

Abbildung 94: Der SASE FEL für sehr kurze Wellenlängen nach Erweiterung der TESLA Test Facility (TTF FEL Phase 2).

Entwicklung eines Freie-Elektronen-Lasers für sehr kurze Wellenlängen

Das Prinzip des Freie-Elektronen-Lasers (FEL) ermöglicht es, mit sehr großer Effizienz Bewegungsenergie eines Elektronenstrahls in elektromagnetische Strahlung umzuwandeln. Durch das Prinzip der selbst-verstärkten spontanen Emission („Self-Amplified Spontaneous Emission“ SASE) und durch den Einsatz eines Linearbeschleunigers mit exzellenter Strahlqualität sollte sich ein FEL auch im VUV- und Röntgenbereich betreiben lassen. Dies verspricht gegenüber derzeitigen Synchrotronstrahlungsquellen eine Verbesserung der Photonenstrahl-Qualität, die in einigen Aspekten acht bis zehn Größenordnungen beträgt.

Das Grundprinzip und die wichtigsten Komponenten wurden im DESY Jahresbericht 1995 beschrieben. Der SASE FEL bei DESY wird an der TESLA Test Facility (TTF) installiert, weil dieser Linearbeschleuniger als idealer Treiber für einen FEL angesehen wird. Die Realisierung erfolgt in zwei Stufen: Die erste Phase verfolgt das Ziel eines sogenannten „Proof of Principle“, das heißt den Nachweis, dass das SASE-Verfahren bei Wellenlängen im Bereich zwischen 70 und 140 nm so funktioniert wie erwartet und dass die erforderliche Elektronenstrahl-Qualität technisch realisierbar ist. In der zweiten Ausbaustufe soll der TTF-Linac durch Installation von mindestens fünf weiteren Linac-Abschnitten auf über 1 GeV Strahlenergie erweitert und der Undulator auf etwa 30 m verlängert werden. Diese Anlage wird weniger als 6 nm Wellenlänge erreichen und soll Nutzern zur Verfügung stehen.

Die ganze Entwicklung erfolgt unter maßgeblicher Unterstützung von Wissenschaftlern aus 37 Instituten aus elf Nationen. Abbildung 94 gibt einen Überblick über beide Phasen der im Bau befindlichen Anlage.

Die Arbeiten im Berichtszeitraum konzentrierten sich auf den Einbau und die Inbetriebnahme der

Komponenten für Phase 1, den Rohbau für Phase 2 sowie auf die Studien zu einem Höchstleistungs-FEL im Sub-Nanometer-Bereich, der als integraler Bestandteil des TESLA-Projekts geplant wird.

Aufbau der Komponenten für Phase 1

Das Herzstück eines FELs ist der Undulator, der das alternierende magnetische Feld erzeugt, in dem der FEL-Prozess ablaufen kann. Für die Phase 1 wurde ein 14 m langer Undulator gebaut, der aus drei je 4.5 m langen Abschnitten besteht, zwischen denen jeweils ein etwa 30 cm langer Block zur Strahldiagnose eingebaut wurde. Nach der sehr genauen Einmessung der Magnete auf einer hochpräzisen Granitbank wurde der Undulator in den vorgesehenen klimatisierten Abschnitt des Beschleunigers eingebaut. Dort wurden die Undulatorabschnitte mit einem speziell entwickelten Laserinterferometrischen Aufbau relativ zueinander auf etwa 20 µm genau ausgerichtet. Anschließend wurde die Vakuumkammer eingelegt, die ein Kollaborationsbeitrag des Argonne National Laboratory (USA) ist und in die 30 Strahllagemonitore sowie ebenso viele Korrekturmagnete integriert sind. Abbildung 95 zeigt die fertige Installation.

Da der Beschleuniger für eine sehr hohe mittlere Strahlleistung (etwa 30 kW in Phase 1) ausgelegt ist, wurde ein Kollimatorsystem aufgebaut, welches den Undulator davor schützt, von unkontrollierten Teilen des Elektronenstrahls getroffen zu werden. Abbildung 96 zeigt diesen Abschnitt des Beschleunigers nach Abschluss des Aufbaus. Die weiteren für den FEL wesentlichen Baugruppen, nämlich der sogenannte Bunch-Kompressor, die Photon-Diagnostik und die Elektronenquelle wurden bereits in früheren Jahresberichten beschrieben.



Abbildung 95: Der Undulator für den TTF FEL nach seinem Einbau in den Beschleuniger. Die Vakuummkammer für den Elektronen-Strahl befindet sich in der Mittelebene, zu erkennen an den vielen Signal- und Stromversorgungskabeln, die dort hinein- und herausführen.

