

Forschung Linearbeschleuniger

Sprecher: P. Schmüser, Univ. Hamburg

Die Gruppe „Forschung Linearbeschleuniger“ (FDET) arbeitet an beschleunigerphysikalischen Untersuchungen, die von hoher Relevanz für den TESLA-Collider und den X-FEL sind. Eine Mitarbeit besteht an der Weiterentwicklung der supraleitenden Resonatoren zu höchsten Feldstärken und an systematischen Untersuchungen zu den kritischen Magnetfeldern von Niob. Die theoretisch vorhergesagten „wake fields“ in rauen Strahlrohren sind weltweit erstmals von der Gruppe experimentell nachgewiesen worden. Ein zentrales Forschungsgebiet ist die Entwicklung höchstauflösender Zeitmessmethoden mit Hilfe der elektrooptischen Abtastung. Erste erfolgreiche Messungen sind am TTF1-Linac und an der Swiss Light Source durchgeführt worden.

Seit September 2003 besteht eine enge Kooperation mit der Gruppe HERA-B mit dem Ziel einer Zusammenlegung beider Gruppen. Die angelaufenen gemeinsamen Aktivitäten werden in diesem Jahresbericht noch nicht vorgestellt.

Supraleitende Resonatoren für höchste Energien in TESLA

Die entscheidende Maßnahme für die vorgesehene Energieerhöhung des TESLA-Colliders von 500 auf 800 GeV ist die Steigerung der Beschleunigungsfelder in den supraleitenden Resonatoren. Um die benötigten Gradienten von 35 MV/m zu erreichen, kommt der Oberflächenpräparation im Innern der Resonatoren eine herausragende Bedeutung zu. Die bisher verwendete chemische Beizung hat ihre Leistungsgrenze bei knapp 30 MV/m, die elektrolytische Politur (EP) der Nioboberfläche geht deutlich weiter. In Zusammenarbeit mit mehreren Instituten (CEA, CERN, KEK, TJNAF) hat ein ehemaliger Doktorand unserer Gruppe

(Lutz Lilje) seit Ende 1998 hervorragende Ergebnisse mit einzelligen Resonatoren (bis 42 MV/m) erzielt. In enger Zusammenarbeit mit dem japanischen Teilchenphysikzentrum KEK und einer japanischen Firma ist das Elektropolitur-Verfahren auf neunzellige Resonatoren übertragen worden. Vier neunzellige TESLA-Resonatoren haben 35 MV/m erreicht, einer dieser Resonatoren wurde in einem Dauertest mehr als 1000 Stunden beim Maximalfeld betrieben. Ein fünfter Resonator wurde in der neuen EP-Anlage bei DESY behandelt und erreichte den Rekordwert von 40 MV/m bei 1.8 K und einem Gütefaktor von 10^{10} . Die Daten werden in Abbildung 46 gezeigt.

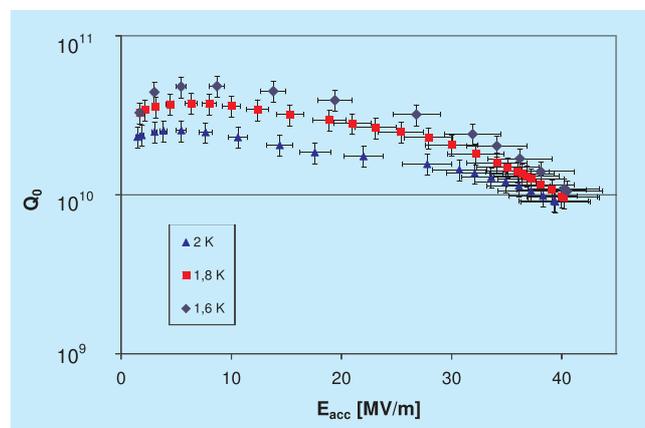


Abbildung 46: Gütefaktor des besten elektropolierten neunzelligen TESLA-Resonators als Funktion des Beschleunigungsfeldes.

