

Grundlagen

- Röntgenquellen in der Forschung:



Röntgenröhre



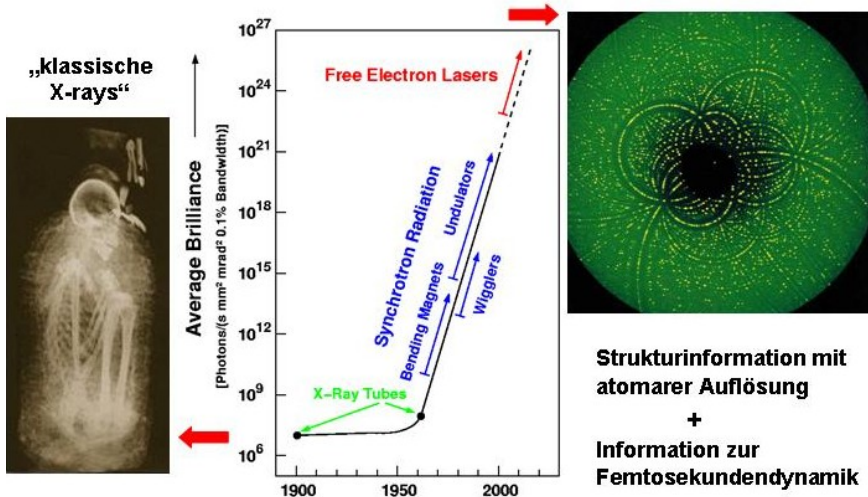
Synchrotron



Röntgen-FEL

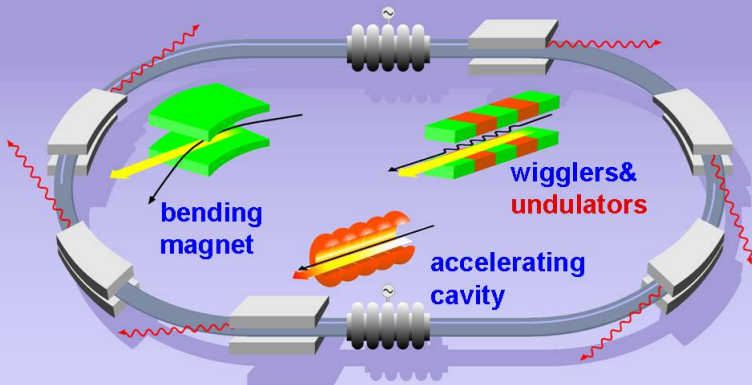
Grundlagen

- Brillanz von Röntgenquellen:



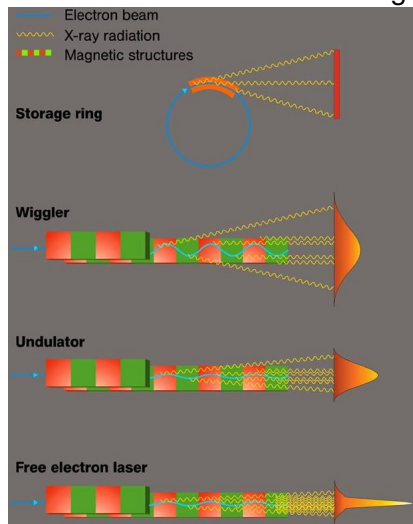
Grundlagen

- Komponenten eines Speicherings:



Grundlagen

Photonenfluss verschiedener Magnetstrukturen:



- **Ablenkmagnet**

$$\propto N_e$$

- **Wiggler**

$$\propto N_W \cdot N_e$$

- **Undulator**

$$\propto N_U^2 \cdot N_e$$

- **Freie-Elektronenlaser (FEL)**

$$\propto N_U^2 \cdot N_e^2$$

mit N_e : Anzahl der Elektronen im Elektronenpaket
 und N_W bzw. N_U : Anzahl der magnetischen Perioden

Grundlagen

- **Quanten-Laser**

Verstärkung durch stimulierte Emission von Elektronen, die an Atomen gebunden sind (Festkörper, flüssige Farbstoffe oder Gase)

- **FEL**

Verstärkungsmedium = "freie" (ungebundene Elektronen) aus einer Elektronenquelle, die auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt werden und beim Passieren einer periodischen magnetischen Multipolstruktur (Undulator) ein intensives Lichtfeld erzeugen

FEL-Konzept: John Madey (Doktorarbeit, Stanford 1970)

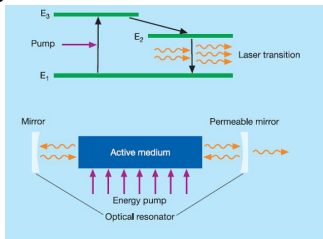
J. Appl. Phys. 42, 1906 (1971)

Experimentelle Realisierung:

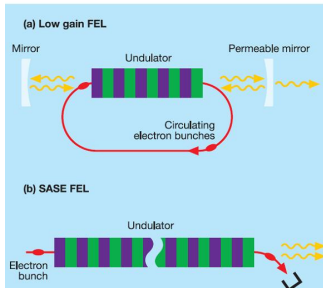
Phys. Rev. Lett. 38, 892 (1977)

Grundlagen

Vergleich von Quanten-Laser und FEL:



