

Abbildung 128: 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 8–10 Größenordnungen beträgt.

Das Grundprinzip und die wichtigsten Komponenten wurden in früheren Jahresberichten beschrieben (u.a. 1995). 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 so genannten „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 vier weiteren Linac-Abschnitten auf 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 mit maßgeblicher Unterstützung von Wissenschaftlern aus 37 Instituten aus elf Nationen. Abbildung 128 gibt einen Überblick über beide Phasen der Anlage.

Die Arbeiten zum FEL im Berichtszeitraum 2001 konzentrierten sich auf die Demonstration der vol-

len FEL-Leistung an Phase 1 einschließlich erster Pilot-Experimente durch wissenschaftliche Nutzer, die technische Konstruktion und Auftragsvergabe für Phase 2 sowie auf den Technical Design Report (TDR) zu einem Höchstleistungs-FEL im Sub-Nanometer-Bereich, der als integraler Bestandteil des TESLA-Projekts geplant wird.

Der FEL an der TTF

Phase 1

Im Laufe des Jahres 2001 gelang es, die Verstärkungsleistung des FEL gegenüber dem im Vorjahr erreichten Wert von 10^3 – 10^4 schrittweise um mehrere Größenordnungen zu erhöhen. Der Erfolg beruhte auf der Optimierung nicht eines einzelnen, sondern mehrerer Betriebsparameter, wie der Einstellung des Bunch-Kompressors, des Photoinjektors und der Elektronenstrahlage im Undulator. Dem Wunsch der ersten wissenschaftlichen Nutzer folgend, konzentrierten sich die Bemühungen auf den Wellenlängenbereich zwischen 80 nm und 120 nm. Am 10. September wurde der maximal mögliche Verstärkungsfaktor von 10^7 erreicht.

Der Nachweis, dass Lasersättigung erreicht wurde, erfolgte durch genaue Vermessung der Eigenschaften des Laserstrahls. Die Strahlungsintensität als Funktion der longitudinalen Koordinate im Undulator ist in Abbildung 129 zu sehen. Da die Intensität nur am Ausgang des Undulators gemessen werden kann, wurde diese Information dadurch gewonnen, dass die aktive Länge des Undulators absichtlich schrittweise verkürzt wurde. Das ist möglich, indem die Korrekturmagnete für die Elektronenstrahlage einer nach dem anderen, und zwar von hinten beginnend, so stark erregt werden, dass der Überlapp zwischen Elektronen- und Photonenstrahl zerstört und dadurch der FEL-Prozess gestoppt

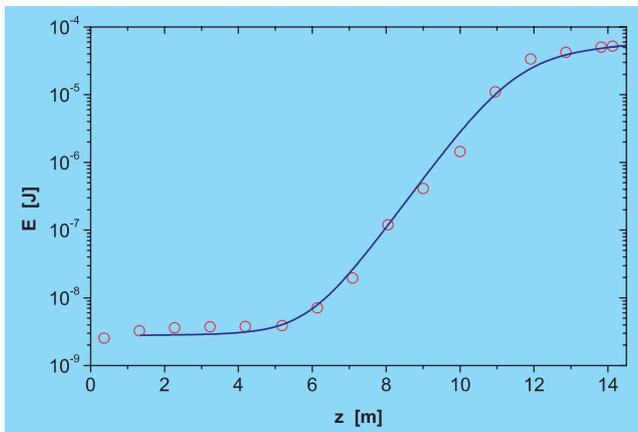


Abbildung 129: Mittlere Energie der FEL-Strahlungspulse (vertikale Achse in logarithmischem Maßstab) bei 98 nm Wellenlänge als Funktion der aktiven Länge des Undulators. Kreise: Messwerte. Kurve: Numerische Simulation.

wird. Auf den letzten zwei Metern knickt die Verstärkungskurve deutlich vom exponentiellen Anstieg ab, was ein Hinweis auf das Erreichen der Sättigungsleistung ist. Im ersten Teil des Undulators ist der exponentielle Anstieg in dieser Darstellung nicht sichtbar, weil er von der spontanen Strahlung des Undulators überdeckt wird. Die gemessene absolute Pulsenergie sowie der Öffnungswinkel der Strahlung stimmen mit den theoretisch erwarteten Werten für Lasersättigung überein.

