

GROSSGERÄTE

Brillante Blitze

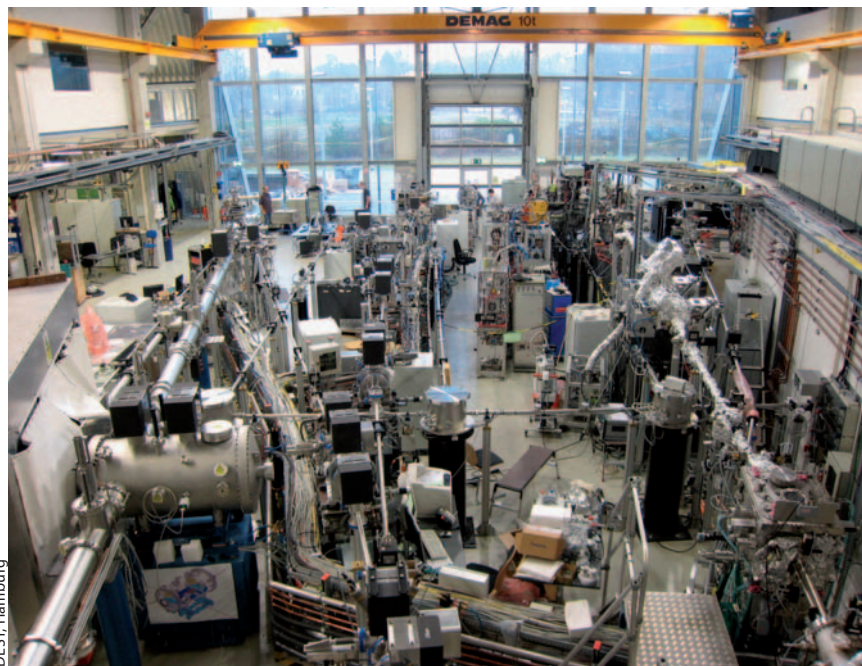
Der Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY erzeugt Laserstrahlung bislang unerreichter Brillanz.

Josef Feldhaus, Jörg Rossbach und Hans Weise

Der Freie-Elektronen-Laser FLASH liefert seit rund drei Jahren Laserstrahlen, die mit ihrer kleinen Wellenlänge im Nanometerbereich und ihrer ultrakurzen Pulsdauer eine neue Welt an Experimenten eröffnen. Nanoobjekte lassen sich damit ablichten oder auch chemische Reaktionen verfolgen. Die hohe Leistungsdichte auf der Probe erlaubt es, auch nicht-lineare Prozesse anzuregen und zu analysieren.

Lichtquellen höchster Intensität bei wohl definierten Wellenlängen stehen auf der Wunschliste zahlreicher Wissenschaftler. Über viele Jahre haben leistungsfähige Laser vor allem im sichtbaren Wellenlängenbereich, aber auch im Infraroten und im nahen Ultravioletten viele faszinierende Entdeckungen und Anwendungen ermöglicht. Dennoch blieb der Wunsch nach einem wesentlich größeren Spektralbereich, denn UV- und Röntgenstrahlung bei Wellenlängen bis unter 0,05 nm waren gefragt, um atomare Strukturen besser untersuchen und verstehen zu können. So wurden kreisförmige Beschleuniger als Synchrotronstrahlungsquellen zum Werkzeug der Wissenschaft. Dabei halten Magnetfelder im Speicherring hochenergetische Elektronen (oder auch Positronen) auf einer Kreisbahn. Da die Teilchen hierbei transversal beschleunigt werden, strahlen sie elektromagnetische Wellen ab. Wenn die Teilchenenergie hochrelativistisch ist, wird dieses „Licht“ nahezu ausschließlich in Vorwärtsrichtung abgestrahlt und ist äußerst intensiv. Ein charakteristischer Parameter dieser Synchrotronstrahlung ist die Brillanz, definiert als die Anzahl der erzeugten Photonen pro Zeitintervall in einem gewählten Wellenlängenintervall, pro Öffnungswinkel und pro Quellenfläche. Die Größe der Quelle und die Richtcharakteristik spielen also eine Rolle, weil sie bestimmen, wie gut sich die Strahlung auf einen möglichst kleinen Fleck fokussieren lässt.

Die neueste, dritte Generation der Synchrotronstrahlungsquellen verwendet Elektronenstrahlen von besonders hoher Qualität, d. h. kleinem Phasenraumvolumen (Emittanz), sowie eine große Anzahl sog. Undulatoren als eigentliche Strahlungsquellen. Undulatoren bestehen aus einer Anordnung von Magneten, die Teilchen periodisch ablenken und die Brillanz gegenüber einfacher Ablenkung um etwa fünf Größenordnungen verstärken (Infokasten). Bekannte Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation sind



DESY, Hamburg

die European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble (Frankreich), die Advanced Light Source (ALS) in Berkeley (USA), ELETTRA in Triest (Italien), BESSY II in Berlin, die Advanced Photon Source (APS) in Argonne (USA), SPring8 in Hyogo (Japan) und die Swiss Light Source (SLS) in Villigen (Schweiz).

Die Weiterentwicklung der Beschleunigertechnologie erlaubt es nun, zur vierten Generation von Synchrotronstrahlungsquellen überzugehen. Dabei handelt es sich um so genannte Freie-Elektronen-Laser (FEL), bei denen die Elektronen erstmals nicht

In der Experimentierhalle von FLASH kann der Laserstrahl mit Spiegeln zu verschiedenen Messplätzen „geschaltet“ werden.

KOMPAKT

- Die vierte Generation der Synchrotronstrahlungsquellen sind sog. Freie-Elektronen-Laser (FEL).
- In einem FEL durchfliegen die Elektronen einen Linearbeschleuniger und werden anschließend von Undulatoren periodisch abgelenkt.
- Die dabei entstehende Strahlung zeigt charakteristische Lasereigenschaften: Sie ist weitgehend kohärent, schmalbandig, und sie enthält viele Photonen pro optischer Mode.
- Vor allem die hohe Leistungs- bzw. Photonendichte der Strahlungspulse ermöglicht völlig neuartige Experimente. Nichtlineare Prozesse lassen sich anregen und hochaufgelöste Pump-Probe-Experimente durchführen.

