

Abbildung 129: Bereits zwei Wochen nachdem FLASH eine Strahlenergie von 1 GeV erreichte, gelang auch die Wellenlänge von 6.5 nm. Die Abbildung zeigt ein über 50 Pulse gemittelt Wellenlängenspektrum, aufgenommen mit einer bildverstärkten CCD-Kamera (oben) und die Projektion (unten).

# Freie-Elektronen-Laser FLASH

Im März 2007 beendete FLASH planmäßig die sehr erfolgreiche erste Nutzerperiode. In der anschließenden Betriebsunterbrechung wurden bis Juli 2007 ein sechstes supraleitendes Beschleunigungsmodul eingebaut und ein weiteres Modul durch ein leistungsfähigeres ersetzt. Ziel der Erweiterung war es, die Strahlenergie von 690 MeV auf 1 GeV zu steigern. Im Zuge dieser Umbauten wurden die Cavitytuner von Modul 5 repariert und zwei größere Experimente zur Messung der longitudinalen Strahlverteilung eingebaut: ein Undulator für Infrarot-Strahlung und das Optical-Replica Experiment.

Die Inbetriebnahme des Beschleunigers nach dem Umbau wurde zügig durchgeführt. Am 21. September konnte zum ersten Mal eine Energie des Elektronenstrahls von 1 GeV gemessen werden. Zwei Wochen später, am 5. Oktober erzeugte FLASH erstmals SASE FEL-Strahlung mit einer Wellenlänge von 6.5 nm (Abbildung 129), die kürzeste Wellenlänge, die jemals mit diesem Prinzip erreicht wurde.

FLASH bleibt auch in 2007 die einzige Quelle von FEL Strahlung weltweit, die Wellenlängen vom VUV bis zu weichen Röntgenstrahlen mit Pulslängen im Femtosekunden-Bereich anbieten kann. Zusätzlich erreicht FLASH mit diesem außerordentlichen Erfolg die

im Projektvorschlag geplanten Ziele. Abbildung 130 zeigt den aktuellen schematischen Aufbau von FLASH.

Die zweiten Nutzerperiode startete im November 2007 und wird Nutzerexperimenten bis Anfang 2009 mehr als 350 12-Stunden-Schichten Strahlzeit zur Verfügung stellen.

Von Januar bis Ende März 2007 konnten 1785 Stunden Strahlzeit zur Verfügung gestellt werden, davon 972 Stunden oder 54% für Nutzerexperimente, 483 Stunden für FEL-Studien und 330 Stunden für Beschleunigerstudien. Die Ausfallzeit betrug in diesem Zeitraum 164 Stunden oder 9.2%.

Nach dem Umbau waren in 2007 noch 3883 Stunden Strahlzeit geplant: 924 Stunden für die Inbetriebnahme, 1739 Stunden für FEL-Studien, 639 Stunden Beschleunigerstudien und für die letzten Wochen des Jahres 581 Stunden für Nutzerexperimente. Die Ausfallzeit reduzierte sich im Vergleich zu der Nutzerperiode Anfang des Jahres zu 6.6% der geplanten Strahlzeit.

Abbildung 131 fasst die Strahlzeitverteilung der ersten Nutzerperiode zusammen. Erfreulich ist, dass während 75% der Strahlzeit für Nutzerexperimente Strahl geliefert werden konnte.

