

# Voruntersuchungen zum TESLA Linear-Collider Projekt

Mit der Fertigstellung des TESLA Technical Design Report (TDR) wurde im Berichtszeitraum ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Realisierung des Zukunftsprojekts für einen 500–800 GeV supraleitenden Elektron-Positron Linear-Collider mit integriertem Röntgenlaser-Labor erreicht. Am Beschleuniger-Kapitel (Part II) des TDR haben über 400 Wissenschaftler und Ingenieure aus 13 Ländern mitgearbeitet. In diesem Teil des Reports werden die technische Auslegung und die Beschleunigerphysikalischen Aspekte des supraleitenden Linearbeschleunigers sowie aller für den Collider und den Free Electron Laser (FEL) erforderlichen Subsysteme beschrieben.

## TESLA Projektvorschlag

Beim Linear-Collider werden Elektronen und Positronen in zwei 15 km langen gegenläufigen Beschleunigern auf eine Endenergie von 250 GeV beschleunigt und in der zentralen Wechselwirkungszone zur Kollision gebracht. Die Energiezufuhr geschieht in supraleitenden Hochfrequenzresonatoren mit einer Feldstärke von etwa 23 MV/m. Diese neue Technologie wurde von der internationalen TESLA Kollaboration entwickelt und an der Testanlage (TTF) bei DESY erfolgreich erprobt. Die Technologie mit supraleitenden Niob-Resonatoren ermöglicht aufgrund der hohen Effizienz des Beschleunigers und der exzellenten Strahlqualität eine bessere Kollisionsrate (Luminosität) als ein konventioneller Linearbeschleuniger. Die hervorragende Strahlqualität und -stabilität macht den TESLA-Beschleuniger ebenfalls zu einem idealen Treiber für eine Röntgen-FEL Anlage, die integraler Bestandteil des vorgeschlagenen Projekts ist. Eine Kostenschätzung für den Linear-Collider wurde anhand von Industriestudien für die Massenfertigung der Hauptkomponenten der Anlage erarbeitet. Die Gesamtkosten

für den 500 GeV Collider wurden zu 3.136 Milliarden € ermittelt. Als dominierende Anteile entfallen davon etwa ein Drittel auf die supraleitenden Beschleuniger-Module, jeweils etwa ein Sechstel auf das Hochfrequenzsystem sowie auf den Bau des 33 km langen Tunnels und der Hallen. Die zusätzlichen Kosten für das Röntgen-FEL Beschleunigersystem belaufen sich auf 0.241 Milliarden €.

Der TESLA TDR wurde im März 2001 im Rahmen eines internationalen Kolloquiums der Öffentlichkeit vorgestellt. Das große Interesse am TESLA-Projekt wurde durch die Teilnahme von annähernd 1000 Wissenschaftlern an dieser Veranstaltung eindrucksvoll unterstrichen. Das hohe Maß an Aufmerksamkeit, das der TESLA Projektvorschlag in der internationalen Gemeinschaft der Hochenergie-Physiker genießt, wurde ebenfalls beim Treffen der amerikanischen Teilchen- und Beschleuniger-Physiker in Snowmass (USA) im Sommer 2001 deutlich. Bei diesem nur alle fünf Jahre stattfindenden dreiwöchigen Treffen wurden die Zukunftsperspektiven der Teilchenphysik intensiv diskutiert, mit dem klaren Ergebnis, dass ein Linear-Collider bei den mit TESLA erreichbaren Energien das nächste international zu realisierende Projekt sein soll. Gleichzeitig begann in Snowmass ein Prozess des detaillierten Vergleichs der für so eine Anlage vorgeschlagenen technischen Lösungen: während die bei DESY koordinierte Kollaboration auf Supraleitung setzt, arbeiten die Beschleuniger-Experten in den USA (SLAC, Stanford) und Japan (KEK, Tsukuba) an der Optimierung der konventionellen Technologie mit Kupfer-Resonatoren.

