

FEL, eine Einführung nicht nur für Physiker

Dirk Nölle
DESY, MPY
9-2579
Dirk.Noelle@desy.de

Seminar DESY-Zeuthen, 28.04.03



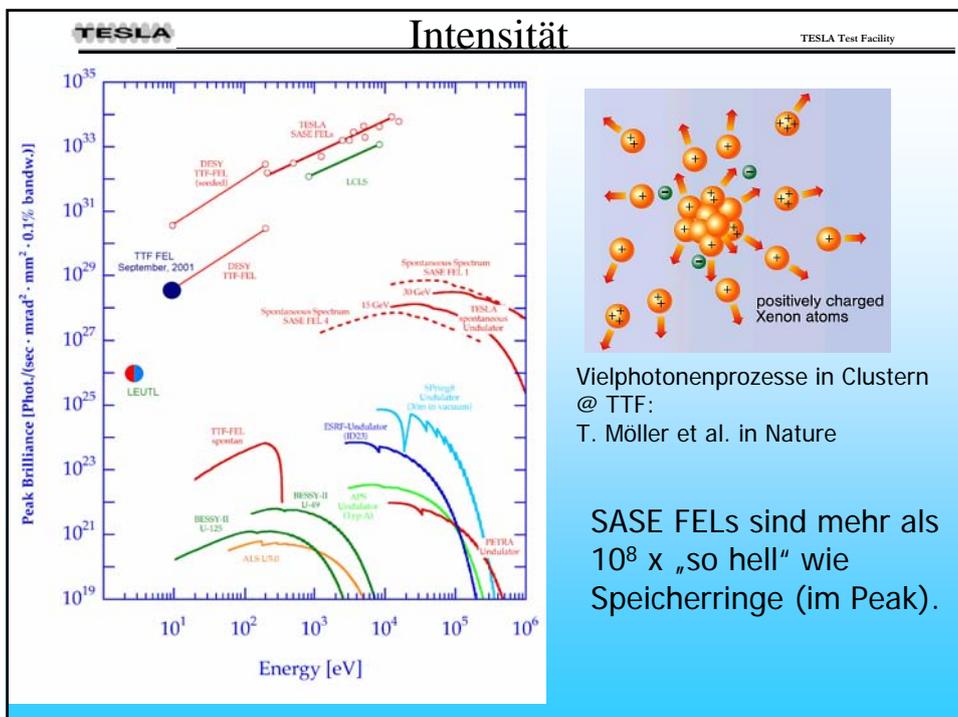
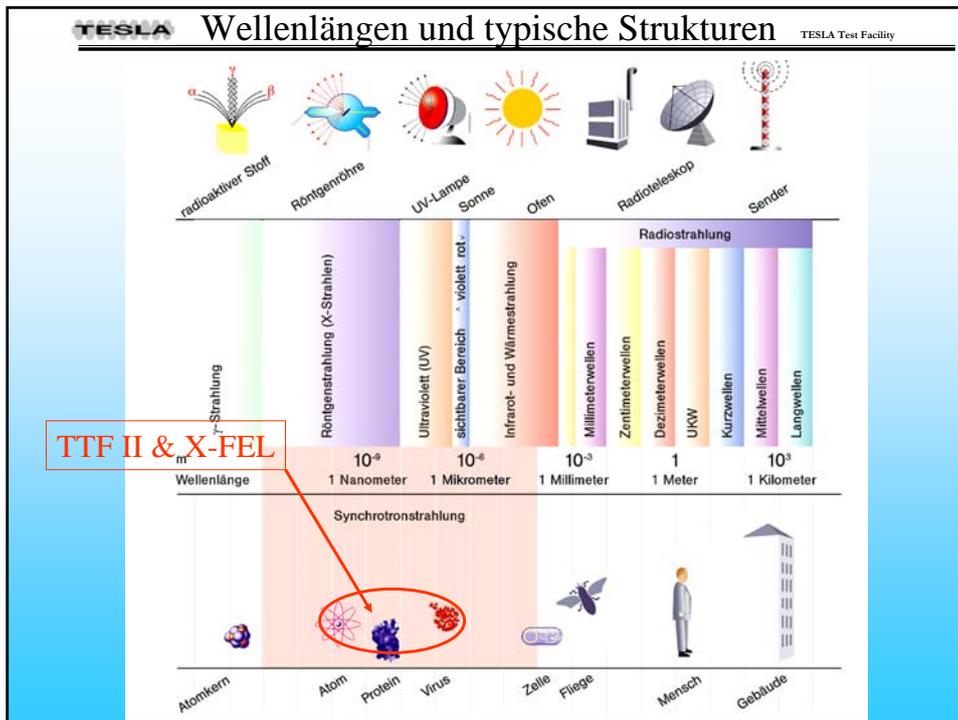
Überblick:

- Warum das Ganze ?
- Was ist ein Free-Electron-Laser?
 - „Klassischer“ Laser und FEL
 - Eine kleiner (historischer) Überblick
 - Das Funktionsprinzip
 - Beispiele für verschiedene FEL Typen
 - SASE
- TTF und X-Ray FEL

Überblick:

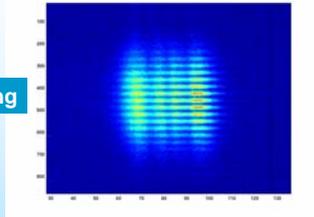
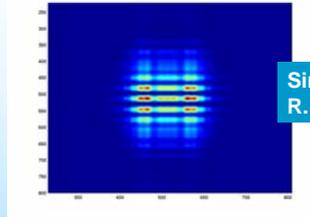
- Warum das Ganze ?
- Was ist ein Free-Electron-Laser?
 - Ist das ein Laser?
 - Eine kleiner historischer Überblick
 - Das Funktionsprinzip
 - Beispiele für verschiedene FEL Typen
 - SASE
- TTF und X-Ray FEL

- Strahlung (Licht) ist ein wichtiges Werkzeug zur Beobachtung der Natur.
- Immer kleinere Strukturen benötigen immer kürzere Wellenlängen.
- Hohe Intensitäten erlauben die Beobachtung „extremer“ Vorgänge.
- Kohärenz: Holographische Bilder, räumliche Auflösung
- Die Beobachtung schneller Abläufe erfordert kurze Pulse.