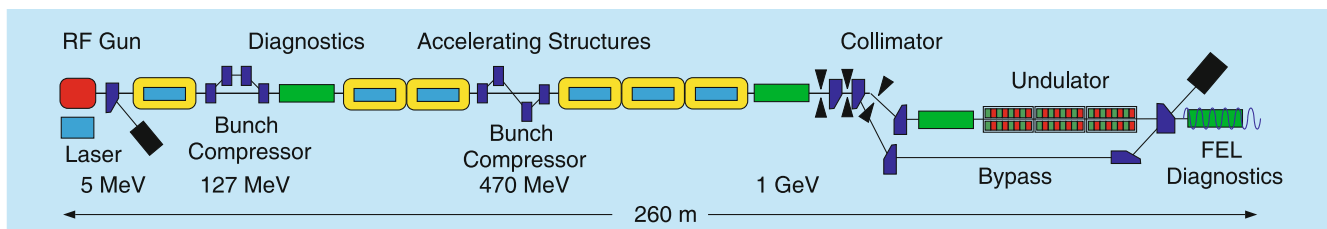


Abbildung 130: Schematischer Aufbau von FLASH nach dem Umbau. Mit der Installation eines sechstens supraleitenden Beschleunigungsmoduls erreicht FLASH eine Elektronenstrahlenergie von 1 GeV.

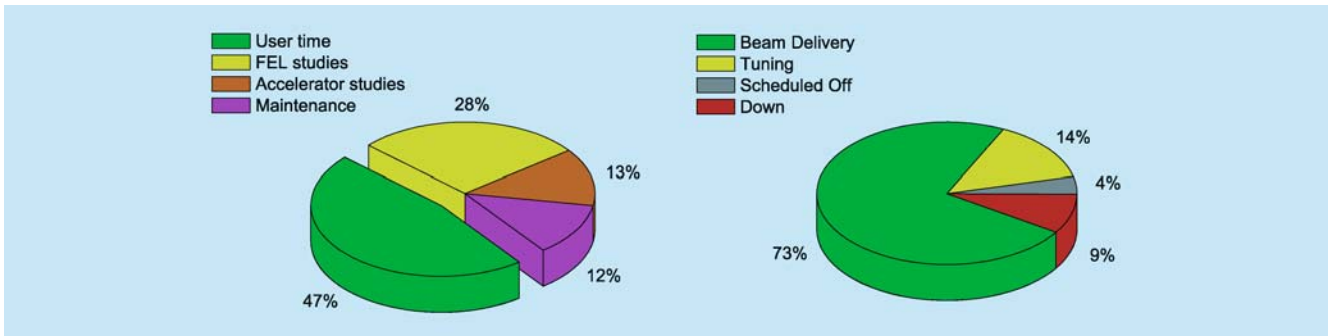


Abbildung 131: Verteilung der Strahlzeit während der zweiten Hälfte der ersten Nutzerperiode von Mai 2006 bis März 2007. Fast 50% der Strahlzeit wurde für Nutzerexperimente eingeplant (links, grünes Feld). Während 75% der geplanten Strahlzeit für Nutzerexperimente konnte tatsächlich Strahl geliefert werden (rechts, grünes Feld).

Im Vergleich zum Beginn der ersten Nutzerperiode von Mitte 2005 bis Mai 2006 wurden ab Mitte 2006 neben einer Wellenlänge von 32 nm auch verschiedene andere Wellenlängen gefordert. Favorit war die bis Sommer 2007 erreichbare kürzeste Wellenlänge von 13.5 nm.

In 2007, überstieg die mittlere Energie der einzelnen SASE-Pulse meist 20  $\mu\text{J}$  (siehe Abbildung 132). Der

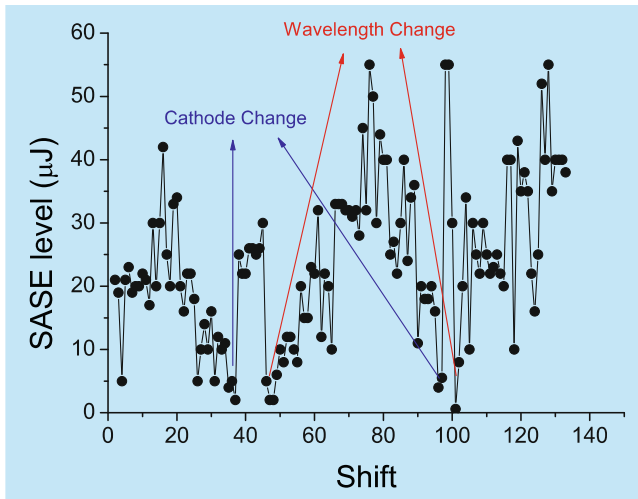


Abbildung 132: Energie der FEL-Strahlung während der ersten Nutzerperiode 2007 (SASE level). Die mittlere Einzelpulsenergie übertrifft meist 20  $\mu\text{J}$ . Nach einem Wechsel der Wellenlänge und bei einer Verschlechterung der Kathode kann die mittlere Energie absinken. Nicht berücksichtigt ist die Reduktion der gemessenen Energie durch benutzte Aperturen.