Teststand für Elektronenquellen

Die Elektronenquelle ist die kritischste Komponente für SASE FELs und es ist absehbar, dass noch einige Jahre intensiver Forschung und Entwicklung notwendig sind, bevor diese sogenannten Photoinjektoren routinemäßig diejenigen Strahlparameter erreichen, die für FELs im Nanometer-Bereich erforderlich sind. Damit die erforderlichen Tests nicht am TTF-Beschleuniger durchgeführt werden müssen und dadurch das dortige Forschungsprogramm behindern, wurde ein separater Teststand entworfen. Aus dem „Vernetzungsfonds“ der Helmholtz-Gemeinschaft HGF wurden 1999 Sondermittel genehmigt, um im Rahmen einer Kollaboration mit dem Max-Born-Institut Berlin, BESSY Berlin und der TU Darmstadt einen solchen Teststand bei

DESY Zeuthen aufzubauen. Vom INFN Milano wurde im Berichtsjahr ein neues, verbessertes Vakuumsystem zum Transport, zur Manipulation und zum Einbau der Photokathoden (Cs_2Te) beigesteuert.

Inbetriebnahme

Nach Abschluss der Aufbauarbeiten konnte im August 1999 die Inbetriebnahme beginnen. Das wichtigste Ziel der Inbetriebnahmephase war es, schnell einen Elektronen-Strahl durch den gesamten Beschleuniger inklusive Undulator zu fädeln, damit möglichst viele Komponenten quasi gleichzeitig am Strahl getestet werden konnten. Dies gelang innerhalb weniger Tage. Es stellte sich heraus, dass eine Reihe von Verbesserungen



Abbildung 96: Das Kollimatorsystem schützt den Undulator vor unkontrollierten Teilen des Elektronen-Strahls. Im Hintergrund ist die Klimakammer für den Undulator zu erkennen.

erforderlich waren, um einen Test des SASE-Prinzips zu ermöglichen:

- Da die Strahlemittanz unter schlecht kontrollierten Bedingungen bei weitem zu groß war, musste ein schnelles Verfahren entwickelt werden, die Strahlemittanz an mehreren Stellen entlang des Beschleunigers zu messen. Dadurch konnten die kritischen Parameter identifiziert und unter Kontrolle gebracht werden. Gegen Ende 1999 war es möglich, im Undulator routinemäßig normierte Emittanzen zwischen 5 und 20π mrad mm zu verifizieren. Dies liegt zwar immer noch über dem Designwert von 3π mrad mm, aber schon nahe an dem Bereich, in dem eine nennenswerte FEL-Verstärkung möglich wäre. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Monitorblöcke, die zwischen die Undulatorabschnitte

eingebaut sind (Abb. 97). Sie enthalten Drahtscanner, mit denen das Profil des Elektronenstrahls mit einer Auflösung von besser als $10 \mu\text{m}$ genau vermessen werden kann. Eine solche Messung ist in Abbildung 98 wiedergegeben.

- Die Justierung des Kollimatorsystems sowie der Undulatorkammer in Bezug auf die Undulatorachse musste verbessert werden, um den Elektronenstrahl so genau auf die Achse des Undulators zu setzen, dass die Strahlverluste tolerabel blieben. Als Hauptursache für Strahlverluste im Undulator wurden die Dunkelströme erkannt, die von der Elektronenquelle erzeugt werden. Durch Verbesserung des Vakuums konnten diese Effekte weit unter das tolerable Maß gebracht werden. Eine Messgenauigkeit der absoluten Strahlage im Undulator (das heißt bezogen auf die Sollachse) von besser als 0.5 mm war wegen



Abbildung 97: Der Monitorblock, der zwischen die Undulator-Abschnitte eingebaut wurde, enthält dünne Drähte, mit denen das Elektronen-Strahlprofil sowohl horizontal als auch vertikal auf besser als $10\ \mu\text{m}$ genau abgetastet werden kann. Das Foto zeigt die Vorrichtungen zum Fahren der Drähte, die an die Vakuumkammer angebaut sind.

einer Verzögerung bei der Fertigung der Elektronik für die Strahlmonitore im Jahr 1999 nicht möglich.

