

Freie-Elektronen-Laser FLASH

FLASH ist der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser, der im Vakuum-ultravioletten und weichen Röntgen-Wellenlängenbereich arbeitet. Das Besondere an FLASH sind ultrakurze Pulse zwischen 10 und 50 fs mit einer bisher unerreichten Brillanz von bis zu 10^{30} Photonen/s/mrad²/mm²/0.1 % Bandbreite. Frei stimmbar werden Wellenlängen zwischen 7 und 47 nm den Nutzern zur Verfügung gestellt. Die Pulsenergien liegen im Bereich von 10 bis 100 μ J, je nach Wellenlänge. Neben der fundamentalen Wellenlänge werden auch die dritte und fünfte Harmonische für Experimente genutzt.

Ein Experiment nutzte zum Beispiel die fünfte Harmonische bei 1.59 nm für resonante Streuung an magnetischen Strukturen.

Um FLASH weiter zu verbessern und die Nutzerexperimente vorzubereiten, wurden für Arbeiten und Experiment am Beschleuniger, der Photonstrahlführung und der Photonenstrahldiagnostik 3696 Stunden (42 %) reserviert. Weitere 1404 Stunden (16 %) waren für Wartungsarbeiten eingeplant (5 Wochen plus 12 Stunden

Wartung pro Woche). Dazu gehörten auch 3 Wartungswochen im Mai, die neben Baumaßnahmen im Zusammenhang mit dem sFLASH Projekt auch für Installationsarbeiten in der FLASH / PETRA III Querung genutzt wurden (Abbildung 114).

Während der geplanten Betriebszeit erreichte FLASH eine Verfügbarkeit von 94 % – ein neuer Rekord! Die Ausfallzeit konnte von 9 % im Jahre 2007 auf jetzt 6 % deutlich reduziert werden. Der Austausch des 10 MW Klystrons im Januar und viele kleinere Verbesserungen der HF-Systeme trugen wesentlich zu der günstigen Entwicklung bei.

Neben einer hohen Verfügbarkeit ist für Nutzer auch eine wichtige Kenngröße, wie viel Strahlzeit sie effektiv für ihre Experimente nutzen konnten: das waren wie im Jahr zuvor sehr gute 75 % (Abbildung 115). Etwa 17 % der Strahlzeit wird in die Feinabstimmung des FEL-Strahls investiert: davon wird etwa die Hälfte für die Änderung von Wellenlängen benötigt. In der restlichen Zeit werden für das Experiment spezifische Abstimmungen vorgenommen.

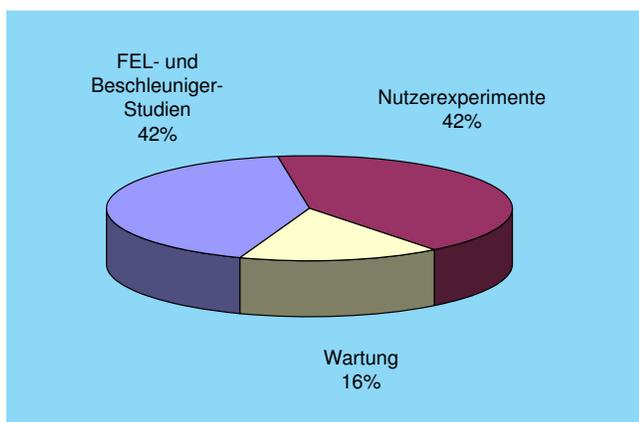


Abbildung 114: *FLASH Strahlzeitverteilung 2008. Fünf Wartungswochen plus 12 Stunden Wartung pro Woche sind berücksichtigt.*