## Vorbereitung des Planfeststellungsverfahrens für TESLA

Die Freie und Hansestadt Hamburg und das Land Schleswig-Holstein haben im Jahr 1998 einen Staats-

vertrag für die Schaffung der planerischen Voraussetzung für die Errichtung und den Betrieb von TESLA abgeschlossen. In dem Vertrag wurde festgelegt, dass für das Projekt ein gemeinsames Planfeststellungsverfahren (PFV) mit einer integrierten Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen ist. Die Planfeststellungsbehörde und Anhörungsbehörde ist das Oberbergamt (OBA) in Clausthal-Zellerfeld.

Auf der Basis des TDR wurde die Vorbereitung des PFV weitergeführt. Mit einer Ingenieurgemeinschaft (IG) wurde ein Vertrag zur Erstellung der Planunterlage abgeschlossen. In einem Workshop Ende April 2001 wurde der Rahmen dafür festgelegt. Mitarbeiter von DESY und unabhängige Ingenieure für die Genehmigungsplanung, die Projektsteuerung, die Umweltplanung und die hydrogeologischen Untersuchungen erarbeiten in einem Team die Planunterlage. Die Verträge mit den unabhängigen Planern orientieren sich dabei an Partnerschaftsmodellen. Darüber hinaus haben sich bei DESY Arbeitsgruppen gebildet, die die technischen Rahmenbedingungen für die TESLA-Planungsgruppe ausarbeiten. Von allen TESLA-Planern werden die gleichen Werkzeuge benutzt. Von Anfang an wird dreidimensional konstruiert. Alle benötigten Karten liegen als Vektorgrafik vor. Es wird ein gemeinsames elektronisches Archivierungssystem („Engineering Data Management System“ EDMS) benutzt.

Dem Vorschlag einer elektronischen Abgabe, Verteilung und öffentlichen Auslegung der Planunterlage hat das OBA bereits jetzt zugestimmt.

Eine erste Demonstrationsversion der digitalen Planunterlage liegt bereits vor. Für diese Unterlage sind bereits die dreidimensionalen Konstruktionen und die Vektorkarten eingesetzt worden. Eine gedruckte Version wird ebenfalls zur Verfügung gestellt.

Zeichnungen, Vorträge, Bilder, Filme und weitere Informationen stellt die TESLA-Planungsgruppe TPL planungsbegleitend intern in einer speziellen Homepage zur Verfügung.

Da der TESLA-Tunnel direkt unter der Kirche von Relingen verläuft, sind im Berichtszeitraum Referenzmessungen an der Kirche begonnen worden, um die natürlichen Bewegungen des Bauwerks zu untersuchen. Dafür wurden sowohl im Kirchenschiff als auch im Außenmauerwerk Messmarken angebracht. Die Messungen werden über einen längeren Zeitraum durchge-

führt, um die tages- und jahreszeitlichen Bewegungen zu ermitteln.

Im Rahmen der Umweltverträglichkeitsstudie UVS wird auch das Schutzgut Wasser untersucht. DESY hat ein hydrogeologisches Fachgutachten in Auftrag gegeben. Die erste Stufe auf der Basis von vorhandenen Bohrungen ist bereits fertig gestellt. Für die erweiterte zweite Stufe wurden im Berichtszeitraum insgesamt 16 Probebohrungen an acht Hallenstandorten und entlang der Tunneltrasse abgeteuft. Diese Bohrungen werden auch bereits für Baugrunduntersuchungen verwendet. Die UVS ist mit dem Planungsstand April 2001 abgeschlossen worden. Eine Anpassung an den neuesten Stand und der Landschaftspflegerische Begleitplan (LBP) werden im Jahr 2002 bearbeitet.

Mit der Technischen Universität Hamburg-Harburg wurde ein Kooperationsvertrag zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens des Baugrundes entlang der TESLA-Trasse abgeschlossen.

