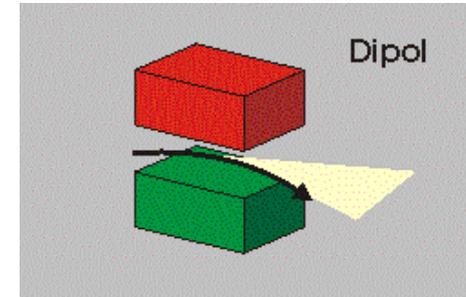


## Noch 2.20 Quellen für Vakuum-Ultraviolett- und Röntgenstrahlung

### Eigenschaften von Synchrotronstrahlung

Welche Eigenschaften von Interesse sind, hängt von der Anwendung ab z.B.

- Intensität (Leistung, Pulsenergie, Photonenzahl etc)
- Winkelverteilung
- spektrale Verteilung
- weitere Eigenschaften wie Pulsdauer, Polarisation, etc.



#### a) Strahlung aus Dipolmagneten

Energieverlust eines Elektrons der Energie  $E$  bei einem Umlauf mit konstantem Biegewinkel  $R$

$$\Delta E_1 [\text{keV}] = 88,5 \frac{E^4 [\text{GeV}^4]}{R [\text{m}]}$$

Leistung bei gegebenem Strahlstrom  $I$ :

$$P = n_e \frac{\Delta E_1}{T} = \frac{I \cdot T}{e} \frac{\Delta E_1}{T} = I \cdot \frac{\Delta E_1}{e} \rightarrow P [\text{W}] = \Delta E_1 [\text{eV}] \cdot I [\text{A}]$$

#### Winkelverteilung

- horizontal: ein Fächer, dessen Winkel dem Biegewinkel des Magneten entspricht (typisch 5–20 Grad)
- vertikal: typischer Wert der Standardabweichung (hängt im Detail von der Wellenlänge ab)

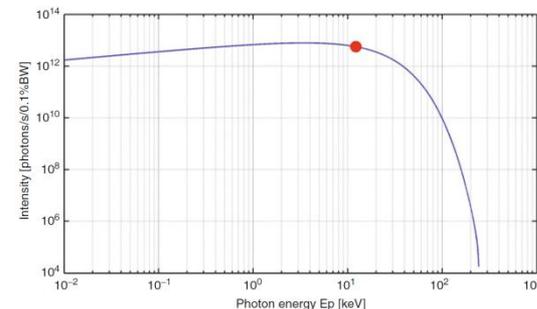
$$\sigma_\theta \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{m_e \cdot c^2}{E}$$

#### Spektrale Verteilung: breites Spektrum

(weil kein periodischer Vorgang) mit Maximum im keV-Bereich.

Die sog. "kritische Energie", die das Spektrum in zwei gleich große Leistungsbeiträge teilt, ist

$$E_{krit} \propto \frac{E^3}{R}$$



## Noch 2.20 Quellen für Vakuum-Ultraviolett- und Röntgenstrahlung

### b) Strahlung aus Wigglern und Undulatoren

Wiggler und Undulatoren sind Anordnungen von abwechselnd gepolten Dipolmagneten, in denen die Elektronen eine sinusförmige Bahn verfolgen. Der Abstand zwischen zwei gleichartigen Dipolen heißt Undulatorperiode. Der Unterschied zwischen Wiggler und Undulator ist etwas unscharf:

Ein typischer **Wiggler** hat ein hohes Magnetfeld, so dass die Strahlung der aufeinanderfolgende Bögen wenig überlappt. Damit unterscheidet sich ein Wiggler von Dipolmagneten nur in der Intensität  $\sim$  Zahl der Bögen.