Durch eine Verbesserung der Messtechnik wurde es möglich, die Spektren einzelner Laserpulse zu messen. Einige solcher Spektren sind in Abbildung 130 zu sehen, zusammen mit dem gemittelten Spektrum vieler FEL-Pulse. Aus diesen Spektren lässt sich der wichtige Schluss ziehen, dass die Strahlungspulse nur etwa 50 fs lang sind. Dass die Spektren innerhalb einer festen Bandbreite beträchtlich fluktuieren, ist mit dieser Feststellung konsistent.

Die Strahlungsleistung im Puls beträgt etwa 1 GW. Mit der erreichten Spitzenbrillanz ist der TTF FEL millionenfach besser als moderne Speicherringe für Synchrotronstrahlung und tausendfach besser als jede andere heute verfügbare Strahlungsquelle in diesem Wellenlängenbereich. Der TTF FEL hat damit die wesentlichen Entwurfparameter für Phase 1 erreicht.

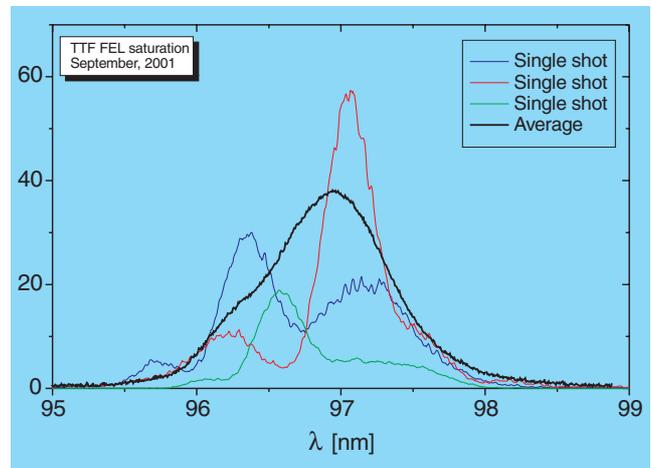


Abbildung 130: Spektren einzelner FEL-Strahlungspulse (dünne, farbige Linien) und des gemittelten Spektrums (dicke Linie) bei Sättigung der Leistung.

Wenige Tage nach dem Erreichen der Sättigungsleistung nahmen erste wissenschaftliche Nutzer den Experimentierbetrieb auf. Obwohl die TTF in der Phase 1 nicht für einen routinemäßigen Experimentierbetrieb vorgesehen und ausgerüstet wurde, konnte schon nach wenigen Wochen eine hohe Zuverlässigkeit des Nutzerbetriebs im 24-Stunden-Betrieb erreicht werden (Abb. 131).

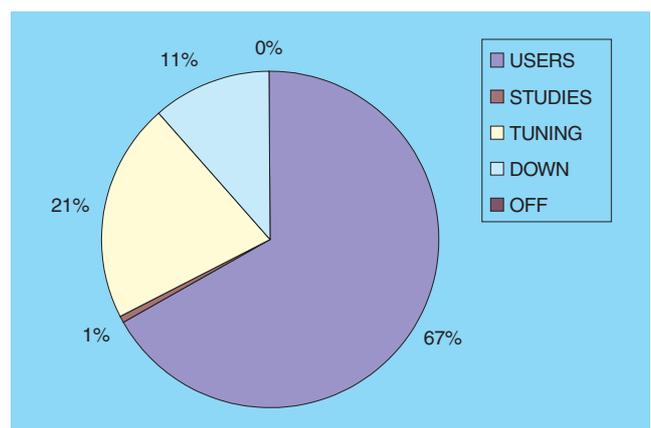


Abbildung 131: Betriebsstatistik der TTF während der Woche 8.10.01 – 14.10.01. Während zwei Drittel der gesamten Betriebszeit war der FEL in Sättigung und lieferte Strahl für wissenschaftliche Nutzer. 21% der Zeit wurde verwendet, um diesen Zustand zu erreichen bzw. zu erhalten.