Im Rahmen der TDR-Begutachtung durch den Deutschen Wissenschaftsrat wurde eine alternative Lösung für den vom Collider-Betrieb weitgehend unabhängigen Betrieb der Röntgenlaseranlage eingereicht. Diese alternative Lösung, die als Übersicht in Abbildung 125 dargestellt ist, basiert auf dem TDR-Vorschlag. Zusätzlich wurde ein knapp drei Kilometer langer Beschleunigertunnel in die Planung mit aufgenommen, der an der Kältehalle Borstel beginnt. Dieser Tunnel nimmt alle Komponenten auf, die in der integrierten Lösung auf den ersten Kilometern angeordnet waren und weitgehend zusammen mit dem Beschleuniger für die Hochenergiephysik genutzt wurden. Die alternative Lösung ist teurer, bietet aber wesentlich mehr Flexibilität gegenüber der integrierten Lösung. Für die alternative Lösung hat sich bereits die modulare Planung der Bauwerke bewährt. Das gesamte Verzweigungsbauwerk müsste nur geringfügig nach Osten verschoben werden, um unnötige Ablenkungen zu vermeiden. Der zusätzliche Beschleunigertunnel könnte dann an ein bereits geplantes Verzweigungsbauwerk angeschlossen werden. Für die zusätzliche Versorgung des separaten X-FEL-Beschleunigers mit Helium und für die zusätzlichen Modulatoren müsste die Versorgungshalle Borstel erweitert werden. Die Abmessungen blieben jedoch innerhalb des für die Umweltplanungen vorgegeben Rahmens.

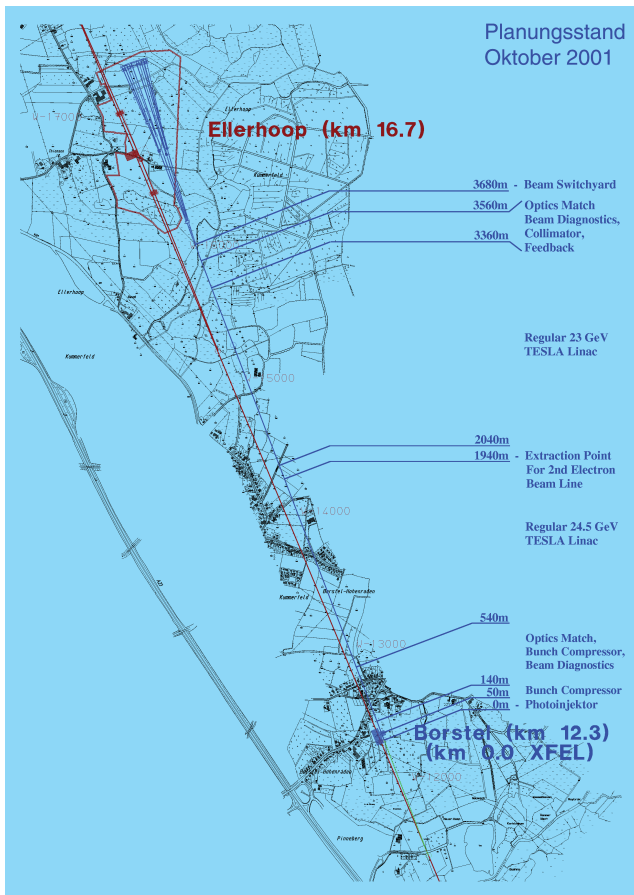


Abbildung 125: Ausschnitt aus dem TESLA-Lageplan mit einem getrennten XFEL Beschleunigertunnel.

## TESLA Test Facility (TTF)

### LINAC-Betrieb und Erweiterungen

Im Rahmen der Voruntersuchungen zum TESLA-Projekt wird bei DESY der Linearbeschleuniger der TESLA Test Facility betrieben. Gleichzeitig wird dieser TTF-LINAC als Treiber für einen Freie-Elektronen Laser (FEL) genutzt.