Ein typischer **Undulator** hat ein niedriges Magnetfeld, so dass sich die Strahlung der flachen Bögen stark überlappt. Das elektrische Feld am Ort des Beobachters ist periodisch. Dadurch entsteht ein **Linienpektrum** mit der Grundwellenlänge

$$\lambda = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad \text{mit} \quad K = 93,4 \cdot \lambda_U [\text{m}] \cdot B_0 [\text{T}] \quad \Delta\lambda \approx \frac{1}{N_U}$$

und ungeradzahigen Harmonischen  $\lambda/3$ ,  $\lambda/5$  usw. auf der Undulatorachse. Bei Beobachtungswinkeln  $\neq 0$  werden auch die geradzahigen Harmonischen sichtbar und alle Linien sind rotverschoben. Die Linienbreite mit der Zahl der Undulatorperioden  $N_U$  ab

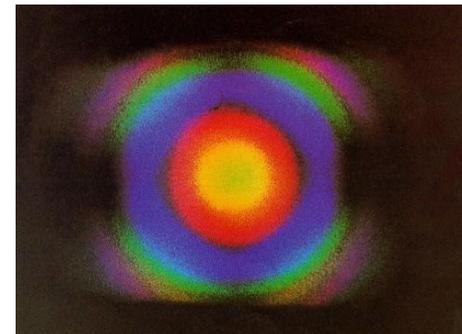
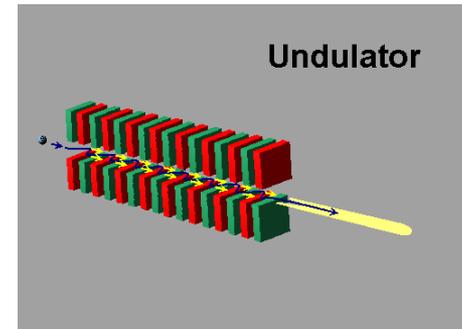
**Leistung** von Wigglern/Undulatoren bei gegebenem Strahlstrom  $I$ :

$$P[\text{W}] = 7.26 \cdot E^2 [\text{GeV}^2] \cdot I[\text{A}] \cdot K^2 \cdot N_U / \lambda [\text{cm}]$$

**Winkelverteilung** von Strahlung aus Undulatoren

- horizontal und vertikal

$$\sigma_\theta \approx \frac{1}{\sqrt{N_U} \gamma} \quad \rightarrow \quad \text{Brillanz} \propto N^2$$



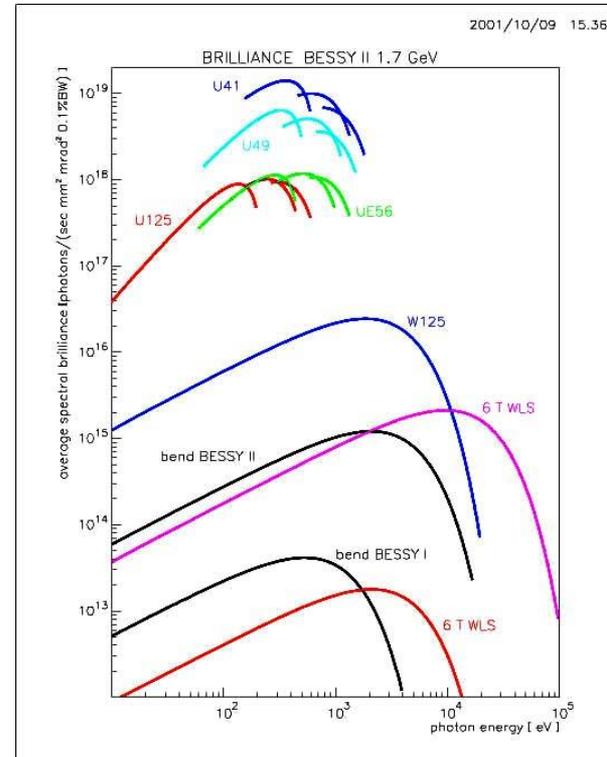
## Bauformen von Wigglern und Undulatoren