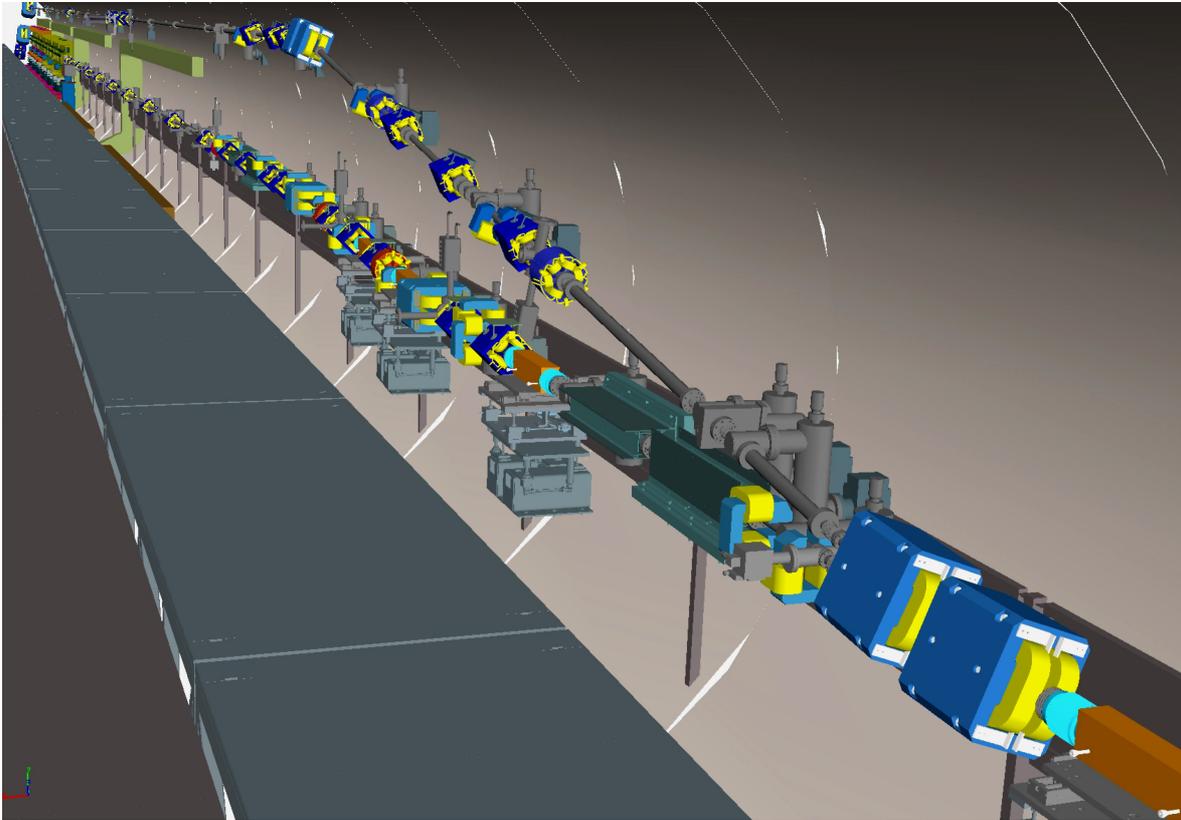


Abbildung 132: Dreidimensionale Konstruktionszeichnung für TTF2 im Bereich der Abzweigung des Undulator-Bypasses mit Blick in Strahlrichtung.

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 fertig gestellt. Der Einbau der Beschleunigerkomponenten und Undulatoren ist für die Jahre 2002–2003 geplant, so dass sich die Arbeiten im Jahr 2001 auf den Abschluss der Konstruktion nahezu sämtlicher Bauteile und auf die Bestellung der zu beschaffenden Komponenten konzentrierte.

Die Beiträge der Technischen Gruppen sind in deren Berichtsteil beschrieben und betreffen unter anderem:

MKK: Modulare Container zur Versorgung unterschiedlicher Bauteile im Tunnel mit Strom, Wasser und Elektronik wurden entwickelt, die voll bestückt unter die Lauffläche im Tunnel eingebaut und schnell an-

geschlossen werden können. Diese technische Lösung wird später bei der Realisierung des TESLA-Projektes von großem Nutzen sein.

MVA, MVP, Zeuthen, ZM1: Die einzelnen Vakuumabschnitte wurden von verschiedenen Gruppen übernommen, wobei MVP die vakuumtechnische Koordination und ZM1 die Erstellung einheitlicher Übersichtszeichnungen verantwortet. Besonderes Augenmerk erforderten

- die erforderliche Partikelfreiheit (zur Vermeidung von Kontamination des supraleitenden Beschleunigers),
- die gewünschte Glattheit der inneren Vakuumkammer-Oberfläche (kritisch wegen der extrem kurzen Elektronenpakete und der engen Toleranz des FELs gegen Energiebreite des Elektronenstrahls) erforderte spezielle Lösungen, zum Beispiel HF-Abschirmungen für Wellbälge,