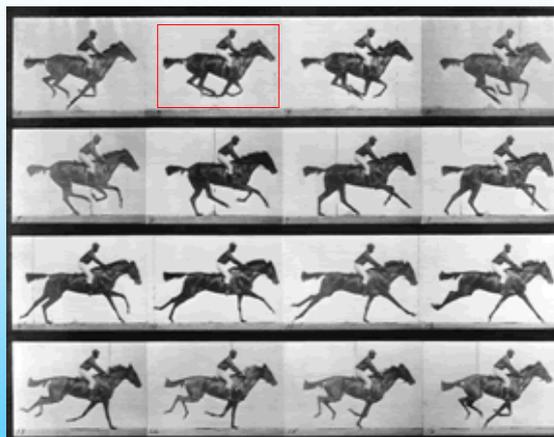
Beugungsmuster eines Doppelspalts:

Messung

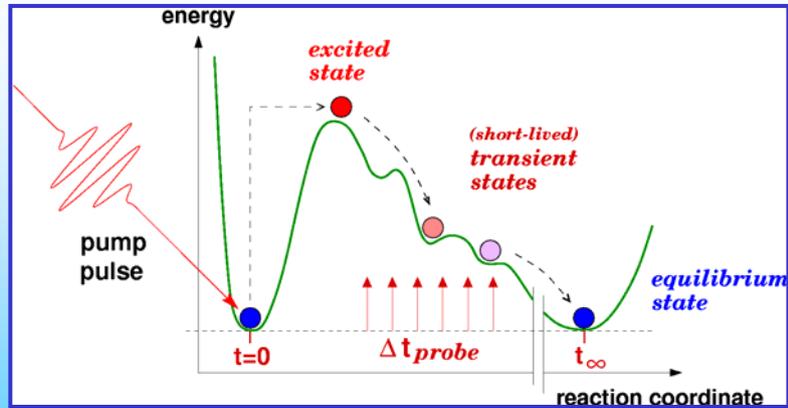
Simulation GLAD
R. Ischebeck

- Feste Phasenbeziehung der Laserwelle
 - Transversal
 - Longitudinal
- ⇒ Voraussetzung für 3D auflösende Messungen (Holografie)

1878 Eadweard Muybridge



1 s bei Lichtgeschwindigkeit = 300000 km (Entf. Erde – Mond)



100 fs bei Lichtgeschwindigkeit = 0,000030 m

Überblick:

- Warum das Ganze ?
- Was ist ein Free-Electron-Laser?
 - Ist das ein Laser?
 - Eine kleiner historischer Überblick
 - Das Funktionsprinzip
 - Beispiele für verschiedene FEL Typen
 - SASE
- TTF und X-Ray FEL