Dr. Josef Feldhaus und Dr. Hans Weise, Deutsches Elektronen-Synchrotron, Notkestraße 85, 22607 Hamburg, Prof. Dr. Jörg Rossbach, DESY und Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg

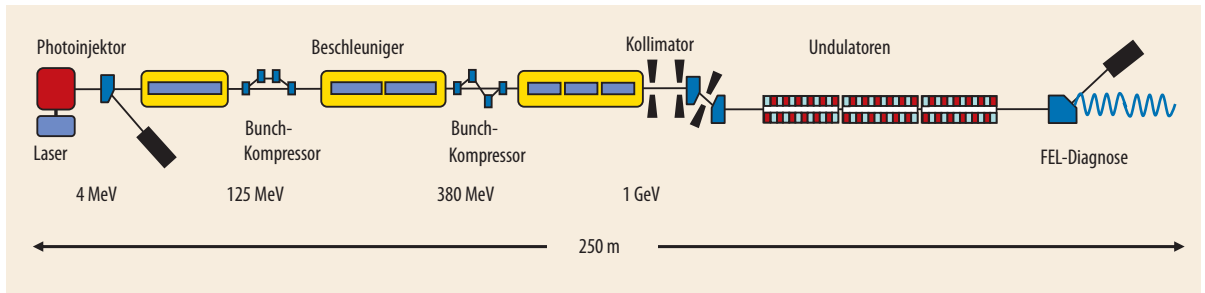


Abb. 1 Beim Freie-Elektronen-Laser FLASH beschleunigen sechs Module, die jeweils acht supraleitende Hochfrequenz-Resonatoren enthalten, den Elektronenstrahl auf Energien von bis zu 1 GeV.

Mehrere Ablenkmagnete (magnetische „Schikanen“) komprimieren die Elektronenpakete (Bunche) in longitudinaler Richtung. Ein Kollimatorsystem schützt den Undulator vor Strahlungsschäden

durch einen möglichen Strahlhalo. Am Ende wird der Laserstrahl mit Spiegeln auf verschiedene Strahlrohre verteilt, die zu den einzelnen Messplätzen führen.

mehr unabhängig voneinander abstrahlen, sondern kohärent. Dadurch erhöht sich die Strahlungsleistung um viele Größenordnungen. Auch die äußere Gestalt des verwendeten Beschleunigers ändert sich: Anstelle der Speicherringe kommen Linearbeschleuniger zum Einsatz, um die außergewöhnlichen Eigenschaften des Elektronenstrahls zu realisieren, die für einen FEL erforderlich sind.

Freie Elektronen wohlgeordnet

Freie-Elektronen-Laser haben in ihrer Entwicklung sehr vom Streben der Hochenergiephysik nach immer besseren Beschleunigern profitiert, insbesondere von den Entwicklungsarbeiten zu einem Linear Collider, sodass inzwischen FELs möglich sind, die Wellenlängen im Nanometerbereich erzeugen. Sie liefern sehr kurze Pulse im Bereich von rund 10 fs und erreichen gleichzeitig eine um viele Größenordnungen höhe-

re Brillanz mit Spitzenwerten von 10^{33} Photonen/(s mrad² mm² 0,1% Bandbreite). Mit der Bandbreite ist der betrachtete Energiebereich gemeint. Diese einzigartigen Strahlungseigenschaften ermöglichen völlig neue Experimente in der Physik, Chemie und Biologie: So lassen sich z. B. kleine Nanoobjekte mit einem einzelnen Strahlungspuls abbilden, chemische Reaktionen stroboskopisch aufnehmen, elektronische und magnetische Materialeigenschaften auf der Femtosekunden-Zeitskala untersuchen oder Proben in extrem niedriger Konzentration wie massenselektierte Metall-Cluster oder hochgeladene Ionen spektroskopieren.

Der Zweck eines FELs besteht darin, möglichst effizient einen Teil der im Elektronenstrahl gespeicherten Bewegungsenergie in quasi-monochromatische Strahlung zu transformieren. Der entscheidende „Trick“ ist dabei, Teile des Elektronenpakets auf ein Raumgebiet zu konzentrieren, das kürzer als die Wellenlänge ist („Bunching“). Die Elektronen strahlen in diesem Ge-

UNDULATORSTRAHLUNG

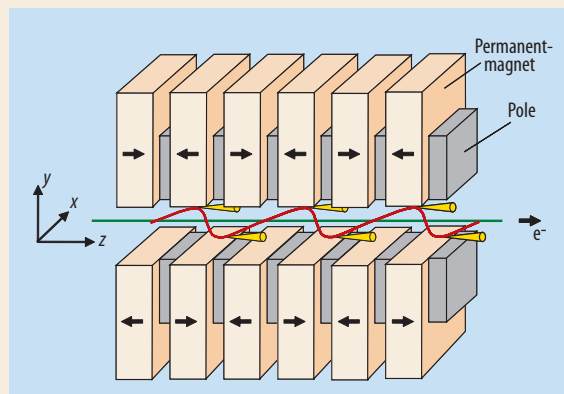
Undulatorstrahlung entsteht, wenn hochrelativistische Elektronen durch ein räumlich periodisches Magnetfeld fliegen. Während die Synchrotronstrahlung, die bei der transversalen Ablenkung in einem homogenen Magnetfeld entsteht, spektral sehr breit ist, ist Undulatorstrahlung nahezu monochromatisch und daher weitaus nützlicher. Ihre Wellenlänge lässt sich

durch folgende Überlegung ermitteln: In einem Koordinatensystem, das sich mit der mittleren Geschwindigkeit des Elektronenstrahls bewegt, erscheint den Elektronen die Undulatorperiode λ_u infolge der relativistischen Längenkontraktion verkürzt: $\lambda_u^* = \lambda_u/\gamma$, wobei γ die Elektronenenergie in Einheiten der Ruheenergie ist. In diesem System oszillieren Elektronen mit einer entspre-

chend höheren Frequenz $\omega^* = 2\pi c/\lambda_u^*$ und emittieren Strahlung wie ein oszillierender elektrischer Dipol, also mit der Wellenlänge λ_u^* . Wenn man diese Strahlung zurück ins Laborsystem Lorentz-transformiert, ergibt sich wegen des relativistischen Dopplereffektes eine Lichtwellenlänge $\lambda_l = \lambda_u^* \gamma (1 - \beta) \approx \lambda_u^*/2\gamma = \lambda_u/2\gamma^2$. So ist z. B. die Wellenlänge der Undulatorstrahlung von Elektronen mit einer Energie von 500 MeV etwa zwei Million mal kürzer als die Undulatorperiode. Eine genauere Behandlung muss den Einfluss der oszillierenden Transversalkomponente der Teilchengeschwindigkeit berücksichtigen. Daraus folgt schließlich die Formel, die auch für FELs gilt:

$$\lambda_l = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \text{ mit } K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi m_e c} \approx 1 \quad (1)$$

K ist der Undulatorparameter und B_0 die Amplitude des Undulatorfeldes. Durch Veränderung der Elektronenenergie lässt sich die Wellenlänge frei einstellen.