Experimentelle Untersuchung von Störwellenfeldern in rauen Strahlrohren

Der Freie-Elektronen-Laser (FEL) erfordert extrem kurze und intensive Ladungspakete, damit die Laser-

Wirkung einsetzen kann und hinreichend Verstärkung vorhanden ist. Wandrauigkeiten im Vakuumrohr innerhalb der Undulatormagnete erzeugen intensive Störfelder („wake fields“), die eine negative Auswirkung auf die Strahlqualität haben können. Dieser theoretisch vorhergesagte Effekt ist von unserer Gruppe erstmals experimentell nachgewiesen worden.

Normalerweise liegt die Phasengeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in Hohlleitern oberhalb der Lichtgeschwindigkeit.

In Wanderwellenbeschleunigern wird durch periodisch angeordnete Blenden im Strahlrohr die Phasengeschwindigkeit bei einer bestimmten Frequenz (3 GHz am SLAC-Linac) auf den Wert c herabgesetzt, so dass eine kontinuierliche Energieübertragung von der laufenden HF-Welle auf die mit gleicher Geschwindigkeit fliegenden Elektronen erfolgen kann. In theoretischen Arbeiten an der TU Darmstadt und am SLAC wurde vorhergesagt, dass die Mikrometer-Wandrauigkeiten in engen Strahlrohren in gewisser Weise auch als Blenden wirken können und bei Frequenzen um 500 GHz die Phasengeschwindigkeit auf c absenken sollten. Die dadurch entstehenden *wake fields* würden nach den Darmstadt-Rechnungen die Strahlqualität ernsthaft beeinträchtigen, während vom SLAC-Modell nur relativ schwache Effekte vorgeschagt wurden. Wegen der großen Bedeutung für den TESLA-Collider und Röntgen-FEL wurde von unserer Gruppe ein spezielles Experiment mit künstlich aufgerauten Strahlrohren durchgeführt. Das überraschende Ergebnis war, dass die Wandrauigkeiten trotz ihrer stochastischen Natur eine harmonische Störwelle hervorrufen, deren Stärke mit der Vorhersage des Darmstadt-Modells übereinstimmt. Die gemessenen, periodisch modulierten Energieprofile der Elektronenbunche werden in Abbildung 47 gezeigt. Die Elektronenbunche werden so geformt, dass sie ein scharfes Maximum an der Spitze haben, welches die harmonischen Störfelder anregt, und einen langen Schwanz, in dem die Störfelder eine periodische Dichtemodulation hervorrufen. Durch geeignete Wahl der HF-Phase im 2. Beschleunigungsmodul wird daraus eine periodische Energiemodulation. Dargestellt ist die Zahl der Elektronen im Schwanz des Bunches als Funktion der von den *wake fields* hervorgerufenen Energieverschiebung ΔE . Die durchgezogenen Kurven (a), (b), (c) zeigen die Messungen an aufgerauten Strahlrohren von 3, 4, 5 mm Radius, Kurve (d) die Messung

