich

Geschichte

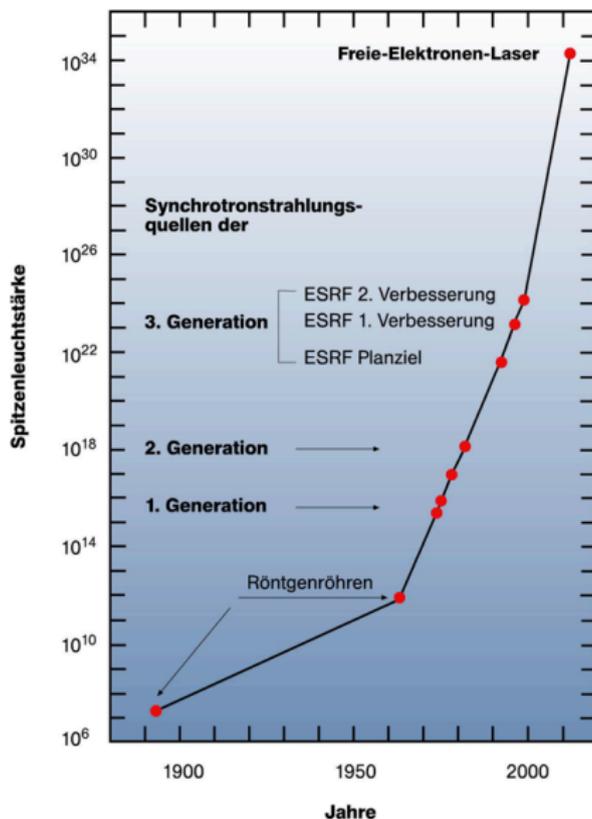
- **1946** - Entdeckung der Synchrotronstrahlung
 1. Generation: Synchrotronstrahlung tritt als Abfallprodukt der Elementarteilchenphysik auf
- **1950er** - Einsatz von *Wigglern* zur Strahlungserzeugung
 2. Generation: Elektronenspeicherringe werden für die Spektroskopie konstruiert
- **1990er** - Massiver Einsatz von *Undulatoren*
 3. Generation: Erste Freie-Elektronen Laser im IR bis UV-VIS Bereich
- **2009** - Inbetriebnahme des LCLS in Stanford
 4. Generation: Freie Elektronen Laser im Röntgenbereich - **XFEL**

Geschichte

- **1946** - Entdeckung der Synchrotronstrahlung
 1. Generation: Synchrotronstrahlung tritt als Abfallprodukt der Elementarteilchenphysik auf
- **1950er** - Einsatz von *Wigglern* zur Strahlungserzeugung
 2. Generation: Elektronenspeicherringe werden für die Spektroskopie konstruiert
- **1990er** - Massiver Einsatz von *Undulatoren*
 3. Generation: Erste Freie-Elektronen Laser im IR bis UV-VIS Bereich
- **2009** - Inbetriebnahme des LCLS in Stanford
 4. Generation: Freie Elektronen Laser im Röntgenbereich - **XFEL**
- **2014** - Fertigstellung des European XFEL in Hamburg geplant

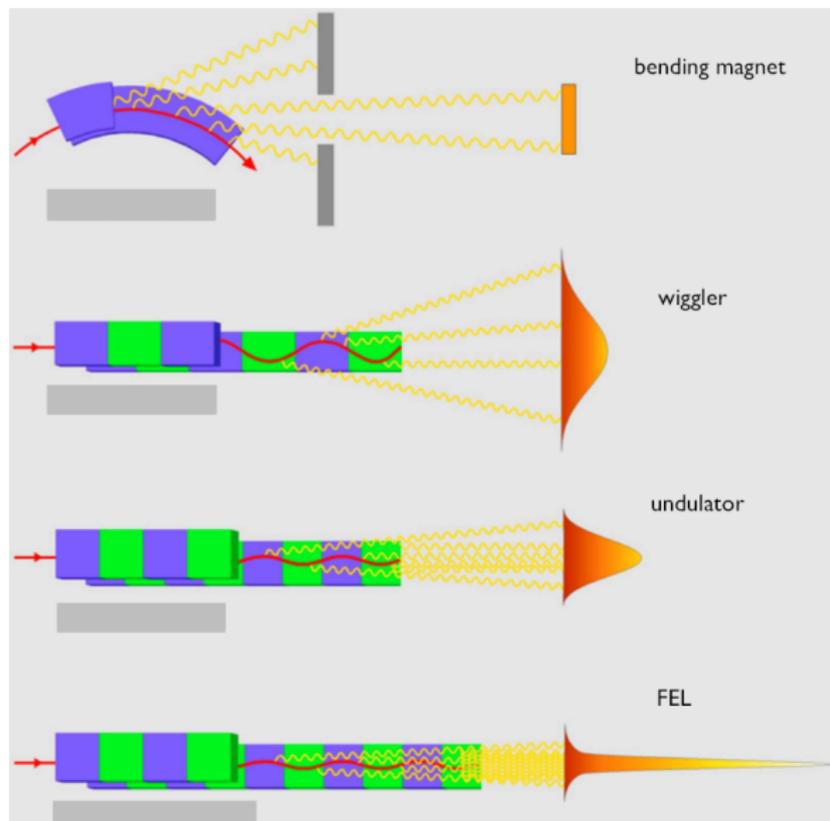
Röntgenlichtquellen im Überblick

Abbildung: [www.desy.de/..]