TESLA „Klassischer“ Laser & FEL Test Facility

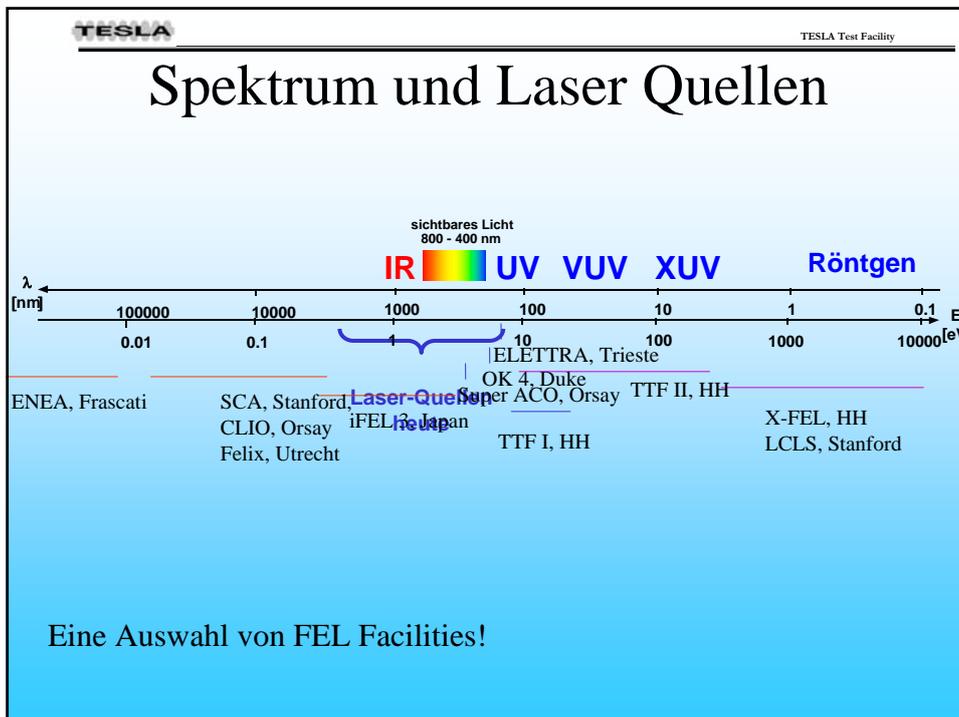
LASER: e^- in festen Zuständen gebunden

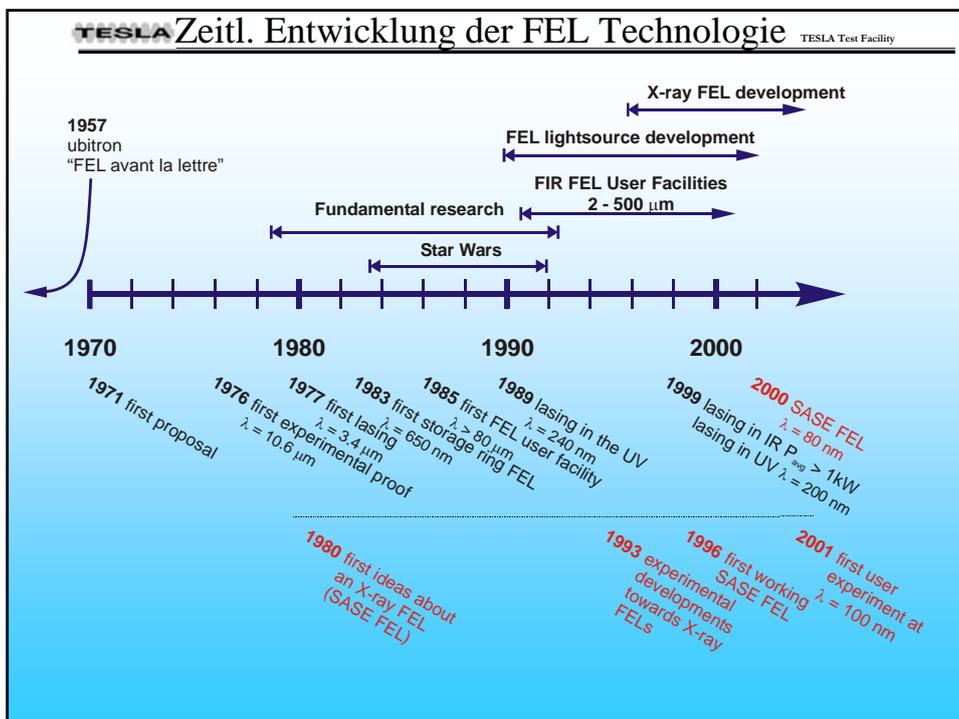
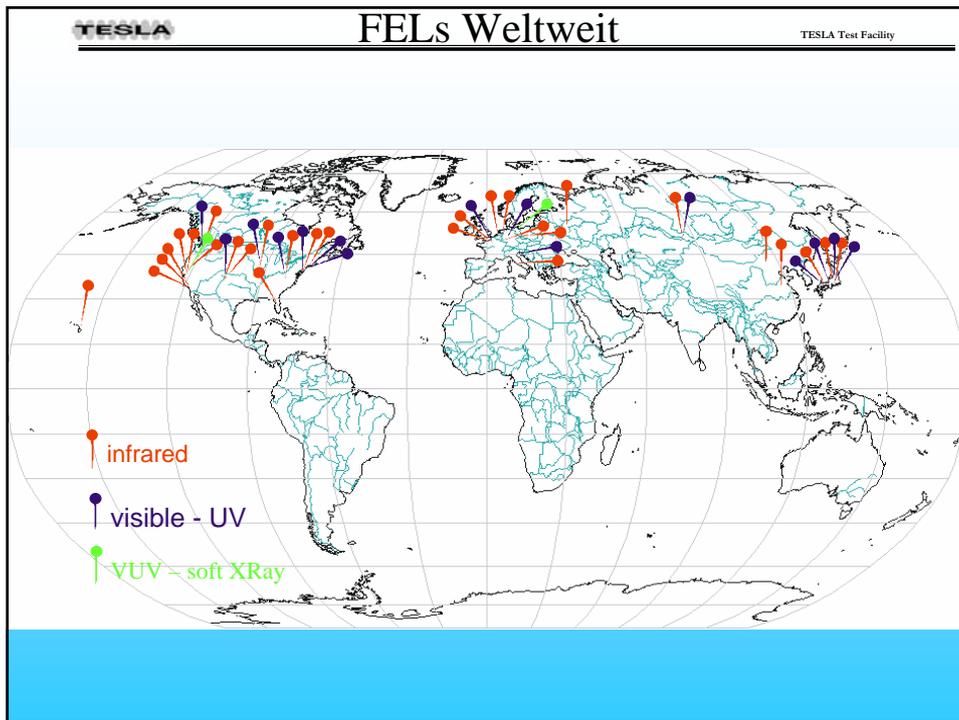
Eigenschaften:
 • Wellenlänge
 • Übergangswahrscheinlichkeiten
 • Linienbreite
 • Pulslänge
 hängen vom Material ab.

Free Electron Laser: Freie Elektronen im Vakuum,
 die durch externe Beschleunigung zum Strahlen „gezwungen“ werden.

Eigenschaften werden nur noch durch die e^- und die externen Kräfte bestimmt
 ⇒ Es gibt keine prinzipielle Beschränkung des Spektralbereichs.

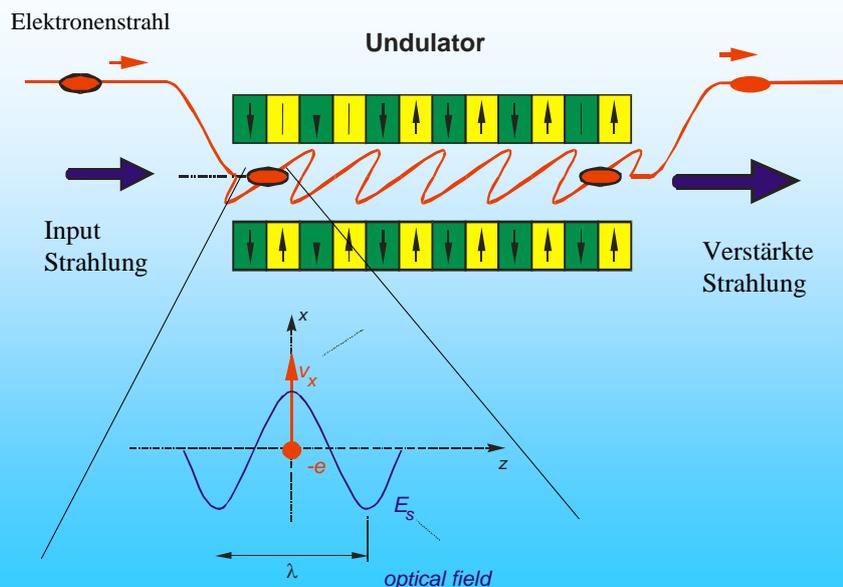
Quantenelektrodynamik:
 Stimulierte Comptonstreuung

