

Abbildung 90: Anordnung des Linearbeschleunigers in einem Tunnel mit 5 m Durchmesser.

Voruntersuchungen zum TESLA Linearcollider-Projekt

Seit mehreren Jahren werden weltweit an verschiedenen Teilchenforschungs-Instituten Planungen für den Bau eines linearen Elektron-Positron-Colliders im Energiebereich von 500–1000 GeV vorangetrieben. Eine solche Maschine wäre komplementär zu dem im Bau befindlichen Proton-Collider LHC beim CERN und wird von einer breiten Mehrheit der Teilchenphysiker als das als nächstes zu realisierende Großprojekt der Hochenergiephysik favorisiert.

Im Rahmen der bei DESY koordinierten internationalen TESLA-Kollaboration, in der mehr als 30 Institute aus acht Ländern mitarbeiten, wird für den Linearcollider ein technisches Konzept verfolgt, welches eine außerordentlich hohe Leistungsfähigkeit der Anlage, gemessen an der Luminosität (der Kollisionsrate am Wechselwirkungspunkt) verspricht und deshalb gute Chancen hat, sich gegenüber konkurrierenden, auf konventioneller Technologie basierenden Konzepten durchzusetzen.

Bei TESLA werden supraleitende Beschleunigungsstrecken verwendet, mit denen aufgrund sehr kleiner Hochfrequenzverluste in der Wand der Resonatoren sehr hohe Strahlleistungen erzeugt werden können. Gleichzeitig ist die erzielbare Qualität des Strahls (kleine Emittanz und Energiebreite) optimal, um einen extrem kleinen Strahlquerschnitt am Kollisionspunkt zu erreichen. Da die Luminosität, etwas vereinfacht, als Quotient von Strahlleistung und -querschnitt gegeben ist, wirken sich diese Vorteile des TESLA-Konzepts quasi „doppelt“ aus.

Die hohe Strahlqualität in TESLA ist ebenfalls optimal geeignet, um den supraleitenden Linearbeschleuniger als Treiber für eine Free Electron Röntgen-Laser Anlage mit extrem hoher Brillanz im Wellenlängenbereich bis herunter zu einem Ångström zu verwenden.

Die Integration einer solchen Anlage, die von Wissenschaftlern aus vielen verschiedenen Fachgebieten genutzt werden kann (von der Biologie bis zur Festkörperphysik), ist ein wesentlicher Bestandteil des TESLA-Konzepts.

Die technischen Herausforderungen bei TESLA liegen im Erreichen eines hohen Beschleunigungsfeldes in supraleitenden Resonatoren und in einer Reduktion der Kosten für diese anspruchsvolle Technologie. Um die technische Machbarkeit zu demonstrieren und eine zuverlässige Basis für die Berechnung der Kosten für die zukünftige TESLA-Anlage zu bekommen, wurde die „TESLA Test Facility“ (TTF) aufgebaut, in der während des Berichtszeitraums weitere wichtige Meilensteine erreicht werden konnten.

Fortschritt der Design-Arbeiten

Ein erster vollständiger Entwurf der TESLA-Anlage wurde im Frühjahr 1997 fertiggestellt und in einem umfangreichen Bericht dokumentiert. Im Berichtsjahr wurden die Arbeiten zur weiteren Optimierung des Linearcollider-Designs vorangetrieben (Abb. 90). Im Vordergrund stand dabei die detaillierte Untersuchung aller Subsysteme, insbesondere im Hinblick auf die bei TESLA erreichbare maximale Luminosität. Im Linearbeschleuniger kann die Beschleunigungs-Effizienz durch eine verbesserte Anordnung der Resonatoren, sogenannte Superstrukturen, weiter verbessert werden. Dabei werden die Resonatoren in Gruppen zusammengefasst, was nicht nur die „Packungsdichte“, den Anteil aktiver Strukturen in der Gesamtlänge, erhöht, sondern auch durch Reduktion der Anzahl von HF-Eingangskopplern zur Kostensparnis beiträgt. Bei gleicher Gesamtlänge des Beschleunigers lässt sich die angestrebte Kollisionsenergie von 500 GeV mit einem

kleineren Gradienten erreichen (22 statt 25 MV/m). Außerdem führt diese Maßnahme zu einer Verringerung der HF-Verluste in den Resonatoren, so dass die erforderliche Leistung der kryogenischen Anlage reduziert wird. Bei gleicher Gesamt-Anschlussleistung trägt dies zu einer möglichen Erhöhung der Strahlleistung und damit der Luminosität bei. Der Einfluss strahlinduzierter Felder („Higher Order Modes“) wurde mit Computer-Simulationen untersucht; er bleibt auch in dieser geänderten Anordnung beherrschbar. Weitere Untersuchungen zur Strahldynamik betrafen die von sehr kurzen Teilchenpaketen (einige Zehntel Millimeter für den Collider, einige hundertstel Millimeter für den FEL) erzeugten Störfelder („Wake Fields“). Durch aufwendige numerische Rechnungen konnte gezeigt werden, dass der Hochfrequenzanteil (im Tera-Hertz Bereich) der Wake Fields und damit auch der Leistungsverlust in den supraleitenden Resonator-Wänden deutlich kleiner ist als in einer ersten Abschätzung angenommen.