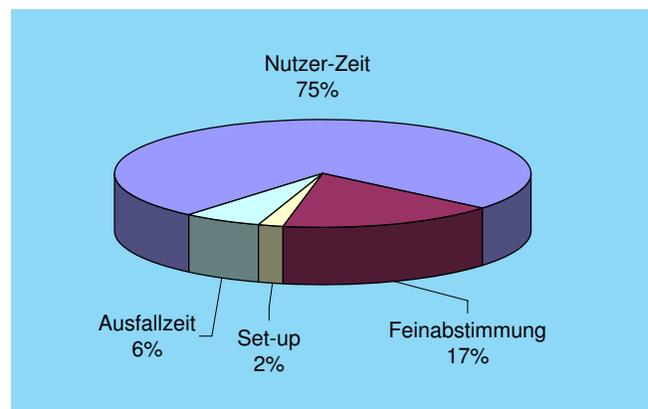


Abbildung 115: *Aufteilung der Strahlzeit während der Nutzerexperimente.*

In der Planung wird versucht, Experimente mit ähnlichen Anforderungen an den Strahl zu bündeln, um die Abstimmzeit zu optimieren. Eine Änderung der Wellenlänge erfordert oft eine neue Elektronenstrahl-optik und dauert im Schnitt 2 Stunden. Trotzdem konnten Änderungen der Wellenlänge von Schicht zu Schicht nicht immer vermieden werden: 89-mal wurde die Wellenlänge geändert; insgesamt waren es 20 verschiedene Wellenlängen zwischen 7 und 27 nm.

Einige Experimente hatten sehr spezielle Anforderungen, wie zum Beispiel eine Optimierung für die dritte oder fünfte Harmonische. Es kann auch erforderlich sein, die Wellenlänge genau auf eine Resonanz abzustimmen oder eine besonders kleine Bandbreite zu erhalten. Zudem fordern die Experimente verschiedene Bunchmuster: Bunchfrequenzen im Pulszug von 100, 200, 250, 500 oder auch 1000 kHz mit 1, 10, 20, 30, 50, 100 oder mehr Bunchen pro Pulszug.

Fast alle der 32 eingereichten Experimentenvorschläge konnten während der 23 Wochen Nutzerzeit berücksichtigt werden. Die Experimente deckten einen weiten Bereich von wissenschaftlichen Anwendungen ab: von der Atom- und Molekularphysik, der Spektroskopie von hochgeladenen Ionen, der Studie von Atomclustern und dynamischen Prozessen auf Oberflächen und Festkörpern bis zur Charakterisierung des FEL-Pulses und der Entwicklung von neuen Messmethoden. Bereits 50 % der Experimente kombinieren den FEL-Strahlpuls mit einem optischen Femtosekundenlaserpuls zur Untersuchung von dynamischen Prozessen auf der fs-Zeitskala.

Seit dem Start der Nutzerexperimente bei FLASH Mitte 2005 ist etwa die Hälfte der Strahlzeit für Studien und Experimente zur Weiterentwicklung und Verbesserung des Beschleunigers reserviert. Dazu gehören auch Experimente, die dem European XFEL und dem ILC dienen. Bei allen Studien profitieren die Nutzerexperimente direkt durch eine gezielte Verbesserung der Experimentierbedingungen aber auch indirekt durch zum Beispiel das immer weiter verbesserte Verständnis der Strahldynamik durch XFEL oder ILC motivierte Experimente.

Wissenschaftler und Studenten aus 20 Forschungseinrichtungen weltweit nutzten den FLASH-Beschleuniger um Experimente durchzuführen. FLASH ist bisher weltweit die einzige Anlage, die supraleitenden TESLA-Beschleunigermodule zusammen mit Strahlparametern bietet, die nahe an die Anforderungen des European XFEL und des ILC reichen. So haben 27 % der Studien mit Entwicklungsarbeiten für den European XFEL und dem ILC zu tun: Elektronenstrahl-diagnose und Instrumentierung, Strahldynamik (Microbunching), Experimente zu höheren Moden in supraleitenden Beschleunigerstrukturen (HOMs), Studien zu Zerstörungsschwellen von Materialien, Experimente zur Stabilität und Vibrationen der Beschleunigermodule unter bestimmten kryogenischen Parametern und so fort.