Wechsel der Wellenlänge ist zwar im Vergleich zu 2006 deutlich verbessert, dennoch wird ein erheblicher Teil der Strahlzeit von 14% zur Feinabstimmung benötigt.

In Abbildung 132 ist auch zu erkennen, dass nicht nur der Wechsel von Wellenlängen, sondern auch die Verschlechterung der Photokathode der Elektronenquelle zu einem Abfall der erreichbaren Strahlungsenergie führen kann. Die ursprüngliche SASE-Energie wurde nach einem Tausch der Kathode sofort wiederhergestellt. Der Kathodentausch kann innerhalb eines normalen Wartungstages durchgeführt werden.

## Umbau und Erweiterungen

Von Ende März bis Anfang Juli wurden wichtige Umbauten und Erweiterungen vorgenommen:

- Einbau eines sechsten supraleitenden Beschleunigungsmoduls
- Austausch des Moduls 3\* gegen Modul 7 mit etwa 100 MeV/Modul höherer Beschleunigung
- Aus- und Einbau des Modul 5 zur Reparatur der Cavity-Tuner
- Einbau eines Undulators für infrarote Strahlung zur Messung der longitudinalen Form der Elektronenpulse und für Pump-Probe-Experimente

- Ein vakuumgeführter Strahlengang, um die infrarote Strahlung zur Experimentierhalle zu führen
- Einbau von zwei Undulatoren und weitere Komponenten für das Optical-Replica-Experiment, ebenfalls zur Messung der longitudinalen Struktur der Elektronenpulse
- Neubau der Sektion zwischen RF-Gun und dem ersten Beschleunigungsmodul
- Verschiebung der RF-Gun um 30 cm weg vom Modul
- Neue Drahtscanner integriert mit Schirmstationen zur Messung der Emittanz vor dem Undulator
- Einbau eines neuen Detektors zur Messung der FEL-Strahlung für Wellenlängen bis zu 6 nm
- Einbau von speziellen Monitoren zur Messung der Ankunftszeit der Elektronenbunche
- Verlegen von speziellen Glasfasern für das Synchronisationsexperiment
- Bau eines Laborgebäudes und Strahlführungen zu FLASH für Lasersysteme, die für verschiedene Experimente genutzt werden

## Beschleunigungsmodule

Der Einbau eines sechsten Moduls und der Austausch des dritten Moduls war notwendig, um die Energie des Elektronenstrahls wie geplant auf 1 GeV zu steigern. Außerdem ist der Aus- und Einbau des fünften Moduls notwendig geworden, um die Motoren der Cavity-Tuner zu reparieren. Durch eine fehlerhafte Elektronik wurden die Tunermotoren beschädigt. Die Reparatur war erfolgreich; alle Motoren sind getestet und voll funktionsfähig.

Nach dem Umbau konnte die Strahlenergie nach dem dritten Modul, also im zweiten Bunchkompressor um 100 MeV auf 470 MeV erhöht werden. Mit den folgenden drei Modulen wird eine Endenergie von knapp über 1 GeV erreicht, was einer Wellenlänge der Undulatorstrahlung von 6.3 nm entspricht. Tatsächlich wurde die Energie neben der Messung mit dem Dipolspektrometer

