

# Freie-Elektronen-Laser FLASH

Das Jahr 2006 stand im Zeichen der Stabilisierung der außerordentlichen Leistung des FLASH Beschleunigers und der Verbesserung der Betriebsabläufe. Von insgesamt 7896 geplanten Betriebsstunden wurde der FEL-Strahl 3696 Stunden (47%) Nutzerexperimenten zur Verfügung gestellt. Die restliche Strahlzeit wurden für Studien zur Verbesserung des FEL-Betriebes (2352 Stunden) und für allgemeine Beschleunigerstudien (1848 Stunden) genutzt.

Mit einer Strahlenergie von 370 bis 700 MeV erzeugt FLASH laserartige FEL-Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 47 bis 13 nm. Die kohärenten Strahlungspulse sind mit 10 bis 20 fs extrem kurz und erreichen eine Energie von mehr als 100  $\mu\text{J}$  im VUV bis EUV-Wellenlängenbereich.

Im April wurde die FEL-Strahlung zum ersten Mal bei 13 nm erzeugt und im August konnte die für den SASE-Prozess typische Sättigung erreicht werden. Diese weltweit einzigartigen und unübertroffenen Ergebnisse beruhen auf einer systematischen Verbesserung der Stabilität des Strahls zusammen mit einem verbesserten

Verständnis der Strahloptik und des -orbits insbesondere im Undulatorbereich.

Die Messung der Verstärkung in Abhängigkeit von der Länge der ausgenutzten Undulatorstrecke zeigt den erwarteten exponentiellen Anstieg der FEL-Strahlenergie bis Sättigung erreicht ist. Aus diesen Daten zusammen mit der Analyse des Frequenzspektrums und einer statistischen Analyse der Energiefluktuation des SASE-Prozesses wurden die Eigenschaften der Strahlung bestimmt: bei der Wellenlänge 13.7 nm erreicht der einzelne FEL-Puls eine Energie von mehr als 70  $\mu\text{J}$  – gemittelt über viele Einzelpulse. Im Maximum werden 170  $\mu\text{J}$  erreicht. Die Länge der Pulse beträgt etwa 10 fs und erreicht eine Leistung von 5 GW. Tabelle 7 fasst die Ergebnisse zusammen.

Neben der fundamentalen Wellenlänge enthält die erzeugte Strahlung auch Beiträge von höheren Harmonischen. In der Sättigung sind im Wesentlichen die ungeraden Harmonischen messbar. Die Messung ergab folgende Werte:

**Fundamental:** 13.7 nm (90 eV) mit einer Energie von 40  $\mu\text{J}$  und Pulsleistung etwa 4 GW,

Wellenlängenbereich (Fundamentale)	13–47 nm
Mittlere Pulsenergie (bester Wert)	bis zu 100 $\mu\text{J}$
Mittlere Pulsenergie (normaler Betrieb)	30 $\mu\text{J}$
Maximal erreichte Pulsenergie	170 $\mu\text{J}$
Einzelpulsleistung	$\sim 5$ GW
Mittlere Leistung	$> 100$ mW
Pulslänge (FWHM)	10–50 fs
Spektrale Breite (FWHM)	0.5–1%
Einzelpuls-Brillanz	$10^{29}$ – $10^{30}$ $\frac{\text{Photonen}}{\text{smrad}^2 \text{mm}^2 0.1\% \text{ Bandbreite}}$

Tabelle 7: *Eigenschaften der FEL-Strahlung.*

### 3. Harmonische:

4.6 nm (270 eV) mit etwa 250 nJ und 40 MW,

### 5. Harmonische:

2.7 nm (450 eV) mit etwa 10 nJ und 2 MW,

### 7. Harmonische:

1.9 nm (630 eV) ist beobachtet worden.

Diese Werte entsprechen einer Einzelpuls-Brillanz von  $(6 \pm 3) \cdot 10^{29}$ ,  $(2 \pm 1) \cdot 10^{28}$  und  $(2 \pm 1) \cdot 10^{27}$  Photonen/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/(0.1% Bandbreite) für 13.7, 4.6 und 2.7 nm.

Der Betrieb von FLASH wurde im Jahre 2006 weiter stabilisiert. Viele Betriebsabläufe wurden standardisiert und optimiert. Operateure sind jetzt in der Lage, Teile der komplexen Optimierung des Elektronenstrahls, der für das Zünden und Halten des SASE-Prozesses notwendig ist, selbstständig und regelmäßig durchzuführen; wenn auch immer noch die Hand des Experten für schwieriges Abstimmen nötig ist.