Weitere 23 % der Studien konzentrieren sich auf die Inbetriebnahme von neuen Projekten (FIR-Undulator, Photonendiagnose, THz- und CSR-Diagnose, Optical-Replica-Synthesizer).

Etwa 21 % der Studien dienen allein der Weiterentwicklung von FLASH. Dazu gehörten wie immer Studien zur Photokathode der Elektronenquelle: Überwachung der Quanteneffizienz und Experimente zu einer möglichen Kontaminierung der Kathoden. Um den Dunkelstrom zu reduzieren wurden die Kathodensysteme gesäubert und die HF-Kontaktfeder erneuert. Außerdem ist jetzt ein Kicker in Betrieb, der 70 % des Dunkelstroms direkt nach der Quelle eliminiert. Die Standardinstrumentierung (Lage- und Strommonitore) ist weiter verbessert worden. Eine neue selbstgetriggerte Elektronik für die Lagemonitore ist in Vorbereitung. Um die Abstimmung des FEL-Strahls und die Umstellung von Wellenlängen weiter zu verbessern, sind Untersuchungen zum Verständnis von Auffälligkeiten beim FEL-Undulator untersucht worden, die die Reproduzierbarkeit von Maschineneinstellungen zum Thema haben und die Abstimmung erschweren.

Dazu gehört auch die Verbesserung der Low-level-HF (LLRF), insbesondere der Regelung der RF-Gun und des ersten Beschleunigermoduls, die weitere 20 % ausmachen. Hier ist die Entwicklung von FPGA-basierenden Elektroniken zur Kontrolle der Beschleunigermodule wichtig. Sie erlauben reduzierte Antwortzeiten und

die Implementierung von komplexeren Algorithmen sowie die Kontrolle von vielen Cavities gleichzeitig. Andere Studien beschäftigten sich mit der Messung und dem Ausgleich der Verstimmung durch Lorentz-Kräfte mit Piezotunern.

Die Lebensadern von FLASH sind die HF-Referenzsignale, die alle Komponenten der Maschine, vom Photoinjektor-Laser und den Experimentier-Lasern bis zu den HF-Stationen der Beschleunigersysteme synchronisieren. Um die Zuverlässigkeit und die Stabilität der HF-Referenzsignale zu erhöhen, wurde der alte Master-Oszillator, der bereits seit mehr als 10 Jahren in Betrieb ist, durch ein modernes System ersetzt. Eine verbesserte Stabilität geht einher mit einer deutlich verbesserten Verteilung der Signale und der Reduzierung von Störungen zwischen den Signalwegen. Neue Diagnosewerkzeuge gestatten den Betrieb permanent zu überwachen und so frühzeitig Störungen anzuzeigen. Es ist geplant in 2009 das System zu verdoppeln, um einem Ausfall zügig begegnen zu können.

Ein Glanzpunkt war das erfolgreiche Experiment zur Stabilisierung eines Strahls mit hohem Strom im Beschleuniger. Mehr als 500 Elektronenbunche mit einem Strom von 3 mA wurden bei hoher Energie stabil beschleunigt (Abbildung 116). Dieses Experiment ist wichtig für den ILC und den European XFEL, der Ströme von 5 mA transportieren soll. Der Transport von langen Pulszügen und hohem Strom ist eine Herausforderung insbesondere an die LLRF. Nur ein perfekt stabilisierter Strahl in Amplitude und Phase kann

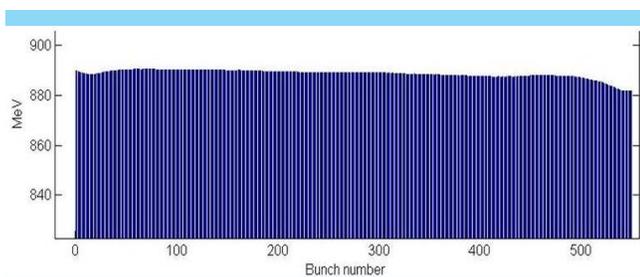


Abbildung 116: Energie im Pulszug von 550 Elektronenpaketen mit einer Länge von 550 μs . Der mittlere Strom im Pulszug beträgt 3 mA. Die Wiederholrate war 5 Hz.

verlustfrei durch den Beschleuniger transportiert werden.

