
FEL für Fussgänger ☺



Dirk Nölle
DESY, MDI

9-2579

Dirk.Noelle@desy.de

FLASH Operateursausbildung, 11.10.07





- 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



Warum das Ganze?

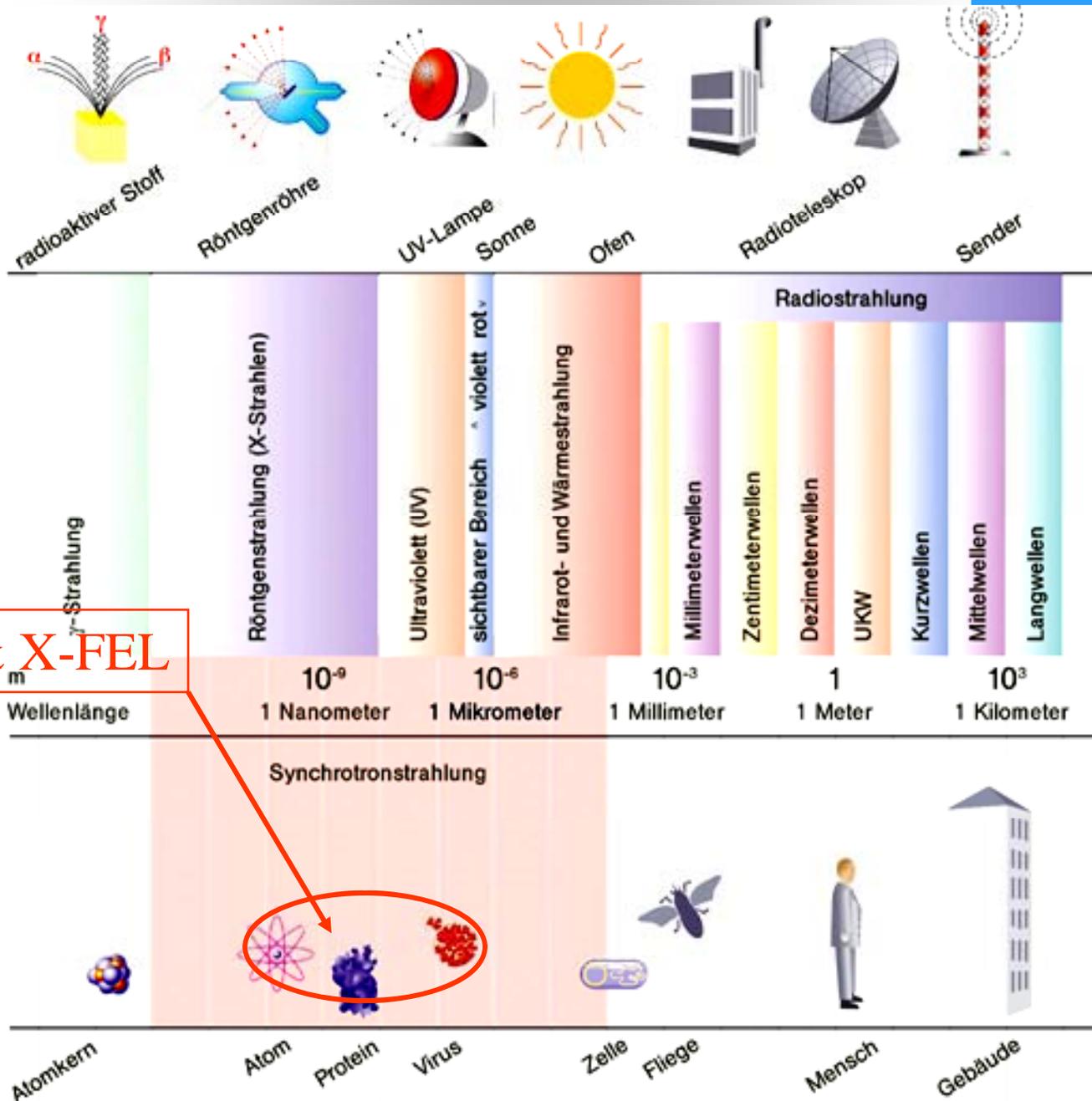
- Strahlung (Licht) ist ein wichtiges Werkzeug zur Beobachtung der Natur.
- Immer kleinere Strukturen benötigen immer kürzere Wellenlängen.
- Hohe Intensitäten erlauben die Beobachtung „extremer“ Vorgänge.
- Kohärenz: Holographische Bilder, räumliche Auflösung
- Die Beobachtung schneller Abläufe erfordert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



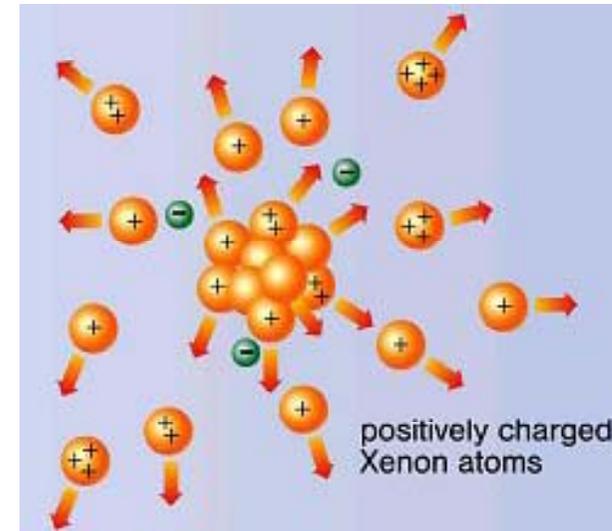
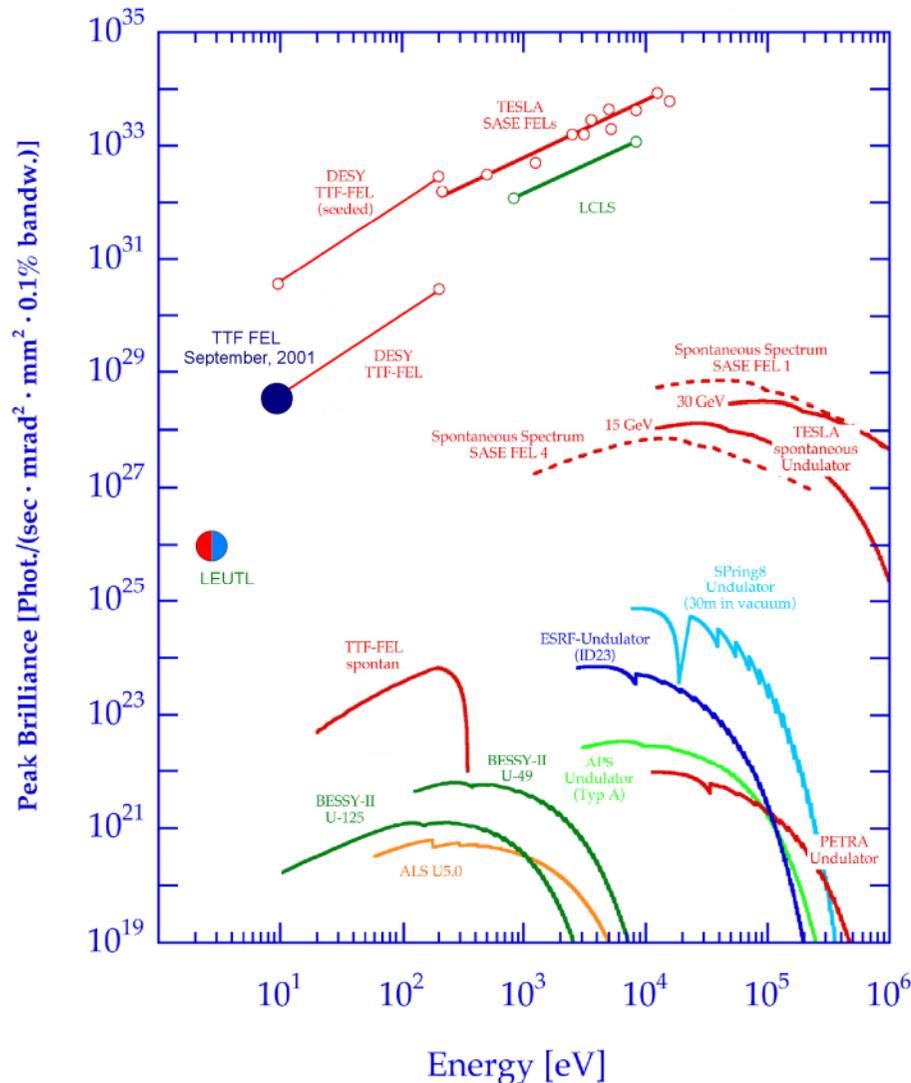
Wellenlängen/Typische Strukturen

FLASH

ron Laser
nburg



TTF II & X-FEL



Vielphotonenprozesse in Clustern
@ TTF:

T. Möller et al. in Nature

SASE FELs sind mehr als
10⁸ x „so hell“ wie
Speicherringe (im Peak).