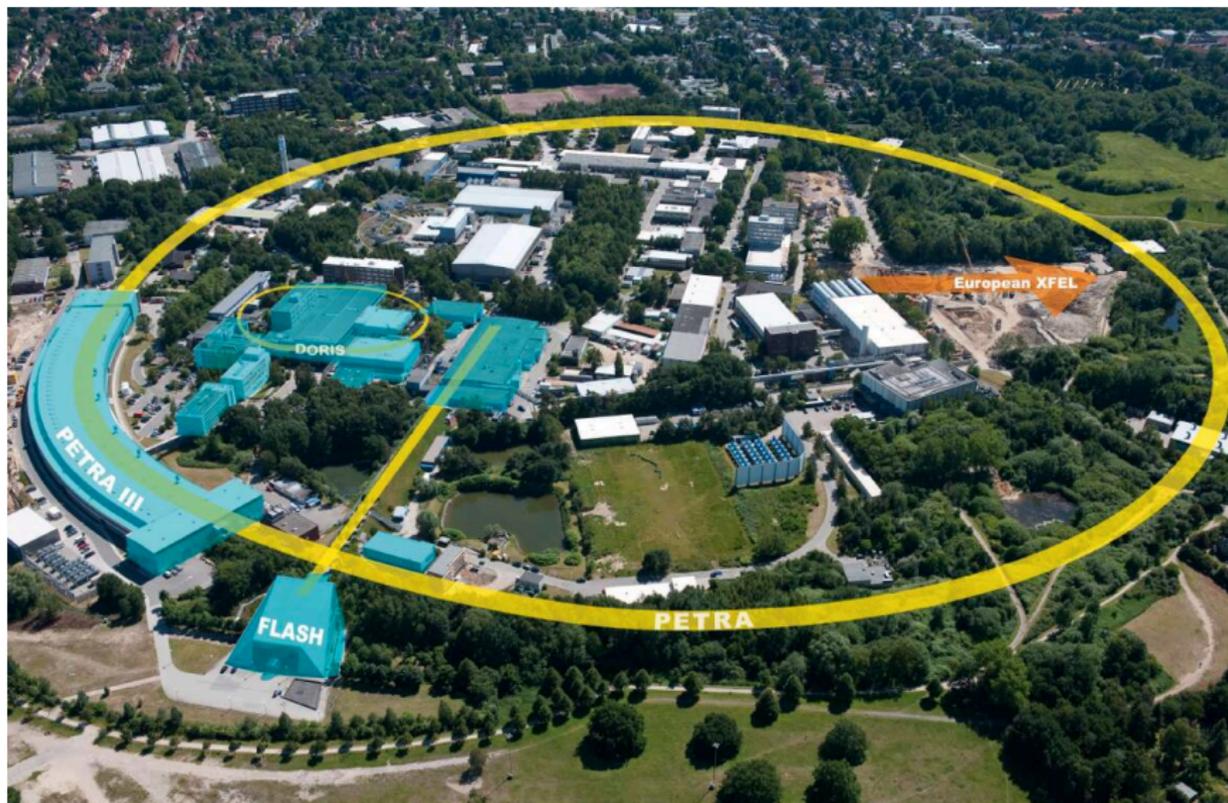
Wie entsteht Licht aus Elektronen?

Abbildung: [www.desy.de/..]



Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Abbildung: [www.desy.de/..]



Elektrodynamik

Aufbau eines FEL

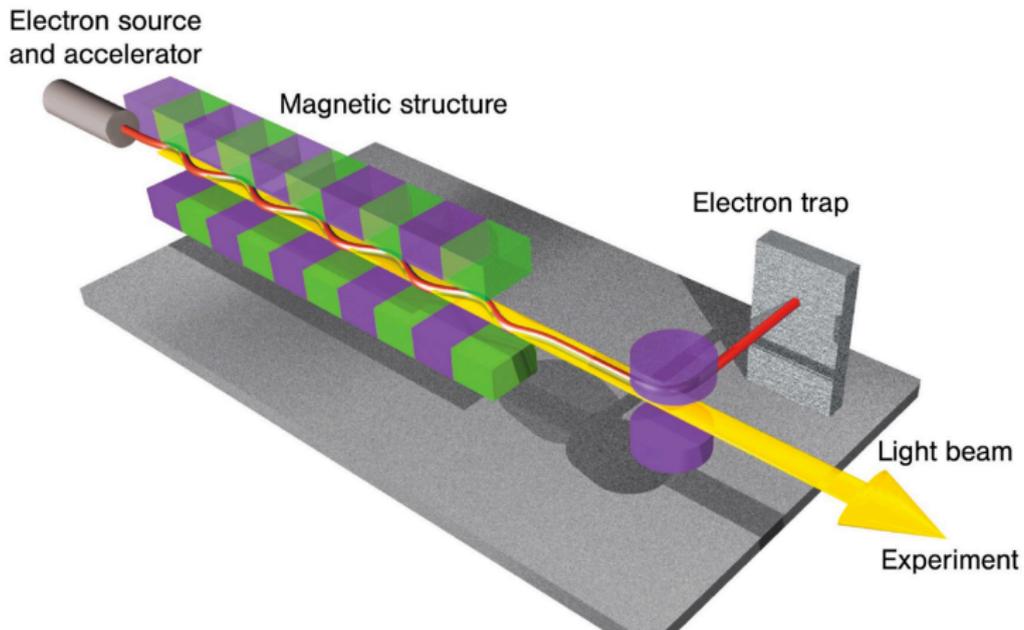


Abbildung: [[http://www.xfel.eu/..](http://www.xfel.eu/)]

Der Undulator in Formeln

Bezeichnungen

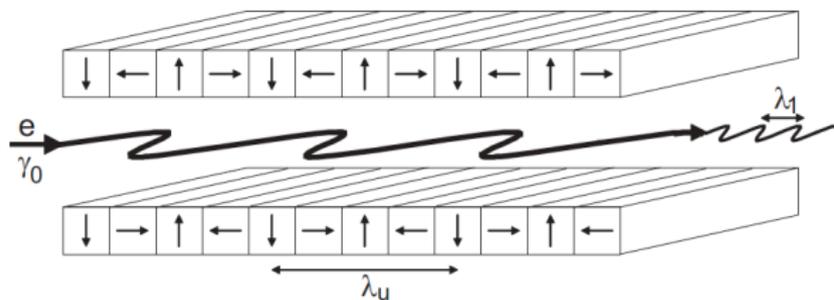


Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B.**10**, 034801 (2007)]

Magnetisches Feld

$$B_y = B_0 \sin(k_u z)$$

Emittierte Strahlung

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma_0^2} \left(1 + \frac{K_0^2}{2} + \gamma_0^2 \Phi^2 \right)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{1}{2N_\omega}$$

Parameter für Undulatorstärke

$$K_0 = \frac{eB_0}{mck_u}$$

Microbunching

- Elektronen haben eine Geschwindigkeitskomponente parallel zum oszillierenden E-Feld