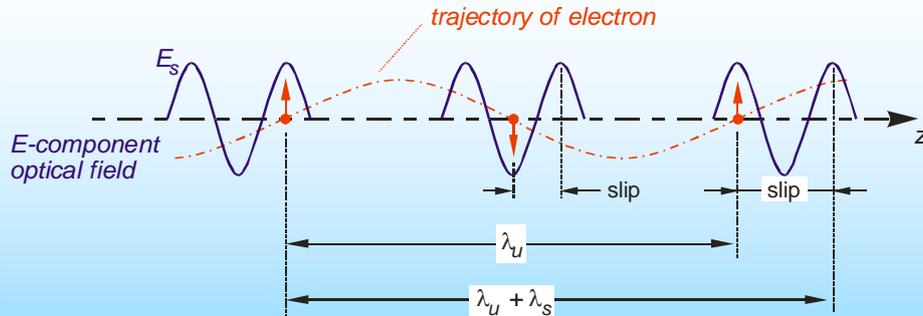




Energieaustausch:
$$mc^2 \frac{d\gamma}{dt} = -e \cdot \vec{v} \cdot \vec{E}$$

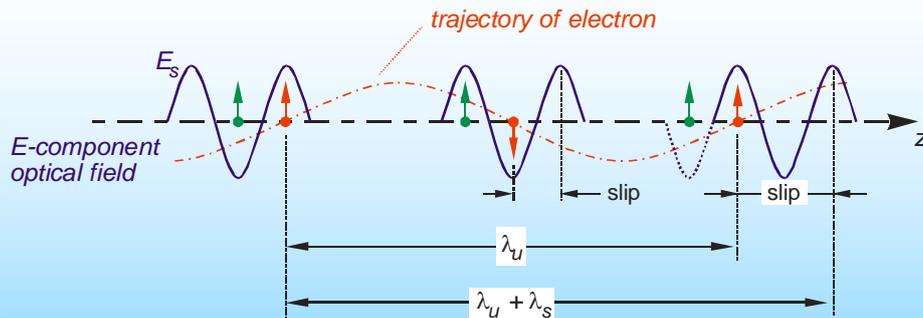
- Ziel: Transfer von Energie aus einem Elektronen- in einen Laserstrahl
- Problem: Lichtwellen sind transversal polarisiert, d.h. das elektrische Feld steht senkrecht zur Flugrichtung eines „mitfliegenden“ Elektronenstrahls
⇒ Energieübertrag eigentlich unmöglich!
- Lösung: Erzeugung transversaler Geschwindigkeitskomponenten in einem Magnetfeld!



Resonance condition

$$\frac{\lambda_u + \lambda_s}{c} = \frac{\lambda_u}{v_z} \iff \lambda_s = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$

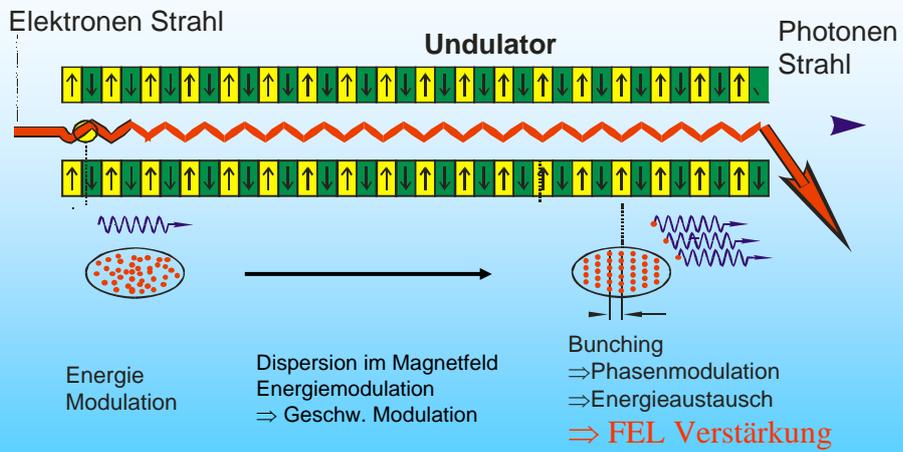
Energieaustausch: $mc^2 \frac{d\gamma}{dt} \approx -e \cdot \frac{B_0 \cdot E_0}{\gamma} \sin(\phi_0)$

Resonance condition

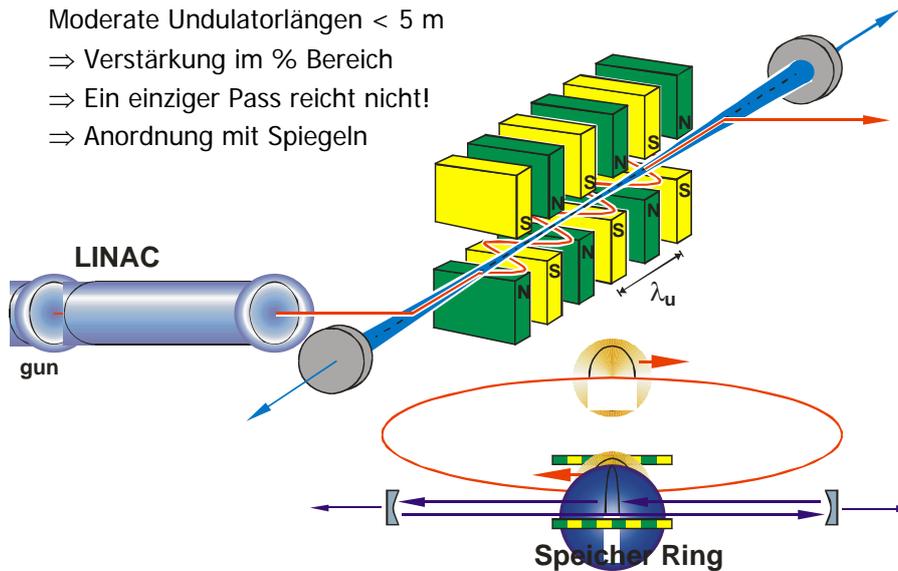
$$\frac{\lambda_u + \lambda_s}{c} = \frac{\lambda_u}{v_z} \iff \lambda_s = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$

Energieaustausch: $mc^2 \frac{d\gamma}{dt} \approx -e \cdot \frac{B_0 \cdot E_0}{\gamma} \sin(\phi_0)$

Aber: ϕ_0 ist eine „zufällige“ Phase \Rightarrow Energie wird nur moduliert!