Regelmäßige Studien und Experimente zur Verbesserung der Elektronenstrahldiagnose und der Vermessung der Strahleigenschaften führten zu einem wesentlich besseren Verständnis der Transferfunktionen und der Strahloptik und trugen so verbesserten Strahleigenschaften im Undulator bei.

Entscheidende Verbesserungen der Strahlstabilität wurden durch zum Teil kleine Verbesserungen in vielen Bereichen erreicht:

Eine verbesserte Optik erlaubt kleinere Elektronenstrahlgrößen in weiten Bereichen des Beschleunigers und vermindert so die Sensitivität für Einstellungsfehler der Quadrupole.

Durch ein verbessertes Modell des Beschleunigers kann jetzt zuverlässig Dispersion korrigiert werden, strahlbasierende Korrekturverfahren glätten den Orbit und vermeiden so unnötige Quellen von Dispersion.

Elektromagnetisch induzierte Störungen wurden an vielen Stellen identifiziert und eine Beseitigung eingeleitet. Zum Beispiel wurden alle Netzgeräte der Magnete mit Rauschfiltern ausgestattet und eine Maßnahmen zur Glättung des Stromes durchgeführt. Nach und nach werden da wo es möglich ist, alle Chopper-Netzteile

durch rauscharme Geräte ausgetauscht. Diese Maßnahmen haben zu einer wesentlich stabileren Strahlage geführt.

Durch Shuntwiderstände wurden die Präzision der Stromsteuerung um den Faktor 10 erhöht, und dadurch die Reproduzierbarkeit der Korrektoreinstellungen deutlich verbessert.

Die Umgebungstemperatur der empfindlichen Elektronik zur Stabilisierung der Amplituden und Phasenlage des beschleunigenden HF ist durch den Einbau einer präzisen Klimaanlage auf  $\pm 1^\circ\text{C}$  stabilisiert worden. Dadurch konnten Tag-Nacht und Wettereinflüsse auf die Phasenlage des Strahls eliminiert werden. Der Injektorlaser hat ebenfalls eine verbesserte Temperaturregelung, hier liegen die Schwankungen in einem Bereich von  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ .

Weitere Maßnahmen zur Reduzierung von elektromagnetisch induzierten Störungen betreffen auch das Erdungsschema der Stromversorgung. Das alte TN-C System (4-Leiter mit PEN) wird nach und nach durch ein modernes TN-S System (5-Leiter PEN und getrenntes PE) ersetzt. Das vermaschte Erdungssystem reduziert vagabundierende Erdströme und verhindert Erdungsschleifen. Gleichzeitig wurde die Stromversorgung der Großverbraucher wie Klystrons und Modulatoren von den empfindlichen Magnetnetzgeräten getrennt. Diese Maßnahmen werden im Frühjahr 2007 abgeschlossen sein.

Die Veränderung des im FLASH-Beschleuniger induzierten Magnetfeldes des PETRA-Ringbeschleunigers während seiner Rampenfahrten induziert eine deutlich messbare Bewegung des Elektronenstrahls weit über die Toleranz für den SASE-Prozess hinaus. Ein Kompensationsstrom wurde eingeführt, der den Effekt auf ein akzeptables Niveau reduziert (10% der FEL-Strahlenergie).

Die Phasen- und Amplitudenstabilität der HF der Elektronenstrahlquelle (RF-Gun) wurde durch die Einführung einer leistungsfähigeren Elektronik (FPGA) deutlich verbessert. Es ist jetzt möglich, Amplitude und Phase des Beschleunigungsfeldes in der RF-Gun durch die Bildung der Vektorsumme der ein- und rücklaufen-