In einem Undulator lenken Magneten mit alternierender Magnetfeldorientierung die Elektronen auf eine sinusförmige Trajektorie ab. Ein typischer Wert für die Undulator-Periode, also für den Abstand λ_u zwischen zwei Polen gleicher Polarität, ist 25 mm.

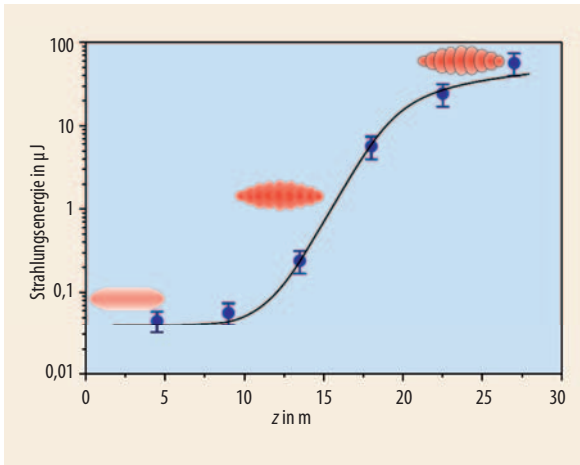


Abb. 2 Als Funktion der longitudinalen Position im Undulator steigt die Energie der Strahlungspulse bei FLASH exponentiell an [5]. Die Punkte mit Fehlerbalken wurden bei einer Wellenlänge von 13 nm gemessen (entsprechend 700 MeV Elektronenenergie). Die durchgezogene Linie gibt den berechneten Anstieg an. Außerdem wird die entstehende Dichtemodulation schematisch angedeutet.

biet kohärent mit einer Leistung proportional zum Quadrat ihrer Anzahl N ab, also ganz analog zu einer Punktladung bestehend aus N Elektronen.

Im Wesentlichen ist ein FEL ein schmalbandiger Verstärker, der alle Wellenlängen in der Nähe der durch Gleichung (1) im Infokasten beschriebenen Wellenlänge verstärkt. Um die Strahlungspulse besonders gut zu kontrollieren, wäre es eigentlich attraktiv, eine extern erzeugte elektromagnetische Welle als Anfangssignal zu verwenden. Dieses Verfahren ist bei längeren Wellenlängen auch schon realisiert worden, aber zurzeit sind geeignete, kontinuierlich durchstimmbare Strahlungsquellen für Wellenlängen bis hinunter zum Röntgenbereich nicht verfügbar. Deshalb kommt beim Freien-Elektronen-Laser FLASH (Free-electron LASER in Hamburg) [1] das wesentlich robustere SASE-Verfahren (Self-Amplified Spontaneous Emission) [2, 3] zur Anwendung. Dieses verwendet die im Undulator anfangs spontan erzeugte Undulatorstrahlung als Eingangssignal. Da dieser Verstärkungsprozess vom Rauschen startet, schwankt die Energie der FEL-Pulse bei FLASH statistisch. Diese Schwankungen lassen sich im Sättigungsbereich zwar reduzieren, allerdings kaum unter 20 %, solange die Pulsdauer im Femtosekundenbereich liegt, wie die meisten Nutzer es wünschen.

Die FEL-Strahlung hat alle charakteristischen Eigenschaften von Laserstrahlung: Sie ist transversal (weitgehend) kohärent, schmalbandig, und sie enthält sehr viele Photonen pro optischer Mode. Auch der Verstärkungsprozess erlaubt es, von einem Laser zu sprechen: Es gibt ein „aktives Lasermedium“, nämlich den Elektronenstrahl, und die „stimulierte Emission“ findet von höherer zu niedrigerer kinetischer Energie der Elektronen statt, unter Einfluss der bereits vorhandenen elektromagnetischen Welle.

FLASH im Überblick

Die FLASH-Anlage stellt Strahlung bei Wellenlängen bis minimal 6 nm und einer Pulsenergie von über 100 µJ bereit (Tab.) [4]. Elektronenpakete, sog. Bunche, werden dort in einem Photoinjektor erzeugt und innerhalb weniger Zentimeter auf etwa 4 MeV Energie beschleunigt (Abb. 1). Nur so lässt sich der große Einfluss der Raumladungskräfte innerhalb der Elektronenpakete (typische Ladungsdichte: 1 nC/mm³) verringern und eine kleine Emittanz erreichen. Der supraleitende Linearbeschleuniger ist bei Energien von 125 MeV und 380 MeV durch Bunch-Kompressoren unterbrochen, welche die Elektronenpakete longitudinal komprimieren und damit den Spitzenstrom im Bunch von etwa 50 – 80 A auf 1 – 2 kA erhöhen. Nach Erreichen der gewünschten und durch die angestrebte FEL-Wellenlänge bestimmten Endenergie wird der Elektronenstrahl in den rund 30 m langen Undulator geführt.

