

Entwicklung eines Freie-Elektronen Lasers für sehr kurze Wellenlängen

Im Februar 2000 wurde mit dem Linearbeschleuniger der TESLA Test Facility das Prinzip der selbstverstärkten spontanen Emission („Self-Amplified Spontaneous Emission“ SASE) bei der Wellenlänge 109 nm in einem Freie-Elektronen Laser (FEL) nachgewiesen.

In den folgenden Monaten konnte mit Elektronenstrahl-Energien zwischen 180 MeV und 280 MeV das SASE-Prinzip im Wellenlängenbereich zwischen 80 nm und 180 nm demonstriert werden.

Nach einer zweimonatigen Betriebspause konnte innerhalb der ersten zehn Tage der Elektronenstrahl wieder zur Emission gebracht werden, was für die gute Reproduzierbarkeit der Elektronenstrahl-Qualität des supraleitenden Linearbeschleunigers spricht.

In dieser kurzen Betriebspause wurden die Spiegelkammer des RAFEL-Experimentes und das Wakefield-Experiment eingebaut. Das RAFEL-Experiment („Regenerative Amplifier FEL“) wurde konzipiert, um das FEL-Licht hinsichtlich seiner Monochromatizität, der Sättigung und der vollen dreidimensionalen Kohärenz zu optimieren.

Das sogenannte Wakefield-Experiment ist von fundamentaler Bedeutung für die Beschleunigerphysik und hat wesentliche Konsequenzen für die Planung des TESLA-FEL. In diesem Experiment wird der Einfluss der Oberflächenrauigkeit von verschiedenen Strahlrohren auf die Elektronenstrahl-Qualität untersucht.

Ferner konzentrierten sich die Arbeiten im Berichtszeitraum auf den Rohbau für Phase 2 sowie auf die detaillierte Planung zu einem Höchstleistungs-FEL im Sub-Nanometer-Bereich, der als integraler Bestandteil des TESLA-Projektes angebaut wird.

SASE-FEL im Ultravioletten

Das Prinzip des FEL ermöglicht es, mit sehr großer Effizienz Bewegungsenergie eines Elektronenstrahls in elektromagnetische Strahlung umzuwandeln. Durch das Prinzip der SASE und durch den Einsatz eines Linearbeschleunigers mit exzellenter Strahlqualität sollte sich ein FEL auch im Röntgenbereich betreiben lassen. Die Realisierung eines FELs im ultravioletten Bereich demonstrierte die technische Machbarkeit der erforderlichen Elektronenstrahl-Qualität sowie eines hochpräzisen Undulators. Die Messung von mehreren Photonenstrahl-Parametern durch die von HASYLAB hergestellte Photonen-Diagnostik zeigte die erwarteten Eigenschaften solcher Art Synchrotronstrahlungsquellen: hohe Brillianz (Abb. 112) und schmales Spektrum der Wellenlängen (Abb. 113) für eine Elektronenstrahlenergie von 233 MeV.

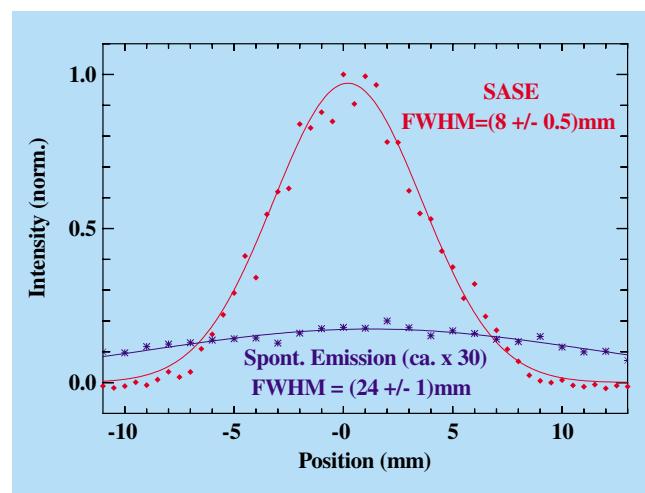


Abbildung 112: Profil des FEL-Photonenstrahls im Vergleich zum Profil der spontanen Undulator-Emission, gemessen mit einer PtSi Photodiode, deren horizontale Position variiert wurde.