Die Strahloptik und die Betriebsenergie für die Dämpfungsringe wurden optimiert mit dem Ziel, das Problem sehr starker Raumladungsfelder bei der angestrebten kleinen Strahlemittanz zu verringern. Zur weiteren detaillierten Untersuchung des Einflusses von Raumladung auf die Strahldynamik wurde ein Simulationsprogramm entwickelt. Weitere Arbeiten betrafen die für den Linearcollider benötigten Strahlquellen. Für die Elektronen-Quelle wurde ein neues Konzept entwickelt, welches die Erzeugung eines „flachen“ Strahls, bei dem die vertikale Emittanz klein ist verglichen mit der horizontalen, erlaubt, wie er für den Collider benötigt wird. Diese neuartige Quelle basiert auf dem gleichen Konzept wie die für den FEL vorgesehene HF-Kanone mit Photokathode, verwendet aber zusätzlich noch einen strahloptischen „Trick“, um den runden Strahlquerschnitt in einen flachen zu transformieren. Es besteht die Möglichkeit, dass mit dieser Quelle der Elektronen-Dämpfungsring eingespart werden könnte, falls sich die ersten, sehr viel versprechenden Simulationsergebnisse durch weitere theoretische und auch experimentelle Studien bestätigen lassen.

Die TESLA-Positronenquelle basiert auf der Erzeugung von Elektron-Positron Paaren durch Bestrahlung eines Targets mit hochenergetischen Photonen. Der Photonen-Strahl wird dabei vom 250 GeV Elektronen-Strahl in einem Wiggler-Magneten generiert. Im bisherigen Konzept wurde dazu der „verbrauchte“ Strahl,

also hinter dem e^+e^- -Wechselwirkungspunkt, verwendet. Die große Energiebreite und Emittanz des Strahls nach der Wechselwirkung erfordern eine Kollimierung im Strahlführungssystem vor dem Wiggler. Genauere Untersuchungen ergaben, dass die mit der Kollimierung verbundenen Strahlungsprobleme (Aktivierung, Komponenten im Tunnel, Abschirm-Maßnahmen) schwer beherrschbar sind. Der Wiggler für die Photonen-Erzeugung wurde daher in das Strahlführungssystem für den einlaufenden Elektronen-Strahl verlegt, so dass sich die Positronen-Quelle jetzt strahlaufwärts vom Wechselwirkungspunkt befindet. Die genannten Probleme lassen sich damit weitgehend beseitigen, allerdings wird durch den Wiggler die Energie des einlaufenden Elektronen-Strahls verringert, so dass man eine Reduktion der Kollisionsenergie von etwa einem Prozent in Kauf nehmen muss.

Für einen effizienten Experimentierbetrieb mit geringem Untergrund im Detektor muss der Strahl frei von Halo-Teilchen bei großen transversalen Amplituden sein. Um den bei TESLA ohnehin schon geringen Halo-Anteil weiter zu verringern, ist ein Kollimatorsystem vorgesehen. Die Auslegung dieses Systems wurde optimiert und durch eine Energie-Kollimierung, basierend auf einer nichtlinear-dispersiven Strahloptik, ergänzt. Die für eine hohe Luminosität erforderlichen extrem kleinen Strahldimensionen von wenigen Nanometern am Kollisionspunkt erfordern eine präzise Steuerung der Strahllagen. Dies geschieht bei TESLA mit Hilfe eines schnellen Orbit-Rückkopplungssystems, welches kleinste Abweichungen von der Sollbahn entdeckt und innerhalb eines Bruchteils der Strahlpuls-Länge ausregelt. Die Auslegung dieses Systems wurde vervollständigt und durch Simulationsrechnungen detailliert untersucht. Dabei wurde auch die für bestimmte Experimente interessante Option von Elektron-Elektron Kollisionen mit einbezogen.

Untersuchungen zu einer $\gamma\gamma$ und γe Wechselwirkungszone bei TESLA

Durch Rückstreuung von Laser-Photonen an hochenergetischen Elektronen oder Positronen können $\gamma\gamma$ und γe mit Energien und Luminositäten, die den bei der Kolli-

sion von e^+e^- oder $e\mu$ erreichbaren Werten vergleichbar sind, zur Kollision gebracht werden. Diese Option ist in den „Conceptual Design Reports“ verschiedener Linearcollider-Projekte enthalten. Der nächste Schritt sind die „Technical Design Reports“. Ein Photon-Collider bei TESLA zeichnet sich hinsichtlich vieler Parameter und geringerer technischer Probleme gegenüber anderen Linearcollider-Projekten aus. Das physikalische Interesse der $\gamma\gamma$ - und γe -Physik liegt in ihrer Komplementarität zur e^+e^- - oder $e\mu$ -Physik.