Energieaustausch

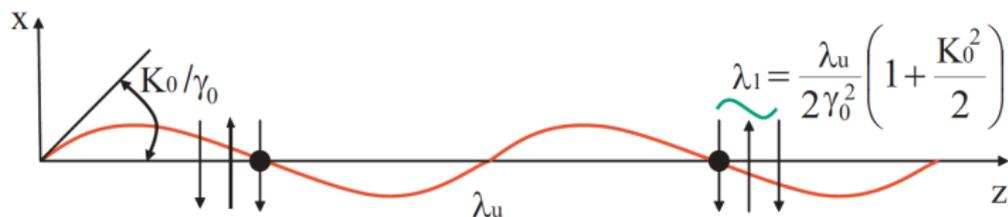


Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

Microbunching

- Elektronen haben eine Geschwindigkeitskomponente parallel zum oszillierenden E-Feld
- Einige Elektronen gewinnen Energie, einige verlieren Energie durch die Wechselwirkung mit der Strahlung

Energieaustausch

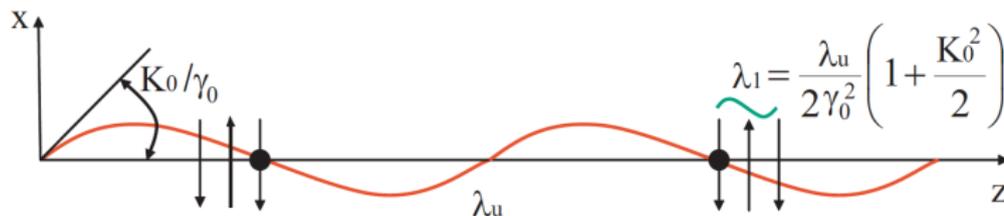


Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

Microbunching

- Elektronen haben eine Geschwindigkeitskomponente parallel zum oszillierenden E-Feld
- Einige Elektronen gewinnen Energie, einige verlieren Energie durch die Wechselwirkung mit der Strahlung
- Energie eines Elektronenbündels wird periodisch mit λ_1 moduliert

Energieaustausch

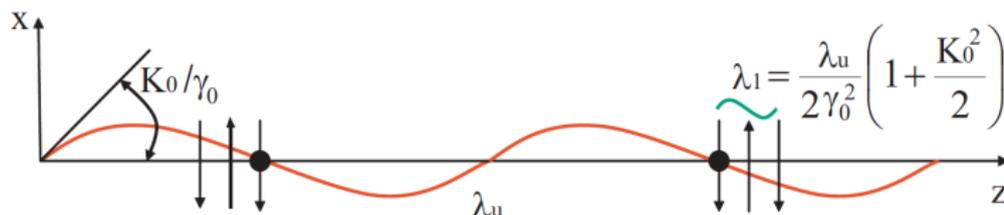


Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

Microbunching

- Elektronen haben eine Geschwindigkeitskomponente parallel zum oszillierenden E-Feld
- Einige Elektronen gewinnen Energie, einige verlieren Energie durch die Wechselwirkung mit der Strahlung
- Energie eines Elektronenbündels wird periodisch mit λ_1 moduliert
- Energiemodulation führt zu Dichtemodulation der Elektronen \Rightarrow *Microbunching*

Energieaustausch

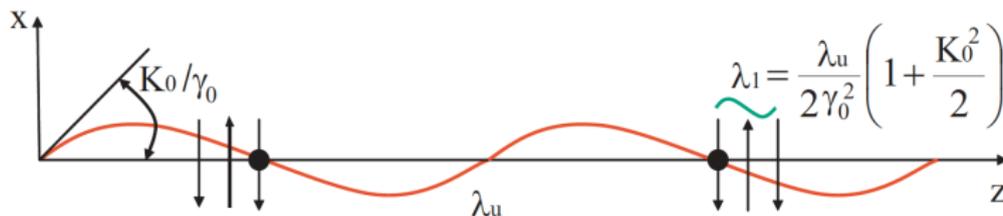
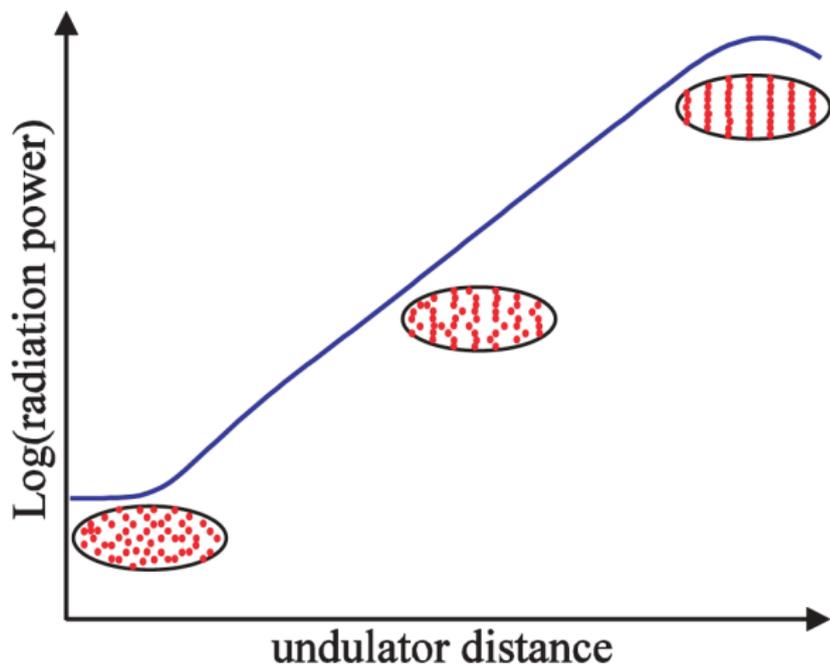


Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

Was hat das L im FEL zu suchen?



$$P \propto \exp(z/L_G)$$

Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

Animation zum Microbunching [xfel.eu/media]

Single-Pass Verstärkung

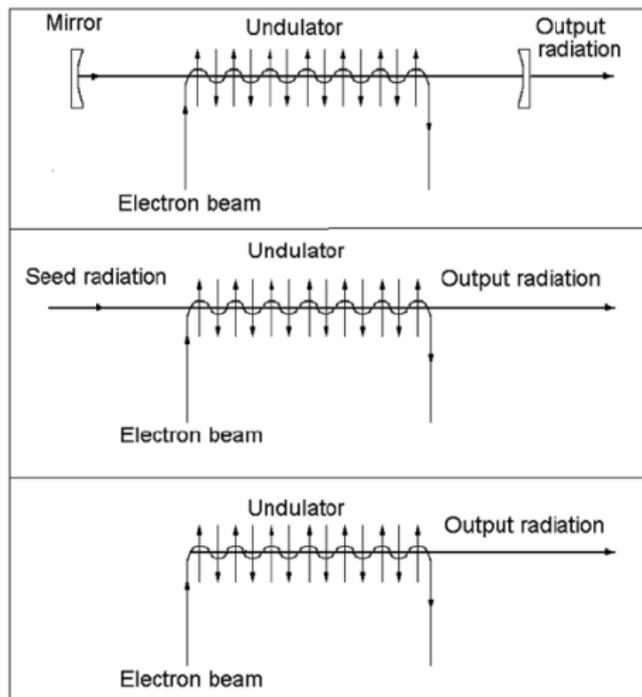


Abbildung: [European XFEL - Technical Design Report]