### Permanentmagnete

- Magnetfeld an der Oberfläche bis ca. 1,6 T, gekühlt auch höher)
- oft Hybridbauweise: Eisenpole mit Permanentmagneten dazwischen
- Magnetfeld auf der Strahlachse wird durch mechanische Abstandsänderung eingestellt

### Elektromagnete

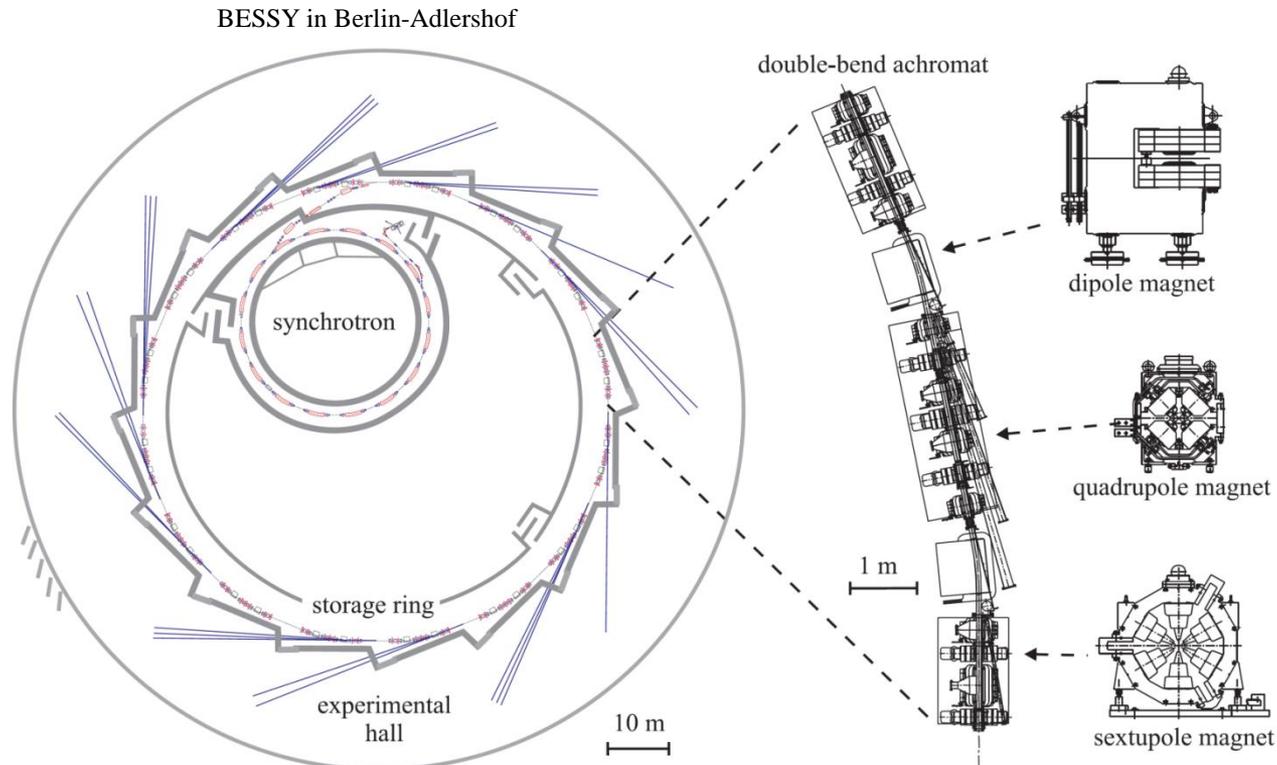
- Spulen mit Eisenjoch (an der Oberfläche bis ca. 1,8 T)
- supraleitende Magnete (bis 10 T)



Typische spektrale Verteilungen der Synchrotronstrahlung auf einer doppelt-logarithmischen Skala: Dipolmagnete (bend), supraleitende Dipole (WLS), Wiggler (W125) sowie die erste, dritte und fünfte Harmonische von Undulatoren (U41 etc).