Im Berichtszeitraum konnte der Beschleuniger in der Regel im 24-Stunden-Betrieb genutzt werden. Hierbei standen zunächst Studien zur Beschleunigerphysik im Vordergrund. Ab dem Sommer lag der Schwerpunkt dann im Bereich des FEL-Betriebs. Erste Experimente nutzten den erzeugten FEL-Strahl, um das

Verhalten von Probenmaterial im intensiven Photonenstrahl zu untersuchen. Zwei Betriebsunterbrechungen von jeweils vier Wochen erlaubten den Wechsel zwischen verschiedenen Experimenten. Am 22. September gelang es, bei der Wellenlänge von 100 nm Sättigung zu erreichen, also die maximal mögliche Verstärkung. Hiermit erreicht der TTF-FEL eine bislang unerreichte Leuchtstärke.

Das Jahr 2001 begann mit den letzten Vorbereitungen für den Betrieb mit 800  $\mu$ s langen Pulszügen. Nach einigen abschließenden Tests konnte ein System zur Überwachung von Strahlverlusten erfolgreich in Betrieb genommen werden. Ein Strahlverlust von deutlich unter einem Prozent führt innerhalb von wenigen Mikrosekunden zur Abschaltung der Elektronenquelle. Im Bereich der Undulatoren gelten noch schärfere Bedingungen.

Ende Januar wurde der TTF-LINAC erstmals mit voller Strahllast betrieben. Ein 800  $\mu$ s langer Pulszug mit einem Strahlstrom von 8 mA erreichte eine Energie von fast 240 MeV. Hierbei betrug die Ladung der einzelnen Elektronenpakete 3.5 nC und der zeitliche Abstand der Pakete 444 ns (Abb. 126). Dieses Ergebnis entspricht den TESLA-Parametern mit ausreichender Genauigkeit.

Im Anschluss an den Betrieb mit langen Pulszügen wurde die Beschleunigungsfeldstärke im ersten TTF-LINAC Abschnitt auf etwa 2 MV/m abgesenkt, um möglicherweise auftretende strahlinduzierte Schwingungen in den supraleitenden Resonatoren zu untersuchen. Die Folgefrequenz der Elektronenpakete wurde auf 54 MHz heraufgesetzt und die Intensität der einzelnen Pakete mit einer frei wählbaren Frequenz um bis zu 90% moduliert. Das so erzeugte Anregungsspektrum ist geeignet, eventuell vorhandene Schwingungsmodi in den Resonatoren anzuregen, die dann wiederum auf den Elektronenstrahl zurückwirken. Ein mit einer Ablage relativ zur Strahlachse eingeschossener Elektronenstrahl kann so genannte Dipolmoden anregen. Ein Strahlagemonitor weist diese Anregungen nach. Es wurde eine Vielzahl von Moden gemessen. Von Interesse war die Güte der Moden, aber auch der Unterschied im Verhalten der einzelnen supraleitenden Resonatoren. Die Auswertung ist noch immer nicht abgeschlossen. Unter anderem konnten aber aus der Messung Rückschlüsse auf einen Fehler in der Anordnung der Antennen erfolgen, die diese Schwingungsmoden bedämpfen sollen.