- Moderate Undulatorlängen < 5 m
- ⇒ Verstärkung im % Bereich
- ⇒ Ein einziger Pass reicht nicht!
- ⇒ Anordnung mit Spiegeln

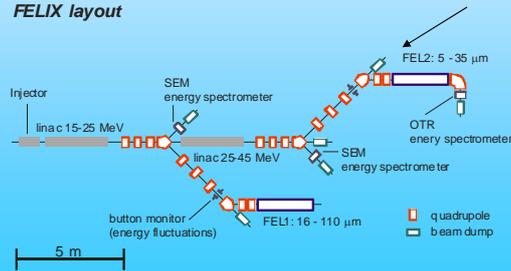


LINAC FEL, IR Quellen

- z.B. Felix in Rijnhuizen
- User Facility im Mid IR Bereich
- Ca. 5000 h/a



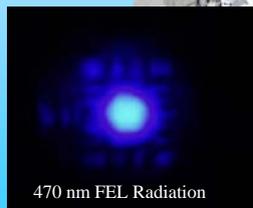
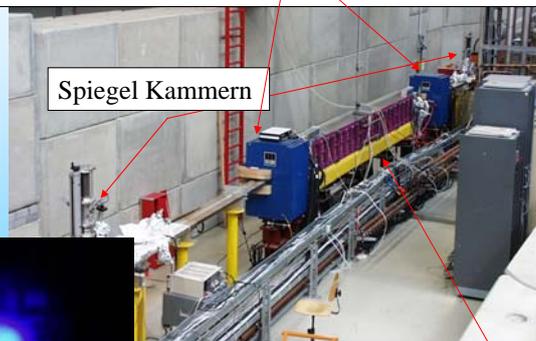
FELIX layout



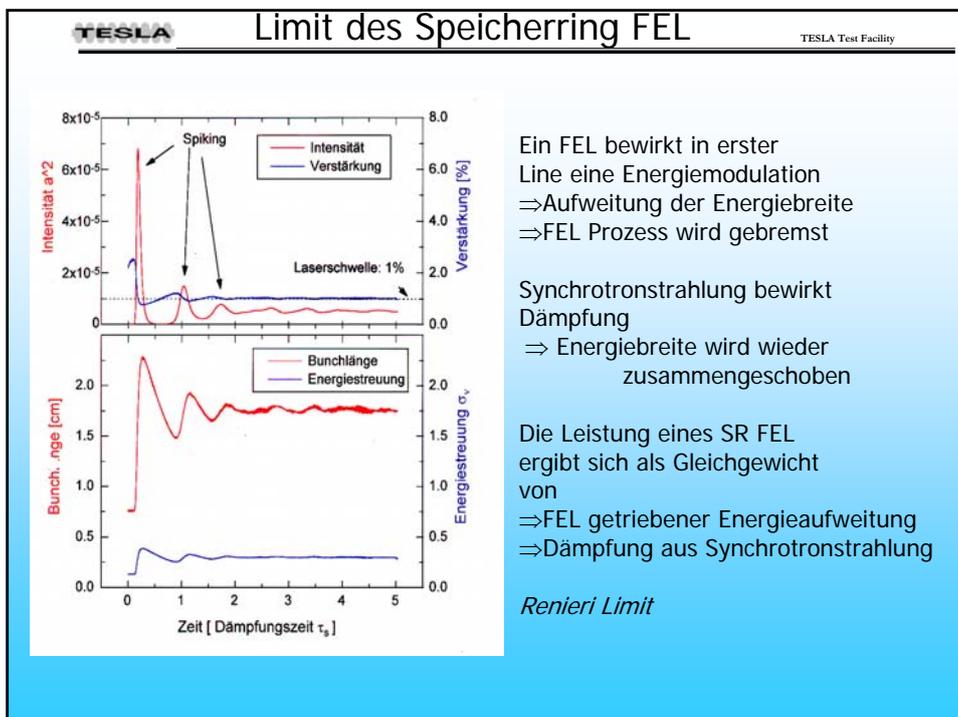
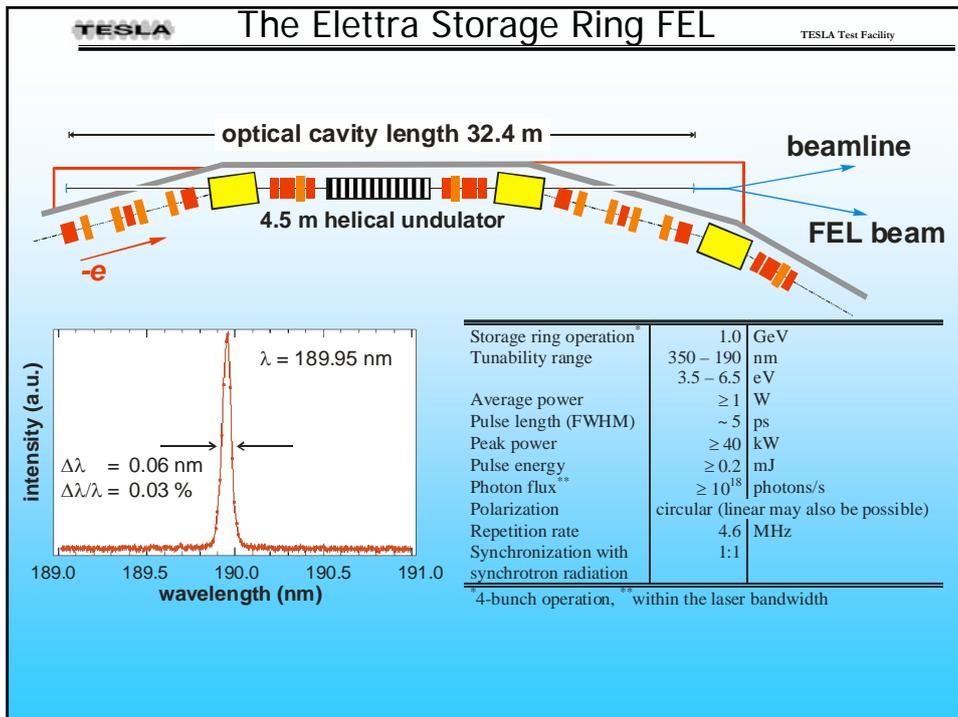
Speicherring FEL:

z.B. FELICITA I bei DELTA, Dortmund

Installiert in einer geraden Strecke von DELTA. Die Gerade wird durch 2 Zusatzdipole verkürzt, so dass auch die Spiegel eingebaut werden können.

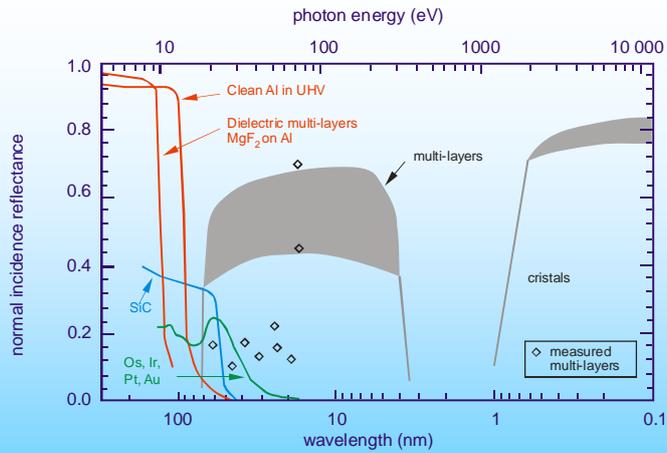


electromagnetischer Undulator
(25 cm, $K_{max}=3$; OK und FEL Option)



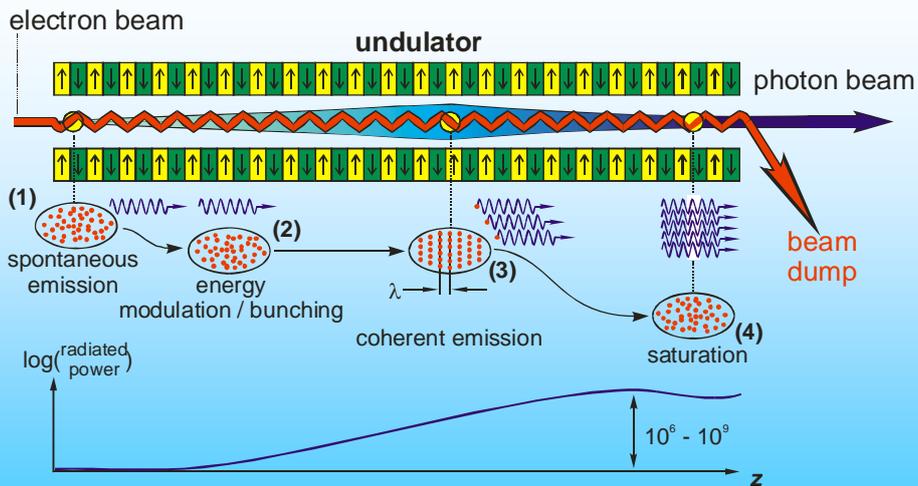
Wir brauchen:

- etwas ohne Spiegel
- etwas ohne einen Input Laser



D.T. Attwood et al, AIP Conf. Proc. 118, eds J.M.J. Madey and C. Pellegrini (AIP, New York, 1983), p. 93

- ⇒ Nutze die spontane Synchrotronstrahlung des Undulators
- ⇒ Verstärke sie in einem einzigen Durchgang
- ⇒ SASE (Self Amplifying Spontaneous Emission)



Reminder: Movie Zeigen!

Das SASE Prinzip stellt extreme Anforderungen an den Elektronenstrahl

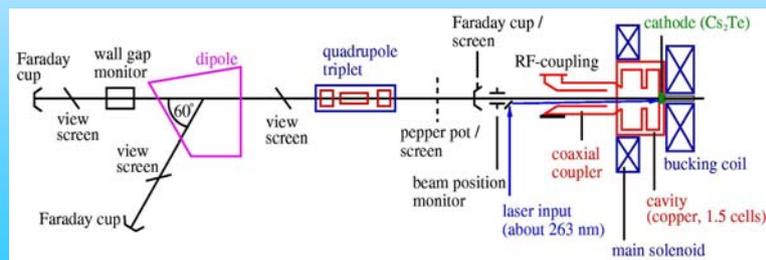
- Strahlqualität; d.h. Elektronendichte
 - Spitzenstrom (O(kA))
 - Extrem kurze Bunche (O(100fs))
 - Strahlquerschnitt und –divergenz (Emittanz)
 - Energiebreite (O(10⁻⁴))
- Stabilität
 - Energie bzw. Laserwellenlänge ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -2\frac{\Delta E}{E}$)
 - Strahlage (FEL-Prozess, Laserstrahltransport)

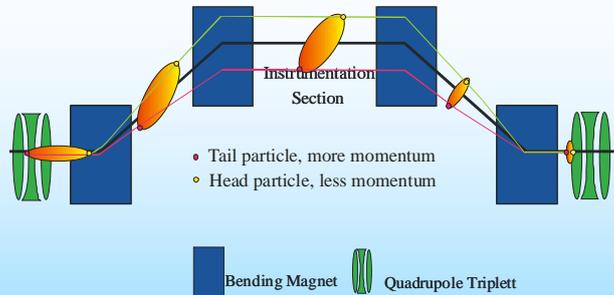
Beim LINAC werden die Grundlagen für die Strahlqualität am Anfang gelegt. Danach kann man alles nur noch schlechter machen!