## Typische Synchrotronstrahlungsquelle

- **Elektronenquelle, Vorbeschleuniger (Linearbeschleuniger), Hauptbeschleuniger (Synchrotron), Speicherring;**  
**Strahlenenergie: einige 100 MeV bis 8 GeV (SPRING8/Japan); Strahlstrom: einige 100 mA**
- **Speicherring: Umfang 10 m (Helios 2, Singapur) bis 2,3 km (PETRA III, Hamburg);**  
**Vakuumkammer: Edelstahl, Aluminium oder Kupfer; Ultrahochvakuum**
- Magnete: Dipole (Kurve), Quadrupole (Fokussierung), Sextupole (Fokussierung), kleine Dipole (Bahnkorrektur)**
- Hochfrequenz-Resonatoren: einige 10 bis 100 kW**
- Wiggler und Undulatoren: Permanentmagnete oder Elektromagnete (normal- oder supraleitend)**
- **Strahlauslassrohre ("beamlines") mit gekrümmten Spiegeln und Gitter- oder Kristall-Monochromatoren**

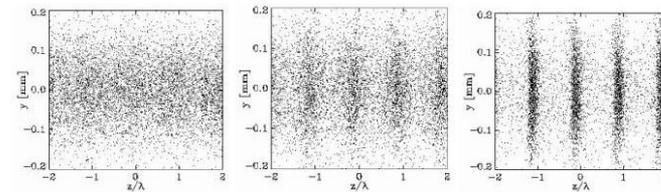
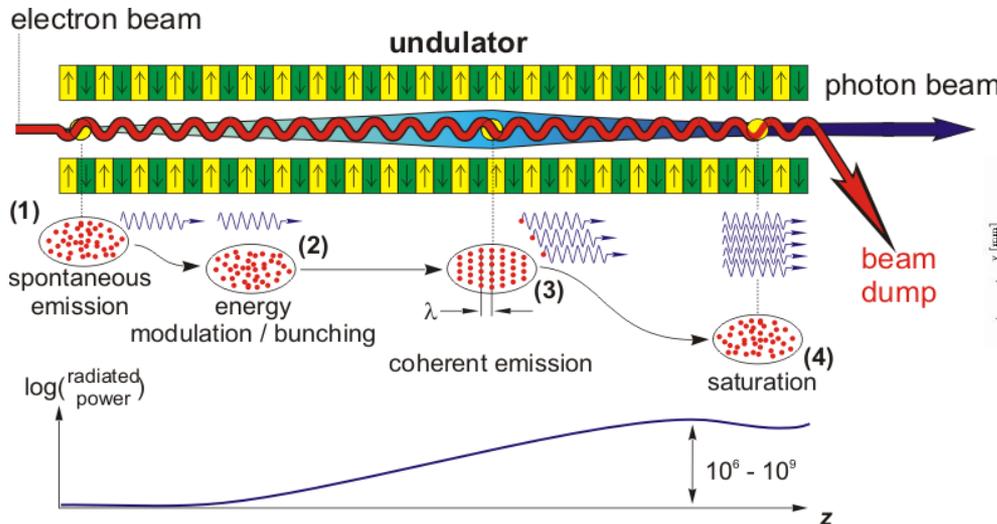


## Freie-Elektronen-Laser (FEL)

Neuartige Röntgenquelle mit extremer Spitzenbrillanz, bestehend aus Linearbeschleuniger und langem Undulator