Eine der Herausforderungen dieses Projekts ist der erforderliche Hochleistungslaser. Eine mögliche Lösung ist ein dioden-gepumpter, aus mehreren Halbleiterlasern bestehender Hochleistungslaser. Wegen des bei TESLA, verglichen mit anderen Linearbeschleunigerprojekten, um bis zu hundertfach größeren Zeitabstandes zwischen den Elektronen-Pulsen kann die Pumpleistung für den Laser hier entsprechend niedriger sein. Eine alternative Lösung besteht aus einem Zug von niederenergetischen Laserpulsen, die in einem externen passiven optischen Resonator verstärkt werden. Bei jeder der vielfachen Reflexionen der Laserpulse in dem optischen Resonator findet eine Kollision mit einem Elektronenbunch, der den Resonator durchquert, statt. Diese Technik, die noch vieler Studien bedarf, könnte die benötigte Laserleistung um bis zu drei Größenordnungen reduzieren. Da das Problem der Beamstrahlung in $\gamma\gamma$ Kollisionen nicht existiert, kann insbesondere die horizontale Emittanz des Elektronen-Strahls sehr viel kleiner sein als bei e^+e^- -Kollisionen.

Die Erzeugung eines polarisierten Elektronenstrahls mit sehr kleiner Emittanz ist von großem Interesse. Hierzu ist zunächst die Optimierung der Dämpfungsringe erforderlich. Mit Hilfe neuer Methoden wie Laserkühlung der Elektronen-Strahlen könnte eine beträchtliche Erhöhung der $\gamma\gamma$ -Luminosität erreicht werden. Das Hauptproblem wäre in diesem Fall die große Laserleistung, die wieder in einem optischen Resonator aufgebaut werden könnte.

Zur Zeit wird in verschiedenen Arbeitsgruppen, der DESY-ECFA-Studie in Europa und in weltweiten Studien zur Physik und den Detektoren für Linearbeschleuniger an Konzepten für Photon-Collider gearbeitet. Kürzlich wurde eine internationale Kollaboration begonnen. Der „International Workshop on High Energy Photon Colliders“ wird vom 14.–17. Juni 2000 bei DESY in Hamburg stattfinden.

DESY als möglicher Standort für TESLA

Als koordinierendes Labor in der TESLA-Kollaboration hat DESY die Aufgabe übernommen, die Möglichkeit einer Errichtung der Anlage in der Nähe des DESY-Geländes detailliert zu prüfen. Dazu gehören sowohl die Klärung bautechnischer Fragen als auch die Vorbereitung auf das genehmigungsrechtliche Verfahren. Der insgesamt 32.8 km lange Linearbeschleuniger kann entlang einer Trasse in nordnordwestlicher Richtung, ausgehend vom DESY-Gelände, angeordnet werden (Abb. 91). Dabei wird die Richtung genau tangential an den Abschnitt West des HERA-Rings angenommen, um eine mögliche spätere Option von Elektron-Proton Kollisionen mit zu berücksichtigen. Auf halber Strecke, südlich des Dorfes Ellerhoop, befindet sich das Experiment (optional ist eine zweite Wechselwirkungszone vorgesehen) für die Teilchenphysik sowie die Röntgenlaser-Anlage. Der Beschleuniger befindet sich in einem unterirdischen Tunnel, sehr ähnlich dem existierenden HERA-Tunnel. In insgesamt sieben oberirdischen und durch Schächte mit dem Tunnel verbundenen Versorgungsstationen entlang der Trasse sind die Helium-Kälteanlagen und die Leistungsversorgung für das Hochfrequenzsystem untergebracht. In einem Staatsvertrag zwischen den Bundesländern Hamburg und Schleswig-Holstein wurde ein Planfeststellungsverfahren als Genehmigungsverfahren für den Bau von TESLA festgelegt. Die Planfeststellungsbehörde ist das Oberbergamt in Clausthal-Zellerfeld. Bei einem Scoping-Termin wurde unter der Leitung des Oberbergamts der Untersuchungsrahmen für die Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) definiert. Eine Reihe von für die UVS erforderlichen Fachgutachten wurde im Berichtszeitraum durchgeführt.

TESLA Test Facility

Linac Betrieb

Abbildung 92 zeigt einen Blick in den Tunnel der TESLA Test Facility.

Im Dezember 1998 wurde der bei FNAL (Batavia/USA) gebaute RF-Photoinjektor installiert. Dieser In-