Dort lenkt das periodische Magnetfeld (etwa 0,5 T Feldamplitude, 3 cm Periodenlänge) einzelne Elektronenpakete ab. Durch diese transversale Beschleunigung senden die Elektronen zunächst inkohärent Undulatorstrahlung aus. Im weiteren Verlauf bewegen sich die Elektronen in dem Feld, welches durch die Überlagerung des Undulator-Magnetfeldes und der elektromagnetischen Welle entsteht. Dies führt innerhalb weniger Meter zu einer longitudinalen Dichtemodulation im Elektronenstrahl, und zwar mit einer Periodenlänge, die identisch mit der Wellenlänge der Undulatorstrahlung ist (Abb. 2). Die Ursache hierfür liegt darin, dass nur bei dieser Wellenlänge ein kontinuierlicher Energieübertrag zwischen Elektronenstrahl und elektromagnetischer Welle möglich ist. Die Elektronen in den entstehenden „Mikrobunchen“ beginnen, kohärent zu strahlen, weil sie jetzt auf der Skala der Wellenlänge quasi punktförmig angeordnet sind. Die Strahlungsleistung steigt entsprechend dramatisch an und beschleunigt die Ausbildung der Dichtemodulation. Schließlich wächst die Strahlungsleistung exponentiell, bis das Elektronenpaket vollständig durchmoduliert ist und Sättigung einsetzt. Dies geschieht meist bei einer Strahlungsleistung von einigen Gigawatt.

Typische Parameter von FLASH	
Beschleuniger	
Frequenz der Resonatoren	1,3 GHz
Dauer der Hochfrequenzpulse	0,8 ms
Maximale Wiederholrate	10 Hz
Maximale Teilchenenergie	300 – 1000 MeV
Elektronen	
Ladung der Teilchenpakete	1 nC
Zahl der Teilchenpakete pro HF-Puls	800
Emittanz $\cdot E/m_0c^2$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{rad}$
Photonen	
Wellenlänge (1. Harmonische)	50 – 6 nm
Typische Energie im Puls	10 – 100 µJ
Pulsdauer (FWHM)	8 – 50 fs
Brillanz	$6 \cdot 10^{29} \text{ Photonen/}$ $(\text{s} \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{mm}^2 \cdot 0,1 \% \text{ Bandbreite})$

Bei FLASH ist kein optischer Resonator erforderlich, weil sich die Strahlung innerhalb eines einzigen Durchgangs des Elektronenstrahls durch den Undulator um viele Größenordnungen verstärkt („Single Pass FEL“). Daher eignet sich dieses Funktionsprinzip besonders gut für Wellenlängen unter 100 nm, für die es keine guten Spiegel gibt. Die im Undulator entstehende FEL-Strahlung sowie die Elektronen verlassen schließlich gemeinsam den Undulator, werden jedoch kurz danach durch einen Ablenkmagneten voneinander getrennt. Die FEL-Strahlung gelangt dann über verschiedene Strahlrohre zu den einzelnen Messplätzen. Bevor wir uns den faszinierenden Experimenten widmen, die sich mit dieser neuartigen Strahlung durchführen lassen, wollen wir zunächst noch einen genaueren Blick auf die einzelnen Komponenten von FLASH werfen.

Beschleunigte Elektronenbunche

Ein FEL verlangt die Beschleunigung von Elektronenbunchen mit hoher Ladungsdichte und kleiner Emitanz. Eine Photokathode, die in einem kurzen, ein-einhalbzelligen Beschleunigungsresonator installiert ist, erlaubt es, solche Bunche zu erzeugen. Dabei lässt sich mittels eines UV-Laserpulses (262 nm) von einigen μJ Energie ohne weiteres eine Bunchladung von 1 nC erreichen. Die verwendeten Laserpulse, die eine Dauer von rund 5 ps und eine Wiederholfrequenz von bis zu 2,25 MHz haben, erzeugt ein speziell vom Max-Born-Institut in Berlin entwickelter Laser. Aus den Laserpulsen werden Pulszüge mit einer Dauer von bis zu 800 μs gebildet. Für die weitere Beschleunigung der Bunche ist der Laser mit der Hochfrequenz des Linearbeschleunigers synchronisiert.

Die im Photoinjektor erzeugten Bunche werden in einen supraleitenden Linearbeschleuniger eingeschossen, der aus sechs Modulen mit jeweils acht supraleitenden Beschleunigungsresonatoren (Abb. 3) besteht. Diese Strukturen aus hochreinem Niob wurden ursprünglich für das TESLA-Projekt entwickelt und sind auch die Grundlage für den Internationalen Linear Collider. Heute stehen sie u. a. für Freie-Elektronen-Laser wie FLASH oder den im Bau befindlichen XFEL

[6] zur Verfügung. Die supraleitenden Strukturen erlauben es, lange Pulszüge zu beschleunigen, da ihr Hochfrequenz (HF)-Oberflächenwiderstand verglichen mit herkömmlichen Kupferresonatoren um viele Größenordnungen niedriger ist. Allerdings hat auch ein Supraleiter keinen unendlich kleinen HF-Widerstand. Das im Resonator oszillierende hochfrequente Magnetfeld (Abb. 3) dringt bis zu 50 nm in den Supraleiter ein und regt die nicht zu Cooper-Paaren gebundenen Elektronen zu Schwingungen an. Dies führt zu ohmschen Verlusten, also zur Erzeugung von Wärme, die durch die Resonatorwand hindurch an das umgebende Helium-Bad abzuführen ist. Nach der von Bardeen, Cooper und Schrieffer entwickelten Theorie der Supraleitung wächst der HF-Widerstand quadratisch mit der Frequenz und hängt exponentiell von der Temperatur ab. TESLA-Strukturen werden bei 1,3 GHz betrieben und erreichen eine unbelastete Resonatorgüte von $Q_0 > 10^{10}$ bei einer Betriebstemperatur von 2 K. Aus dem kritischen Feld von $B_c \approx 200$ mT lässt sich bei bekannter Feldverteilung eine maximale Beschleunigungsfeldstärke von $E_{acc} \approx 45$ MV/m berechnen (gemittelt über die Länge des Resonators). Dies in der Praxis zu erreichen, war das Ziel der TESLA-Entwicklung. Eine geeignete Oberflächenpräparation sowie die in der Halbleiterindustrie üblichen Reinraumtechniken erlauben es heute, die Beschleunigungsstrukturen zuverlässig herzustellen und sie bei bis zu 30 MV/m sicher zu betreiben.