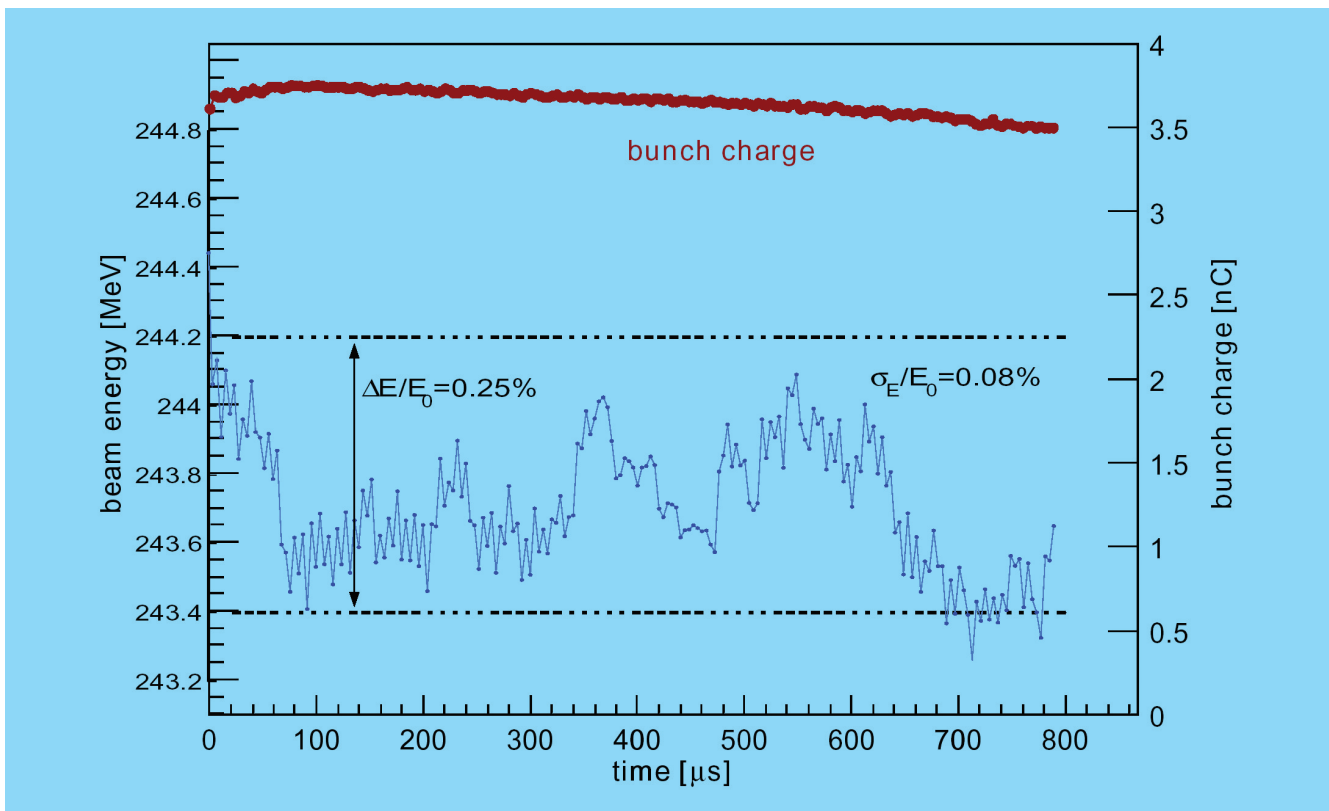


Abbildung 126: Bunchladung und Energieunschärfe während eines 800  $\mu\text{s}$  langen Bunchzuges in der TESLA Test Facility.

## Wakefields

Parallel zur Optimierung des FEL-Betriebes wurden im Frühjahr Experimente zu einem weiteren, den Elektronenstrahl möglicherweise stark beeinflussenden Effekt abgeschlossen. So genannte „Wakefields“, unmittelbar zu vergleichen mit der Bugwelle eines Schiffes in einem schmalen Kanal, entstehen, sobald ein Paket von sehr vielen Elektronen durch ein enges Strahlrohr geführt wird. Für den FEL-Betrieb wurde die Rauigkeit der Innenwände der Undulatorkammern diskutiert. Eine Reihe von theoretischen Modellen sagte unterschiedlich starke Effekte voraus. Aus diesem Grund wurde unmittelbar hinter dem Undulator eine Anordnung mit mehreren austauschbaren Rohren verschiedener Rauigkeit installiert. Die tatsächlich entstehenden Wakefields wurden über einen speziellen Schirm ausgekoppelt und in ihrem Frequenzspektrum analysiert. Im Bereich um 500 GHz, einer Frequenz, die unmittelbar durch die

Länge der Elektronenpakete bestimmt ist, konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Vorhersage und den gemessenen Daten gefunden werden. Auf einem Schirm hinter einem Spektrometernagneten wird eine energieabhängige Intensitätsverteilung beobachtet, die als ein Zerreißen des Elektronenpaketes entlang seiner Flugrichtung zu verstehen ist (Abb. 127). Nimmt dieser Effekt überhand, so kann der FEL nicht mehr arbeiten.