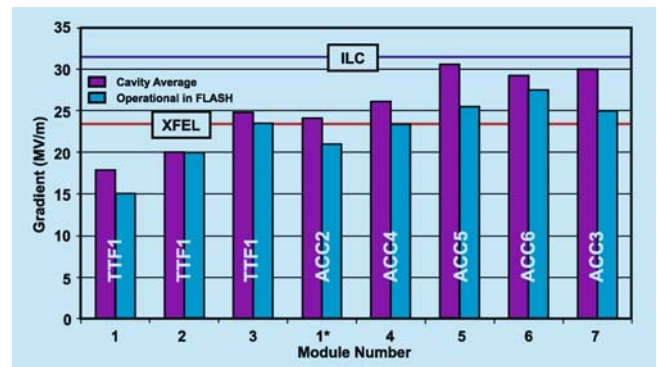


Abbildung 133: *Betreibbare Beschleunigungsgradienten von Modulen, die bei TTF1 in Betrieb waren (Module 1, 2 und 3) und den Modulen die jetzt bei FLASH eingebaut sind. Die roten Balken zeigen die Gradienten, die bei individueller Anpassung der RF-Leistung für jede Cavity erreichbar wäre, die blauen Balken zeigen die tatsächlich im Betrieb erreichten Werte. Da die Leistung auf die Cavities jedes Moduls (Ausnahme Modul 6) gleichverteilt werden, bestimmt im Betrieb die schwächste Cavity den Modulgradienten. Die Planungsziele für den Europäischen XFEL und den ILC sind eingezeichnet.*

auch durch die Messung der Wellenlänge der spontanen Undulatorstrahlung bestätigt.

Abbildung 133 zeigt die betreibbaren Beschleunigungsgradienten von Modulen, die bei TTF1 in Betrieb waren (Module 1, 2 und 3) und der Module, die momentan bei FLASH eingebaut sind. Die roten Balken zeigen die Gradienten, die bei individueller Anpassung der RF-Leistung für jede Cavity erreichbar wäre, die blauen Balken zeigen die tatsächlich im Betrieb erreichten Werte. Da die Leistung auf die Cavities jedes Moduls mit Ausnahme von Modul 6 gleichverteilt werden, bestimmt im Betrieb die schwächste Cavity den Modulgradienten. Die neuen Module 6 und 7 sowie die Module 4 und 5 erreichen oder übertreffen das Planungsziel für den Europäischen XFEL.

Durch die Off-Crest-Beschleunigung zur Komprimierung der Elektronenbunche, die für den SASE Prozess notwendig sind, gehen etwa 20 MeV verloren, so dass FEL-Strahlung mit einer Wellenlänge von 6.5 nm erreicht wurden (Abbildung 129).

## Longitudinale Bunchlängenmessung

Um die physikalischen Prozesse des SASE-Prinzips besser zu verstehen, ist eine genaue Kenntnis der longitudinalen Struktur der Elektronenbunche notwendig. Daher sind neben der existierenden THz-Diagnostik und der transversal ablenkenden Cavity LOLA zwei weitere Experimente eingebaut worden: das Optical-Replica-Experiment und ein Undulator zur Erzeugung von infraroter Strahlung. Da dieselben Elektronenbunche sowohl die infraroten Strahlungspulse als auch die FEL-Strahlungspulse erzeugen, sind beide zeitlich gekoppelt und können für Pump-Probe-Experimente genutzt werden.

## Elektronenquelle

Die gesamte Sektion zwischen der RF-Gun und dem ersten Modul wurde neu konstruiert. Die Vakuumkammern sind jetzt auf einer leicht justierbaren Platte montiert. Damit wurde die Aufstellgenauigkeit der Komponenten deutlich verbessert. Der Abstand der Polschuhe des Spektrometerdipols ist jetzt vergrößert und dadurch besser an die Strahlgröße in diesem Bereich angepasst. Das Design des Diagnosekreuzes ist weiter optimiert worden, um den Einfluss der Wakefelder auf die Elektronenbunche so klein wie möglich zu halten. Mit neuen eisenfreien Korrekturspulen können Orbitkorrekturen jetzt reproduzierbar eingestellt werden. Die Laserstrahlführung und die Strahlwege der Kamerasysteme zur Messung der Laser- und Elektronenstrahlprofile wurden verbessert.

