

# Freie-Elektronen-Laser FLASH

## FLASH

Im November 2007 begann bei FLASH die zweite Nutzerstrahlzeitperiode, die nach mehr als 7600 Stunden reiner Strahlzeit für Nutzerexperimente am 21. Sep. 2009 erfolgreich endete. Seitdem wird FLASH weiter ausgebaut, um für die nächsten Experimente optimal gerüstet zu sein. Wiederanlauf ist für Mitte April 2010 geplant.

Von den 6384 Stunden Strahlzeit, die 2009 zur Verfügung stand, wurden 2955 Stunden für Nutzerexperimente (46.3%) genutzt, 1880 Stunden (29.4%) für FEL-Studien und für Experimente und andere Messarbeiten an der Photonstrahlführung sowie an der Photon-diagnose und zur Vorbereitung der Nutzerexperimente (Abbildung 33a). Weiter fielen 10.4% (664 Stunden) der Strahlzeit auf Beschleunigerstudien, 13.9% sind für Wartungsarbeiten (4 Wochen plus 8 Stunden je Betriebswoche) genutzt worden.

Die Verfügbarkeit des Beschleunigers während der Nutzerzeit war mit 92% wieder hervorragend. Die gesamte Ausfallzeit betrug 8%. Der leichte Anstieg im Vergleich zu 2008 von fast 2 Prozentpunkten wurden durch den hamburgweiten Stromausfall im Juni 2009 und durch Ausfall der beiden alten HF-Stationen verursacht. Diese Stationen werden jetzt erneuert, so dass eine deutliche Reduzierung der Ausfallzeit zu erwarten ist. Während der Nutzerexperimentierzeit lieferte der Beschleuniger in 80% der Zeit Strahl an die Experimente, 10% wurden für die Feinabstimmung des FEL-Strahls und für Änderungen der Wellenlänge benötigt (Abbildung 33b). Das ist deutlich besser als im Vorjahr. Die Feinabstimmung geht jetzt zügiger voran, so dass den Nutzern trotz leicht erhöhter Ausfallzeiten häufiger Strahl geliefert wurde. Um die Effizienz zu erhöhen, wurde bei der Planung der Experimentier-

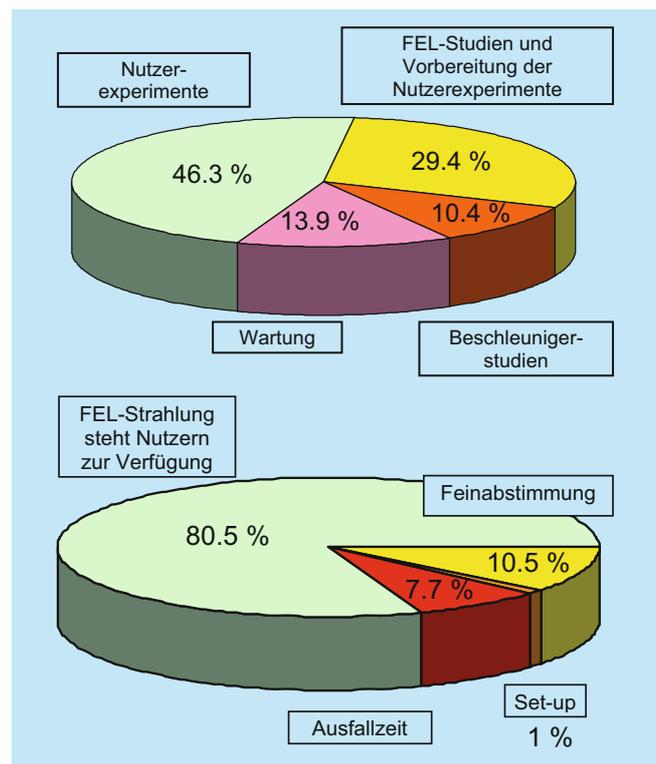


Abbildung 33: a) FLASH Strahlzeitverteilung 2009 (bis zum Beginn des Ausbaus im 21. Sept. 2009). b) Aufteilung der Strahlzeit während der Nutzerexperimente.

zeiten auch darauf geachtet, häufige Änderungen der Strahlparameter zu vermeiden.