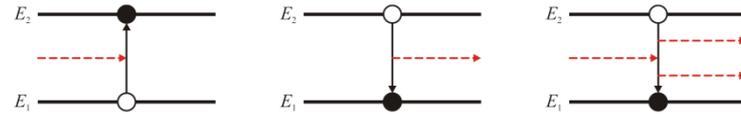
- Prinzip in den 1970er Jahren publiziert (John Madey, SLAC)
- erste FELs im Infrarotbereich
- FELs für kurze Wellenlängen: FLASH in Hamburg, FERMI@Elettra in Trieste/Italien
- erster Röntgen-FEL 2009 LCLS in Menlo Park/USA, 2010 SACLA in Hyogo/Japan
- weitere FELs in Bau, z.B. Europ. XFEL in Hamburg, SwissFEL in Villigen/Schweiz, PAL-FEL in Pohang/Korea
- sehr kurze Elektronenpakete, kleiner Strahlquerschnitt → hohe Elektronendichte ermöglicht FEL-Prozess
- FEL-Prozess verstärkt Licht und erzeugt kohärente Strahlung (extrem hohe Intensität ~ Elektronenzahl<sup>2</sup>): elektrisches Feld der Strahlung bewirkt in einem Undulator eine periodische Anordnung der Elektronen ("microbunching"), die zur kohärenten Abstrahlung führt

FEL nach dem SASE-Prinzip (self-amplified spontaneous emission), bei dem kein extern zugeführter Lichtpuls vom FEL verstärkt wird, sondern die Strahlung im ersten Teil des langen Undulators als Synchrotronstrahlung entsteht und auf die Elektronen zurückwirkt, so dass sich diese im Abstand der Wellenlänge anordnen und kohärent strahlen.



numerische Simulation des Microbunching-Prozesses. Der Abstand zwischen den Maxima der Elektronendichte beträgt eine Wellenlänge der FEL-Strahlung

## 2.21 Laser



Strahlungsquelle, die auf induzierter Emission basiert (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Erster Laser: T. Maiman 1960

Größter Laser: National Ignition Facility (LLNL/USA) 500 TW Spitzenleistung

Laserdioden: sub-mm Größe,  $\mu\text{W}$ - bis  $\text{W}$ -Bereich

**Beersches Absorptionsgesetz**  $n_{1,2}$ : Besetzungsdichten (hier ohne Gewichtungsfaktoren)

$$I(\nu, x) = I(\nu, 0) \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad \alpha = (n_1 - n_2) \cdot \sigma(\nu)$$

$$n_1 > n_2 \quad \alpha > 0$$

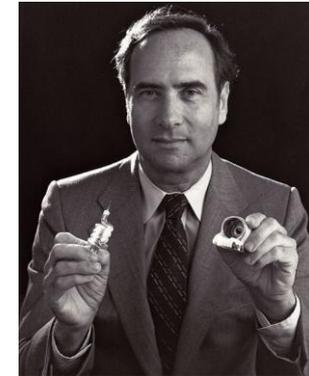
$$n_2 > n_1 \quad \alpha < 0 \quad \text{Inversion, Intensität wächst}$$

Eine **Energiequelle** (anderer Laser, Blitzlampe etc) bewirkt in einem **aktiven Medium** (abhängig vom Lasertyp) eine Inversion, d.h. ein Zustand höherer Energie hat eine höhere Besetzungsdichte  $n$  als ein Zustand niedriger Energie. Ein **optischer Resonator** (z.B. zwei parallele konkave Spiegel) der Länge  $L$  bewirkt, dass die Lichtwelle das aktive Medium wiederholt durchläuft. Verstärkung ("gain") für einen "Umlauf" (Strecke  $2 \cdot L$ )

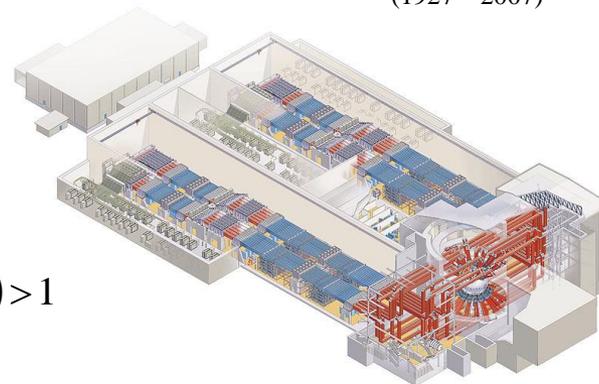
$$\frac{I(\nu, 2L)}{I(\nu, 0)} = \exp(-2\alpha(\nu) \cdot L - \gamma) = \exp(-2\{n_1 - n_2\} \cdot \sigma(\nu) \cdot L - \gamma) > 1$$