Eine wichtige Verbesserung in der Kollimation des Dunkelstroms im Gun-Bereich ist dadurch erreicht worden, dass die RF-Gun um 30 cm vom Kollimator weg längs der Strahlachse verschoben wurde. Mit der neuen Anordnung werden jetzt etwa 70% des Dunkelstroms kollimiert. Eine weitere Reduktion wird mit dem Einbau eines Dunkelstromkickers an dem so freigewordenen Platz erwartet.

Trotzdem wird noch ein Teil des Dunkelstroms beschleunigt und führt an einigen Stellen zu einer un-

erwünschten Aufaktivierung von Vakuumkammern und anderen Elementen.

Die Undulatoren sind das Herzstück des FELs. Die Lebensdauer der Undulatoren ist durch die absorbierte Strahlungsdosis limitiert. Durch eine Reihe von Maßnahmen zur Reduktion der Strahlenbelastung ist die vom Undulator absorbierte Dosis weiter reduziert worden. Dazu gehören die Reduktion des Dunkelstroms der Elektronenquelle als auch eine verbesserte Elektronenstrahloptik und ein verbessertes Warnsystem, das bei erhöhter Belastung die Operateure warnt und gegebenenfalls den Strahl abschaltet.

Abbildung 134 zeigt die integrierte Strahlungsdosis gemessen im Undulator seit Anfang 2005. Jeder Messpunkt ist die Summe der während einer Woche gemessenen Dosen aller 30 Messpunkte entlang des Undulators. Die Dosen sinken kontinuierlich und erreichen Werte unter 100 Gy pro Woche, das sind im Mittel etwa 3 Gy pro Messstelle.

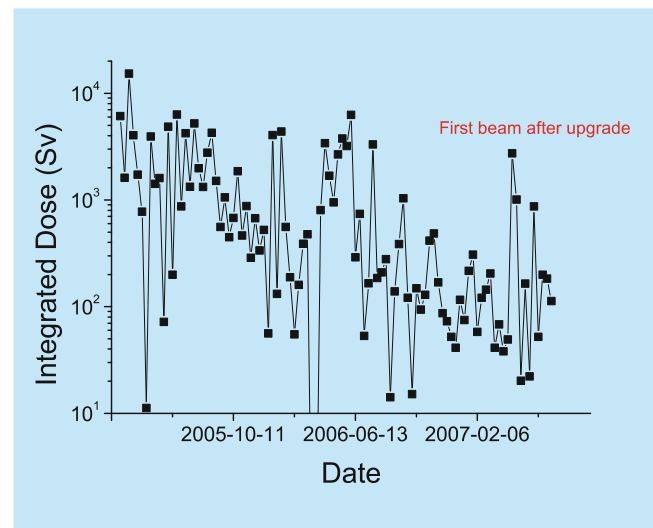


Abbildung 134: Integrierte Strahlungsdosis gemessen im Undulator seit Anfang 2005. Jeder Messpunkt ist die Summe der während einer Woche gemessenen Dosen aller 30 Messpunkte entlang des Undulators. Die Dosen sinken kontinuierlich und erreichen Werte unter 100 Gy pro Woche, im Mittel etwa 3 Gy pro Messstelle.

## Weitere Höhepunkte

Die Konditionierung der drei neu installierten Beschleunigungsmodule gelang sehr zügig innerhalb einer Woche. Damit erweist sich die Konditionierung der Koppler und Cavities im Modulteststand vor dem Einbau als Erfolg. Damit konnte die Anlaufzeit im Vergleich zu früheren Jahren erheblich verkürzt werden. Für die Konditionierung der Hauptkoppler werden sonst mehrere Wochen benötigt.

Ein weiterer wichtiger Höhepunkt war die Erzeugung von FEL-Strahlung in langen Pulszügen. FLASH kann innerhalb von Pulsen mit einer Dauer von 800  $\mu\text{s}$  bis zu 800 Pulse mit einem Abstand von jeweils 1  $\mu\text{s}$  erzeugen. Die Wiederholrate ist 5 Hz. Der Transport dieser Pulszüge ist sehr schwierig, da auch kleine Strahlverluste vermieden werden müssen. Der Pulszug liegt allerdings nur dann stabil, wenn das Beamloading durch Anpassung und Regelung der Amplitude und Phase der Beschleunigungsfelder korrekt über den gesamten Pulszug stabilisiert werden.