Das experimentelle Programm der Nutzer deckte wieder ein weites Spektrum von Anwendungen im Bereich der Atom- und Molekularphysik mit einem Schwerpunkt auf ultra-schnelle Prozesse in Festkörpern ab. Die Zahl der wissenschaftlichen Publikationen ist weiter gestiegen: 2009 wurden weitere 30 Arbeiten veröffentlicht, die aus Experimenten bei FLASH entstanden sind. Damit ist die Zahl der Publikationen auf 68 gestiegen.

Wellenlängenbereich (erste Harmonische)	6.8 nm–47 nm
Mittlere Einzelpulsenergie	10 μJ–100 μJ
Pulslänge	10 fs–70 fs
Spitzenleistung	1 GW–5 GW
Mittlere Leistung (für 500 Pulse/s)	15 mW
Spektrale Breite	1%
Brillanz	1029 B–1030 B

(B = Photonen/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%bw)

Tabelle 3: *Typische FEL-Strahlparameter von FLASH.*

Tabelle 3 fasst die typischen FEL-Strahlparameter während der 2. Nutzerperiode zusammen. Die Einzelpulsenergie der dritten Harmonischen beträgt etwa 0.5 bis 1% der fundamentalen ersten Harmonischen.

Mehr als 30 verschiedene Wellenlängen zwischen 6.8 und 40.5 nm sind während der zweiten Nutzerperiode nachgefragt und von FLASH geliefert worden, mehr als 140 Mal wurde die Wellenlänge geändert. Favoriten waren natürlich die kürzest mögliche Wellenlänge um 7 nm und zusätzlich auch 13.5 nm, für die häufig Spiegel zur Verfügung standen (Abbildung 34). Einige Experimente nutzten auch die dritte und fünfte Harmonische. Die kleinste eingestellte Wellenlänge war eine

fünfte Harmonische mit 1.59 nm für ein Experiment an magnetischen Strukturen.

In Zusammenarbeit mit internationalen Partnern wurde nach der offiziellen Nutzerperiode in zwei zusätzlichen Wochen ein Experiment durchgeführt, in FLASH einen Strahl mit voller Strahllast zu beschleunigen. Das ist zwar nicht ganz neu, jedoch wurde ein solches Experiment diesmal bei einer Strahlenergie von fast 1 GeV und mit einem Gespann aus drei zusammenhängenden Beschleunigermodulen durchgeführt, die bei sehr hohen Gradienten betrieben wurden. Dieses Experiment ist insbesondere für den ILC (International Linear Collider) aber auch für den European XFEL von hoher Bedeutung, da beide Beschleuniger regelmäßig mit voller Strahllast betrieben werden müssen. Im Zuge dieses Experiments wurde die Strahlführung zum Elektromagnet komplett erneuert und mit deutlich verbesserter Strahldiagnose ausgestattet. Das war auch eine Voraussetzung dafür, dass FLASH in Zukunft regelmäßig Strahl mit einigen hundert Pulsen pro Pulszug beschleunigen wird.