Für hochauflösende Pump-Probe-Experimente ist es wichtig, die Ankunftszeit des FEL-Strahls relativ zum Pump-Probe-Laser mit einer Auflösung in der Größenordnung der FEL-Pulslänge zu messen und besser noch, zu stabilisieren. Durch die dispersiven Strecken in den Bunchkompressoren übersetzt sich eine Schwankung der Elektronenstrahlenergie in eine Schwankung der Ankunftszeit des Elektronenpulses im Undulator und damit des FEL-Pulses. Die in 2008 erreichte Verbesserungen der Stabilität der Beschleunigungsgradienten insbesondere im ersten Beschleunigungsmoduls auf einen Rekordwert von 0.014 % führt immer noch zu einer Schwankung der Ankunftszeit der Pulse von etwas weniger als 200 fs rms. Ein wichtiges Zwischenergebnis in der aktiven Stabilisierung der Ankunftszeit ist jetzt gelungen. Die Signale eines speziellen Monitors, der in der Lage ist, die ultrakurzen Signale der Elektronenpulse aufzunehmen, wurden mit einer Referenz verglichen und für ein Feedback innerhalb eines Pulszuges benutzt. Die Referenz ist ein moderner Femtosekundenlaser, der auf die Master-HF abgestimmt ist und eine langzeitstabile Synchronisation ermöglicht. Auch der Pump-Probe-Laser ist auf die gleiche Master-HF abgestimmt. Mit diesem System konnte die Ankunftszeit schon nach etwa 50 Pulsen im Pulszug von 200 fs auf etwa 40 fs deutlich reduziert werden (Abbildung 117).

Die Messung der longitudinalen Struktur der Elektronenpulse ist von entscheidender Bedeutung für das Verständnis und die Optimierung des SASE-Prozesses. Daher werden verschiedene Techniken getestet, die die Struktur mit hoher Auflösung anzeigen. Angestrebt wird eine Auflösung, die kleiner ist als die Kohärenzlänge des FELs (etwa in der Größenordnung von einigen 100 Wellenlängen der FEL-Strahlung, etwa 30 μm oder 10 fs). Ein neues innovatives Experiment ist jetzt erfolgreich gestartet: der *Optical-Replica-Synthesizer* (ORS). Der ORS ist auch deshalb so interessant, weil er auch bei hohen Elektronenstrahlenergien funktioniert, wenn Deflecting-Cavities wie LOLA nicht mehr praktikabel sind. Die neuartige Technik nutzt einen ultrakurzen optischen fs-Laserpuls, der mit dem Elektronenpuls in einem speziell auf den La-

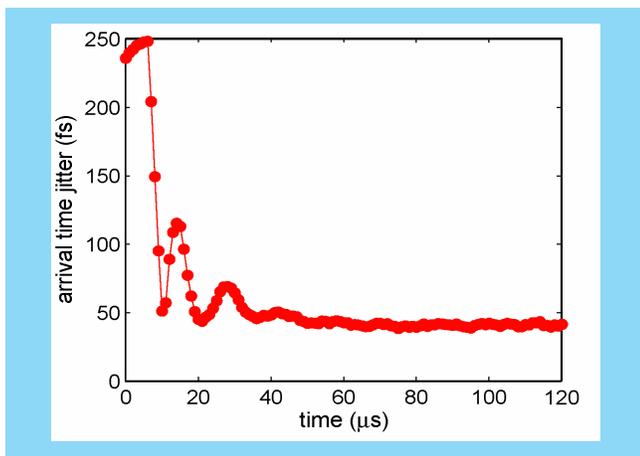


Abbildung 117: *Ankunftszeitschwankung von Puls zu Puls im Elektronenpulszug. Nach etwa 50 Pulsen ($50 \mu\text{s}$) ist die Schwankung auf 40 fs reduziert.*