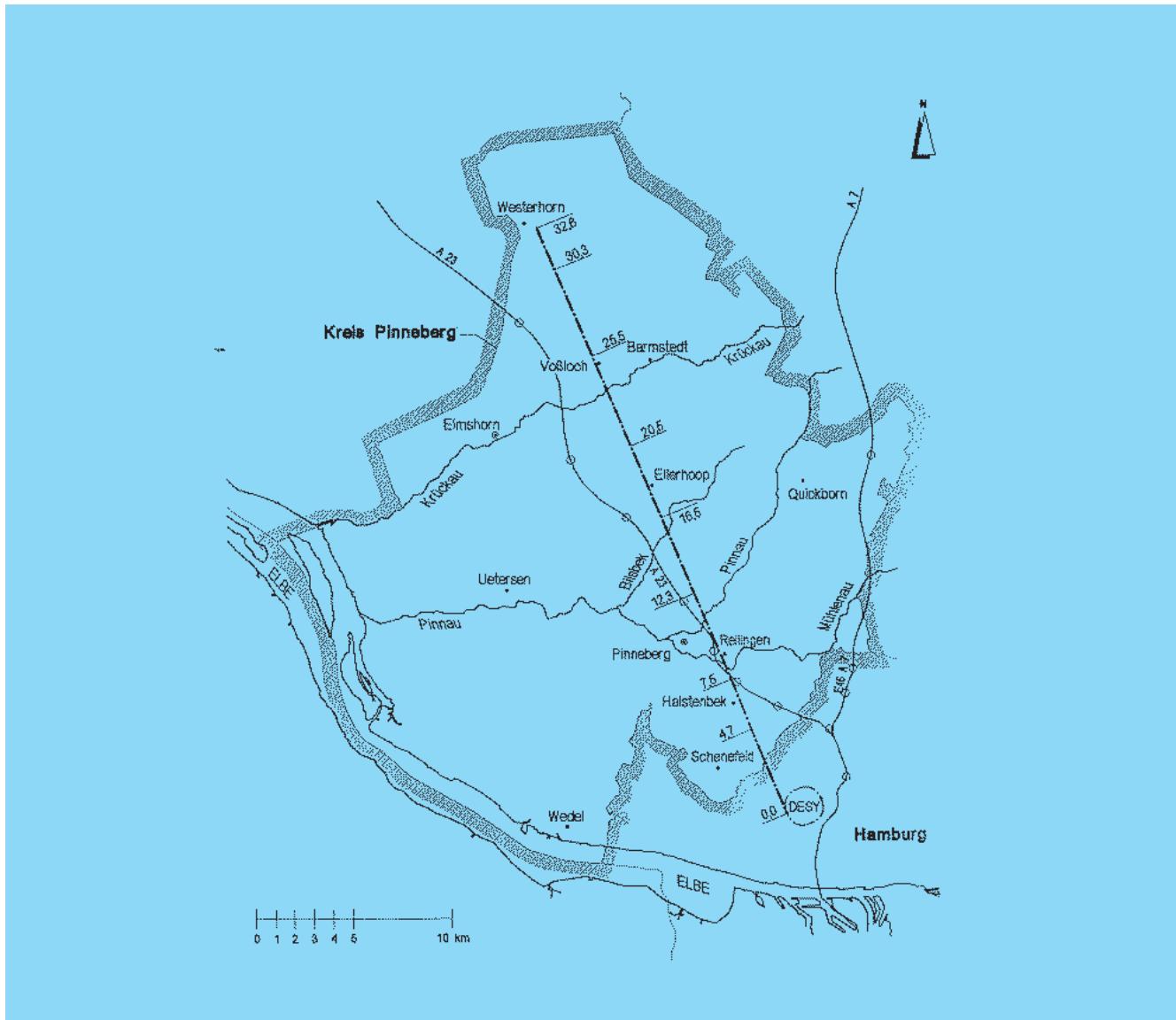


Abbildung 91: Die TESLA Trasse nordnordwestlich des DESY-Geländes.

je ktor erlaubt Betriebsbedingungen identisch mit denen am geplanten 500 GeV TESLA-Beschleuniger.

Die Quanteneffizienz der Photokathode (INFN Milano) entsprach mit etwa 1% voll den Erwartungen. Es konnten Bunchzüge von 30 Bunchen mit jeweils 8 nC bei einem Feldgradienten von 35 MV/m erzeugt werden, wobei eine Optimierung der Betriebsparameter noch erfolgen muss. Nach der Beschleunigung in der „Capture Cavity“ (IN2P3 Orsay) erreichte der Strahl eine Energie von 16 MeV. Da das Beschleunigungsfeld des bisher

benutzten ersten Kryomoduls durch Resonatoren mit Fertigungsfehlern (Gradient 13 MV/m) begrenzt war, wurde ein Austausch gegen ein neues Modul vorgenommen. Des Weiteren wurde ein zweites Kryomodul im Linac installiert. Das ausgebauten Modul soll durch Ausrüstung mit besseren Resonatoren aus späterer Fertigung einen Gradienten von 25 MV/m erreichen, was dem TESLA Entwurfswert für 500 GeV Energie entspricht. Es erfolgten Tests im ersten und zweiten Beschleunigermodul, wobei im zweiten Modul zunächst Gradienten von 18 MV/m erzielt werden konnten. Bei