Im Laufe des Experiments wurde über mehrere Stunden ein Strahl mit 800 Pulsen einer Ladung von 3 nC pro Pulszug mit 5 Hz stabil bei fast 1 GeV beschleunigt (Abbildung 35). Für kurze Zeit konnte die Zahl der Pulse pro Zug auf 2400 mit Pulsabständen von 300 ns erhöht werden. Dabei kam auch ein spezieller Laser zum Einsatz, der zum ersten Mal Pulszüge von 3 MHz erzeugen konnte – ein wichtiger Schritt zu einem 5 MHz Laser für den European XFEL. Diese Ergebnisse versprechen, dass in der nächsten Nutzerperiode FLASH

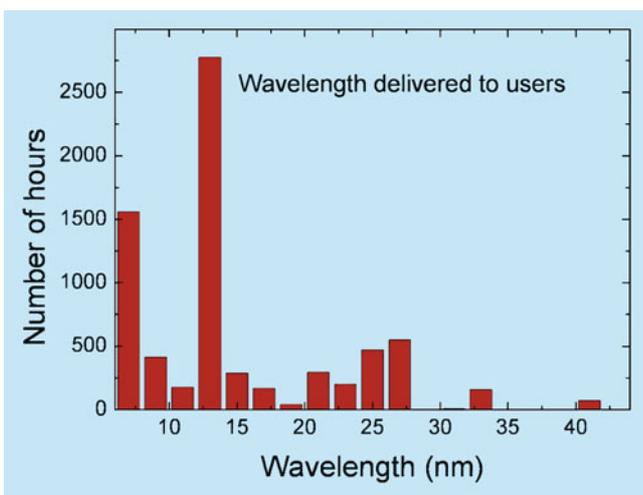


Abbildung 34: *Mehr als 30 verschiedene Wellenlängen sind während der zweiten Nutzerperiode eingestellt worden.*

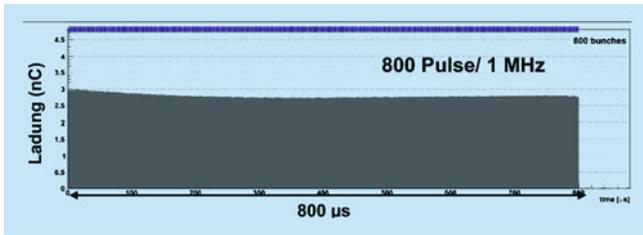


Abbildung 35: Pulszug bei FLASH mit 800 Pulsen pro Zug bei einer Pulsladung von 3 nC. Der Abstand der Pulse beträgt 1  $\mu$ s (1 MHz).

routinemäßig Pulszüge mit vielen hundert bis einigen tausenden Pulsen pro Sekunde liefern kann. Der Erfolg vieler Nutzerexperimente hängt von der hohen mittleren Brillanz der FEL-Strahlung ab. Durch die supraleitende Beschleunigertechnologie sind FLASH und insbesondere der European XFEL weltweit die einzigen Freie-Elektronen-Laser, die in der Lage sind, einige tausend Pulse pro Sekunde zu erzeugen.

Der Betrieb von FLASH ist für die Dauer des Ausbaus für fünf Monate unterbrochen. Nach der Inbetriebnahme, die Mitte Februar beginnt, wird der erste beschleunigte Strahl Ende April 2010 erwartet. Abbildung 36 zeigt die wichtigsten Ausbaumaßnahmen.

Es gibt zwei Hauptziele des FLASH Ausbaus: die Erhöhung der Strahlenergie von 1 auf 1.2 GeV und eine deutlich bessere Kontrolle über den longitudinalen Phasenraum der Elektronenstrahlen durch die Installation von Beschleunigungsstrukturen, die bei 3.9 GHz betrieben werden. Weiter wird neben vielen Maßnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit des Beschleunigers ein wichtiges Experiment aufgebaut: sFLASH, das Seeding-Experiment.