Pulsstruktur bei SASE

Zeitliche und räumliche Struktur der LCLS Strahlung (SASE)

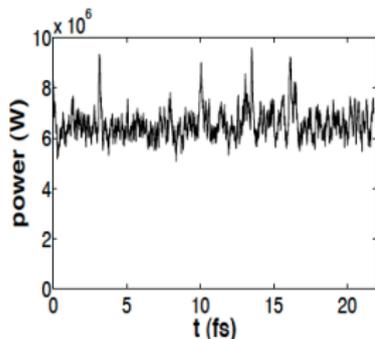
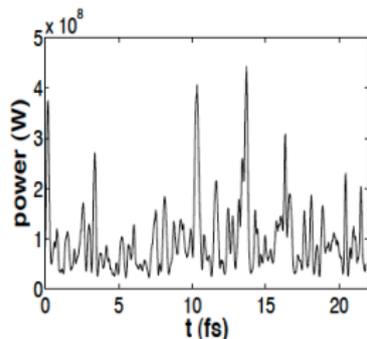
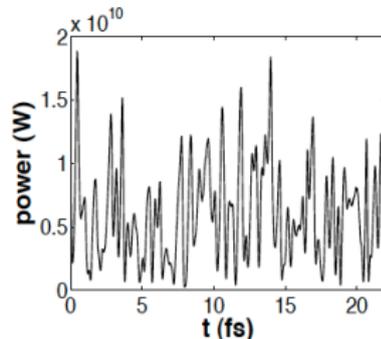
(a) $z = 25$ m(b) $z = 50$ m(c) $z = 75$ m

Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

- Chaotisches Licht \Rightarrow **problematisch** für Anwendungen

Pulsstruktur bei SASE

Zeitliche und räumliche Struktur der LCLS Strahlung (SASE)

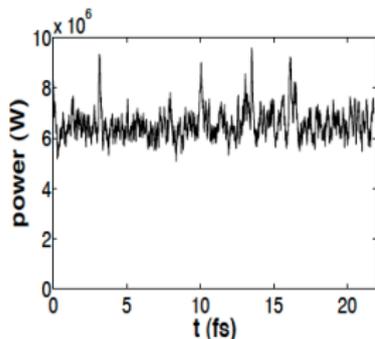
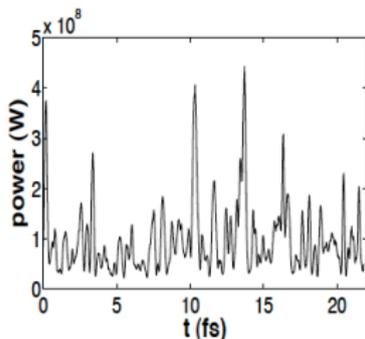
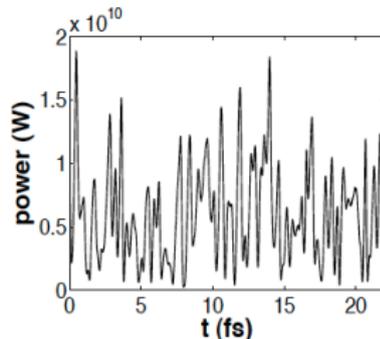
(a) $z = 25$ m(b) $z = 50$ m(c) $z = 75$ m

Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

- Chaotisches Licht \Rightarrow **problematisch** für Anwendungen
- Grund: Elektronenstrahl besteht aus diskreten Ladungen, die zufällig verteilt aus der Kathode emittiert werden

HGHG - High Gain Harmonic Generation

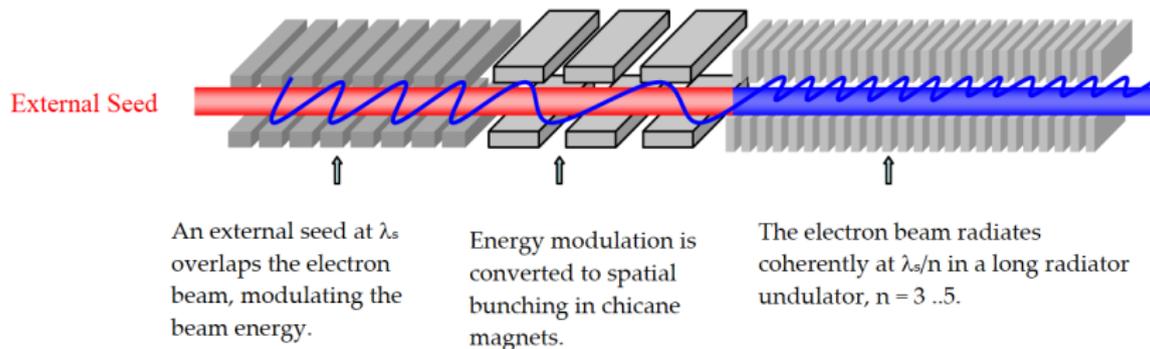


Abbildung: [Knobloch, Jaeschke, Eberhardt, STARS, 2006]

HGHG - High Gain Harmonic Generation

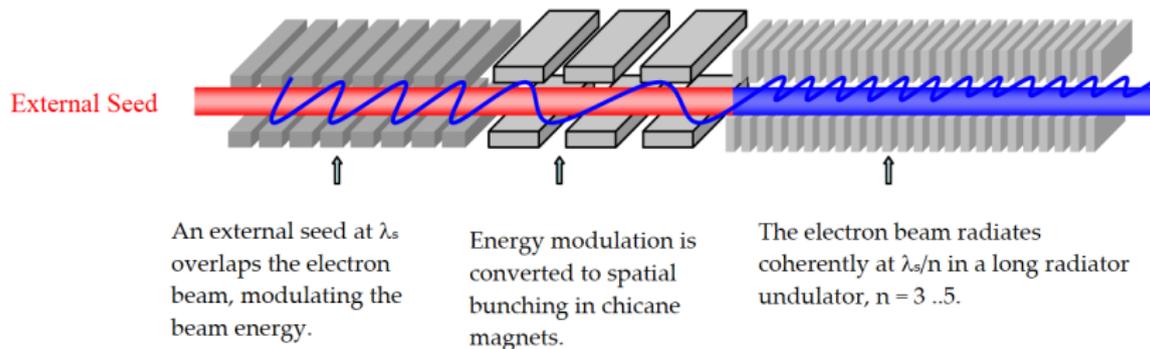


Abbildung: [Knobloch, Jaeschke, Eberhardt, STARS, 2006]