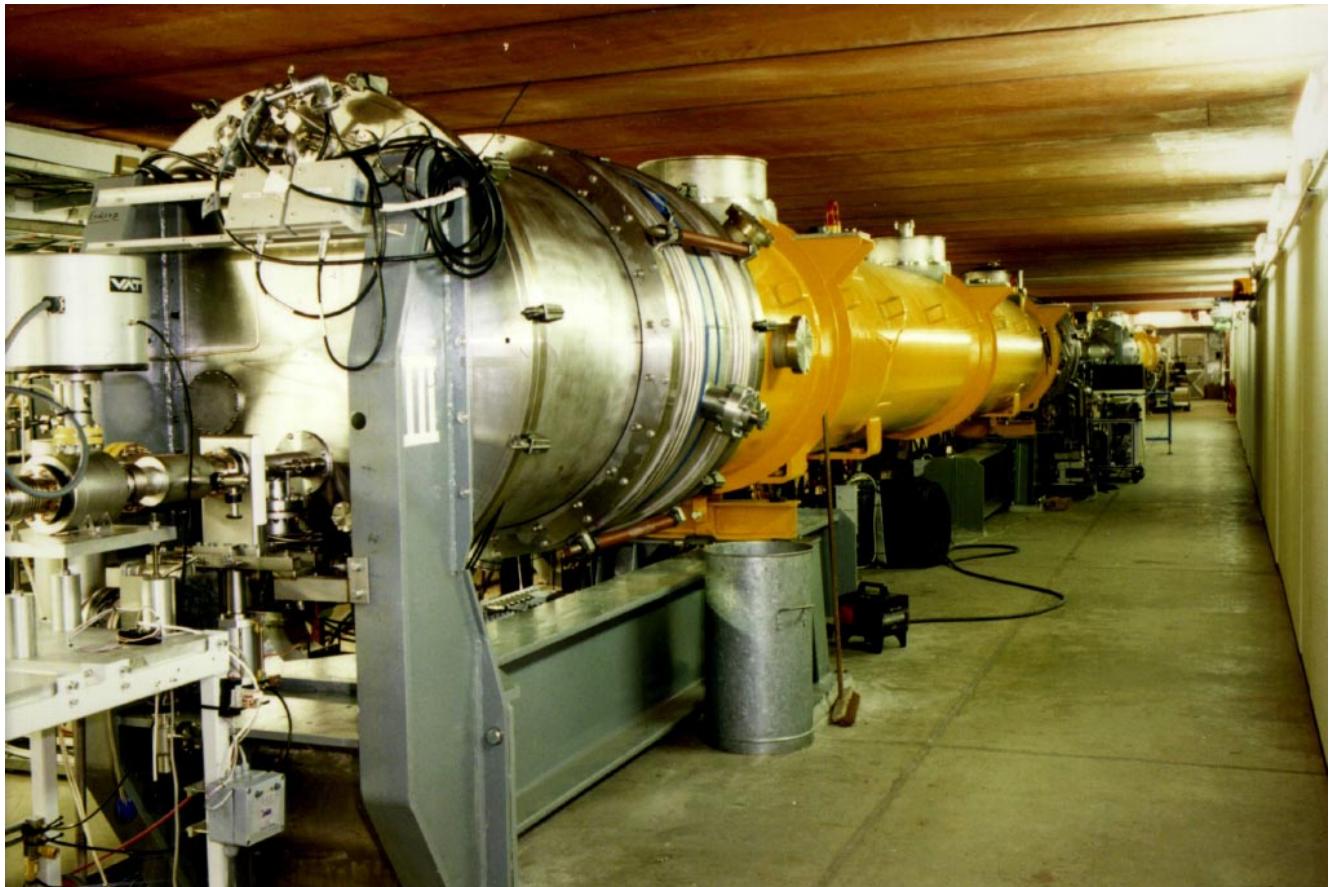


Abbildung 92: *TESLA Test Facility Linearbeschleuniger – Blick in den Tunnel.*

den Messungen höherer Feldmoden zeigte sich erneut der bereits früher beobachtete, nur unzureichend gedämpfte Dipolmode bei 2.85 GHz. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Nach dem Konditionieren der supraleitenden Resonatoren konnten dann im zweiten Modul Beschleunigungsfelder von knapp 23 MV/m erreicht werden.

Neben den Messungen an den supraleitenden Kryomodulen war die Inbetriebnahme des Undulators für den FEL-Betrieb von grosser Bedeutung. Ziel war zunächst eine möglichst gute Übereinstimmung der gemeinsamen Achse von Beschleunigungsstrukturen und Undulatoreinheiten, so dass mit Hilfe von Korrekturspulen der Strahl mit einer Abweichung von weniger als 100 μ m entlang dem Linac bis zum Undulator eingeschossen werden kann. Die zur Kontrolle der

Strahllage erforderlichen Monitore wurden erfolgreich in Betrieb genommen, wobei aber noch eine weitere Optimierung der Betriebsparameter vorzunehmen ist. Außerdem wurde zum Schutz des Undulators vor zu hohen Strahlverlusten eine Spoiler-Kollimator-Strecke installiert und in Betrieb genommen.

In der Regel konnten in einem 24-Stunden-Betrieb durchschnittlich an fünf Tagen pro Woche Messungen am TTF-Linearbeschleuniger durchgeführt werden.

Dabei erwies sich der für den Betrieb des Injektors erforderliche Laser (Max-Born-Institut Berlin) als äußerst zuverlässig mit einer Verfügbarkeit von nahezu 100%. Die Regelung von Phase und Amplitude ist ähnlich der HF-Regelung für die Module. Durch ein Feedback-System konnte die Phase zwischen Laser- und RF-Gun auf besser als 1 ps konstant gehalten werden.

Strahldiagnose

Der Aufbau eines Prototyps des „Beam-Trajectory-Monitors“ (BTM) für den FEL-Betrieb erforderte sowohl die Testmessungen des Silizium-Pixeldetektors sowie die Konstruktion und den Bau einer Vakuumkammer, als auch die Entwicklung einer hochpräzisen Lochblendenstruktur.

Die erste Inbetriebnahme des neu entwickelten Detektors fand am Halbleiterlabor der Max-Planck-Gesellschaft in München statt. Am DESY wurde ein Laser-Teststand aufgebaut und die Genauigkeit der Ortsmessung zu $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ermittelt. Am Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB wurde die Quanteneffizienz im Energiebereich der Vakuumultraviolett-(VUV-)Strahlung zu 20% bestimmt. Schließlich erfolgte ein Test zur Strahlenhärte in einem Rasterelektronenmikroskop.