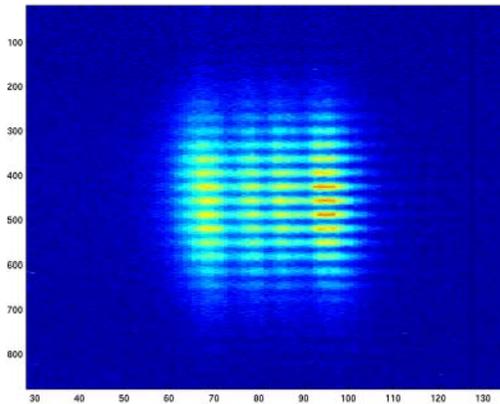
HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

Kohärenz

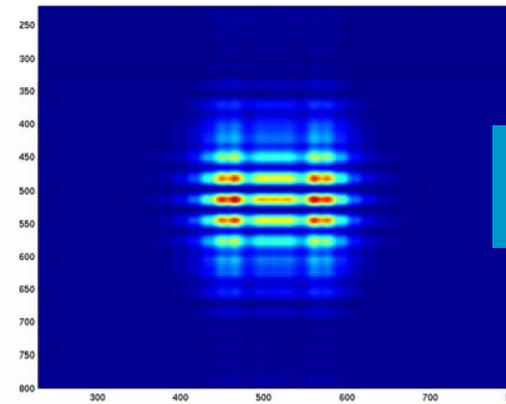
FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

Beugungsmuster eines Doppelspalts:

Messung



Simulation GLAD
R. Ischebeck



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

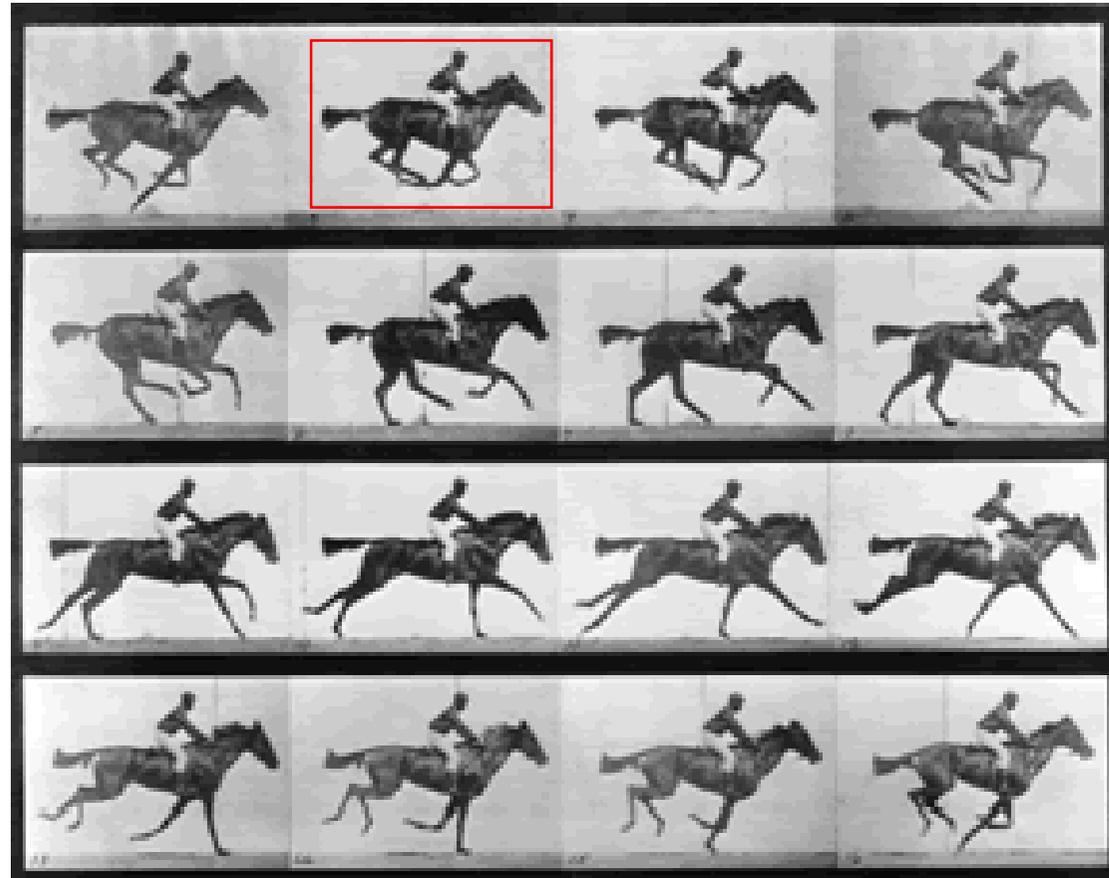


Zeitaufgelöste Untersuchungen

HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

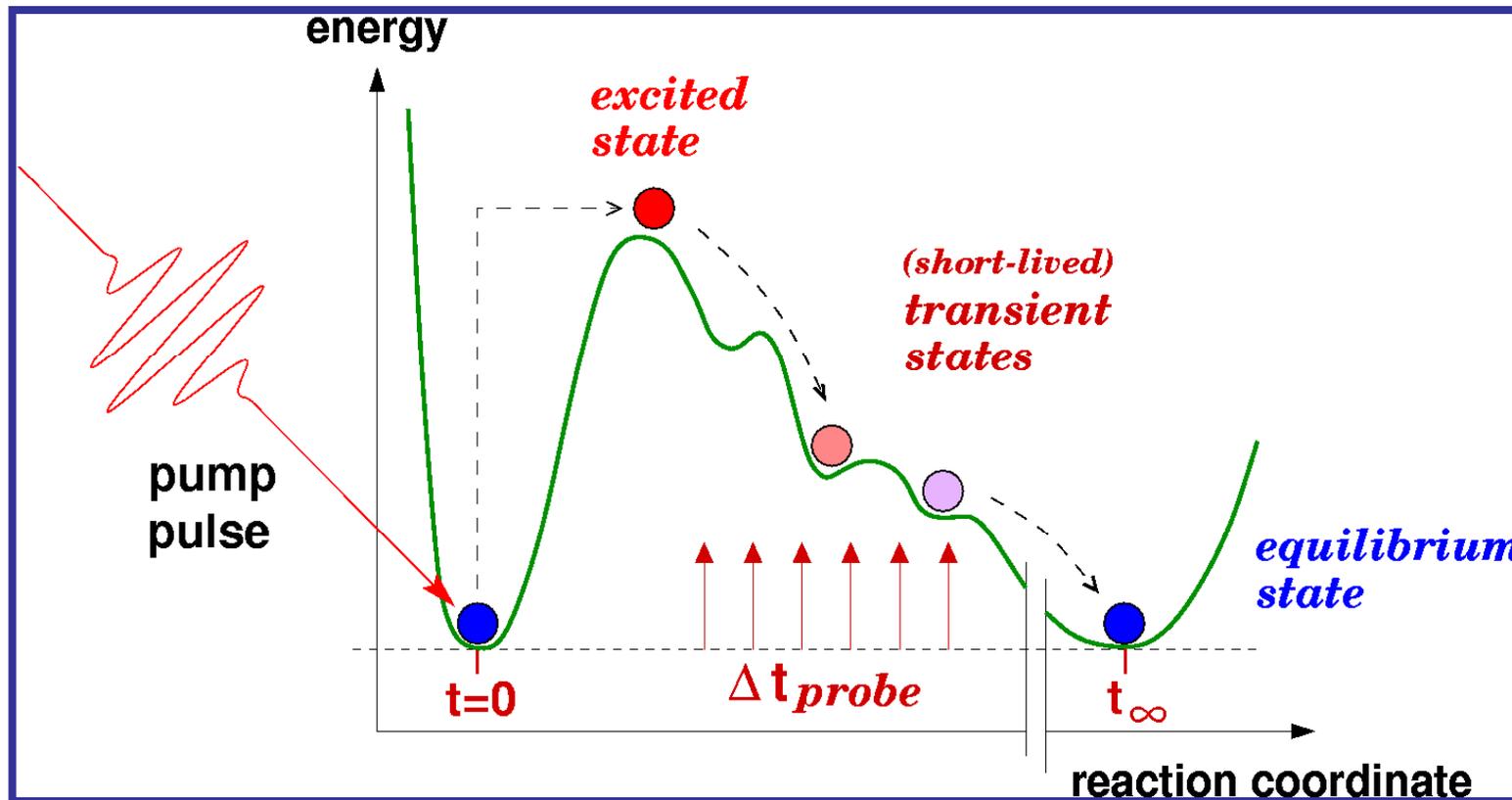
1878 Edward Muybridge



1 s bei Lichtgeschwindigkeit = 300000 km (Entf. Erde – Mond)₇



Schnelle Abläufe



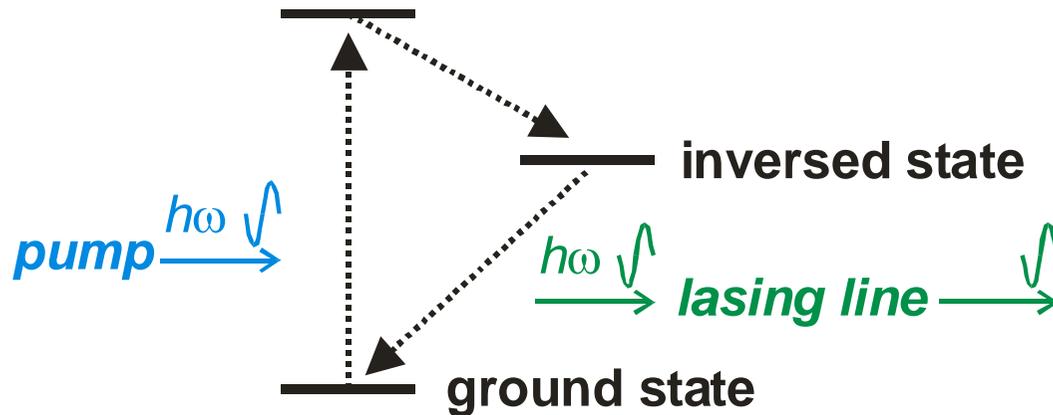
100 fs bei Lichtgeschwindigkeit = 0,00030 m (30 μm)



- 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



LASER: e^- in festen Zuständen gebunden

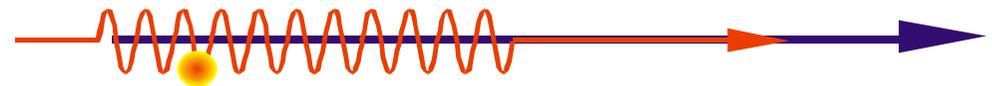


Lasereigenschaften:

- Wellenlänge
 - Übergangswahrscheinlichkeiten
 - Linienbreite
 - Pulslänge
- hängen vom Material ab.

Free Electron Laser: Freie Elektronen im Vakuum,

die durch externe Beschleunigung (Magnetfelder) zum Strahlen „gezwungen“ werden.

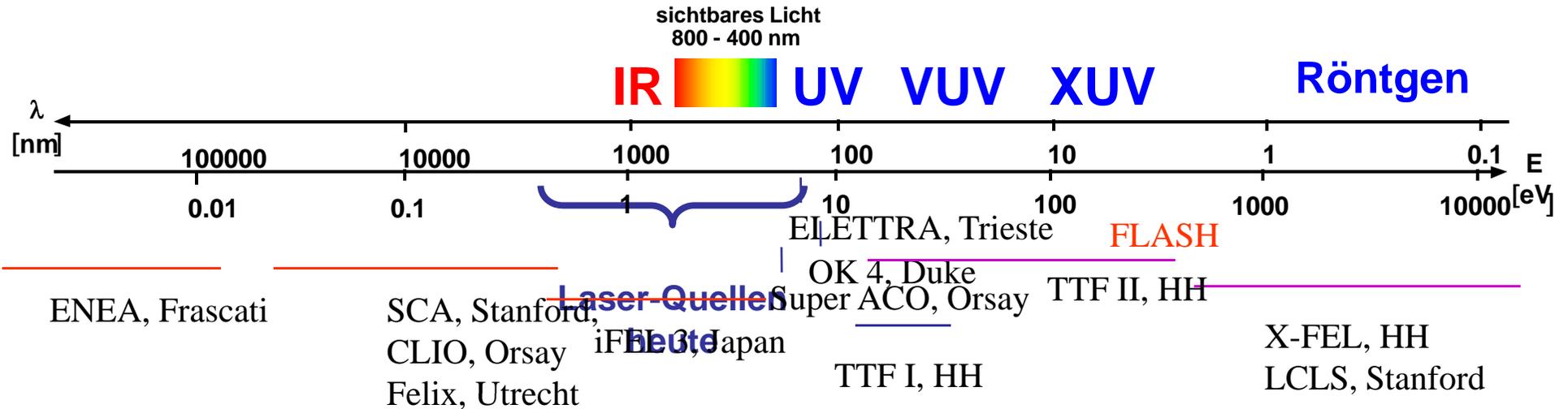


Strahlungseigenschaften werden nur noch durch die e^- und die externen Kräfte bestimmt

⇒ Es gibt keine prinzipielle Beschränkung des Spektralbereichs.



Spektrum und Laser Quellen



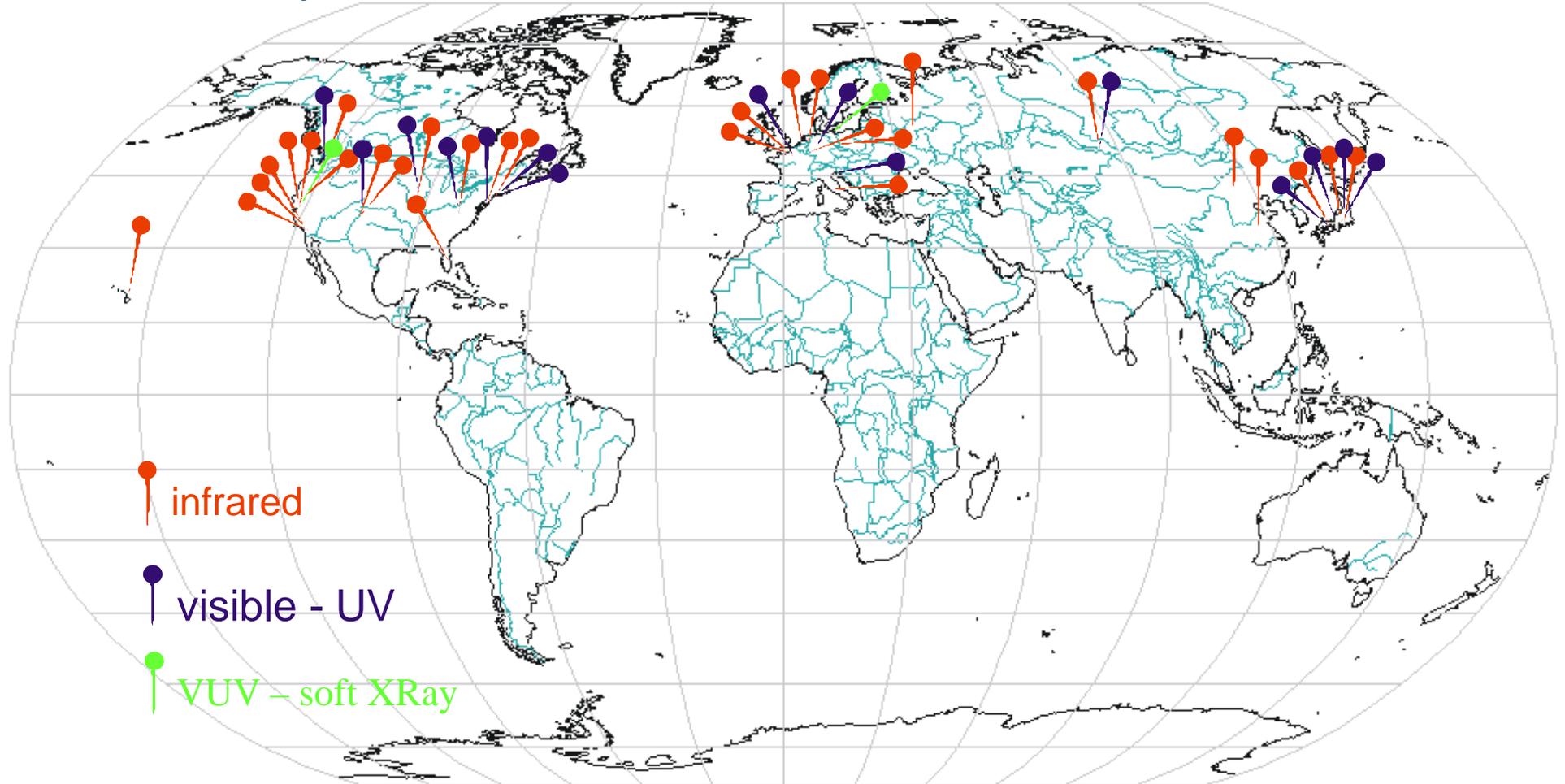
Eine Auswahl von FEL Facilities!



HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

FELs Weltweit

FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg





Historie der FEL Technologie



X-ray FEL development

FEL lightsource development

FIR FEL User Facilities

2 - 500 μm

Fundamental research

Star Wars

1957
ubitron
"FEL avant la lettre"

1970

1980

1990

2000

FLASH

1971 first proposal

1976 first experimental proof
 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$

1977 first lasing
 $\lambda = 3.4 \mu\text{m}$

1983 first storage ring FEL
 $\lambda = 650 \text{ nm}$

1985 first FEL user facility
 $\lambda > 80 \mu\text{m}$

1989 lasing in the UV
 $\lambda = 240 \text{ nm}$

1999 lasing in IR P
lasing in UV $\lambda = 200 \text{ nm}$

2000 SASE FEL
 $\lambda = 80 \text{ nm}$

2005: 32 nm
2006: 13 nm
2007: 6.5 nm

1980 first ideas about
an X-ray FEL
(SASE FEL)

1993 experimental
developments
towards X-ray
FELs

1996 first working
SASE FEL

2001 first user
experiment at
 $\lambda = 100 \text{ nm}$

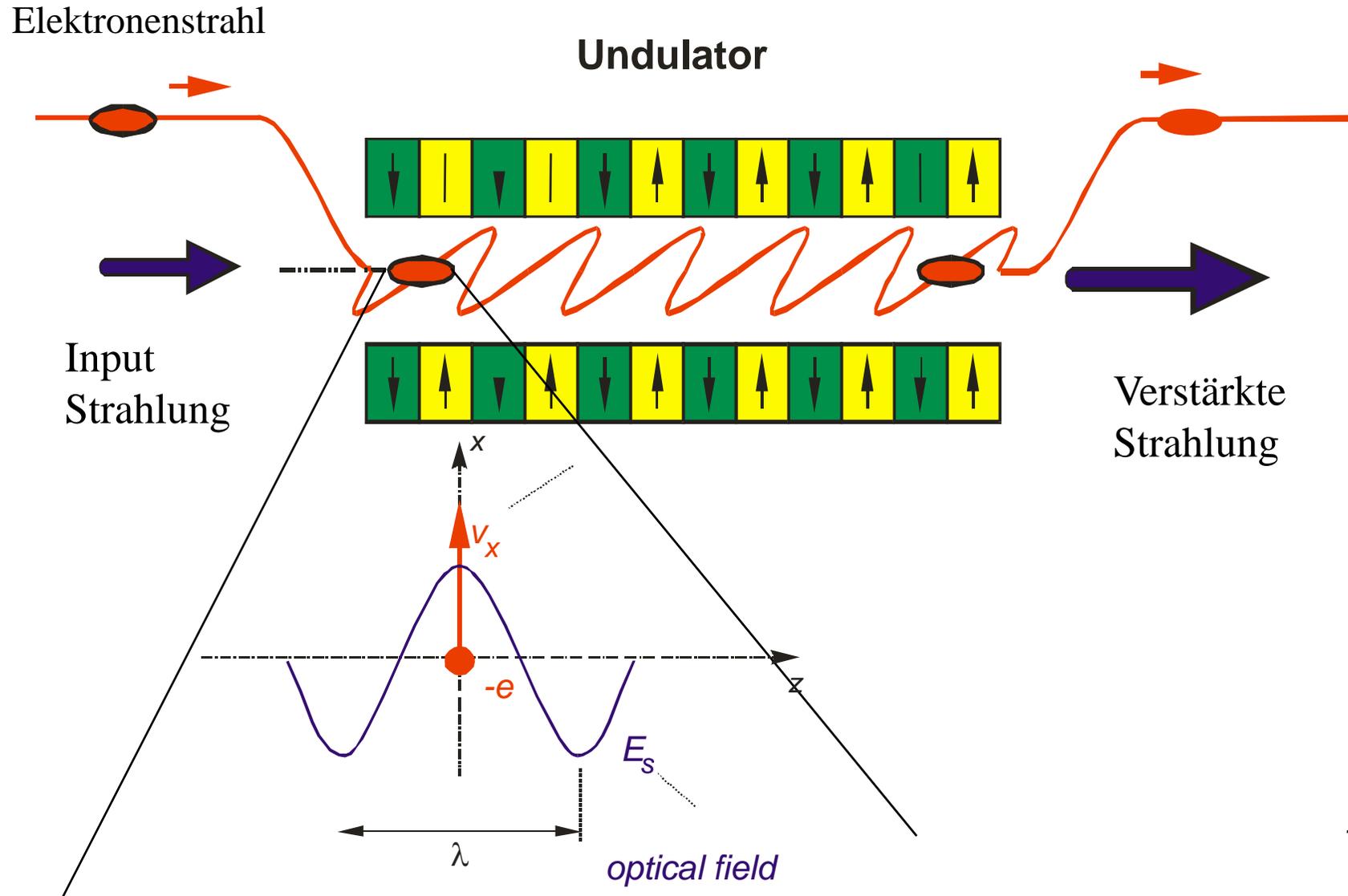


Energieaustausch: $mc^2 \frac{d\gamma}{dt} = -e \cdot \vec{v} \cdot \vec{E}$

- 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 „mit-fliegenden“ Elektronenstrahls
⇒ Energieübertrag eigentlich unmöglich!
- Lösung: Erzeugung transversaler Geschwindigkeitskomponenten in einem Magnetfeld!



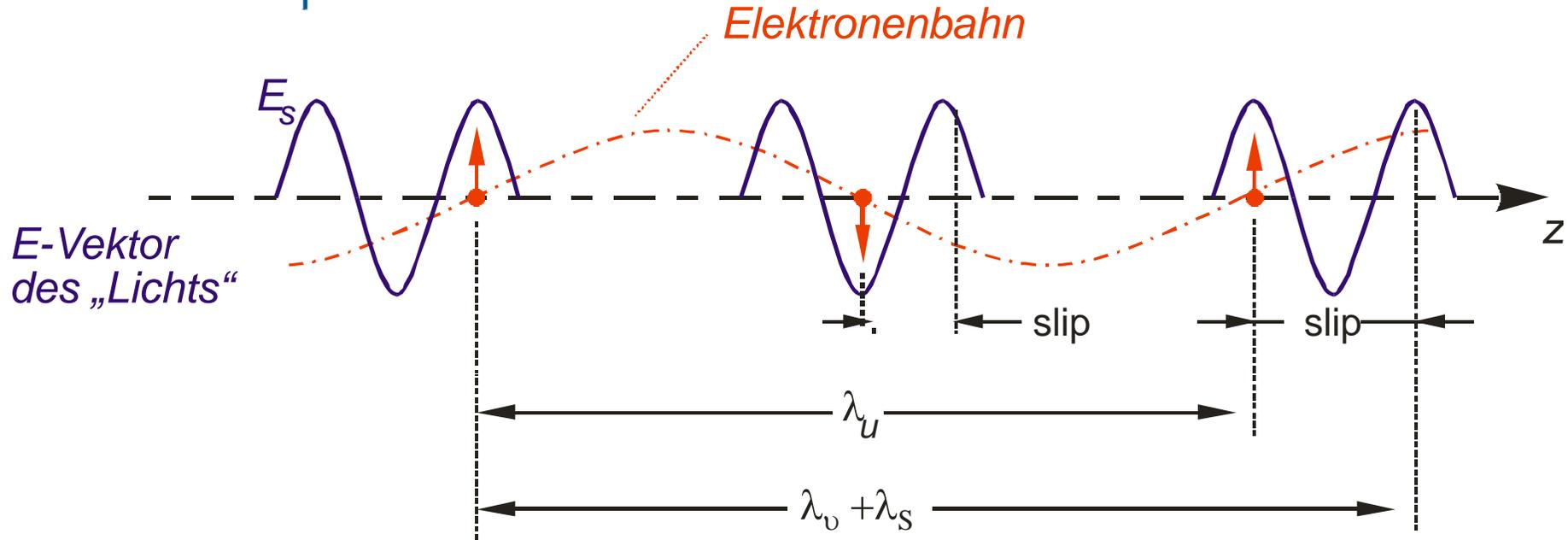
Funktionsweise eines FEL (II)





Funktionsweise eines FEL (III)

Resonanzbedingung



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

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!