Die Erhöhung der Strahlenergie auf 1.2 GeV wird durch zwei Maßnahmen realisiert: der Einbau eines zusätz-

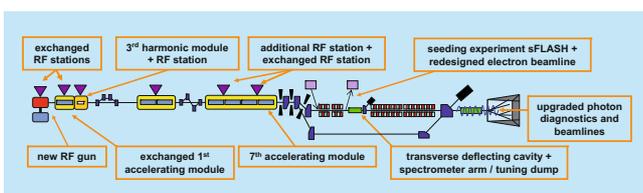


Abbildung 36: Ausbaumaßnahmen bei FLASH.

lichen neuen Beschleunigermoduls mit einem Energiegewinn von 200 MeV und der Austausch des ersten Moduls mit verbesserten Gradienten, um den Energieverlust durch die 3.9 GHz Cavities auszugleichen. Durch diesen Ausbau wird FLASH Wellenlängen unter 5 nm realisieren können und erreicht damit fast die K-Kante bei 4.2 nm. Mit der dritten Harmonischen des FEL-Strahls mit etwa  $10^{10}$  Photonen pro Puls wird die L3-Kante der 3d-Elemente bis etwa 1.5 nm abgedeckt. Dies wird zum Beispiel weiter Studien zur schnellen Dynamik von magnetischen Systemen mit deutlich verbessertem Signal ermöglichen.

Abbildung 37 zeigt die Installation des neuen Moduls PXFEL1, ein Prototyp des European XFEL. Die kalte Masse des neuen supraleitenden Beschleunigermoduls wurde in China gefertigt. Tests des Moduls auf dem Modulteststand bei DESY zeigten außerordentlich hohe Gradienten von 30 MeV/m (gemittelt über alle 8 Cavities) bei niedriger Feldemission, so dass das Ziel von einem Energiegewinn von mindestens 200 MeV sicher erreicht werden kann.

Eine deutlich verbesserte Flexibilität in der Formung des longitudinalen Phasenraums des Elektronstrahls wird das neue Modul mit vier supraleitenden 3.9 GHz Cavities bieten. Abbildung 38 zeigt das neue Modul beim Einbau in FLASH. Es wurde im Fermilab (FNAL) gebaut und im April dieses Jahres geliefert. Die Mes-

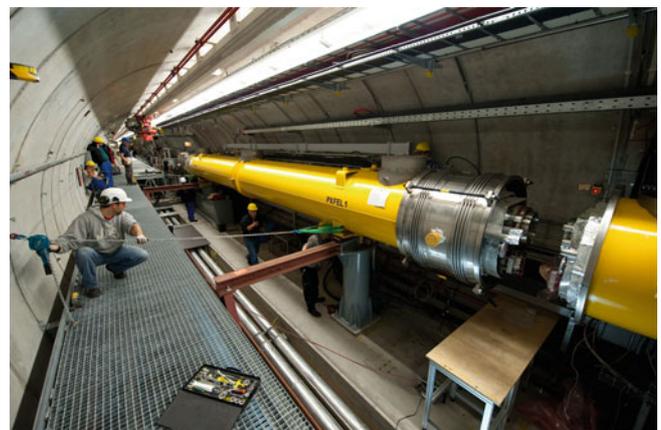


Abbildung 37: Das neue siebte Beschleunigermodul PXFEL1 während der Installation in den FLASH-Tunnel.

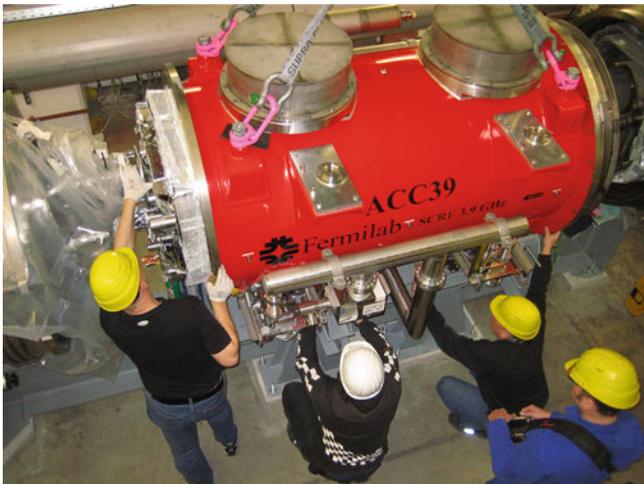


Abbildung 38: Das neue Modul mit vier supraleitenden 3.9 GHz Cavities beim Einbau in FLASH.

sergebnisse im Teststand sind vielversprechend: neben Gradienten weit über den Anforderungen bei kleiner Feldemission konnte auch gezeigt werden, dass die hohen Anforderungen an die Stabilität der Amplituden und Phasen der Feldgradienten erreicht werden.