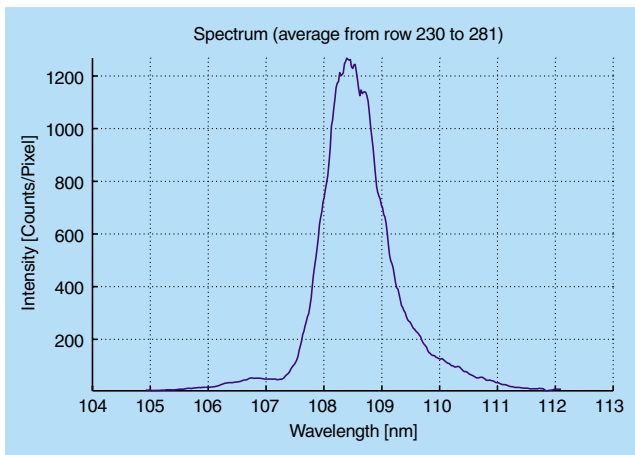


Abbildung 113: *Spektrum des SASE-FEL-Lichts.*

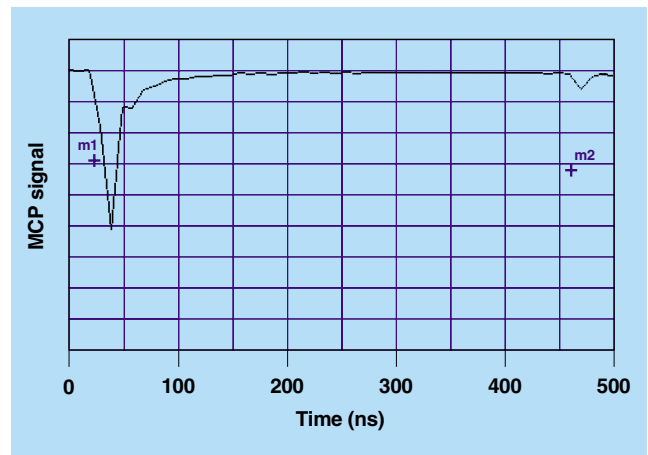


Abbildung 115: *Erster Nachweis der punktgenauen Reflexion von Licht auf dem Micro-Channel Plate (MCP)-Detektor.*

RAFEL-Experiment

Abbildung 114 zeigt eine schematische Darstellung des RAFEL-Prozesses. Im Wellenlängenbereich unter 100 nm liegt die Reflexion eines Spiegels bei nur einigen Prozent. Deshalb kann nur ein winziger Teil des Lichts als Eingabelicht (Seed) für den FEL-Prozess verwendet werden. Wenn ein neues Elektronenpaket den Undulator erreicht, verstärkt es das Licht um drei oder vier Größenordnungen. Dieses sollte die starken Verluste durch die geringen Reflexionen kompensieren und

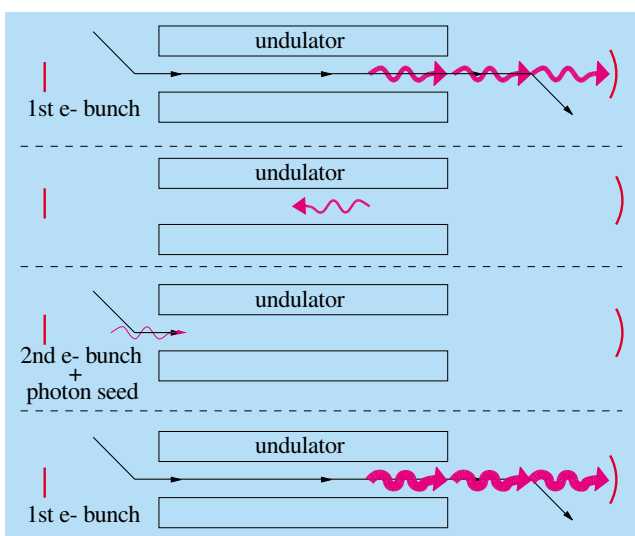


Abbildung 114: *Schematische Darstellung des RAFEL-Prozesses.*

eine Gesamtverstärkung von 10 oder mehr ergeben. Nach dem Durchlauf von mehreren Elektronenpaketen durch den Undulator sollte die Sättigung des FEL-Prozesses eintreten. Dafür ist die Synchronisierung des Lichtes mit dem nächsten Elektronenpaket durch die genaue Einstellung des Abstands zwischen den beiden Spiegeln erforderlich. Zusätzlich ist eine sehr präzise Ausrichtung der Spiegel parallel zueinander nötig, um das Licht auf der Achse des Undulators zu führen. Die Spiegelkammern wurden im Sommer 2000 installiert. Als erster Schritt wurde die parallele Ausrichtung der Spiegel erfolgreich durch die Reflexion von Licht auf dem MCP-Detektor (Abb. 115) nachgewiesen.