Elektronen auf der Überholspur

Zur longitudinalen Kompression des beschleunigten Elektronenstrahls wäre es am naheliegendsten, den Elektronen im Bunch eine longitudinale Modulation der Geschwindigkeitsverteilung aufzuprägen und, ähnlich wie beim Klystron, die unterschiedlichen Laufzeiten auszunutzen. Da die Kompression jedoch bei ultrarelativistischen Energien geschieht, sind dieser Methode enge Grenzen gesetzt. Bei FLASH wird deshalb die Impulsabhängigkeit der longitudinalen Bewegung dadurch verstärkt, dass die Teilchen einen Umweg, eine sog. magnetische Schikane, durchlaufen

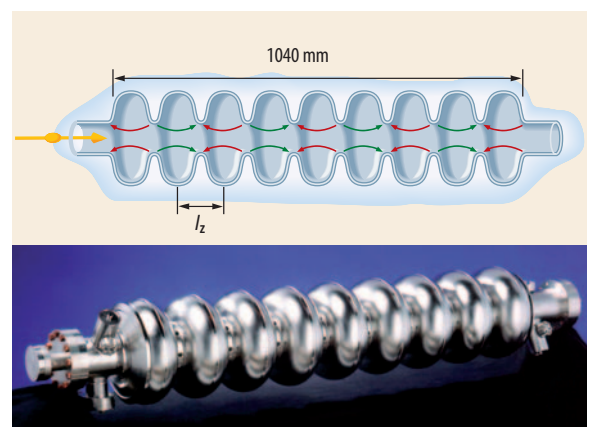
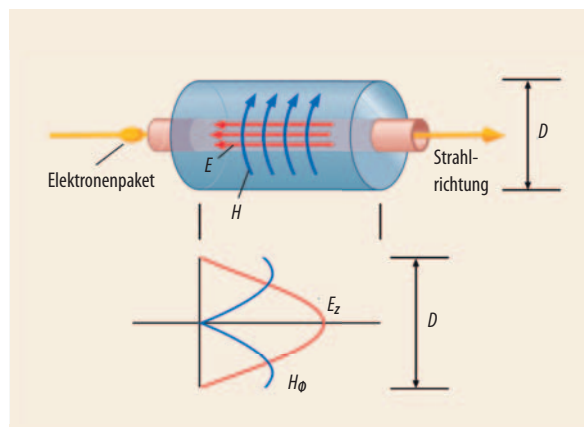


Abb. 3 Ein zylindrischer Hochfrequenzresonator dient zur Beschleunigung der Elektronen (links). Von den vielen Schwingungsmoden, die ein solcher

Resonator zulässt, wird die sog. Pi-Mode mit starkem longitudinalen elektrischen Feld auf der Achse ausgewählt und auf ihrer Resonanzfrequenz angeregt.

Rechts: Längsschnitt und Foto eines neunzelligen supraleitenden Beschleunigungsresonators, wie er u. a. bei FLASH und beim XFEL verwendet wird.

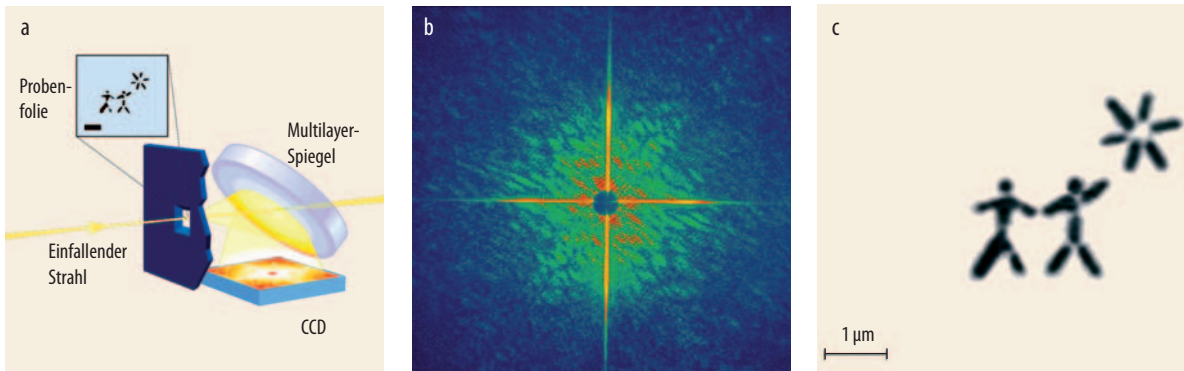


Abb. 4 Zur Aufnahme der Beugungsbilder durchdringt der fokussierte FEL-Strahl die Probenfolie (a). Ein Multilayer-Spiegel lenkt die gebeugte Strahlung auf eine CCD-Kamera ab, während der

direkte Strahl durch ein zentrales Loch im Spiegel austritt. Aus dem Beugungsbild (b) – aufgenommen mit einem einzelnen FEL-Puls mit 30 nm Wellenlänge – lässt sich mittels iterativer Algorithmen

das Originalobjekt rekonstruieren (c). Das rekonstruierte Bild zeigt dabei keine Anzeichen für Strahlungsschäden.

müssen. Zunächst wird die Energie innerhalb eines Bunches so moduliert, dass die vorne fliegenden Elektronen weniger Energie hinzugewinnen und die am Bunch-Ende fliegenden Elektronen die höchste Energie haben. Dies geschieht dadurch, dass das Teilchenpaket geringfügig vor dem Maximum der Beschleunigungswelle injiziert wird. In der Schikane, die aus mehreren Ablenkmagneten besteht, wird der Strahl parallel versetzt und wieder zurückgeführt. Die niederenergetischen Elektronen legen dadurch einen längeren Weg zurück, sodass die am Ende fliegenden Elektronen sie in der Schikane überholen. Diesem Idealfall wirken zwei Effekte entgegen: Da der Bunch dem zeitlichen Cosinus-Verlauf des Beschleunigungsfeldes unterliegt, ergibt sich ein nicht-linearer Term in der Energiemodulation. Außerdem führt die kurze Bunchdauer von rund 1 ps dazu, dass innerhalb der Schikane kohärent Synchrotronstrahlung ausgesendet wird. Daher sind nach der Kompression rund 10 bis 20 % der gesamten Ladung in den vorderen 100 fs konzentriert. Nur dieser Teil ist für den FEL-Prozess nutzbar.