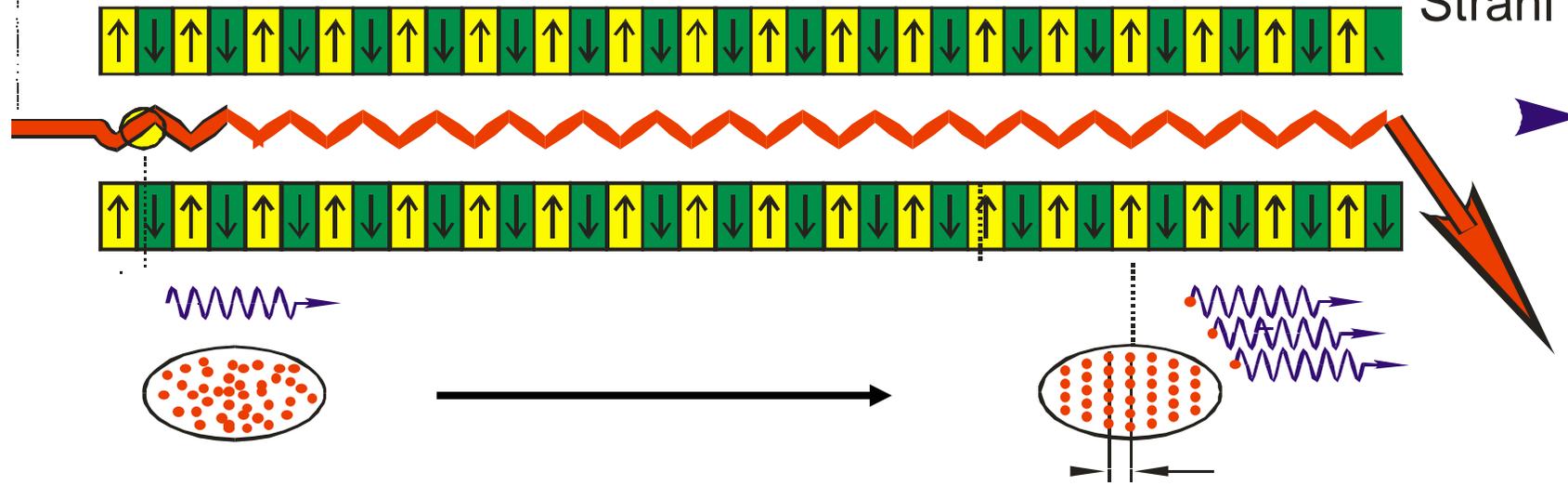


Funktionsweise eines FEL (IV)

Elektronen Strahl

Undulator

Photonen Strahl



Energie Modulation

Dispersion im Magnetfeld
Energimodulation
⇒ Geschw. Modulation

Bunching

⇒ Phasen- bzw. Dichtemodulation
⇒ Energieaustausch

⇒ **FEL Verstärkung**

Analogien: Einfangen des LINAC 2 Strahls in PIA

LKW Pulks auf der A1 Dortmund-Köln im Siebengebirge



... bleiben wir noch in der Geschichte 😊

FEL Typen

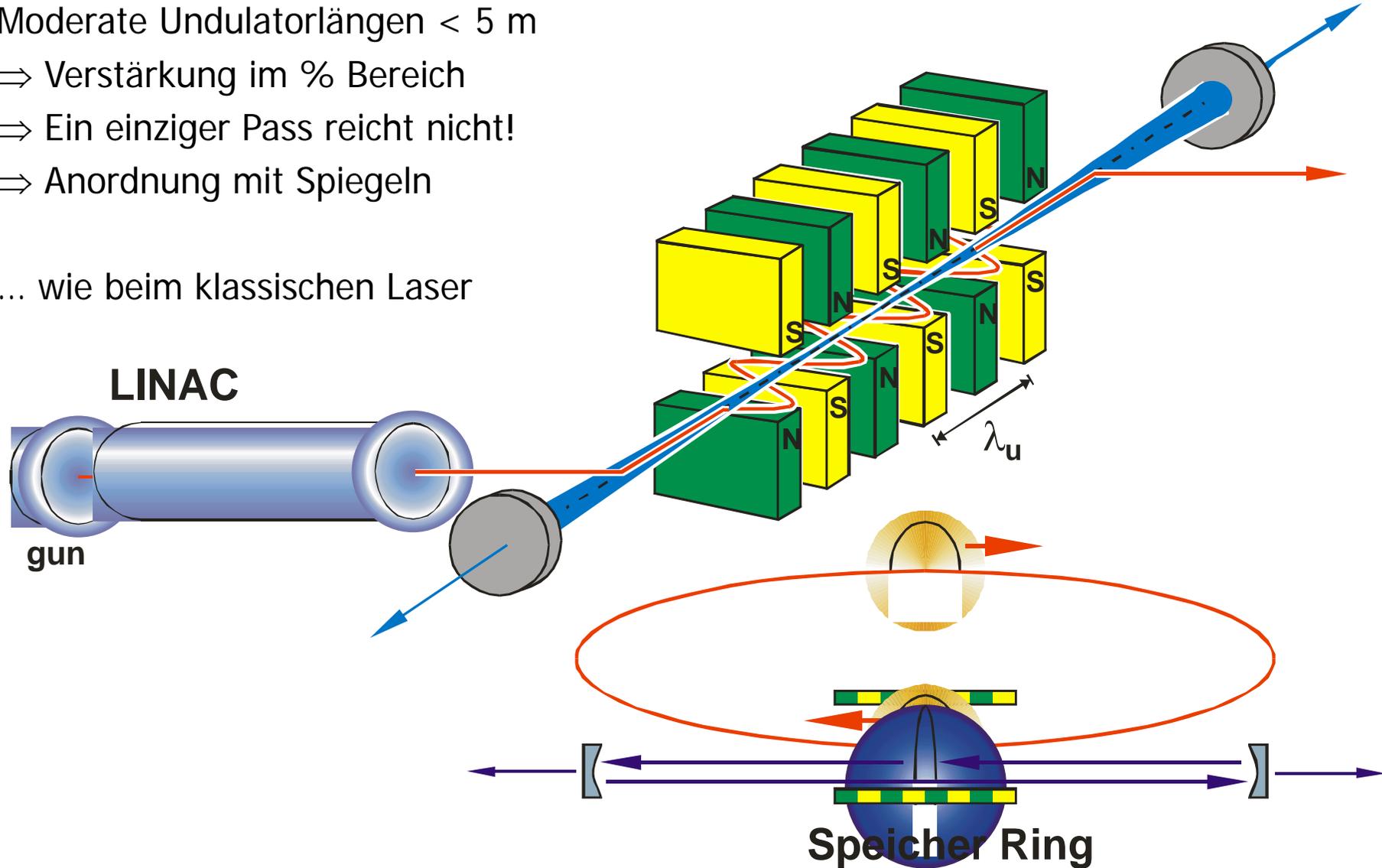


Oszillator FEL

FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

- Moderate Undulatorlängen $< 5\text{ m}$
- \Rightarrow Verstärkung im % Bereich
- \Rightarrow Ein einziger Pass reicht nicht!
- \Rightarrow Anordnung mit Spiegeln

... wie beim klassischen Laser





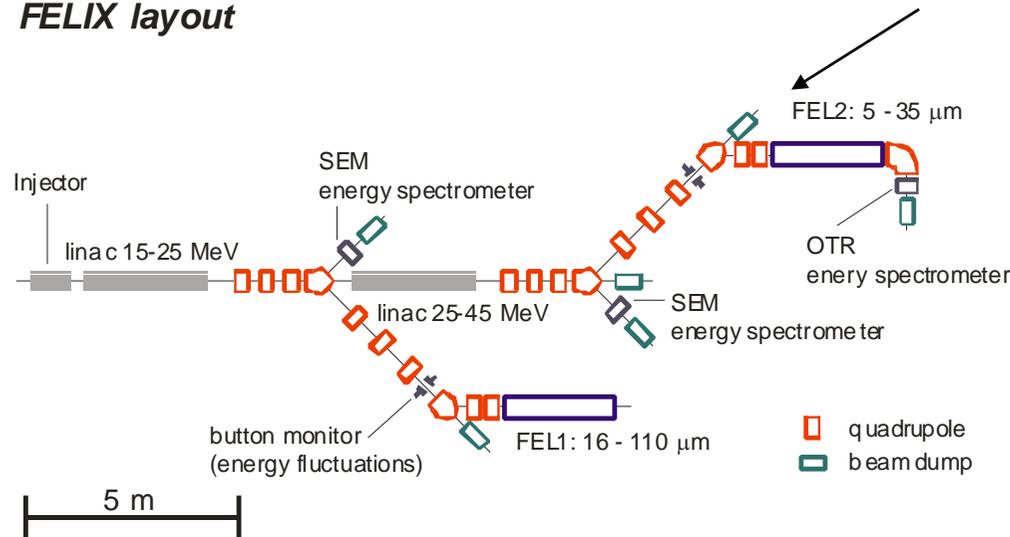
LINAC FEL, IR Quellen

FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

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

First Lasing 1991 (Bart ??)