Im Rahmen eines etwa vierwöchigen Umbaus wurde im Mai 2001 der Aufbau zur Untersuchung von Wakefields gegen einen so genannten „Beam Trajectory Monitor“, eine Art Lochkamera zur Bestimmung des Entstehungsortes der Undulator-Strahlung, getauscht. Weiterhin wurde das RAFEL-Experiment („Regenerative Amplifier FEL“) modifiziert und im Bereich der LINAC-Infrastruktur das erste Multibeam-Klystron eingebaut. Dieses 10 MW Klystron ist der Proto-



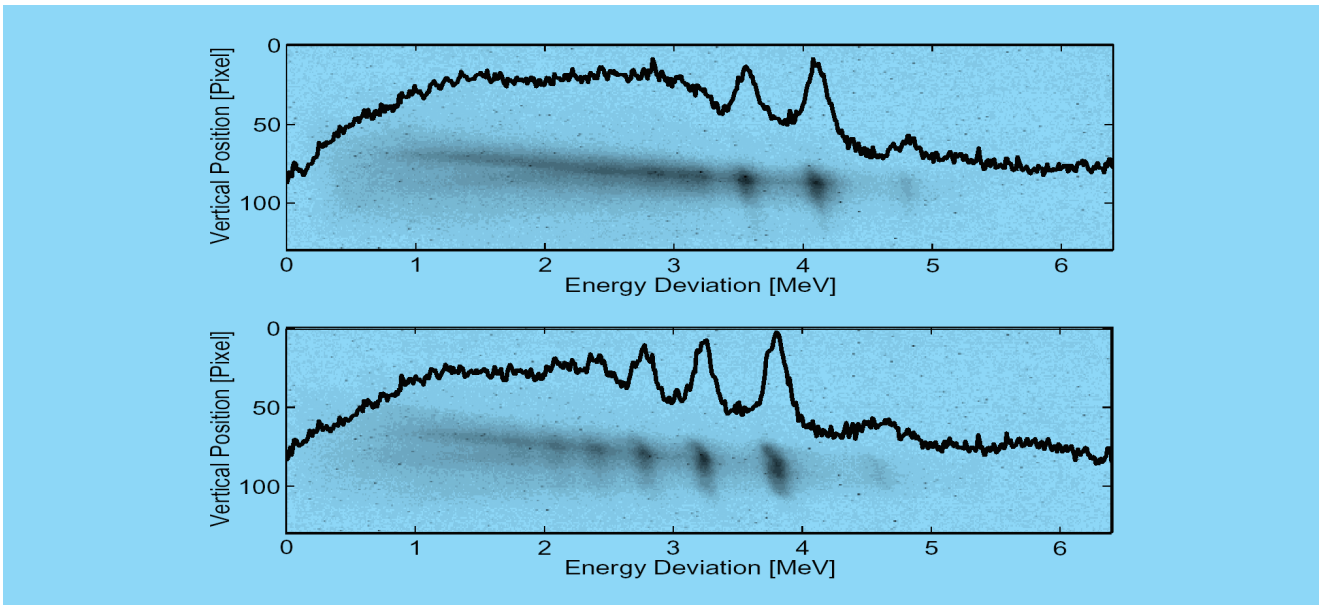


Abbildung 127: Wakefields, die durch den Strahlstrom an den Rauigkeiten der Strahlrohrwände induziert werden, bewirken Änderungen in der Intensitätsverteilung eines Bunches. Die untere Verteilung wurde an einem Strahlrohr gemessen, dessen Oberfläche durch Sandstrahlen aufgeraut worden war.

typ eines TESLA-Klystrons, das im Unterschied zu herkömmlichen Klystrons mehrere Elektronenstrahlen verwendet.