Je kürzer, desto besser

Historisch gesehen war die kurze Bunchlänge zunächst nur eine unvermeidliche Folge der longitudinalen Kompression, die nötig ist, um den hohen Spitzenstrom zu realisieren. Die wissenschaftlichen Nutzer waren jedoch höchst erfreut darüber, dass die FEL-Strahlung von einem nur 10 μm kurzen Bunch erzeugt wird. Der Strahlungspuls ist dann mindestens genauso kurz und erlaubt somit zeitaufgelöste Experimente im Femtosekunden-Bereich. Für die Beschleuniger-Experten ergab sich die Herausforderung, eine Elektronenstrahl-Diagnostik zu entwickeln, welche die Ladungsverteilung im Bunch auf wenige Mikrometer genau messen und kontrollieren kann. Darüber hinaus führen die hohe Ladungsdichte und die Kürze der Bunches zu Effekten, die in der Beschleunigerphysik bislang eine eher untergeordnete Rolle gespielt haben. Für Wellenlängen, die vergleichbar oder lang gegenüber der Bunchlänge sind, strahlen die Elektronen ihre Synchrotronstrahlung wie eine einzelne Makroladung ab (Coherent Synchrotron Radiation, CSR), wenn sie

einen Ablenkmagneten passieren. Die Strahlungsleistung ist dann um viele Größenordnungen intensiver als die inkohärente Abstrahlung bei kürzeren Wellenlängen. Bei herkömmlichen Beschleunigern ist dieser Effekt dadurch unterdrückt, dass der Durchmesser der metallischen Vakuumkammer etwa so groß wie die Bunchlänge ist. Bei FLASH hingegen wirken die hohen Feldstärken der CSR beträchtlich auf die Ladungsverteilung zurück, die bei der Auslegung des gesamten Beschleunigers zu berücksichtigen ist. Der Vergleich von Messungen mit Modellrechnungen zeigt, dass diese komplizierten Effekte inzwischen gut verstanden sind.

Experimentelles Neuland

FLASH ist seit Anfang 2005 rund um die Uhr in Betrieb, abgesehen von einer jährlichen Betriebsunterbrechung von etwa vier Wochen für regelmäßige Wartungsarbeiten. Hinzu kam eine dreimonatige Unterbrechung von April bis Juli 2007, die für Umbaumaßnahmen notwendig war, um die Sollenergie von 1 GeV zu erreichen. Damit lassen sich nun über die Elektronenenergie des Beschleunigers beliebige Wellenlängen zwischen 6,5 nm und mehr als 40 nm einstellen. Ein Wellenlängenwechsel dauert wenige Stunden. Seit August 2005 wird etwa die Hälfte der Betriebszeit an Wissenschaftler aus aller Welt für Experimente mit dieser neuartigen Strahlung vergeben; die andere Hälfte ist erforderlich, um die Anlage laufend zu verbessern. In der Experimentierhalle stehen fünf Messplätze zur Verfügung, zu denen der Strahl durch einfaches Verschieben von ein oder zwei Planspiegeln gelangen kann. Drei Messplätze nutzen den direkten FEL-Strahl, den Spiegel auf einen Durchmesser von rund 100 μm oder 20 μm am Ort der Probe fokussieren. Zwei Messplätze befinden sich hinter einem hochauflösenden Monochromator, einer von ihnen wird zurzeit mit einem zweistufigen Spektrometer ausgerüstet, um die spektrale Verteilung inelastisch gestreuter Photonen hochaufgelöst zu messen. Alle Experimente lassen sich mit einem optischen Femtosekunden-Laser kombinieren, der mit den FEL-Pulsen synchronisiert

ist. Da der SASE-Prozess stochastischer Natur ist, misst eine spezielle, „minimal-invasive“ Diagnostik ständig die wesentlichen Kenngrößen der Strahlung, nämlich die Pulsenergie, die spektrale Verteilung und den relativen zeitlichen Abstand zwischen FEL-Puls und optischem Laserpuls, und stellt diese den Experimenten zur Verfügung.

Nicht-linear angeregt

In den ersten zwei Jahren bearbeiteten rund 200 Wissenschaftler bei FLASH insgesamt 16 wissenschaftliche Projekte. Alle Experimente haben Neuland betreten, vor allem weil die Strahlungspulse eine Leistungs- bzw. Photonendichte auf der Probe erzeugen, die um viele Größenordnungen über den Werten anderer Strahlungsquellen liegt. Dadurch wird so viel Energie übertragen, dass in aller Regel auch nichtlineare Anregungsprozesse auftreten. Denn die Photoabsorptionsquerschnitte in diesem Spektralbereich liegen zwischen etwa 1 und 100 Mbarn ($1 \text{ Mbarn} = 10^{-22} \text{ m}^2$), und 10^{15} Photonen pro Puls fokussiert auf eine Fläche von $100 \mu\text{m}^2$ ergeben eine Photonendichte von 10^{23} m^{-2} . Jedes Atom in der Wechselwirkungszone wird also mindestens einfach ionisiert, sodass sich die Probe in ein dichtes, heißes Plasma verwandelt. Bei der Bestrahlung von Xenon-Atomen mit einer Wellenlänge von 13,5 nm in einem Fokus von wenigen Mikrometern Durchmesser wurden z. B. hochgeladene Ionen bis zu Xe^{+21} beobachtet [10]. Dazu müssen innerhalb der Pulsdauer von 10 fs mindestens 50 Photonen pro Atom absorbiert worden sein.

Eine wichtige Frage ist, ob man unter solchen extremen Bedingungen überhaupt noch etwas über das ursprüngliche Objekt lernen kann, ob sich also ein kleines Objekt mit einem einzelnen Strahlungspuls hochaufgelöst abbilden lässt. Der XFEL soll eines Tages dazu dienen, die Struktur großer Biomoleküle mit atomarer Auflösung aufzuklären. Erste Experimente in diese Richtung sind an FLASH erfolgreich durchgeführt worden.