FELIX layout



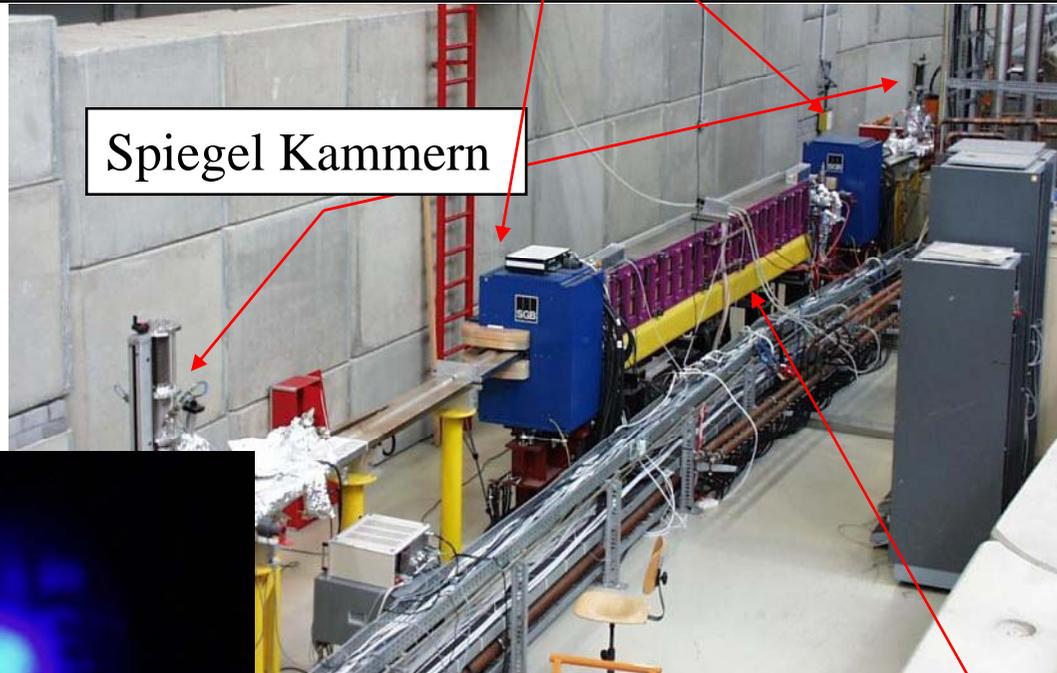


Speicherring FEL:

z.B. FELICITA I bei DELTA, Dortmund

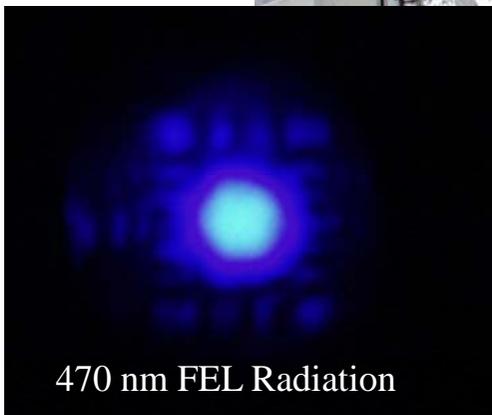
FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

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



Spiegel Kammern

First Lasing 1998



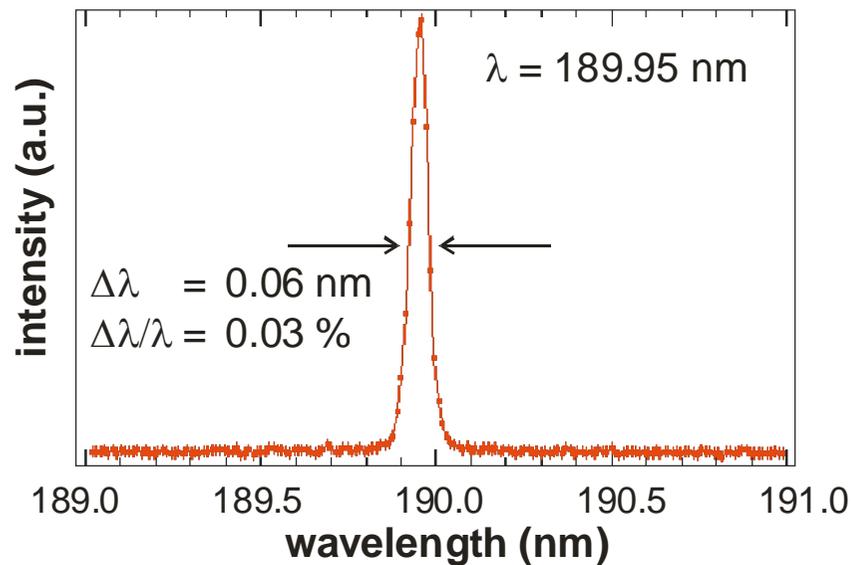
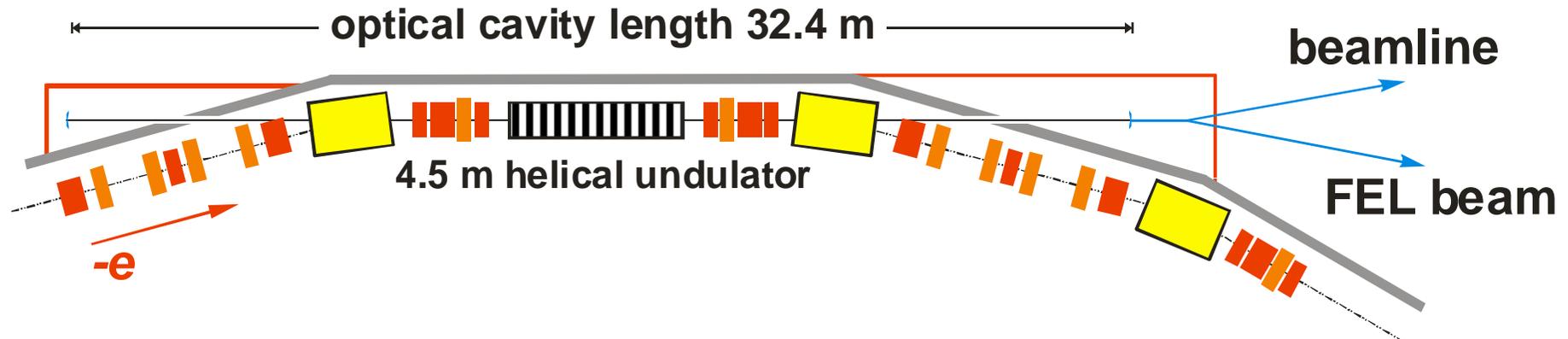
470 nm FEL Radiation