Undulator Strahlagementore

Die Undulatorstrecke besteht aus drei separaten Modulen mit jeweils einer speziellen Vakuumkammer, in welche 10 Strahlagementore sowie ebenso viele Korrekturmagnete integriert sind. Im Juli wurden die beiden ersten Module, deren Strahlagementore aus Antennen-Elektroden bestehen, mit der entsprechenden Monitorelektronik ausgerüstet. In das dritte Modul, in welchem Strahlagementore mit Mikrowellenleitern eingebaut sind, wurde die Monitorelektronik Anfang Dezember installiert. Beide Elektroniktypen messen die Lage einzelner Elektronenpakete mit

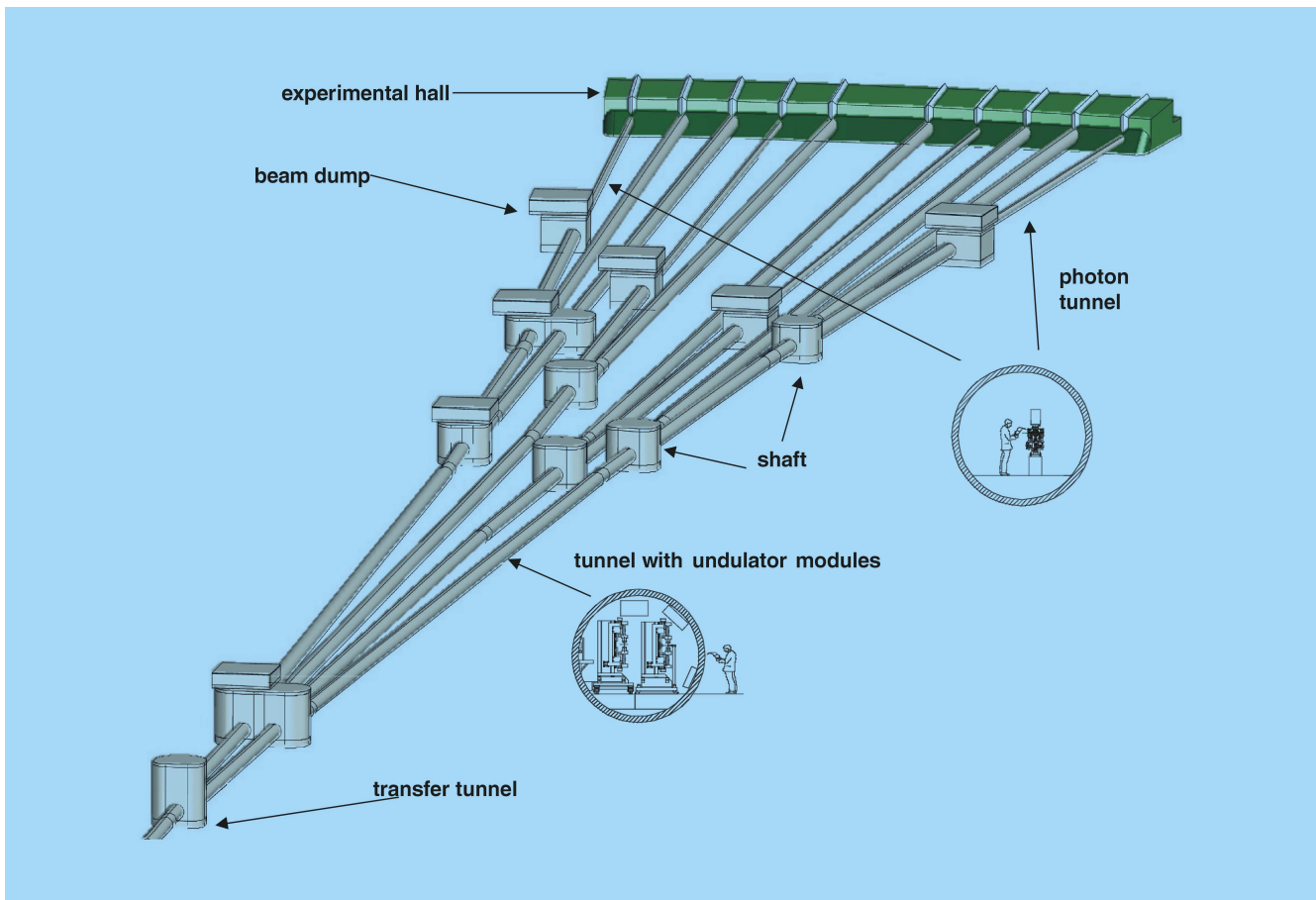


Abbildung 116: Schematische Darstellung der geplanten Strahlweiche zur Aufteilung der Elektronenpakete auf die verschiedenen XFEL-Nutzer.