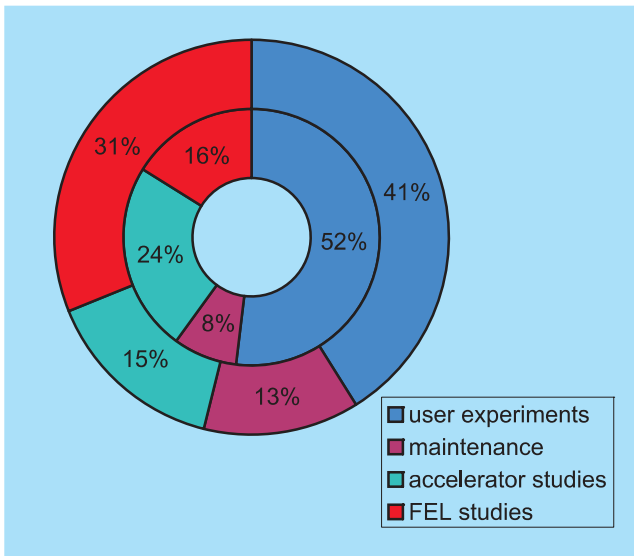


Abbildung 106: Verteilung der Strahlzeit auf die erste (innerer Kreis) und zweite Periode mit Nutzer-Experimenten. Im Vergleich zur Periode 1 von August 2005 bis Februar 2006 ist die Strahlzeit in Periode 2 von April 2006 bis März 2007 für die Verbesserung des FEL-Strahlbetriebes (rot) verdoppelt worden.

den HF-Leistung zu bestimmen und damit zu regeln. Die gemessene Phasenstabilität beträgt jetzt hervorragende  $0.14^\circ$  bezogen auf die HF (1.3 GHz), was 300 fs entspricht. Ein ähnlich verbessertes System ist schon für das erste Beschleunigungsmodul (ACC1) aufgebaut und wird getestet.

Die Standarddiagnose – insbesondere die Messung des Strahlorbis – ist jetzt überholt und erreicht jetzt beachtliche Genauigkeit. Zum Beispiel liegt jetzt die Auflösung der Strahlmessung im Undulatorbereich bei  $20 \mu\text{m rms}$ .

Der Betrieb von FLASH unterscheidet bisher zwei Perioden mit Nutzer-Experimenten. Im Vergleich zu der ersten Periode von August 2005 bis Februar 2006 ist die Strahlzeit in der zweiten Periode (April 2006 bis März

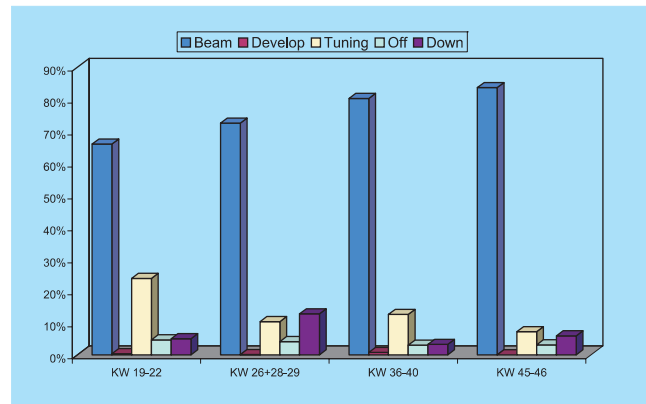


Abbildung 107: Strahlzeit für Nutzer-Experimente seit April 2006 im Vergleich zur Einstellzeit (Tuning), Ausfallzeit (down) und planmäßiger Betriebsunterbrechung (Off).

2007) für die Verbesserung des FEL-Strahlbetriebes erhöht worden (Abbildung 106). Die zusätzlichen Studienzeiten zahlen sich in einer deutlich besseren Strahlqualität aus, die die Ausbeute der Experimente deutlich erhöht hat.

Eine wichtige Prozedur, die während der FEL-Studienzeiten eingeübt wurde ist der Wechsel der FEL-Wellenlänge von Experiment zu Experiment. Ein Wellenlängenwechsel bedeutet eine Veränderung der Elektronenstrahlenergie, was eine komplizierte Optimierungsprozedur nötig macht. Mehr als 14 verschiedene Wellenlängen im Bereich von 47 bis 13 nm wurden eingestellt und die dazugehörigen Parameter des Beschleunigers gespeichert. Der Wechsel der Wellenlänge gelingt jetzt meist in weniger als zwei Stunden, wenn auch die Feineinstellung der Wellenlänge noch schwierig ist.

Abbildung 107 zeigt den langsamen Anstieg der effektiven Strahlzeit während der Nutzerperioden seit April 2006 auf jetzt 80%. Die Zeit, die für das Einstellen (Tuning) benötigt wird, ist deutlich reduziert worden. Die Ausfallzeiten liegen konstant um die 10%.