ser abgestimmten Modulator wechselwirkt und dem Elektronenpuls eine Energiemodulation aufprägt. Diese Energiemodulation wird in der folgenden magnetischen Schikane in eine Dichtemodulation umgewandelt, die wiederum den nachfolgenden Radiator veranlasst, einen kohärenten optischen Lichtpuls mit dem selben longitudinalen Profil des Elektronenpulses abzustrahlen. Der Lichtpuls ist eine Replika des Elektronenpulses. Mit Standard-Verfahren (FROG) kann jetzt der optische Puls mit der gewünschten Auflösung vermessen werden. Abbildung 118 zeigt die erste gemessene FROG-Spur (*Frequency Resolved Optical Gating*) der optischen Replika, aufgenommen während des Pilotexperiments in 2008. Die Spur erlaubt die Amplitude und Phase des Lichtpulses zu rekonstruieren und so die gewünschten Eigenschaften des Elektronenpulses zu bestimmen.

FLASH II

Es wurde mit Vorstudien zu FLASH II, einer Erweiterung von FLASH um eine neue Undulatorstrahlführung begonnen. Die neuen Undulatoren, die durch variable Gaps eine von FLASH unabhängige Einstellung der Wellenlänge der SASE Strahlung erlauben, sollen in einem neu zu bauenden Tunnel installiert werden. In der neuen Strahlführung wird auch das Prinzip

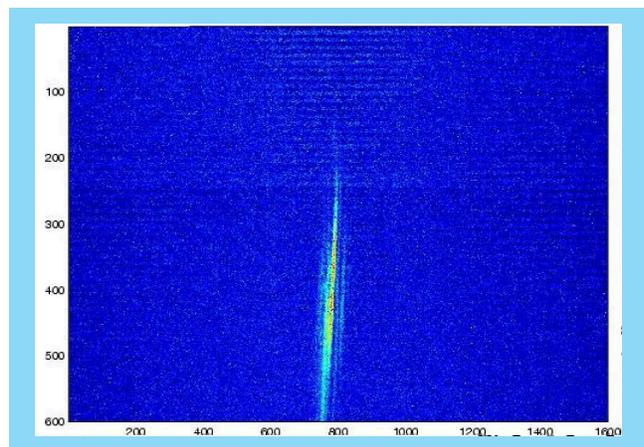


Abbildung 118: *Erste Messung der longitudinalen Struktur eines Elektronenpulses mit dem Optical-Replica-Synthesizer. Gezeigt ist eine FROG-Spur, die horizontale ist die Zeit, die vertikale Achse die Wellenlänge des Replika-Pulses. Die Spur erlaubt die Amplitude und Phase des Lichtpulses zu rekonstruieren und so die gewünschten Eigenschaften des Elektronenpulses zu bestimmen.*

des *seeded FEL* zur Anwendung kommen, bei dem die Qualität der FEL Strahlung durch Modulation der Elektronenpakete mittels Wechselwirkung mit einem Laserstrahl optimiert werden kann. Der neue Tunnel zweigt nach der Beschleunigerstrecke, deren Elektronenstrahl quasi simultan in die Undulatoren der alten und der neuen Strahlführung gelenkt werden kann, von der existierenden Strahlführung ab und mündet in eine ebenfalls vorgeschlagene neue Experimentierhalle. Durch FLASH II könnte einerseits der schnell wachsenden Nutzergemeinde ein größeres Strahlzeitangebot zur Verfügung gestellt werden, andererseits können hier auch wichtige Tests auf dem Gebiet der Strahl diagnose, die für den European XFEL von großer Bedeutung sind, durchgeführt werden.

Das Helmholtz Zentrum Berlin ist Partner bei der Planung und Durchführung des FLASH-II Projekts, für das gemeinsam Ausbaumittel bei der Helmholtz-Gemeinschaft für die nächste Förderperiode beantragt wurden.