Hier wird vereinfachend angenommen, dass die Länge des Medium  $L$  dieselbe ist wie die des Resonators. Die Verluste durch die begrenzte Reflektivität der Spiegel, Streuung, Beugung etc. werden mit  $\gamma$  zusammengefasst. Damit ergibt sich die **Schwellwertbedingung** für die Inversion und das Funktionieren eines Laser

$$\Delta n = n_2 - n_1 \geq \frac{\gamma(\nu)}{2\sigma(\nu) \cdot L}$$



Theodore Maiman (1927 – 2007)



Oberhalb der Schwellwertbedingung übersteigt die Verstärkung die Verluste und die Besetzung des oberen Energieniveaus nimmt zu. Dieser Zuwachs verlangsamt sich, weil das untere Energieniveau entvölkert wird und es entsteht ein Gleichgewicht, bei dem der Aufbau der Inversion durch die Energiequelle ("Pumpe") gerade den Abbau der Inversion durch die induzierte Emission kompensiert.

### Mehrniveau-Laser

Die Entstehung der Besetzungsinversion erfordert mindestens drei Energieniveaus, von denen eines eine lange Lebensdauer haben muss. Die Einstein-Koeffizienten für Absorption und stimulierte Emission sind gleich, so dass für ein 2-Niveau-System die Wahrscheinlichkeiten gleich sind, wenn 50% der Elektronen im oberen Niveau sind. Dazu kommt noch die spontane Emission, die die Besetzung des oberen Niveaus zusätzlich reduziert.

Wenn ein Teil der Elektronen jedoch nicht in den unteren Zustand, sondern in ein metastabiles Zwischenniveau übergeht, kann eine Inversion zwischen dem Zwischenzustand und dem unteren Niveau entstehen. Die Laser-Wellenlänge ist durch den Energieabstand zwischen diesen Niveaus gegeben. Bei den meisten Lasertypen sind mehr als 3 Niveaus beteiligt.

### Ratengleichung für 3 Niveaus

$$\dot{n}_3 = W_p \cdot n_1 - W_{31} \cdot n_3 - W_{32} \cdot n_3$$

$$\dot{n}_2 = W_{32} \cdot n_3 - W_{21} \cdot n_2$$

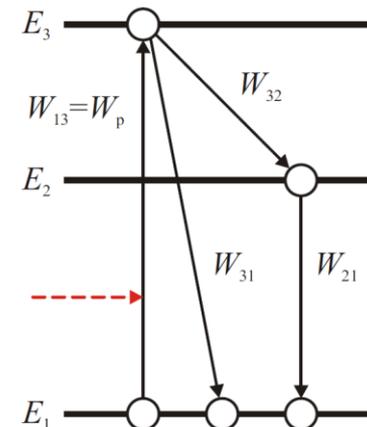
im Gleichgewicht sind die Änderungen = 0

$$\dot{n}_3 = 0 \quad \rightarrow \quad n_3 = \frac{W_p}{W_{31} + W_{32}} n_1$$

$$\dot{n}_2 = 0 \quad \rightarrow \quad n_3 = \frac{W_{21}}{W_{32}} n_2$$

gleichgesetzt und nach  $n_2/n_1$  aufgelöst

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{W_p \cdot W_{32}}{W_{21} \cdot (W_{31} + W_{32})} = \frac{W_p}{W_{21}} \left( \frac{1}{1 + W_{31}/W_{32}} \right) \approx \frac{W_p}{W_{21}} \left( 1 - \frac{W_{31}}{W_{32}} \right)$$



Die Inversion ist umso höher  
 - je langlebiger Zustand 2 ist  
 - je höher die Rate von 3 nach 2 ist