Zunächst wurde ein künstliches Testobjekt, nämlich eine Mikrometer große, mit einem Ionenstrahl in ein

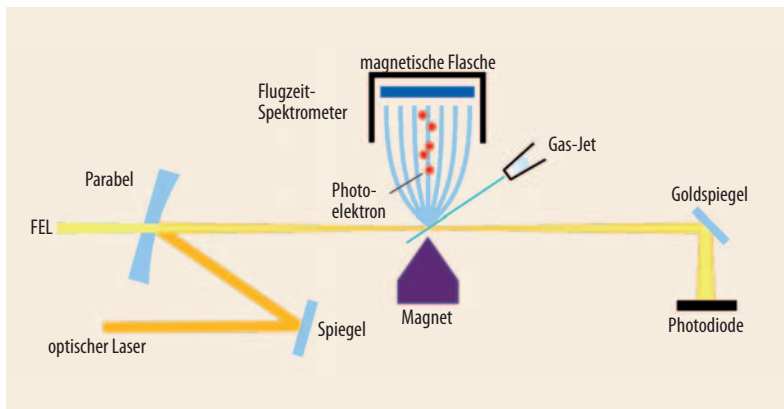


Abb. 5 Im Pump-Probe-Experiment bei FLASH werden Laser- und FEL-Puls in einem Edelgasstrahl räumlich und zeitlich überlagert. Das stark inhomogene

Magnetfeld der magnetischen Flasche lenkt am Probenort die Photoelektronen in ein Flugzeit-Spektrometer.

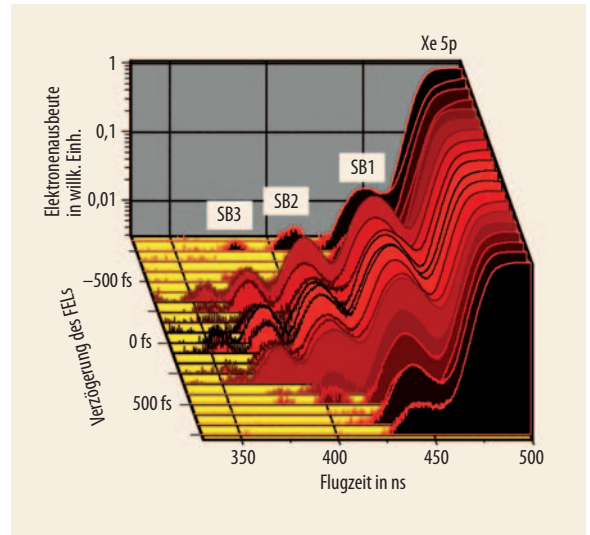


Abb. 6 Die Photoelektronenspektren von Xenon-Atomen für verschiedene Zeitabstände zwischen FEL-Puls und optischem Laserpuls zeigen ausgeprägte Seitenbänder, wenn beide Pulse überlagert sind. Die Wellenlänge der FEL-Strahlung betrug 13,8 nm bei einer Pulsdauer von 20 fs, die des optischen Lasers 800 nm bei 120 fs Pulsdauer.

dünnes Siliziumnitrid-Fenster geätzte Struktur, mit einem einzelnen Puls einer Wellenlänge von 30 nm beleuchtet und die gebeugte Strahlung mit einer CCD-Kamera aufgenommen (Abb. 4) [11]. Aus dem Beugungsbild lässt sich das Objekt mit einem iterativen Algorithmus rekonstruieren, ohne irgendwelche Annahmen über die Gestalt zu machen. Die Rekonstruktion ist praktisch beugungsbegrenzt und enthält keinen Hinweis auf Strahlungsschäden. Bei einer Wellenlänge von 30 nm überrascht dieses Ergebnis nicht, da sich selbst die schnellsten Ionen während der Pulsdauer nur einen Bruchteil der Wellenlänge weit bewegen können. Dies wird sich aber bei wesentlich kürzeren Wellenlängen und steigender Auflösung verändern. Zudem wird eine einzelne Aufnahme für eine gute Abbildung nicht mehr ausreichen, sodass es dann erforderlich ist, viele gleiche Objekte zu belichten. FLASH ist hervorragend geeignet, um diese Methoden zu entwickeln. Eines der nächsten Ziele ist es, biologische Objekte bei einer Wellenlänge von etwa 3 nm abzubilden, wo Wasser für Strahlung transparent ist. Dazu nutzt man die dritte Harmonische des FEL, die nur noch etwa 10^9 bis 10^{10} Photonen pro Puls enthält.

Angeregt messen

Ein anderes, spannendes Anwendungsgebiet der FEL-Strahlung ist die Untersuchung ultraschneller elektronischer, magnetischer oder chemischer Prozesse mithilfe von Pump-Probe-Experimenten. Bei diesen wird ein Prozess mit einem optischen Femtosekunden-Laserpuls gestartet und nach einer definierten Zeit mit dem FEL-Puls abgefragt oder umgekehrt. Die technischen Voraussetzungen dafür wurden in den letzten Jahren bei FLASH geschaffen [12].

Dazu ist es erforderlich, Laser- und FEL-Pulse räumlich und zeitlich in einem Edelgasstrahl zu überlagern (Abb. 5). Ein starkes inhomogenes Magnetfeld

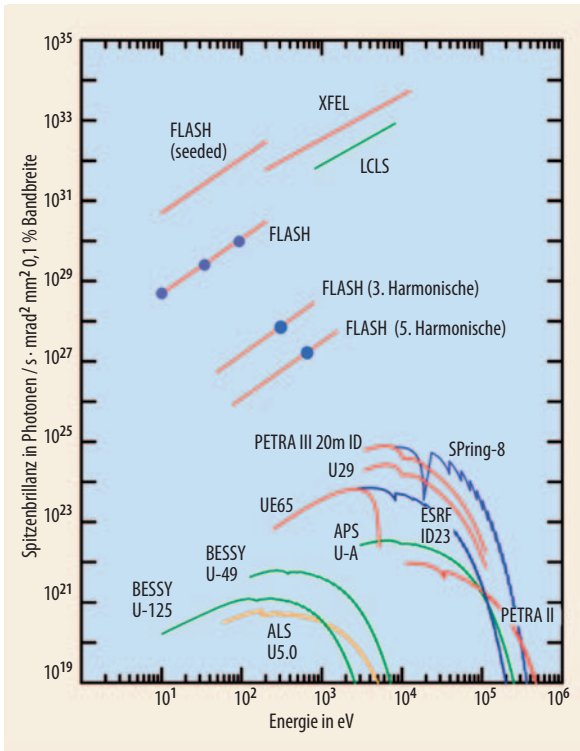


Abb. 7 Die Spitzen-Brillanz von SASE-FELs übersteigt die von Synchrotron-Strahlungsquellen aus der dritten Generation deutlich. Die blauen Punkte zeigen die experimentell bestimmte Brillanz bei FLASH. Die durchgezogenen Linien sind die errechneten Nominal-Werte.