The Photo Injector Test Facility at DESY Zeuthen (PITZ)

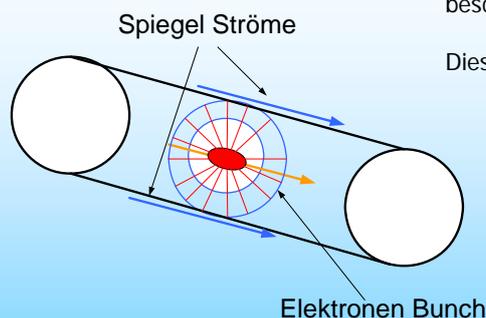
PITZ Collaboration and partners

BESSY, Berlin
 CAEP Mian Yang
 DESY, Hamburg and Zeuthen
 HEPI Tbilisi
 INFN Milano
 INR Troitsk
 INRNE Sofia
 Max-Born-Institute, Berlin
 TU Darmstadt, department TEMF
 YERPHI Yerevan





- Kompression der ca. 3 mm langen Bunche der Gun auf 30 μm (2 Stufen)
 - Problem: Intensive kohärente Synchrotronstrahlung ($\lambda \approx \sigma$) wirkt auf den Bunch zurück
- ⇒ **Emittanzaufweitung**
- ⇒ **Kammern mit niedrigem Gap als Absorber für die FIR Strahlung**



Der Beschleuniger ist nach außen neutral.
 ⇒ Spiegelströme kompensieren die Felder der beschleunigten Ladung

Diese Ladungen „erfahren“

- Querschnittsänderungen
- Oberflächenrauigkeit
- Oberflächenleitfähigkeit

Diese Behinderung zur Impedanz Z der Kammer (Widerstand) zusammengefaßt. $Z \times I$ gibt den Energieverlust des Strahls durch diese Effekte

Skin Effekt: Die Spiegelströme fließen nur in einer dünnen Schicht auf der Kammerinnenwand

Je kürzer der Bunch, desto dünner die Spiegelstromschicht

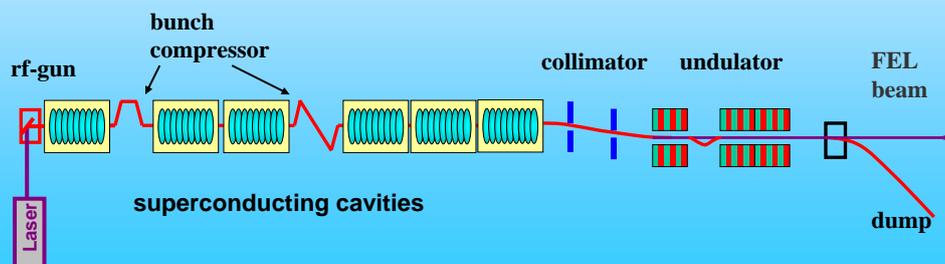
Gut leitende Oberflächen vermindern Impedanz (TTF II Kammern werden verkupfert)

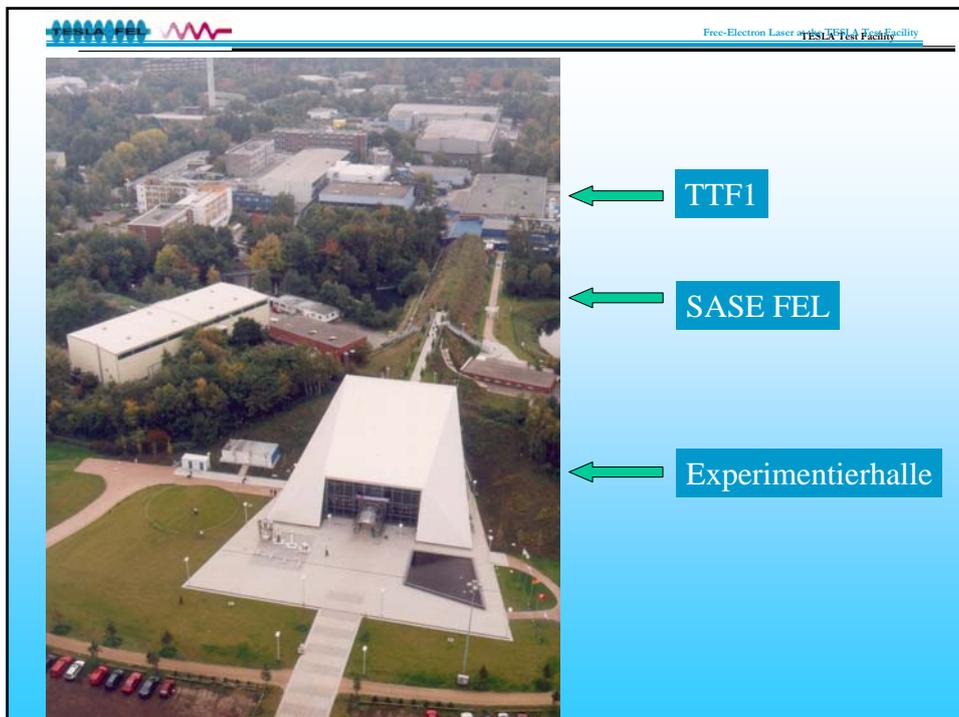
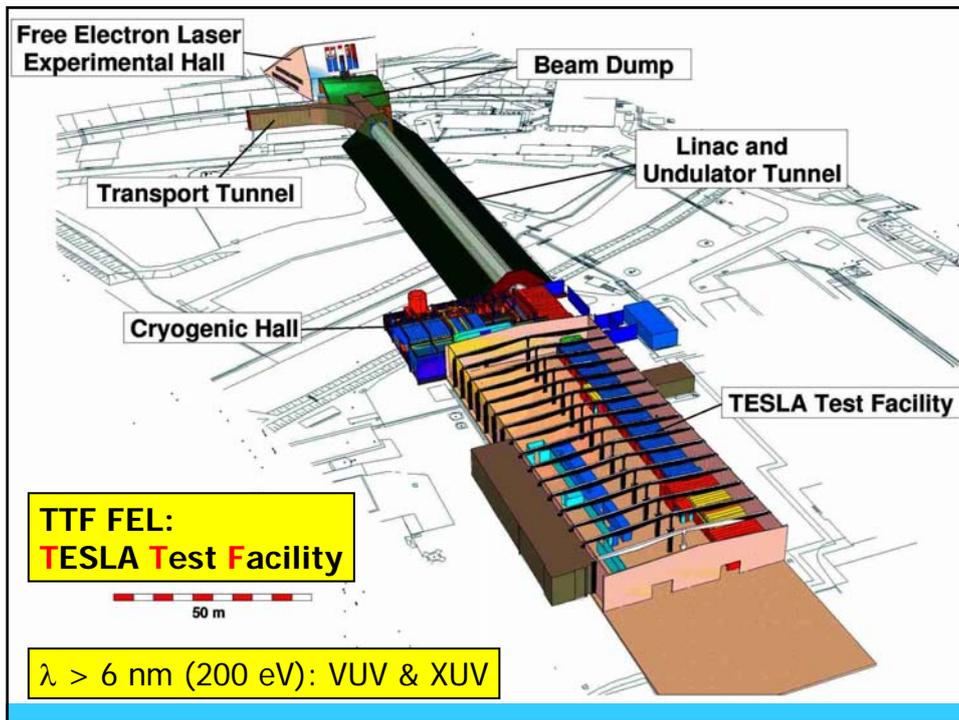
Überblick:

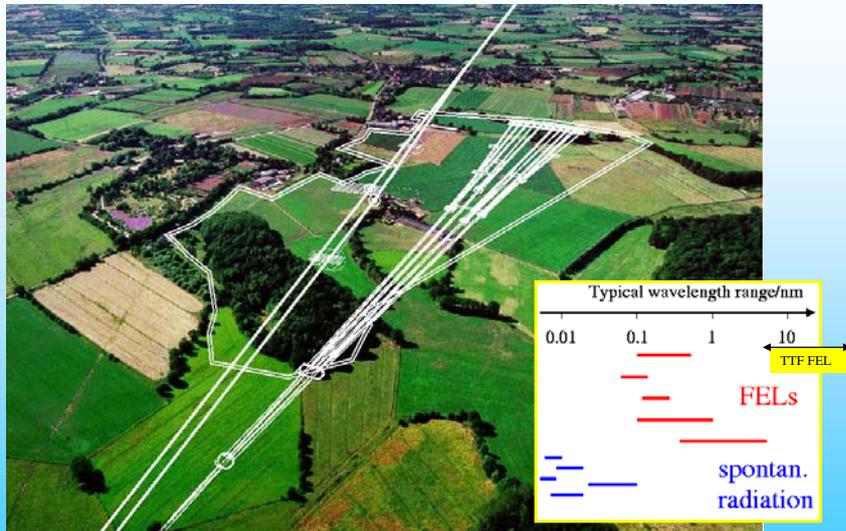
- Warum das Ganze ?
- Was ist ein Free-Electron-Laser?
 - Ist das ein Laser?
 - Eine kleiner historischer Überblick
 - Das Funktionsprinzip
 - Beispiele für verschiedene FEL Typen
 - SASE
- TTF und X-Ray FEL

TTF II at DESY:

- Supraleitender 1 GeV LINAC
- Ladungen zwischen 0.1 and 4 nC
- Normalisierte Emittanz $\approx 2 \pi$ mm mrad
- Bunchlängen von ca. $\approx 50 \mu\text{m}$
- Bis zu 7200 Bunches mit 110 ns Abstand
- 10 Hz Betrieb
- VUV - Soft X-Ray FEL User Facility (bis ≈ 6 nm)







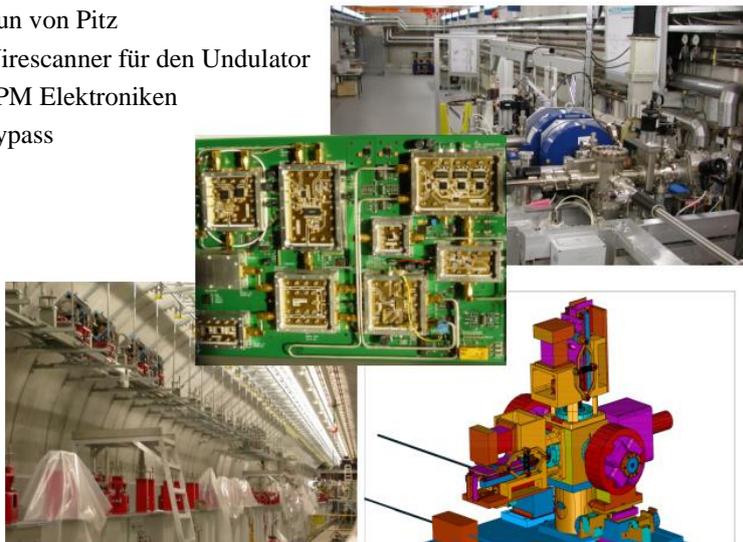
Mögliches TESLA/X-FEL Areal nahe Hamburg

- HF Test
 - Vakuum Komplettieren
 - Injektor Kommissionierung
- } 2003
-
- Single Bunch Operation
 - FEL Betrieb (30 nm)
 - Full Performance
- } 2004



Unter anderem:

- Gun von Pitz
- Wirescanner für den Undulator
- BPM Elektroniken
- Bypass



Danke,
den vielen Kollegen, die mir
Grafiken und Folien zur
Verfügung gestellt haben!