Vorteile gegenüber SASE (Self Amplified Spontaneous Emission):

- SASE verstärkt alle Frequenzkomponenten im Akzeptanzbereich des FEL → HGHG garantiert eine deutlich kleinere Bandbreite

HGHG - High Gain Harmonic Generation

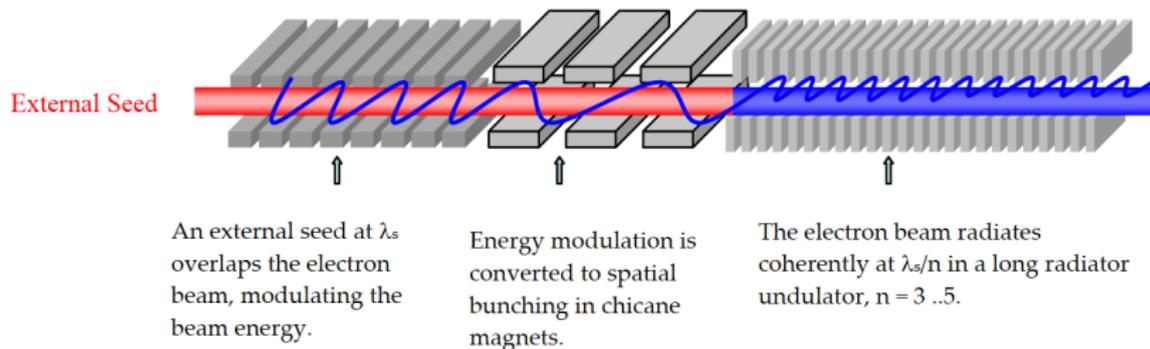


Abbildung: [Knobloch, Jaeschke, Eberhardt, STARS, 2006]

Vorteile gegenüber SASE (Self Amplified Spontaneous Emission):

- SASE verstärkt alle Frequenzkomponenten im Akzeptanzbereich des FEL → HGHG garantiert eine deutlich kleinere Bandbreite
- Pulsstruktur folgt direkt aus Struktur des Seedingpulses

HGHG - High Gain Harmonic Generation

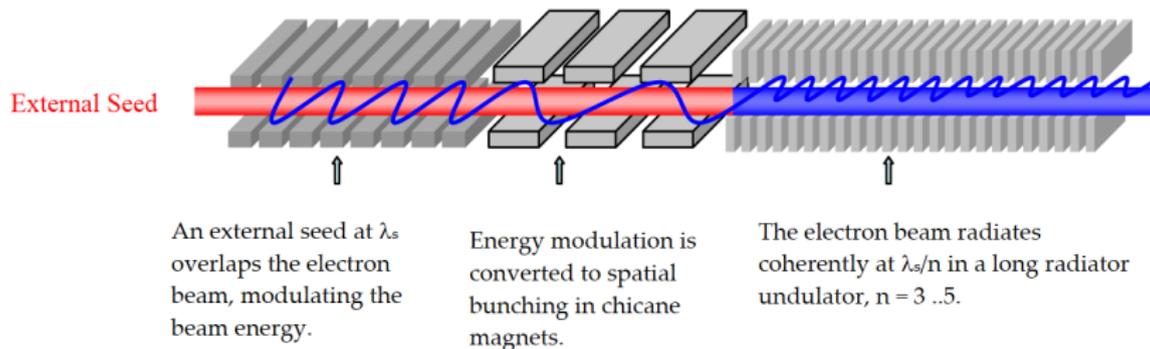


Abbildung: [Knobloch, Jaeschke, Eberhardt, STARS, 2006]

Vorteile gegenüber SASE (Self Amplified Spontaneous Emission):

- SASE verstärkt alle Frequenzkomponenten im Akzeptanzbereich des FEL → HGHG garantiert eine deutlich kleinere Bandbreite
- Pulsstruktur folgt direkt aus Struktur des Seedingpulses
- **Bessere Kohärenzeigenschaften** als SASE und ~ 100 -fach brillianter

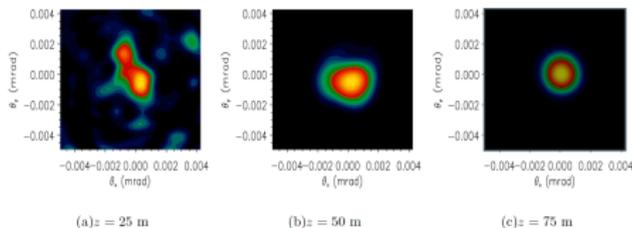
Kohärenz

Transversale Kohärenz

$$L_t = \frac{R\lambda}{2D}$$

D = Transversale Ausdehnung der Probe

R = Entfernung der Probe vom Detektor



[Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

Longitudinale Kohärenz

$$L_l = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

Kohärenz bei Wellen

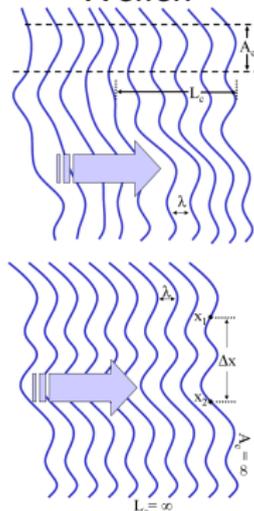


Abbildung:
[wikipedia.org]

Der erste XFEL

Anforderungen an die Komponenten:

- Niedrige Emittanz und Energiestreuung des Elektronenstrahl
- Extrem hohe Ladungsdichte des Elektronenstrahls
- Extrem präzise Magnetfelder und **Strahlführungsmechanismen**

LCLS



Abbildung: [[http://lcls.slac.stanford.edu/..](http://lcls.slac.stanford.edu/)]