Die Konstruktion und der Bau der Vakuumkammer für den BTM erfolgten in Zusammenarbeit mit der TESLA-Gruppe DESY Zeuthen und den dortigen Werkstätten. Die Herausforderungen hierbei waren eine Fertigungsgenauigkeit im Bereich von $1/100\text{ mm}$ und der Aufbau einer im Mikrometerbereich reproduzierbaren Kammerjustierung unter gleichzeitiger Erfüllung der Anforderungen, die durch den Einsatz im Ultrahochvakuum (UHV) gesetzt sind. Auch beim Bau der Elektronik-Komponenten mussten die UHV-Anforderungen berücksichtigt werden. Hinzu kam eine geforderte Platzgenauigkeit der Detektor-Chips von $5\text{ }\mu\text{m}$. Hochpräzise Lochblenden mit $80\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser konnten mit Unterstützung des Instituts für Halbleitertechnik an der TU Harburg auf photolithographischem Weg hergestellt werden.

Im Linac-Bereich machten der Einbau eines zweiten Kryomoduls, der Kollimator- und Undulatorstrecke sowie der Photonen-Diagnostik umfangreiche Umbauten des Vakuumsystems erforderlich. Hinzu kamen die Installation der Test-Strahlführung des DESY-Photoinjektors an einem neuen Standort sowie Fertigung und Aufbau des Vakuumsystems für einen zweiten Vertikal-Kryostaten, der den Durchsatz der supraleitenden Resonatoren beim Helium-Kältetest deutlich verbessern soll.

Im Rahmen des Kontrollsystems sind insbesondere Entwicklung, Installation und Einbindung von schnellen

ADCs für Strahllagemonitore (gemeinsam mit DESY Zeuthen) sowie die Umstellung des Timing Systems auf 9 MHz zu erwähnen.

Hochfrequenzversorgung und -regelung

Ein wichtiger Beitrag im Berichtszeitraum war die Inbetriebnahme des dritten bei Fermilab (USA) gebauten Hochspannungsmodulators zusammen mit einem 5 MW-Klystron. Dieses System wird nun hauptsächlich zur Versorgung des TTF-Guns mit Hochfrequenz verwendet, während eines der beiden bestehenden Modulator-Klystron-Systeme die TTF-Cavities mit Hochfrequenz versorgt und das andere zum Testen von Hochfrequenzkomponenten und zur Konditionierung neuer Cavities oder Hochfrequenzkoppler verwendet wird.

Von Bedeutung war auch der erfolgreiche Test eines Prototyps des neu entwickelten 10 MW-Multibeamklystrons bei 10 MW Pulseistung, einer Folgefrequenz von 30 Hz und einer Pulsdauer von $500\text{ }\mu\text{s}$ beim Hersteller. Dieses Klystron, das über eine deutlich höhere Effizienz (etwa 70%) verfügt als die bisher verwendeten Typen (etwa 45%), steht nun bereit, um bei DESY in einem Modulator, der eine Pulsdauer von 1.3 ms bei einer Folgefrequenz von 10 Hz ermöglicht, getestet zu werden.

Die Hochfrequenzregelung des TTF-Linac, die für die Regelung der Vektorsumme von 24 supraleitenden Resonatoren ausgelegt ist und zur Zeit die vorhandenen 16 Resonatoren ansteuert, wurde mehrere Monate betrieben und hat sich dabei als sehr zuverlässig erwiesen. Die Flexibilität der digitalen Regelung erlaubte dabei wahlweise TTF- oder FEL-Betrieb, bei dem wegen des zwischen den beiden Kryomodulen installierten Bunchkompressors nur die Vektorsumme der vor dem Bunchkompressor installierten acht Resonatoren stabilisiert wurde. Der Betrieb der Hochfrequenzregelung wurde durch vereinfachte Benutzeroberflächen und Reduktion der notwendigen Eingabeparameter für Feedback, Feedforward und Strahlkompensation stark erleichtert. Die Diagnostik zur Kalibrierung der Resonatorfelder mittels strahlinduzierter Transienten wurde verbessert und kann nun bei einer Ladung von mindestens 100 nC

im Strahlpuls routinemäßig zum Einstellen der individuellen Resonatorphase eingesetzt werden. Erste Versuche zur Automatisierung der Hochfrequenzregelung mittels einer im DOOCS-Kontrollsysteem integrierten Software für die automatische Zustandssteuerung verliefen erfolgversprechend. Außerdem fanden erste Tests zur Automatisierung des Linac-Betriebes mit Hilfe einer „State Machine Software“ statt und es wurden umfangreiche Verbesserungen am Beam-Interlock-System (BIS) vorgenommen.

Infrastruktur

Nach etwa fünfjährigem Dauerbetrieb wurde Ende 1998 die Chemie- und Präparationsanlage einer Generalüberholung unterzogen. Ab Februar 1999 zeigten sich eine Verbesserung der Einsatzfeldstärke der Feldemission und hiermit verbundene höhere maximale Beschleunigungsfelder.