- Eine Kompression der Länge der Elektronen-Pakete auf unter $0.5\ \text{mm}$ (rms) konnte routinemäßig im sogenannten Bunchkompressor erzielt und nachgewiesen werden. Die Arbeiten zur Verbesserung der Messverfahren des longitudinalen Strahlprofils, die unter anderem in Kollaboration mit der TU Darm-

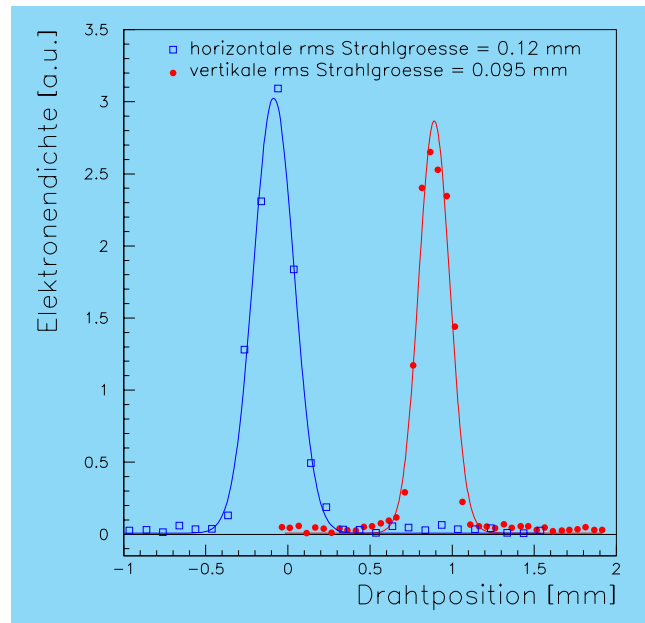


Abbildung 98: Horizontales bzw. vertikales Strahlprofil im Undulator, gemessen mit Drahtscannern. Der Designwert der rms Strahlgröße liegt bei $80\ \mu\text{m}$.

stadt und der RWTH Aachen durchgeführt wurden, wurden fortgesetzt.

- Da die Photonen-Diagnostik für einen sehr großen dynamischen Bereich ausgelegt werden musste, war es zunächst schwierig, das Spektrum der spontanen Undulatorstrahlung zu messen. Instrumentelle Verbesserungen und zusätzliche Abschirmung gegen Strahlungsuntergrund führten hier zum Erfolg.

Weitere Untersuchungen und Maßnahmen betrafen die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Maschinenbetriebs, weil dies sowohl für SASE-Experimente als auch für späteren Nutzerbetrieb bedeutsam sein wird.

Phase 2

Das Ziel der zweiten Ausbaustufe ist es, noch kürzere Wellenlängen zu erreichen und den Strahl für Experimente zur Verfügung zu stellen. Die erforderliche Tunnelverlängerung wurde 1999 im Rohbau fertiggestellt. Die Beschleunigerkomponenten sollen, wie auch im zukünftigen TESLA-Projekt, mit einer Monorail transportiert werden. Die zukünftige Experimentierhalle konnte

am 14. Oktober 1999 Richtfest feiern. Sie wird zunächst für die Nutzung als Ausstellungshalle im Rahmen der Weltausstellung EXPO 2000 vorbereitet. Hinsichtlich der Ausrüstung des Beschleunigtunnels konzentrierten sich die Arbeiten auf die Festlegung der Strahlführung. Das CE Saclay/F hat beschlossen, im Rahmen der TESLA-Kollaboration den Entwurf und den Bau eines weiteren Bunch-Kompressors beizusteuern, in dem die Länge des Elektronen-Paketes („Bunch“) auf $50\ \mu\text{m}$ (rms) verkürzt werden soll.

Vorstudien zu einem Röntgen-FEL

Die Studien zum Entwurf eines Höchstleistungs-FELs für Wellenlängen bis hinunter zu $0.1\ \text{nm}$ (kurz: XFEL) wurden fortgesetzt. Die Arbeiten konzentrierten sich darauf, technisch-wissenschaftliche Fragen zu identifizieren, die vor der Abfassung des Technischen Design Reports für TESLA (geplant für 2001) zu klären sind. Dazu gehörten:

- Die Geometrie der Strahlweiche zur Aufteilung der Elektronen-Pakete auf die verschiedenen Nutzer wurde so verbessert, dass die Kosten für Bauwerke und Strahlführung reduziert wurden.
- Eine Studie über die Beeinflussung der Strahlqualität ultrakurzer Elektronen-Pakete durch induzierte Störfelder („Wake Fields“), verursacht durch die Oberflächenrauigkeit der Vakuumkammer, wurde, in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt, abgeschlossen.
- Im Rahmen einer neuen Kollaboration mit der ESRF in Grenoble/F wurde die Möglichkeit untersucht, die Wellenlänge für jeden Nutzer dadurch individuell einzustellen, dass das Magnetgap der Undulatoren variabel gemacht wird. Diese im Prinzip erprobte Technik muss hinsichtlich der Machbarkeit und der Kosten besonders geprüft werden, weil die Undulatoren für XFELs etwa $100\ \text{m}$ lang sein werden und engen mechanischen Toleranzen unterliegen.