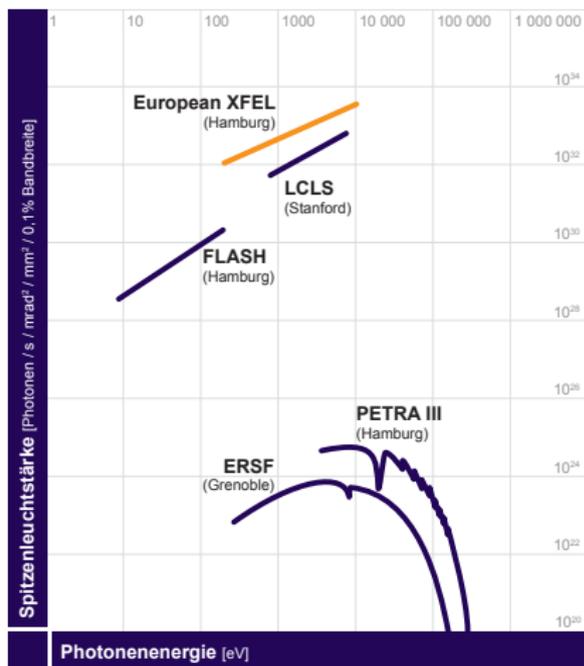
LCLS Daten

TABLE I: Main parameters for the LCLS FEL.

| Parameter | Symbol | Value |
|------------------------------|-----------------|----------------------|
| electron energy | $\gamma_0 mc^2$ | 13.6 GeV |
| bunch duration (fwhm) | T | 200 fs |
| bunch current (flat part) | I_e | 3.4 kA |
| transverse norm. emittance | ε_n | 1.2 μm |
| average beta function | $\bar{\beta}$ | 25 m |
| undulator period | λ_u | 0.03 m |
| undulator field | B_0 | 1.25 T |
| undulator strength parameter | K_0 | 3.5 |
| active undulator length | L_u | 110 m |
| fundamental wavelength | λ_1 | 1.5 \AA |
| Pierce parameter | ρ | 4.5×10^{-4} |
| FEL power gain length | L_G | 4.3 m |

Abbildung: [Z.Huang und K. Kim, Phys. Rev. ST Acc.B. **10**, 034801 (2007)]

Was ist das Maß für die Qualität der FEL Strahlung?



Brillanz

$$\frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{mm}^2 \cdot 0.001 \cdot \text{Bandbreite}}$$

XFEL übertrifft LCLS um eine Größenordnung

Abbildung:

[<http://www.xfel.eu/media/>]

Potentielle Anwendungen eines XFEL

- Ultraklein (~ 1 nm)
- Ultraschnell ($\sim 10^{-14}$ s)
- Extrem (~ 30 GeV)

Potentielle Anwendungen eines XFEL

- Ultraklein (~ 1 nm)
- Ultraschnell ($\sim 10^{-14}$ s)
- Extrem (~ 30 GeV)

Anwendungen in:

- Chemie
- Biologie
- Medizin
- Materialwissenschaft
- Astrophysik
- Nanotechnologie
- Photonik



Abbildung: [<http://www.xfel.eu/media/>]

Diffraction Imaging

- Bisher: Röntgenbeugung an kristallisierten Proben → erfordert periodische Struktur
- Jetzt: Hohe Intensitäten ermöglichen Untersuchung von Molekülstrukturen ohne kristalline Periodizität
- Viren, Membranproteine, virale Gene

Diffractive Imaging

- Bisher: Röntgenbeugung an kristallisierten Proben → erfordert periodische Struktur
- Jetzt: Hohe Intensitäten ermöglichen Untersuchung von Molekülstrukturen ohne kristalline Periodizität
- Viren, Membranproteine, virale Gene

Experimenteller Aufbau

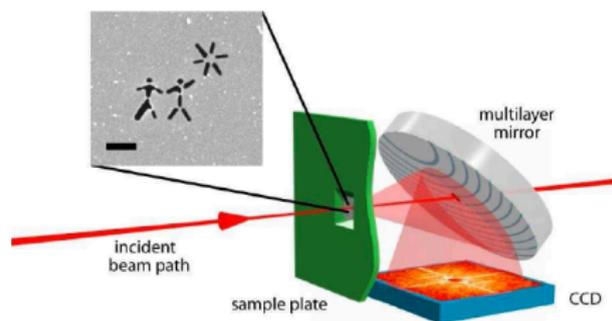


Bild im k-Raum

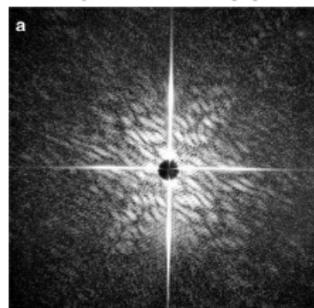


Bild im Ortsraum

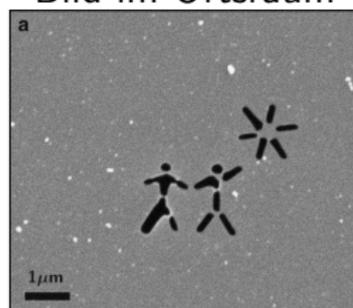


Abbildung: [H.N. Chapman et al., *Nature Physics* 2, 839]

3D Diffractive Imaging

- Problem: Hochintensiver XFEL-Puls zerstört die Probe

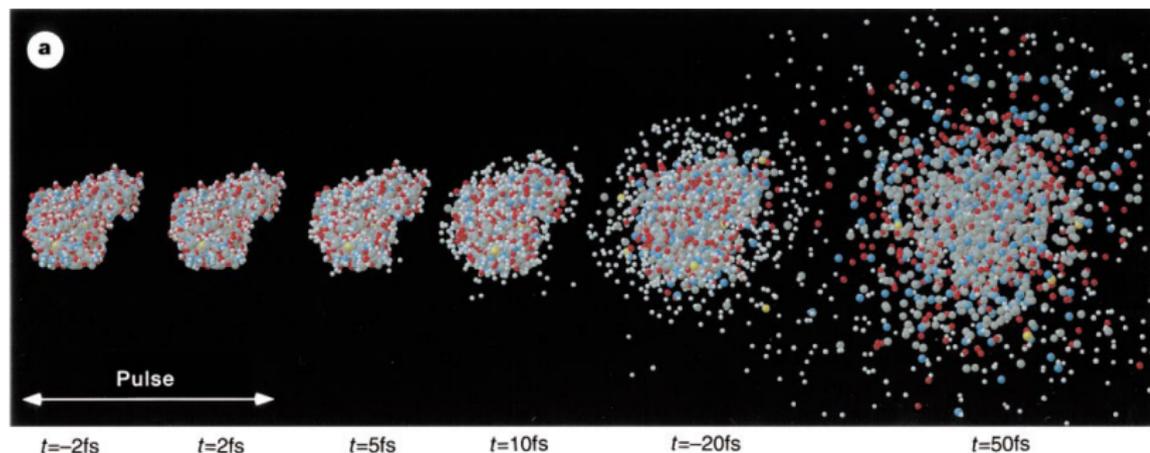


Abbildung: [Neutze et al., *Nature*, **406**, 2000]