Seit Beginn des Jahres 1999 wurden 99 chemische Behandlungen durchgeführt, 48 Kavitäten wurden für vertikale Tests präpariert und montiert. Im Mittel erreichten diese Kavitäten Beschleunigungsfelder von 24.2 MV/m. Die Einsatzschwelle für Feldemission lag im Mittel bei 20 MV/m. Die im Reinraum verwendete Hochdruckspülung muss auf eine neue Prozess-Software umgestellt werden. Hierfür wurde ein neues Konzept entwickelt. Basierend auf einer SPS Steuerung wird die Prozess-Visualisierung jetzt mit Visual Basic realisiert. Um dieses auch entsprechend testen zu können, wurde ein Simulationssystem erstellt, mit dem alle Betriebszustände realitätsnah nachempfunden werden konnten. Die ursprünglich von CERN gelieferte Kontroll-Hardware und -Software wird bei nächster Gelegenheit ausgetauscht. Fernerhin befindet sich eine Qualitätssicherung im Aufbau. Sie beruht auf der Filtration des Ablaufwassers der Hochdruckspülung, der Entnahme von Feldemissionsproben zur Überwachung von Partikelkontamination im Prozess und der Neuentwicklung eines Online-Verfahrens zur Bestimmung der Säurequalität über Spektralanalyse.

Die Helium-Kälteversorgung des TTF-Linearbeschleunigers mit zwei TTF-Kryomodulen und des TTF-Kältelabors wurde gewährleistet. Dabei wurde der Kältebetrieb des TTF-Linearbeschleunigers in zwei Be-

triebsperioden für insgesamt 7 1/2 Monate durchgehend aufrechterhalten.

Für die erweiterte Helium-Kälteversorgung des TTF/FEL-Linearbeschleunigers mit einem Anschluss an die HERA-Helium-Kälteanlage wurden eine HERA-FEL-Transferleitung und eine FEL Vorkühler- und Verteilerbox bei Industriefirmen gefertigt, installiert und mit einem Probelauf erfolgreich getestet.

Die zur Anbindung an die HERA-Kälteanlage benötigte Warmgasverrohrung wurde ebenfalls von Fremdfirmen bis zu den Übergabepunkten an der bestehenden TTF-Helium-Kälteanlage fertiggestellt.

Die Verlängerung der bestehenden TTF-Transferleitung zur FEL-Vorkühler- und Verteilerbox wurde spezifiziert und in Auftrag gegeben. Weiterhin wurde der Auftrag zum Bau eines zweiten Helium-Kompressorsystems erteilt, das zur Entkopplung der Kälteversorgung des TTF-Linearbeschleunigers und des TTF-Kältelabors und zur Kapazitätserweiterung benötigt wird.

Für den weiteren Ausbau des TTF/FEL-Linearbeschleunigers werden spezielle kryogenische Komponenten benötigt, die unter anderem den Übergang zu einem überarbeiteten Kryomodul-Design ermöglichen: Zu diesen Komponenten gehören eine 24 m lange Bunchkompressor-Bypass-Transferleitung mit neuen Prozessrohren, eine Neuauslegung der Modul-Verbindungsstücke und eine dem neuen Modul-Design angepasste Endbox. Für diese Komponenten wurden Konstruktionsentwürfe erarbeitet.

Ein Entwurf für die Anbindung des beim Forschungszentrum Karlsruhe in Fertigung befindlichen supraleitenden Energiespeichers (SMES) an das erweiterte Helium-Verteilungssystem wurde fertiggestellt.

Der Aufbau eines zusätzlichen Teststandes für ein- und mehrzellige Cavities unter Verwendung der 300 W-Kälteanlage wurde in Angriff genommen.

Zur Analyse der an den supraleitenden Kavitäten für TTF gemessenen Daten wird die chronologische Abfolge der Arbeiten und die Verfügbarkeit der wichtigsten Anlagen zur Präparation und zum Test der Resonatoren in einer Datenbank festgehalten. Zusätzlich werden die wichtigsten Daten der visuellen und mechanischen Eingangskontrolle der Kavitäten, die Prozedur

und Ergebnisse ihrer chemischen Behandlungen und Messungen bei Zimmertemperatur und 2 K in dieser Datenbank gespeichert. Vom Linac über die Module kann direkt auf die Daten der Resonatoren zugegriffen werden, die im TTF-Linac installiert sind. Dazu musste eine Vielzahl von SQL-Prozeduren entwickelt werden, um die anfallende Datenmenge zu filtern und für die Datenbank aufzubereiten. Um den Zugriff auf diese Daten zu erleichtern, wurde ein umfangreiches graphisches Benutzer-Interface zur Datenbank erstellt, das die wichtigsten Ergebnisse in Form von Tabellen und Graphen zur Verfügung stellt. Das Benutzer-Interface wurde mit dem ORACLE Developer Server ins WEB migriert, so dass die Datenbank dynamisch ins Internet eingebunden ist.

Superstruktur

Ein wichtiger Schritt zur Kostenreduzierung des TESLA-Projekts ist das Konzept der Superstruktur. Dabei werden einige mehrzellige Resonatoren über ein kurzes Strahlrohr direkt miteinander verkoppelt. Es ergeben sich drei wesentliche Vorteile:

- es wird nur ein einziger Einkoppler für die gesamte Gruppe benötigt,
- es wird nur ein Dämpfungskoppler zwischen jeweils zwei Strukturen benötigt – gegenüber zwei notwendigen Dämpfungskopplern bei dem Standardkonzept,
- bei gleicher aktiver Beschleunigungslänge verkürzt sich die gesamte Baulänge um etwa 15% oder der Beschleunigungsgradient reduziert sich um den gleichen Betrag bei unveränderter Baulänge.