### Dunkelstrom

Bereits während der Betriebsunterbrechung konnte der durch Feldemission entstehende Dunkelstrom der supraleitenden Resonatoren im zweiten Beschleunigerabschnitt untersucht werden. Für diese Messung wurde die Strahlführung unterbrochen, um den durch den Beschleunigerabschnitt erzeugten Dunkelstrom-Elektronenstrahl nach dem Austritt aus einem dünnen Edelstahlfenster direkt auf der Achse abzustoppen und seine Intensität zu bestimmen. Zum einen stellte sich hierbei heraus, dass der achte Resonator im zweiten Beschleunigerabschnitt sehr viel Dunkelstrom erzeugt, während die anderen Resonatoren akzeptable Ströme zeigen, zum anderen konnte die später im Jahr durchgeführte Messung am ersten Beschleunigerabschnitt vorbereitet werden. Diese im November durchgeführte Messung ergab bei einer maximal möglichen mittleren Beschleunigungsfeldstärke von 21.5 MV/m einen

Dunkelstrom von deutlich unter  $1\ \mu\text{A}$ , ohne den dritten Resonator dieses ersten Beschleunigerabschnittes waren es nur etwa 100 nA. Dies ist mit den Annahmen für TESLA verträglich.

### FEL-Betrieb

Seit dem Sommer stand der FEL-Betrieb im Vordergrund. Neben der Nutzung des FEL-Photonenstrahls für die Untersuchung des Ab- bzw. Verdampfens von Oberflächen unter Einwirkung des sehr intensiven Photonenstrahls sowie der Streuung von Photonen an so genannten Clustern stand die weitere Optimierung der FEL-Verstärkung im Vordergrund. Um Sättigung zu erreichen, wurde unter anderem mit Hilfe eines an der TU Darmstadt geschriebenen Programms der Bereich der Elektronenquelle mit sehr hoher Präzision ausgerichtet. Die Ablage des Elektronenstrahls wurde in Abhängigkeit von der Einstellung von Strahlführungsmagneten gemessen. Das Programm simulierte den Strahltransport und ermittelte die notwendigen Korrekturen in der Aufstellung.

Für das Verständnis des optimierten FEL-Betriebs ist weiterhin die gründliche Untersuchung der Intensitätserhöhung durch Verkürzung der Elektronenpakete im so genannten Bunch-Kompressor Voraussetzung. Die Verkürzung wird durch unterschiedliche Laufzeiten in einer magnetischen Schikane realisiert. Nach einer leichten Energiemodulation im ersten Beschleunigerabschnitt legt der niederenergetischere Kopf des Paketes in der Schikane eine längere Strecke zurück als der höherenergetische Schwanz. Dies bewirkt die Verkürzung des Paketes, birgt aber die Gefahr, dass die bei der Ablenkung in den Magneten der Schikane entstehende Synchrotronstrahlung die Strahlqualität verschlechtert. In der Tat kann bei relativ kurzen Elektronenpaketen das von den hinten fliegenden Elektronen abgestrahlte Licht die vorn fliegenden einholen und diese beeinflussen. Es kommt zu einer kohärenten Abstrahlung von Synchrotronstrahlung, und die Intensitätsverteilung entlang der Flugrichtung wird stark beeinflusst. Ein einzelnes Paket kann, ähnlich wie oben für Wakefields beschrieben, regelrecht zerreißen, so dass im Undulator für den FEL-Prozess kein wohldefinierter kurzer und intensiver Puls mehr zur Verfügung steht. Eine Reihe von Messungen führte zu einem tieferen Verständnis dieser kohärenten Abstrahlung von Synchrotronstrahlung. Die Messungen müssen jedoch mit einer im November in den Bunch-Kompressor eingebauten flacheren Vakuumkammer wiederholt werden. Sie kann das Ergebnis laut Theorie beeinflussen.

### Verbesserte Instrumentierung

Eine Reihe weiterer Verbesserungen kann hier nur kurz aufgezählt werden. So wurde zum Beispiel die Präparation der Kathoden in der Elektronenquelle deutlich verbessert, was eine merkliche Verringerung des Dunkelstroms und damit auch eine sehr stark abgeschwächte Aktivierung der Strahlführung zur Folge hat. Wesentlich waren auch die Arbeiten an den Diagnoseelementen zur Strahlstrommessung. Hier galt es, die Messgenauigkeit und die Zuverlässigkeit zu erhöhen, so dass diese so genannten Toroide im Maschinen-Interlock zum Einsatz kommen können. Der Test eines neu entwickelten schnellen Strommonitors wird künftig die Strahlüberwachung für jedes einzelne Elektronenpaket erlauben. Dies gilt auch für den geplanten zeitlichen Abstand der Pa-