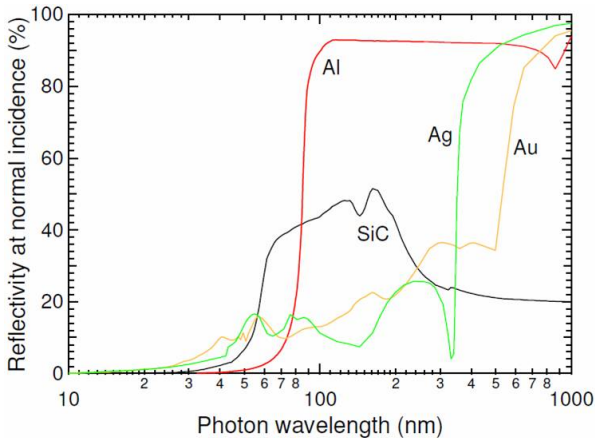
- quantisierte Energieniveaus
- Pumpenergie erzeugt Besetzungsinversion
- stimulierte Emission
- optischer Resonator



- Elektronenenergie ist nicht quantisiert
- "Pumpenergie" ist die kinetische Energie der Elektronen
- stimulierte Emission
- optischer Resonator oder SASE

Grundlagen

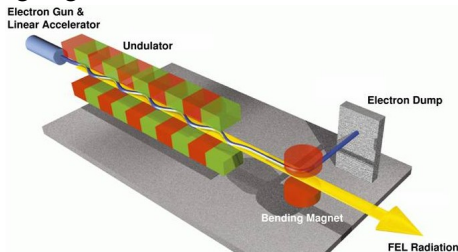
- Optische Resonatoren nicht anwendbar für Wellenlängen $\lambda < 100\text{nm}$ (geringe Reflektivität, mögliche Strahlenschäden)



- \Rightarrow *single pass* SASE FEL

Grundlagen

- Elektronenbewegung im Undulator



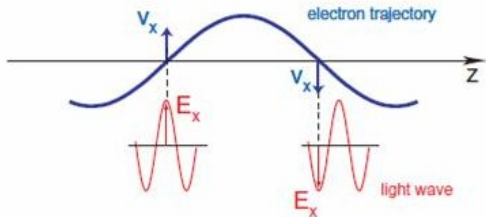
- Relativistische Energie des Elektrons: $W = E_{kin} + m_e c^2 = \gamma m_e c^2$
- Bewegungsgleichung: $\gamma m_e \dot{\vec{v}} = -e\vec{v} \times \vec{B}$
 - $\rightarrow x(t) \approx \frac{eB_0}{\gamma m_e \beta c k_u^2} \sin(k_u \beta c t)$
 - $\rightarrow x(z) \approx \frac{K}{\beta \gamma k_u} \sin(k_u z)$
- mit Undulator Parameter $K = \frac{eB_0 \lambda_u}{2\pi m_e c}$ und $B_y = -B_0 \sin(k_u z)$
- Elektronen bewegen sich auf sinusförmiger Trajektorie und emittieren Licht!**

Grundlagen

- Gibt es kontinuierlichen Energietransfer vom Elektronenstrahl ins Lichtfeld ?
- Änderung der Elektronenenergie pro Zeitintervall:

$$dW = \vec{v} \cdot \vec{F} dt = -e v_x(t) \cdot E_x(t) dt$$
- Mittlere Elektronengeschwindigkeit in z-Richtung:

$$\bar{v}_z = c \left(1 - \frac{1}{2\gamma^2} (1 + K^2/2) \right) < c$$
- Propagationszeit von Elektronen und Licht für halbe Undulatorperiode: $t_{el} = \lambda_u / (2\bar{v}_z)$ und $t_{li} = \lambda_u / (2c)$
- Kontinuierlicher Energietransfer für: $c(t_{el} - t_{li}) = \lambda_l / 2$



Grundlagen

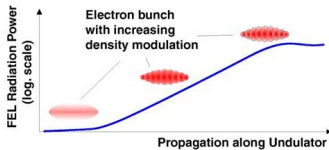
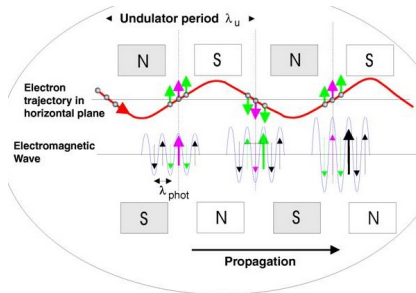
- Aus $c(t_{el} - t_{lj}) = \lambda_l/2$ folgt die emittierte Lichtwellenlänge in Vorwärtsrichtung:

$$\lambda_l = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

- **Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE)**
- FEL-Prozess startet mit der spontanen Undulatorstrahlung
- Bei gegebene Wellenlänge existiert für eine definierte Elektronenenergie ein resonanter Energietransfer
- "Regelung" der Wellenlänge über die Elektronenenergie oder Magnetfeldstärke
- Bemerkung: $c(t_{el} - t_{lj}) = 3\lambda_l/2, 5\lambda_l/2...$ ist auch möglich !
 \Rightarrow Erzeugung ungerader harmonischer auf der z-Achse
 $(\lambda_l/3, \lambda_l/5)$

Grundlagen

Warum emittieren alle Elektronen eines Paketes kohärent obwohl typischerweise $L_{bunch} \gg \lambda_l$?



- Elektronen in Phase mit der Lichtwelle werden abgebremst (emittieren Photonen)
- Beschleunigung der Elektronen mit entgegengesetzter Phase (absorbieren Photonen)
- → unterschiedliche Trajektorien im Undulator (s. Lorentzkraft)
- → Energie- bzw. Dichtemodulation im Elektronenpaket (*Microbunching*)
- **konstruktive Interferenz aller Punktladungen !!** $P \propto N_U^2 \cdot N_e^2$