Die elektrischen Eigenschaften einer Superstruktur wie Einschwingverhalten, Abstimmung in Beschleunigungsmoden und Verkopplungen bei höheren Moden sind mit Rechnermodellen untersucht worden und lassen keine besonderen Schwierigkeiten erwarten. Allerdings ist es notwendig, die berechneten Eigenschaften an Cu-Modellen zu überprüfen. Hierzu wurden acht siebenzellige Resonatoren gebaut. Jeweils vier dieser

Resonatoren können zu einer Superstruktur verbunden werden. An dieser Superstruktur wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Abstimmung der Beschleunigungsmoden in Hinblick auf Frequenz und Anregungsamplitude,
- Bestimmung der Frequenzspektren und der Anregungsamplitude der dominanten höheren Moden,
- Optimierung der Dämpfungskoppler.

Diese Messungen waren in guter Übereinstimmung mit den vorher durchgeführten Berechnungen und haben auch keine unerwarteten Probleme aufgezeigt. Als nächster Schritt soll der Prototyp einer Superstruktur im TTF-Linac betrieben werden. Hierzu wurde das Design einer solchen Struktur aus Niob erarbeitet und ein Fertigungsauftrag für sechs siebenzellige Niob-Resonatoren vergeben. Der Strahltest ist für das Frühjahr 2001 geplant. Wegen des verkürzten Abstandes zwischen den Resonatoren ist ein neuer Tuner zur Frequenzabstimmung erforderlich, dessen Konstruktion abgeschlossen werden konnte.

Materialforschung

In Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung in Berlin ist ein Prüfverfahren für Niob-Bleche entwickelt und angewendet worden. Hierbei wird mit einer Eddy-Strom-Sonde die Oberfläche der Niob-Bleche gescannt. Abweichungen der elektrischen Leitfähigkeit durch Fremdeinschlüsse oder mechanische Defekte können entdeckt und lokalisiert werden. Damit können frühzeitig „defekte“ Niob-Bleche ausgesondert werden, die bei Weiterverarbeitung zu einem kompletten Niob-Resonator dessen supraleitende Eigenschaften reduzieren würden. Diese Apparatur konnte weiter verbessert werden. Bei insgesamt 750 gescannten Niob-Blechen lag die Defektrate bei 5%.

Bezüglich des Resonator-Entwicklungsprogramms standen zwei Aspekte im Vordergrund. Um die Energie des geplanten TESLA-Beschleunigers bei unveränderter Länge von 500 GeV auf etwa 800 GeV zu erhöhen, muss, selbst bei einer Verbesserung des Füllfaktors von bisher 67% auf 75–80%, der Beschleunigungsgradient

über die bisher erreichten etwa 25 MV/m hinaus deutlich erhöht werden. Gemeinsam mit CERN wurde daher ein anderes Verfahren für die Behandlung der Oberfläche der Niob-Resonatoren getestet, nämlich die sogenannte Elektropolitur. Damit gelang es, in einzelligen Resonatoren Beschleunigungsfelder von 40 MV/m zu erreichen (Abb. 93). Für die Übertragung dieser Resultate auf mehrzellige Resonatoren sind allerdings noch weitere Untersuchungen notwendig. Außerdem sind zusätzliche Versteifungsmaßnahmen erforderlich, um die Frequenzverschiebung durch Lorentz-Kräfte bei höheren Feldstärken auf ein tolerables Maß zu reduzieren. Hier wurden erste Vorschläge erarbeitet.

Der zweite Aspekt betrifft das Bestreben, durch andere Herstellungsverfahren die aufwendigen Elektronenstrahl-Schweißverbindungen innerhalb eines Resonators weitgehend zu reduzieren. Hierzu wurde das Verfahren der Innenhochdruckumformung entwickelt, mit

der aus Niob-Rohren nahtlose Einzeller hergestellt werden konnten, die bereits bis zu 27 MV/m erreicht haben. Auch hier sind sicherlich weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich.

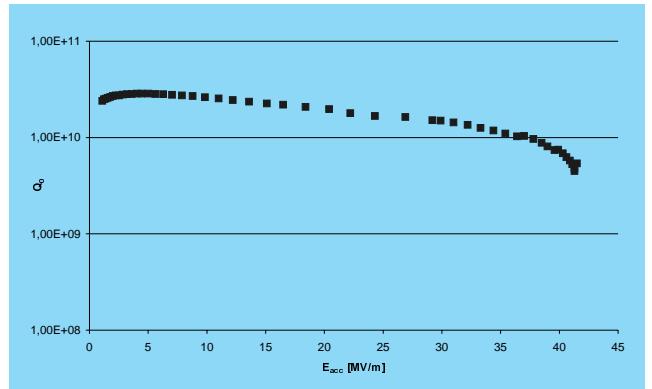


Abbildung 93: *Messresultat eines einzelligen Resonators nach Elektropolitur.*