- keramische Vakuumkammern mit einer dünnen Edelstahlbeschichtung für sehr schnell gepulste Korrekturmagnete, mit deren Hilfe die Elektronenstrahlage im Undulator auf besser als $10\ \mu\text{m}$ stabilisiert werden soll,
- ein System verstellbarer Absorberblenden, mit deren Hilfe der Undulator gegen Strahlenschäden durch Elektronen mit zu großer Abweichung vom Sollwert geschützt wird,
- ein zweiter Strahlweg für die Elektronen am Undulator vorbei. Er wird unter die Tunneldecke gehängt und ermöglicht die Inbetriebnahme und Optimierung der Elektronenstrahlparameter, ohne den Strahl durch den Undulator führen zu müssen. Dieser Bypass wird auch verwendet, um ein Target aufzubauen, mit dem mechanische Eigenschaften verschiedener Materialien unter Beschuss mit konzentrierten Elektronenstrahlen untersucht werden sollen.

Ein Teil des Strahlweges für TTF2 ist in Abbildung 132 dargestellt.

MDI: Die Instrumentierung des TTF2-Beschleunigers erfordert wegen der extremen Strahlparameter und der engen Toleranzen einige anspruchsvolle Neuentwicklungen. Dabei sind die an TTF1 gewonnenen Erfahrungen eine unverzichtbare Grundlage. Einige der Projekte werden in Kollaborationen mit anderen DESY-Gruppen sowie mit in- und ausländischen Instituten

bearbeitet. Als Beispiel sei ein neuartiges, auf Glasfasern basierendes Dosimetersystem genannt, welches in Zusammenarbeit mit dem Hahn-Meitner-Institut (Berlin) und der Fraunhofer-Gesellschaft (INT Euskirchen) entwickelt wurde und auf eine vergleichsweise einfache und preiswerte Weise eine orts aufgelöste Online-Information über die Verteilung der Strahlungs-dosis auch an schwer zugänglichen Bauteilen erlaubt.

MKS: Der Umbau des Injektors für TTF2 erfordert wesentliche Änderungen der Heliumkälteverteilung für die Anschlüsse der ersten beiden Kryomodule (ACC1 und ACC2). Die benötigten Komponenten wurden spezifiziert und zur Beschaffung ausgeschrieben. Im November 2001 wurden zum ersten Mal probeweise die Kompressoren der HERA-Kälteanlage benutzt, um die 900 W Coldbox der TTF-Anlage zu versorgen.

Vorstudien zu einem Röntgen-FEL als Teil des TESLA-Projektes

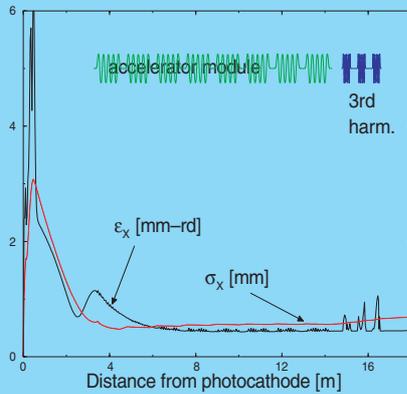
Die Studien zum Entwurf eines Höchstleistungs-FELs für Wellenlängen bis hinunter zu $0.1\ \text{nm}$ (kurz: XFEL) wurden fortgesetzt. In der ersten Hälfte des Berichtszeitraums konzentrierten sich die Arbeiten darauf, technisch-wissenschaftliche Fragen zu klären, die für die Spezifikation und Kostenermittlung des XFEL-Labors wesentlich waren, sowie auf die Abfassung

Verwendetes Programm	Institut der Autoren	Zweck
ASTRA	DESY	Raumladungsdominierter Strahltransport
TraFiC4	DESY	Selbstkonsistente Berechnung der kohärenten Synchrotronstrahlung und ihrer Wirkung auf den Strahl
MAFIA	DESY/TUD/CST	Berechnung elektromagnetischer Felder, z.B. Wakefields
elegant	ANL Argonne	Schnelle Verfolgung von Elektronenbahnen einschließlich vereinfachter Behandlung von Wakefields und kohärenter Synchrotronstrahlung
GENESIS1.3	DESY	Dreidimensionale Berechnung des SASE FEL-Prozesses unter Berücksichtigung von Feldstörungen
FAST	DESY/JINR	Schnelle Berechnung des SASE FEL-Prozesses zur Optimierung von Parametern