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



The Elettra Storage Ring FEL

FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

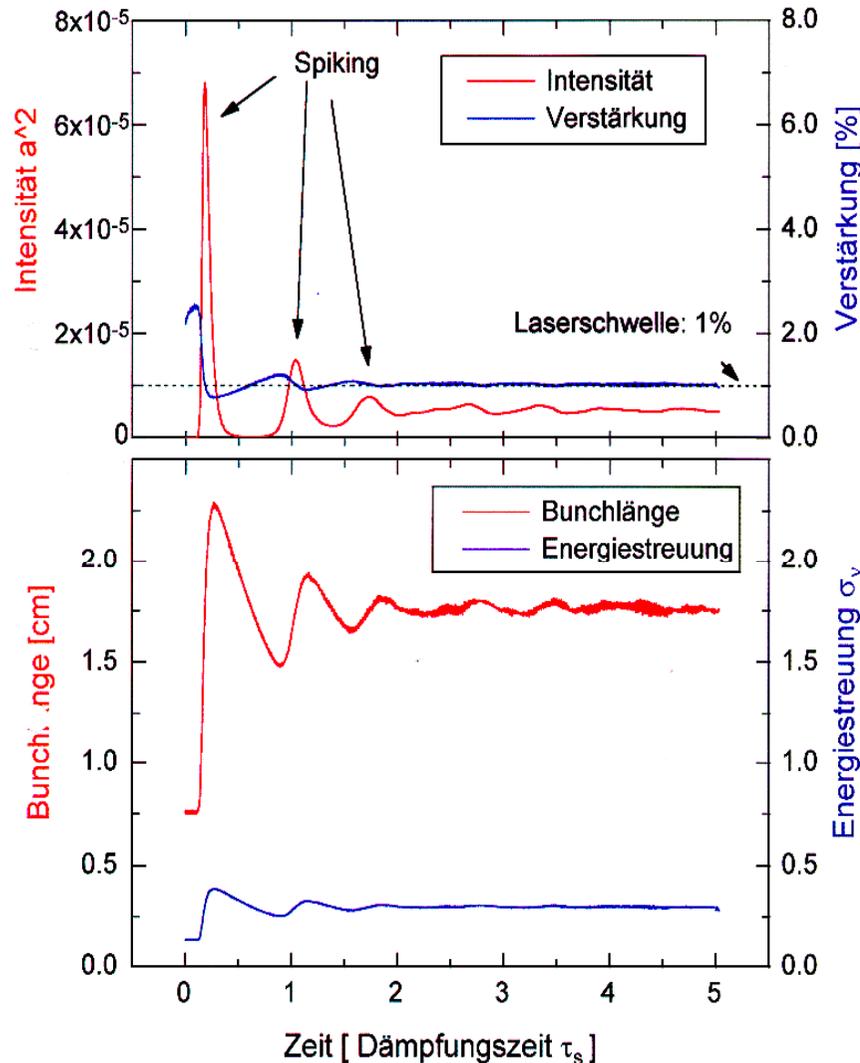


Storage ring operation*	1.0	GeV
Tunability range	350 – 190	nm
	3.5 – 6.5	eV
Average power	≥ 1	W
Pulse length (FWHM)	~ 5	ps
Peak power	≥ 40	kW
Pulse energy	≥ 0.2	mJ
Photon flux**	$\geq 10^{18}$	photons/s
Polarization	circular (linear may also be possible)	
Repetition rate	4.6	MHz
Synchronization with synchrotron radiation	1:1	

* 4-bunch operation, ** within the laser bandwidth



Warum geht es nicht richtig mit Speicherringen ☹



Ein FEL bewirkt in erster Line eine Energiemodulation
 \Rightarrow Aufweitung der Energiebreite
 \Rightarrow FEL Prozess wird gebremst

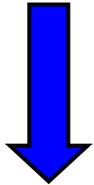
Synchrotronstrahlung bewirkt Dämpfung
 \Rightarrow Energiebreite wird wieder zusammengesoben

Die Leistung eines SR FEL ergibt sich als Gleichgewicht von
 \Rightarrow FEL getriebener Energieaufweitung
 \Rightarrow Dämpfung aus Synchrotronstrahlung

Renieri Limit

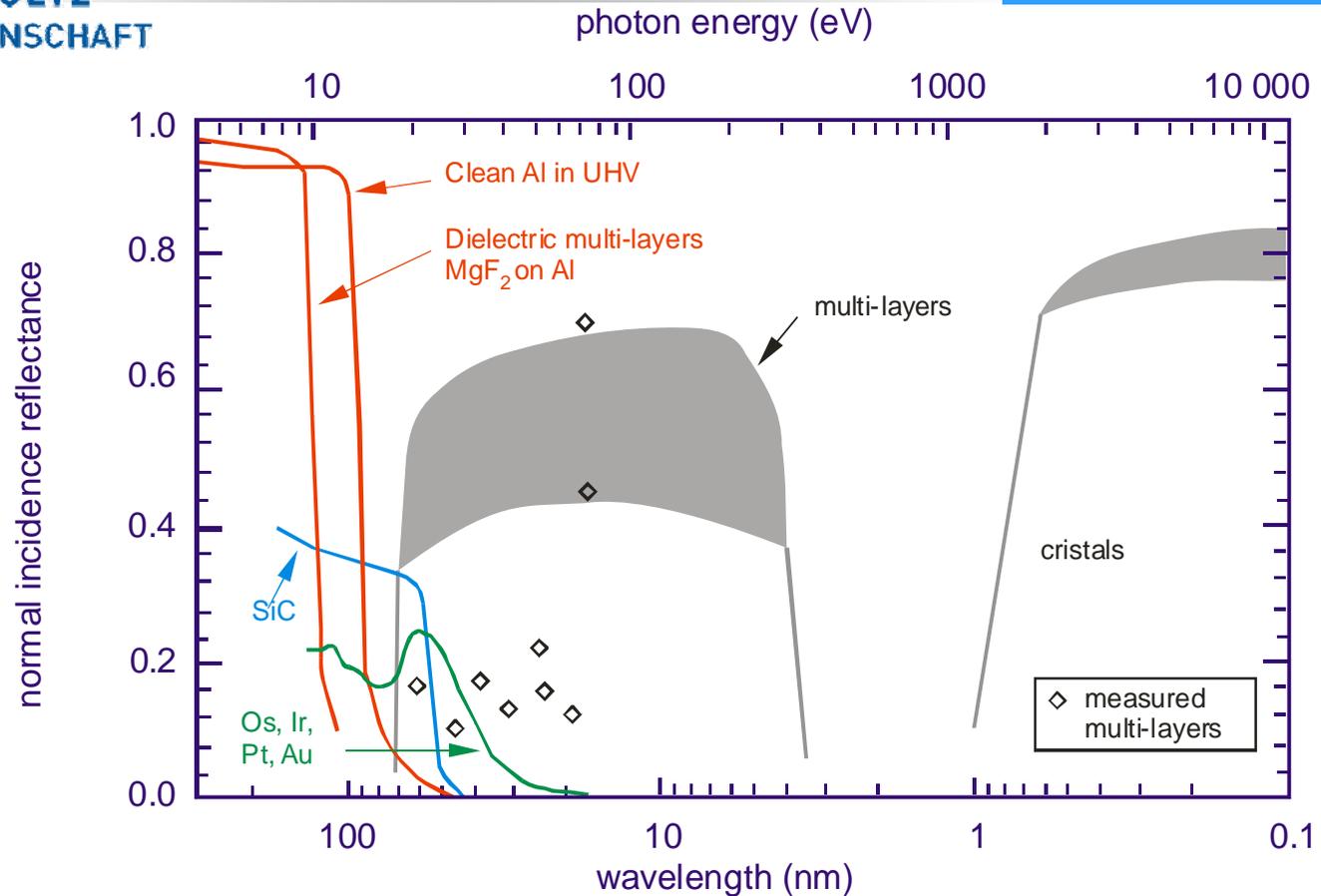


Spiegelproblematik



Wir brauchen:

- etwas ohne Spiegel
- etwas ohne einen Input Laser

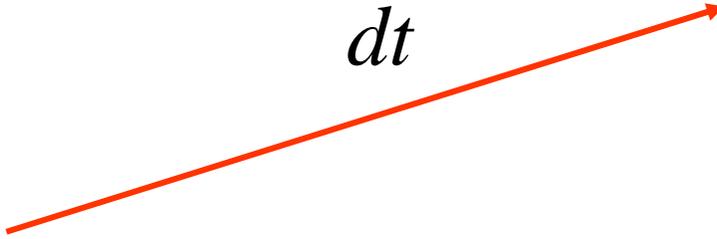


D.T. Attwood et al.

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



Lösung: SASE

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


- Undulatoren erzeugen spontane Strahlung (Startfeld, „Seed“)
- Danach, mache den Undulator lang genug, dass diese Strahlung reicht, damit sich der Laser selbst aus dem Dreck zieht.



- Strahlqualität; d.h. Elektronendichte
 - Spitzenstrom (O(kA))
 - Extrem kurze Bunche (O(100fs))
 - Strahlquerschnitt und –divergenz (Emittanz)

} Bunch Kompression

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

- Ankunftszeit (Pump & Probe)

} LLRF

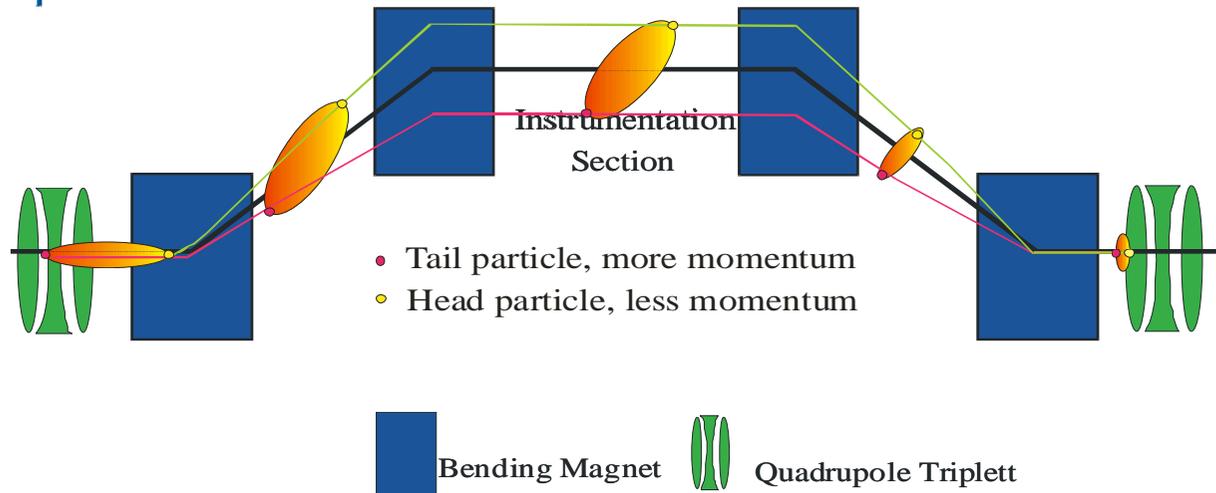
- Strahlage (FEL-Prozess, Laserstrahltransport)
 - Überlapp zwischen Licht und Elektronen über viele Meter

BPMs {

- Winkelgenauigkeit/Stabilität => Frösche treffen!!