einer Genauigkeit von etwa $10\ \mu\text{m}$. Mit Hilfe dieser Messungen wird die Strahlage so optimiert („Beam-Based Alignment“), dass die Wechselwirkung zwischen dem Elektronenstrahl und den FEL-Photonen einen Maximalwert annimmt. Außerdem wurde der Aufbau eines BTM („Beam Trajectory Monitor“) Prototyps fertig gestellt. Das Detektorsystem wurde bereits im Jahresbericht 1999 beschrieben. Der BTM wird die Vakuumkammer des Wakefield-Experiments ersetzen.

Wakefield-Experiment

Die Beeinflussung der Strahlqualität ultrakurzer Elektronenpakete durch induzierte Störfelder („Wake-

fields“), verursacht durch die Oberflächenrauigkeit der Vakuumkammer, kann den FEL-Prozess ernsthaft beeinträchtigen. Hier wurden zwei wichtige Fortschritte erzielt: Die Rauigkeit existierender Kammern wurde gemessen und in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt wurde ein Verfahren gefunden, die resultierenden Störfelder zu simulieren. Außerdem wurde ein Strahlrohr mit definierten, absichtlich vergrößerten Rauigkeiten präpariert, eingebaut und die Beeinflussung des Elektronenstrahls gemessen. Erste Ergebnisse zeigen deutliche Veränderungen an der Energieverteilung des Elektronenpakets. Eine erste Analyse zeigt, dass die beobachteten Effekte gut durch die Theorie beschrieben werden. Zukünftig sind direkte Messungen des Störfelds mit sehr empfindlichen Detektoren im Mikrowellenbereich geplant.

Teststand für Elektronenquellen

Die Elektronenquelle ist eine wesentliche Komponente für SASE FELs. Es ist absehbar, dass noch einige Jahre intensiver Forschung und Entwicklung notwendig sind, bevor diese sogenannten Photoinjektoren routinemäßig die Strahlparameter erreichen, die für FELs im Nanometerbereich erforderlich sind. Die notwendigen Tests können nicht am TTF-Beschleuniger durchgeführt werden, da sie dadurch das dortige Forschungsprogramm behindern. Deshalb wurde ein separater Teststand entworfen. Dieser wird bei DESY-Zeuthen aufgebaut im Rahmen einer Kollaboration mit dem Max-Born-Institut Berlin, BESSY Berlin, dem INFN Milano und der TU Darmstadt (Abb. 85, Seite 160).

TTF Phase 2

In der zweiten Ausbaustufe soll der TTF-Linac durch Installation von vier weiteren Linac-Abschnitten auf 1 GeV Strahlenergie erweitert werden. Zusätzlich soll der Undulator auf etwa 30 m verlängert werden. Diese Anlage wird FEL-Strahlung mit Wellenlängen bis zu 6 nm erzeugen und soll Nutzern zur Verfügung stehen.

Die gesamte Entwicklung erfolgt unter maßgeblicher Unterstützung von Wissenschaftlern aus 37 Instituten in elf Nationen. Ein Überblick über beide Phasen der

im Bau befindlichen Anlage wurde bereits im Jahresbericht 1999 gezeigt. Die erforderliche Tunnelverlängerung und die Experimentierhalle wurden fertiggestellt und als Ausstellungshalle im Rahmen der Weltausstellung EXPO 2000 genutzt. Hinsichtlich der Ausrüstung des Beschleunigertunnels konzentrierten sich die Arbeiten auf die Festlegung der Strahlführung.

Studien zu einem Röntgen-FEL

Die Studien zum Entwurf eines Höchstleistungs-FEL für Wellenlängen bis hinunter zu 0.1 nm (kurz: XFEL) wurden fortgesetzt. Die Arbeiten konzentrierten sich auf Fragen, 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 Elektronenpakete auf die verschiedenen Nutzer wurde so verbessert, dass die Kosten für Bauwerke und Strahlführung reduziert wurden und die Beeinträchtigung von Umwelt und Landschaft so gering wie möglich ist. Abbildung 116 zeigt schematisch die geplante Geometrie.
- Im Rahmen von Kollaborationen mit BESSY und mit dem INR/Moskau wurde die Elektronenoptik detailliert ausgelegt und untersucht.