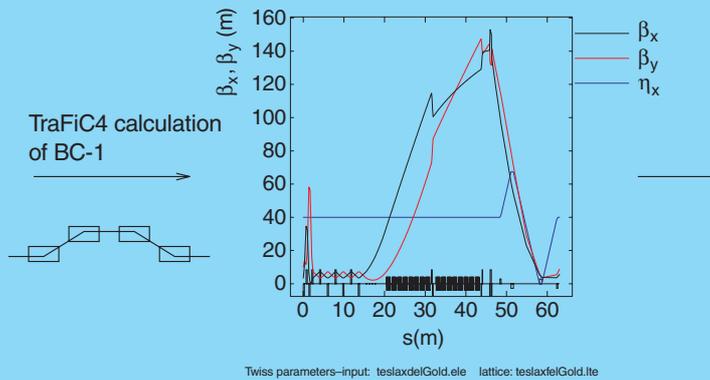
Tabelle 2: *Computer-Programme, die zur Verfolgung der Elektronenstrahlqualität entlang des XFEL-Beschleunigers verwendet wurden.*

Complete Simulation of the TESLA X-FEL (25 GeV, 1A)

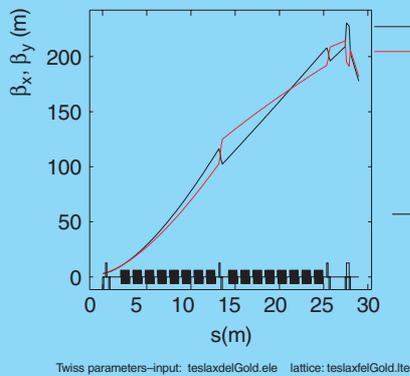
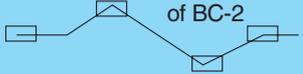
Injector calculated with ASTRA



Transport between BC-1 and BC-2 with elegant

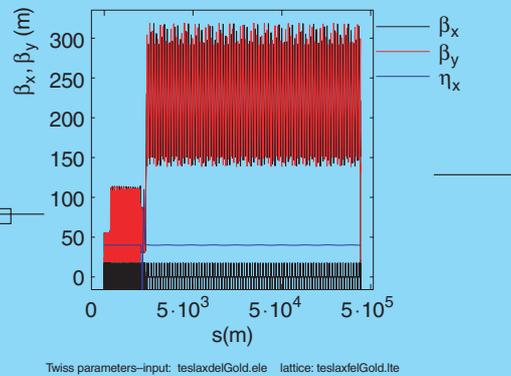
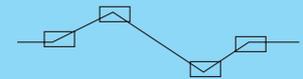


TraFiC4 calculation of BC-2



Transport between BC-2 and BC-3 with elegant

TraFiC4 calculation of BC-3



Transport between BC-3 and undulator with elegant

GENESIS

Abbildung 133: Schema der Computersimulation für die vollständige Elektronenstrahldynamik im TESLA XFEL. Für die verschiedenen Abschnitte des Beschleunigers wurden unterschiedliche Programme verwendet, die auf die jeweiligen spezifischen Probleme spezialisiert sind.