Bunch Kompression



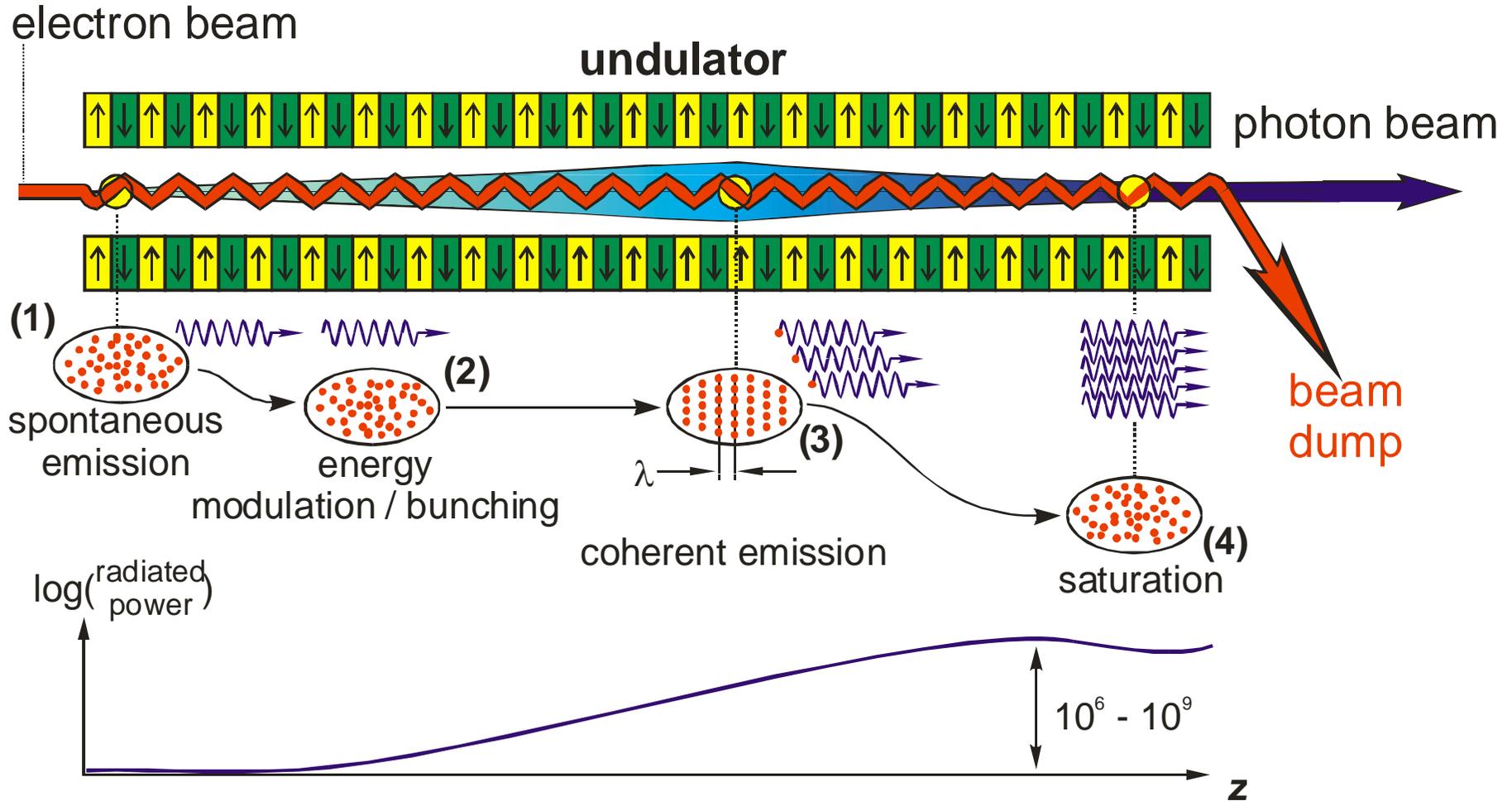
- Korrelierte Energiemodulation durch „Offcrest“ Beschleunigung (ACC1,23)
- Die Energie im Bunch steigt vom Kopf zum Schwanz an.
- In der Schikane fliegen nieder energetische Teilchen weiter aussen, die mit mehr Energie weiter innen.
- Die Innenbahn ist kürzer => die Teilchen mit mehr Energie holen auf.
- Der Bunch wird zusammengeschoben.



Self Amplified Spontaneous Emission



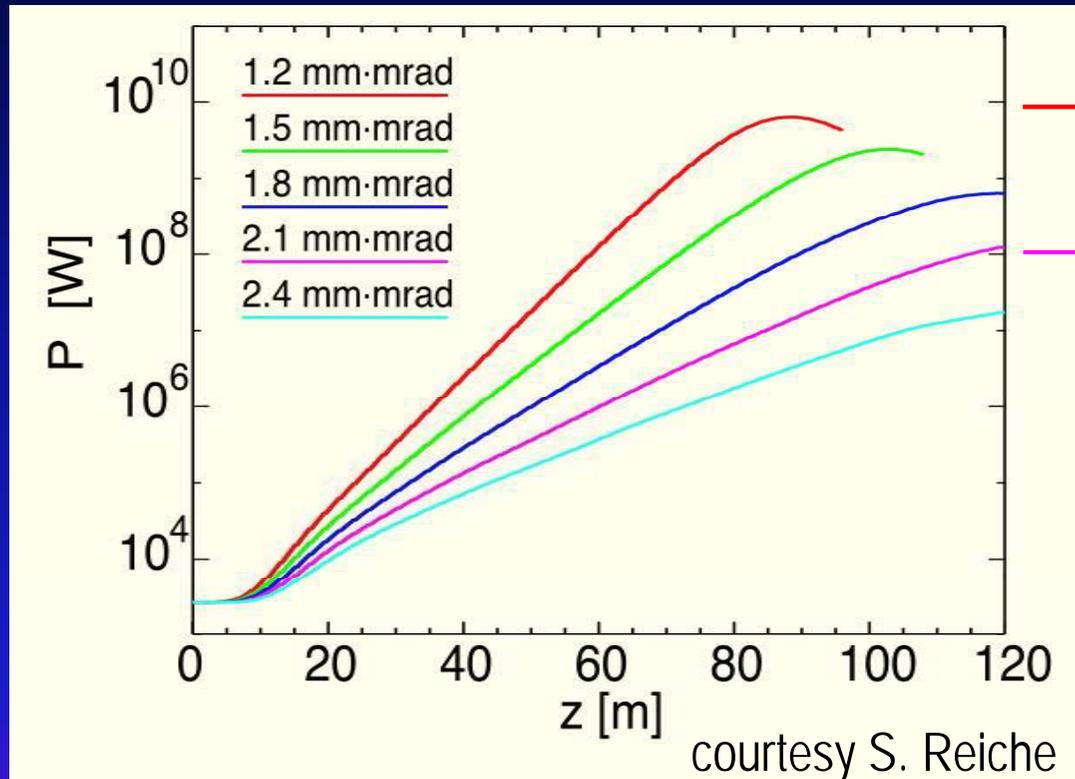
FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg



Reminder: Movie Zeigen!

Comment (from J. Hastings LCLS)

For *LCLS*, slice emittance $> 1.8 \mu\text{m}$ will not saturate



$$\varepsilon_N = 1.2 \mu\text{m}$$

$$P = P_0$$

$$\varepsilon_N = 2.0 \mu\text{m}$$

$$P = P_0/100$$

Similar of course for
XFEL, VUV-FEL, ...

SASE FEL is not forgiving — instead of mild brightness loss, power nearly switches OFF

electron beam **must** meet brightness requirements²⁹



HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

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