kete von 111 ns. Ein weiterer Drahtmonitor zum Ausmessen der Elektronenstrahlprofile konnte ebenso erfolgreich in Betrieb genommen werden wie auch alle Strahllagemonitore im Bereich der ersten beiden Undulatorabschnitte. Eine neu aufgebaute Elektronik wird zur Überwachung der Flugzeit der Elektronenpakete im Bereich des Bunch-Kompressors eingesetzt. Eine Online-Dosimetrie mit Hilfe von Lichtwellenleitern (LWL) wurde in Zusammenarbeit mit dem Hahn-Meitner-Institut in Berlin und dem Fraunhofer-Institut in Euskirchen weiter verbessert. Die Messung mit LWL entlang dem TTF-LINAC wurde in das Kontrollsystem integriert. Eine neue Messmethode mit gewickelten LWLs erlaubt eine schnelle und empfindliche Online-Messung der Ortsdosis an definierten Positionen.

Der auf Seite 233 im Detail beschriebene FEL-Betrieb profitierte sehr von der Tatsache, dass der TTF-LINAC seit dem Sommer auch vom Hauptbeschleunigerkontrollraum (BKR) aus gesteuert werden kann. Hierbei wurde insbesondere der FEL-Nutzerbetrieb vom BKR aus ermöglicht. Die erforderlichen Konsolen wurden installiert. Nachdem einige Teilsysteme bereits in der Vergangenheit von Partnerinstituten, zum Beispiel aus Paris, betreut und gesteuert wurden, konnte im Spätsommer erstmalig der gesamte LINAC auch aus Italien bedient werden. Ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem gemeinsamen, partnerschaftlich betriebenen LINAC ist die Einführung eines elektronischen Logbuches, das von verschiedenen Arbeitsplätzen zuverlässig beschrieben und gelesen werden kann. Alle Grafiken von Messergebnissen sowie Statusbilder können von verschiedenen Rechnern direkt in das Logbuch geschrieben werden. Die Texteingabe und die Darstellung erfolgen über einen Standardbrowser wie Netscape. Neueste Internet-Technologien wie XML, XSL und JAVA Servlets werden verwendet, um das Logbuch zu verwalten und darzustellen. Nach einigen kleineren Korrekturen wurde das elektronische Logbuch von den Benutzern so gut angenommen, dass die Papierform aufgegeben wurde. Mit diesem neuen Logbuch können jetzt alle Mitglieder der TESLA Kollaboration sowie die Experten in ihren Büros sehr viel stärker an den Ergebnissen und Problemen des Beschleunigerbetriebs teilhaben. Die Wahl von offenen Internet-Standards ermöglicht einen zukünftigen Ausbau dieser Technologien zur weiteren Integration von verteilten Informationen.

Dies ist der Weg zu einem globalen Beschleuniger-Netzwerk, in dem Komponenten nicht nur in auswärtigen Instituten entwickelt und gebaut werden, sondern nach der Installation auch die dauerhafte Betreuung der Beschleunigersektionen möglich ist. Der Aufstellort des Beschleunigers wird unwichtiger. Ein partnerschaftlicher Betrieb ist möglich. Im August wurde begonnen, den TTF-LINAC Betrieb statistisch zu erfassen. So ist es möglich, neben der gesamten

Betriebsdauer von inzwischen über 11 000 Stunden Angaben über die Aufteilung der Strahlzeit zu machen. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass die typische Effektivität in FEL-Betriebszeiten inzwischen oberhalb von 75% liegt. Die durch Ausfälle bedingten Betriebsunterbrechungen liegen über Wochen gemittelt unter 20%. Insgesamt waren im Berichtszeitraum etwa 2500 Stunden FEL-Betrieb für von HASYLAB durchgeführte Experimente möglich.