Von den vielen Maßnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit des Beschleunigers seien hier insbesondere der Austausch der RF-Gun, die Erneuerung der HF-Stationen und der HF-Regelung aller Stationen sowie die Optimierung des Wellenleitersystems erwähnt.

Die neue RF-Gun ist ausgiebig bei PITZ getestet worden. Sie wurde mit der neuen CO<sub>2</sub>-Reinigungstechnik bearbeitet und hat daher einen sehr kleinen Dunkelstrom. Die Messungen bei PITZ lassen erwarten, dass der Dunkelstrom etwa um den Faktor 10 kleiner sein wird. Die neue HF-Station für die RF-Gun ist jetzt für den Einsatz eines 10 MW Klystrons vorbereitet. Sobald ein solches Multibeam-Klystron zur Verfügung steht, wird es weit höherer Gradienten in der RF-Gun erlauben und damit die Strahlqualität weiter verbessern.

Parallel zum den Ausbaumaßnahmen von FLASH wird ein wichtiges Experiment bei FLASH installiert: das HHG-Seeding-Experiment sFLASH einschließlich einer eigenen Experimentierstation für hochauflösende Pump-Probe-Experimente. Dafür werden zurzeit etwa

40 Meter Strahlführung komplett umgebaut und mit vier neuen Undulatoren plus Diagnoseeinheiten und Strahlführungen für den Seed-Laser und die FEL-Strahlung bestückt. HHG bedeutet, dass mit einem konventionellen Laser höhere harmonische der Laserwellenlänge in einem Gastarget erzeugt werden. Diese HHG-Strahlung injiziert den FEL-Verstärkungsprozess in einem auf die Wellenlänge angepassten Undulator. Im Gegensatz zu SASE, bei der die Verstärkung von stochastischer Strahlung ausgehen muss, wird hier die Anregung definiert durch die höhere Harmonische des Seed-Lasers gegeben. Dadurch wird neben einer verbesserten Strahlqualität insbesondere der zeitliche Jitter zwischen Pump und Probe deutlich verbessert. Das Ziel wird sein, 10 fs zu erreichen. sFLASH wird von der Universität Hamburg zusammen mit DESY mit Unterstützung des BMBFs realisiert.

Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Strahlqualität und der Erhöhung der Zuverlässigkeit sind die Inbetriebnahme eines neuen modernen Lasersystems für den Photoinjektor, einen zweiten Master-HF-Oszillator, neue Korrekturmagnete mit sehr kleiner Remanenz im Injektor und vieles mehr.

Ein wichtiger Schritt zur Erhöhung der mittleren Brillanz ist die Erhöhung der Wiederholrate der Pulszüge von 5 auf 10 Hz. Auch die Photodiagnose wird verbessert: ein Online Spektrometer wird die Feinjustierung des Frequenzspektrums der FEL-Strahlung erheblich erleichtern. Auch wird es einen schnellen Spiegel geben, den Experimente nutzen können, um parallel an zwei Experimentierstationen zu arbeiten.

## FLASH II

Eine Vorbereitungsphase für die im letzten Jahresbericht erstmalig erwähnte Erweiterung von FLASH um eine neue Undulatorstrahlführung, FLASH II, wurde offiziell genehmigt.

Neben der Bearbeitung von strahldynamischen Fragen wurden in Zusammenarbeit mit den technischen Gruppen Abschätzungen für den Ressourcenbedarf durchgeführt.