3D Diffractive Imaging

- Problem: Hochintensiver XFEL-Puls zerstört die Probe

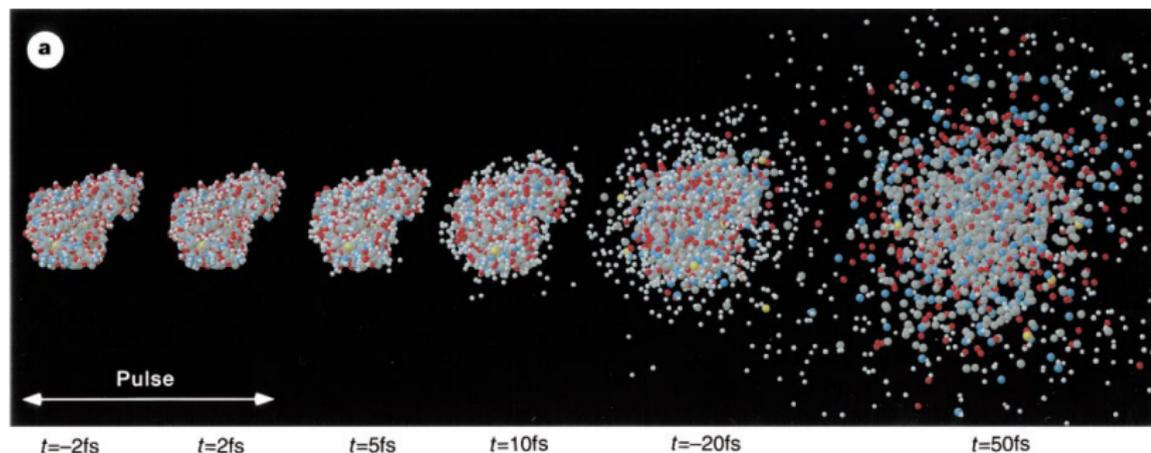


Abbildung: [Neutze et al., *Nature*, **406**, 2000]

- Lösung: Puls muss so **kurz** sein, dass fast keine Wechselwirkung mit dem System stattfinden kann

3D Diffractive Imaging

Die Probe wird aus vielen zufällig verteilten Richtungen im reziproken Raum abgebildet, anschließend wird das 3D Bild im Realraum rekonstruiert

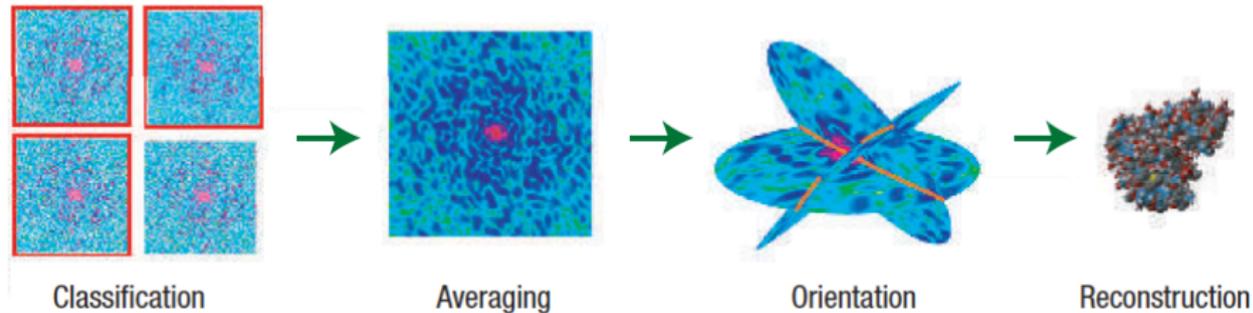
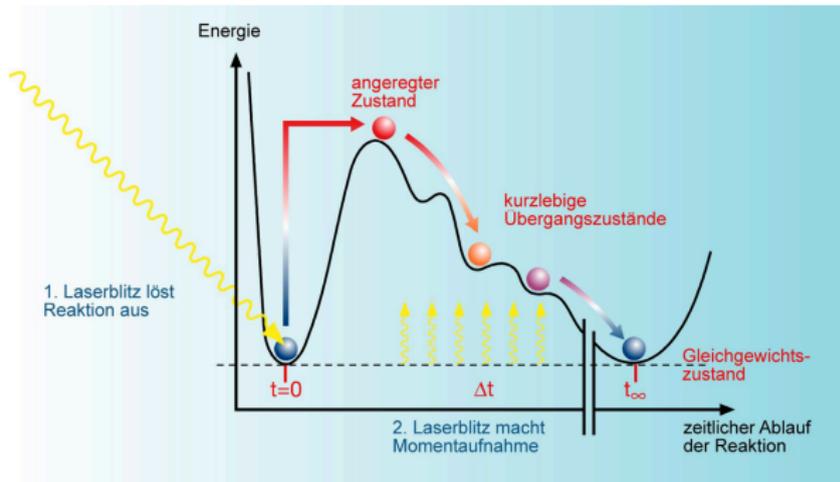


Abbildung: [J. Kirz, *Nature Physics* **2**, 799]

Anregungs-Abfrage Verfahren (Pump Probe)

- Ultrakurze Pulse erzeugbar (~ 100 fs)
- Pump Probe Experimente durchführbar \Rightarrow **Molekulare** Filmchen
- Aufklärung von Veränderungen in Atomstruktur und chemischen Bindungen



Pump-Probe Verfahren

Abbildung: [<http://www.xfel.eu/media/>]