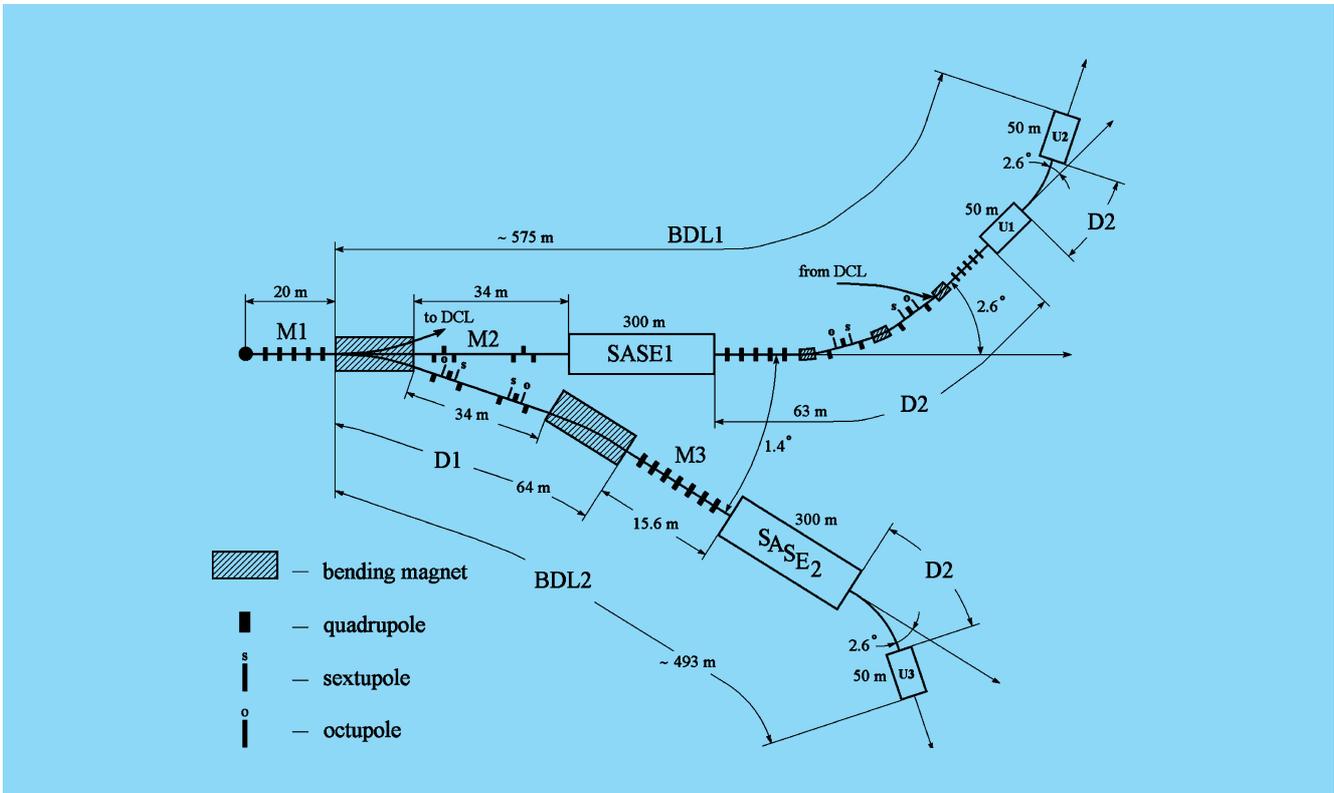


Abbildung 134: Detaillierte Auslegung der Elektronenstrahlverteilung auf verschiedene Undulatoren. Die Magneto-optik garantiert, dass der Elektronenstrahl innerhalb einer Energie-Bandbreite von $\pm 3\%$ ungestört an den Eingang der verschiedenen Undulatoren transportiert wird.

des Technical Design Reports selbst (TESLA TDR Part II, Kapitel 9). Dabei wurden die Beiträge einiger hundert Co-Autoren aus 54 Instituten aus aller Welt zusammengeführt. Als Beispiel seien genannt:

- Die Qualität des Elektronenstrahls kann von der Quelle bis zum Undulator durch zeitabhängige Hochfrequenzfelder, Raumladungskräfte, Wakefields sowie spontane und kohärente Synchrotronstrahlung in Mitleidenschaft gezogen werden. Nur eine vollständige Computersimulation kann ein hinreichend genaues Bild der akkumulierten Störungen liefern. Für die verschiedenen Abschnitte des Beschleunigers müssen unterschiedliche Programme verwendet werden, die auf die jeweiligen Probleme spezialisiert sind. Die meisten dieser Programme, die in Tabelle 2 aufgelistet sind, wurden im Laufe der vergangenen Jahre im Rahmen der

TESLA-Kollaboration entwickelt. Abbildung 133 illustriert schematisch die Reihenfolge der Simulationsschritte.

- Der Elektronenstrahl wird nach der Beschleunigung zu den verschiedenen Undulatoren geleitet, wobei schnell schaltende Ablenkmagnete dafür sorgen, dass die Undulator-Zweige im gewünschten Verhältnis mit Strahl versorgt werden. Dieses Strahlverteilungssystem muss dafür sorgen, dass der Elektronenstrahl innerhalb einer Energie-Bandbreite von $\pm 3\%$ ungestört an den Eingang der verschiedenen Undulatoren transportiert wird und dass die Undulatoren auf die gewünschte Position in der Experimentierhalle ausgerichtet sind. Ein Teil dieses Systems ist in Abbildung 134 zu sehen, wobei die Maßstäbe verzerrt wurden, damit die Ablenkwinkel besser zu erkennen sind.