am Ort der Probe lenkt die Photoelektronen in ein Flugzeit-Spektrometer. Abb. 6 zeigt eine Serie von Spektren der Xenon-5p-Photoelektronen, wobei das Zeitintervall zwischen dem optischen Laserpuls und dem FEL-Puls variiert wurde. Nur bei perfekter Überlagerung der beiden Pulse würde man durch gleichzeitige Absorption der Pulse Seitenbänder in den Spektren erwarten. Die Tatsache, dass Seitenbänder allerdings über einen Bereich von etwa ± 500 fs auftreten, deutet darauf hin, dass die Ankunftszeit der FEL-Pulse schwankt. Dies ist auf eine leichte Energieschwankung der Elektronen-Bunche zurückzuführen. Im Experiment lässt sich dennoch eine Auflösung von etwa 100 fs erreichen, indem der tatsächliche Zeitabstand der beiden Pulse elektro-optisch gemessen wird. Verbesserungen dieser Diagnostik, der Synchronisation aller Systeme und der Energiestabilität des Elektronenstrahls zusammen mit einem neuen optischen Laser, werden in Zukunft die zeitliche Auflösung weiter in Richtung 10 fs verbessern.

FLASH ist heute, XFEL morgen

Die Erfolge beim Bau, bei der Inbetriebnahme, aber vor allem während des Nutzerbetriebes von FLASH waren Grundlage für den europäischen Freie-Elektronen Laser XFEL, mit dessen Realisierung am 5. Juni 2007 begonnen wurde. Die Anlage wird ebenfalls am DESY in Hamburg aufgebaut und soll ab 2014 für Experimente bei Wellenlängen bis 0,1 nm zur

Verfügung stehen. Der Freie-Elektronen-Laser XFEL ähnelt FLASH in seinem Entwurf sehr. Die maximale Elektronenstrahlenergie ist jedoch auf 17,5 GeV angehoben. Dies ermöglicht es, kohärente Strahlung ($> 65\%$ Kohärenz) bei 0,1 nm zuverlässig zu erzeugen. Abb. 7 vergleicht die angestrebte Brillanz des XFEL mit den bei FLASH erreichten Werten sowie den Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation. Gezeigt ist auch der Arbeitsbereich der Linac Coherent Light Source LCLS am SLAC-Linac in Stanford (USA), die vergleichbare Strahlung liefern wird. Ein wesentlicher Unterschied des XFELs verglichen mit dieser schon 2009 in Betrieb gehenden Quelle ist, dass der XFEL auf einem supraleitenden Linac basiert und deshalb eine weitaus höhere Zahl von Bunchen pro Sekunde erzeugen kann, also eine deutlich höhere mittlere Brillanz ermöglicht.

Literatur

- [1] M. Altarelli et al., XFEL Technical Design Report, DESY 2006-097 (2006), vgl. auch <http://xfel.desy.de>
- [2] W. Ackermann et al., Nature photonics 1, 336 (2007)
- [3] V. Ayvazyan et al., Eur. Phys. J. D 37, 297 (2006)
- [4] R. Bonifacio, L. M. Narducci und C. Pellegrini, Opt. Commun. 50, 373 (1984)
- [5] V. Ayvazyan et al., Phys. Rev. Lett. 88, 104802 (2002)
- [6] A. M. Kondratenko und E. L. Saldin, Part. Accelerators, 10, 207 (1980)
- [7] E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller und M. V. Yurkov, The Physics of Free Electron Lasers, Springer, Berlin (1999)
- [8] J. Rossbach, Physikalische Blätter, April 1995, S. 283
- [9] J. Feldhaus, J. Rossbach und H. Weise, Freie-Elektronen-Laser, Spektrum der Wissenschaft Dossier: Laser in neuen Anwendungen 2/1998, 106 (1996)
- [10] A. A. Sorokin, S. V. Bobashev, T. Feigl, K. Tiedtke, H. Wabnitz und M. Richter, Phys. Rev. Lett., 99, 213002 (2007)
- [11] H. N. Chapman et al., Nature physics 2, 839 (2006)
- [12] P. Radcliffe et al., Nucl. Instr. and Meth. A 583, 516 (2007)

DIE AUTOREN

Josef Feldhaus (FV Chemische Physik) studierte Physik in Bochum und promovierte 1982 an der FU Berlin. Während der Promotion experimentierte er mit Synchrotronstrahlung in Stanford (USA), Orsay (Frankreich) und beim HASYLAB am DESY. Anschließend arbeitete er am Fritz-Haber-Institut, bevor er 1994 zum DESY ging. Er koordiniert den Nutzerbetrieb bei FLASH und ist mit seiner Gruppe verantwortlich für Diagnostik und Transport der FEL-Strahlung zu den Messplätzen sowie die Betreuung der Experimente.



Jörg Rossbach (FV Plasmaphysik) studierte Physik an der TU Berlin und promovierte 1978 an der FU Berlin. Anschließend ging er ans DESY. 1990 habilitierte er sich und übernahm vier Jahre später die technische Leitung der FEL-Entwicklung bei DESY. Nach dem erfolgreichen FEL-Betrieb der TESLA Test-Facility koordinierte er den Ausbau zur FEL-Nutzeranlage FLASH. Derzeit ist er verantwortlich für den weiteren Ausbau von FLASH. Seit 2003 ist er Professor an der U Hamburg. 2006 erhielt er den internationalen FEL-Preis.



Hans Weise (FV Hadronen und Kerne) studierte Physik in Darmstadt. Während seiner Promotion trug er wesentlich zum Ausbau des S-DALINAC bei und ermöglichte durch den Aufbau eines neuen Injektors die Inbetriebnahme des ersten FELs in Deutschland. Seit 1993 arbeitet er am DESY und hat dort jahrelang den Aufbau des TESLA Test Facility Linac geleitet. Seine Arbeitsgruppe betreibt alle Linearbeschleuniger bei DESY und ist maßgeblich an der Planung des XFEL beteiligt.