Multiphotonenprozesse

Kohärente Röntgenquellen ermöglichen Untersuchung von Multiphotonenprozessen

Multiphotonenprozesse

Kohärente Röntgenquellen ermöglichen Untersuchung von Multiphotonenprozessen

Kohärenzvolumen $V_{koh} := L_t \cdot L_l$

- Innerhalb des Kohärenzvolumens ist das E-Feld exakt bekannt und unabhängig von äußeren Feldern
- Alle Photonen innerhalb des Kohärenzvolumens sind ununterscheidbar

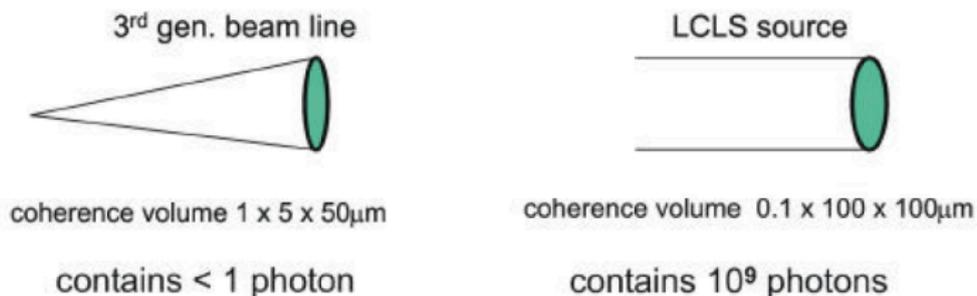


Abbildung: [C. Pellegrini und J. Stöhr, [ssrl.slac.stanford.edu/..](http://ssrl.slac.stanford.edu/)]

Multiphotonenprozesse

Multiphotonenprozesse im IR und UV-VIS Bereich gut erforscht (Multiple Ionisation, Above-Threshold Ionisation, High Harmonic Generation, Attosekundenpulse etc.)

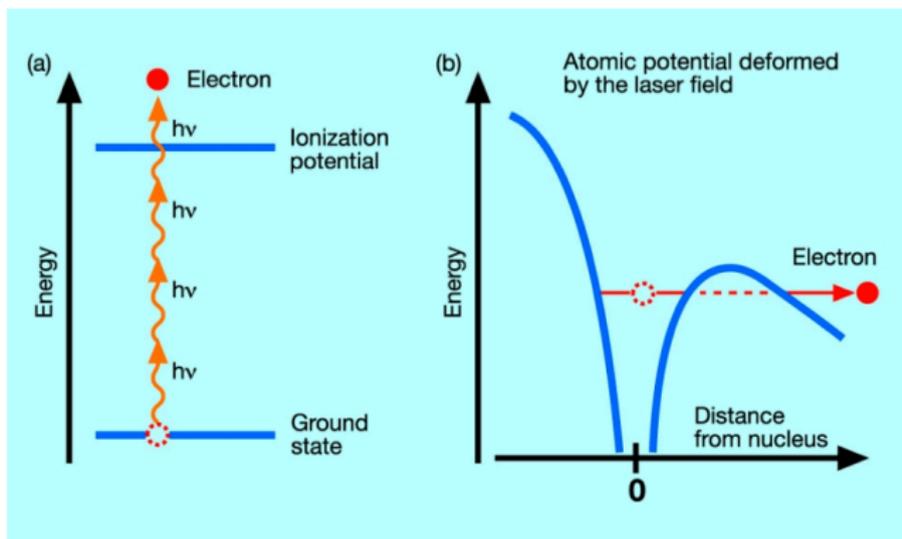


Abbildung: [[www.hasylab.desy.de/..](http://www.hasylab.desy.de/)]

Keldysh Parameter

Der Keldysh Parameter dient als quantitativer Indikator, in welchem Regime (Tunnelionisation, Multiphotonenprozesse) man sich befindet

Keldysh Parameter

Der Keldysh Parameter dient als quantitativer Indikator, in welchem Regime (Tunnelionisation, Multiphotonenprozesse) man sich befindet

Definition

$$\gamma = \omega \frac{\sqrt{2m_e V_{IE}}}{eE}$$

ω = Zirkularfrequenz des Laserfeldes

V_{IE} = Ionisationsenergie des Systems

E = Elektrische Feldstärke des Lasers

Keldysh Parameter

Der Keldysh Parameter dient als quantitativer Indikator, in welchem Regime (Tunnelionisation, Multiphotonenprozesse) man sich befindet

Definition

$$\gamma = \omega \frac{\sqrt{2m_e V_{IE}}}{eE}$$

ω = Zirkularfrequenz des Laserfeldes

V_{IE} = Ionisationsenergie des Systems

E = Elektrische Feldstärke des Lasers

$\gamma \gtrsim 1 \Rightarrow$ Multiphotonenprozesse dominieren

$\gamma \lesssim 0.5 \Rightarrow$ Tunnelionisation tritt auf

Mit XFEL im Bereich $\gamma \gg 1$

Fragestellungen

- Treten neue Effekte im **Röntgenbereich** auf (Nichtlineare Compton Prozesse, Simultane Photon-Streuung und -Absorption etc.)?

Fragestellungen

- Treten neue Effekte im **Röntgenbereich** auf (Nichtlineare Compton Prozesse, Simultane Photon-Streuung und -Absorption etc.)?
- Verschwinden Effekte, die vorher da waren (HHG, ATI, Rückstreu-Ionisation)?
⇒ Mögliche Vereinfachung, gut für Beugungsexperimente und andere Anwendungen

Zusammenfassung

Vorteile einer XFEL Lichtquelle gegenüber existierenden Quellen

- Erste voll kohärente Lichtquelle im Röntgenbereich
- Extrem hohe Brillianz
- Kleiner Fokus des Lichtstrahls → hohe Intensität
- Extrem kurze Röntgenpulse

Zusammenfassung

Vorteile einer XFEL Lichtquelle gegenüber existierenden Quellen

- Erste voll kohärente Lichtquelle im Röntgenbereich
- Extrem hohe Brillianz
- Kleiner Fokus des Lichtstrahls → hohe Intensität
- Extrem kurze Röntgenpulse

Wer könnte von XFEL profitieren?

- Besserer experimenteller Zugang zu Vorgängen auf Nanometer und Femtosekundenskala
- Direkte Abbildung von nichtkristallinen Proben → großer Einfluss auf Strukturbiologie und Physik der Makromoleküle
- Ausdehnung der Quantenoptik auf den Röntgen- und Nuklearbereich (*Science Fiction*)

Danke für die Aufmerksamkeit