Zunächst wurde ein kürzerer Pulszug mit 300 bis 400 Pulsen erzeugt. Es gelang, über den gesamten Pulszug eine gleichmäßige Energieverteilung der FEL-Pulse zu realisieren. Die Wellenlänge betrug 13.5 nm, die Energie der Pulse lagen zwischen 20 und 30  $\mu\text{J}$  mit einem zeitlichen Abstand von 1  $\mu\text{s}$ .

Anschließend konnte zum ersten Mal der FEL-Pulszug auf 800 Pulse verlängert werden (Abbildung 135). Die Energie der Einzelpulse variiert jetzt allerdings zwischen etwa 5 und 20  $\mu\text{J}$ . Die mittlere Energie der Einzelpulse beträgt 14  $\mu\text{J}$ , also mehr als 11 mJ pro Pulszug. Mit einer Wiederholrate von 5 Hz ergibt das eine mittlere Leistung von 55 mW. Während des RF-Pulses ändert sich die Temperatur der RF-Gun, was zu einer Verstimmung führt. Dieser Effekt ist bei voller RF-Pulslänge von fast 1 ms besonders groß und führt zur in Abbildung 135 gezeigten Verteilung der Einzelpulsenergie.

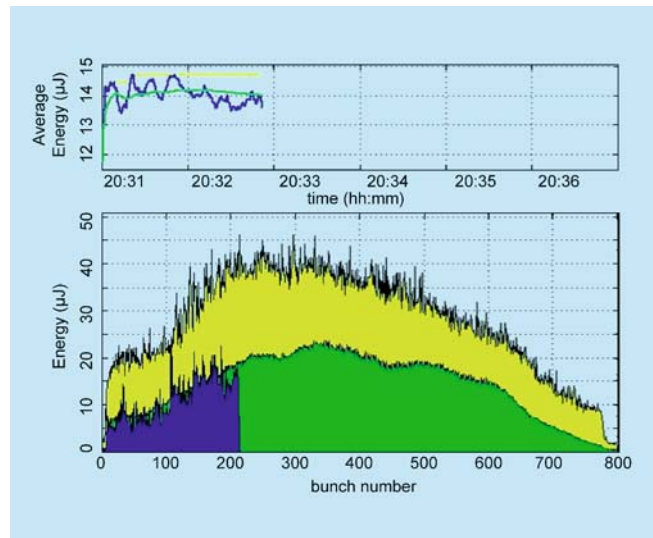


Abbildung 135: FEL-Strahlung im Pulszug von 800 Pulsen. Die Pulse haben einen zeitlichen Abstand von 1  $\mu\text{s}$ . Die Wellenlänge beträgt 13.4 nm. Gezeigt ist in Blau der momentane Pulszug, in Grün die mittlere Strahlungsenergie für jeden Puls, und in Gelb die maximale Energie innerhalb des Messzeitraums. Der obere Bereich der Graphik zeigt die mittlere Energie pro Puls gemessen mit dem Ionensignal des Gasmonitor-Detektors.

Eine weitere Verbesserung der RF-Regelung zur Kompensation dieses Effekts ist in Arbeit.

In der Regelung der RF sind weitere Fortschritte erzielt worden. Sowohl die RF-Gun als auch das erste Beschleunigungsmodul ACC1 sind jetzt standardmäßig mit FPGA unterstützter Elektronik (SIMCON3.1) ausgerüstet. Stabilität von Amplitude und Phase der RF sind hier besonders wichtig. Durch die verkürzte Latenzzeit der neuen Elektronik konnte eine außerordentlich gute Stabilität der RF-Phase in der Gun von Puls zu Puls von  $0.1^\circ$  (rms) bzw.  $0.4^\circ$  (pp) gemessen werden. Auch die Stabilität der Energie des Elektronenstrahls gemessen bei 127 MeV ist verbessert worden und liegt jetzt bei 0.016% (rms).