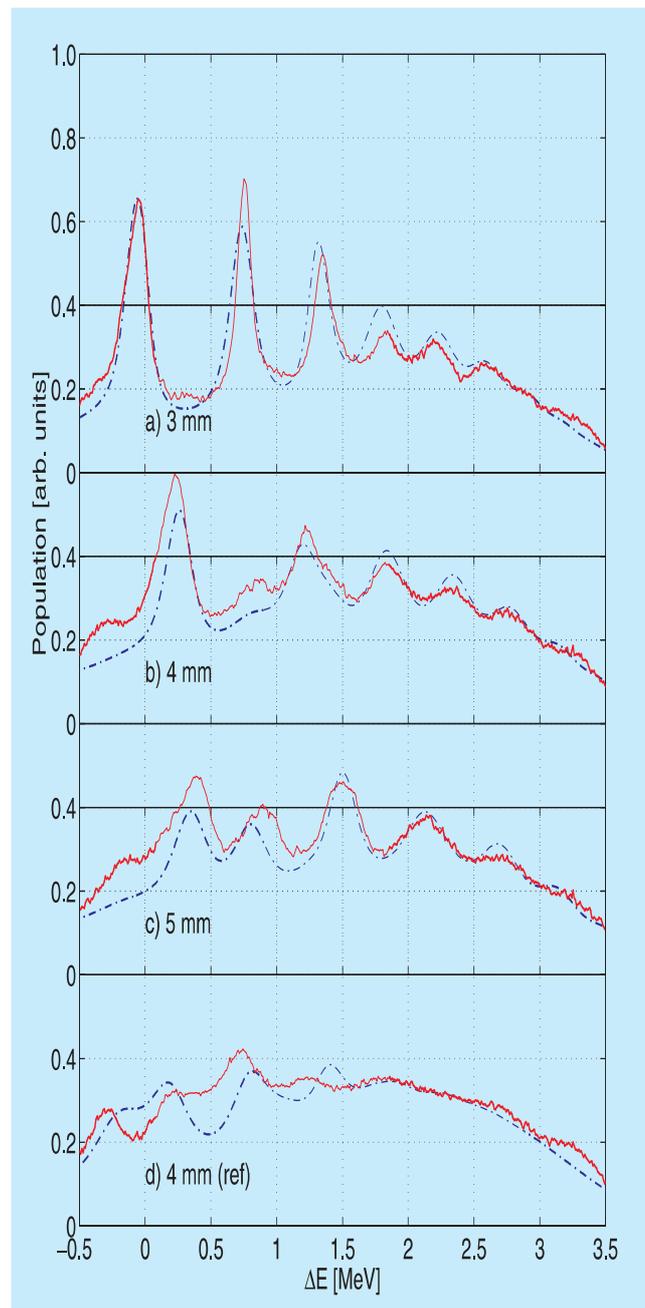


Abbildung 47: Experimenteller Nachweis der periodischen *wake fields* in rauen Strahlrohren. Dargestellt ist die Zahl der Elektronen im Schwanz des Bunches als Funktion der von den *wake fields* hervorgerufenen Energieverschiebung ΔE . Durchgezogene Kurven (a), (b), (c): aufgeraute Strahlrohre von 3, 4, 5 mm Radius; Kurve (d): glattes Referenzrohr von 4 mm Radius. Gestrichelte Kurven: Simulationsrechnungen. Für Details siehe Text.

an einem glatten Referenzrohr von 4 mm Radius. Die gestrichelten Kurven zeigen Simulationsrechnungen. Die bei dem glatten Referenzrohr sichtbaren Strukturen werden durch *wake fields* in strahlaufwärts befindlichen Beschleunigerkomponenten wie z. B. dem Bunch-Kompressor verursacht. Wegen der Komplexität dieser Komponenten ist die theoretische Beschreibung sehr unvollkommen.

Arbeiten zur elektro-optischen Abtastung der Elektronenpakete in Linearbeschleunigern

Ein wesentliches Anliegen der Beschleuniger-Diagnostik ist die Vermessung der longitudinalen Ladungsverteilung in den ultrakurzen Elektronenpaketen („bunches“). Dazu nutzt man die von dem Elektronenbunch mitgeführten Ladungsfelder oder die an Metallfolien emittierte Übergangsstrahlung aus, die elektromagnetischen Impulsen im THz-Bereich mit Pikosekunden-Dauer entsprechen. Die elektro-optische Abtastung (electro-optic sampling EOS) ermöglicht die Messung dieser Felder mit sehr guter Zeitauflösung. Die grundlegende Idee besteht darin, einen nichtlinearen optischen Kristall wie ZnTe zu verwenden, der durch das elektrische Feld doppelbrechend wird und dessen Polarisationsanisotropie durch einen polarisierten Femtosekundenlaserpuls abgetastet wird. Der Abtastpuls muss hochpräzise mit dem Elektronenbunch synchronisiert sein. Die relative zeitliche Lage von THz-Puls und Laserpuls kann durch Variation der Hochfrequenzphase kontinuierlich variiert werden.

Der schematische Aufbau eines Experiments zur elektro-optischen Abtastung von kohärenter Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) wird in Abbildung 48 gezeigt.

Am TTF1-Linac ist 2002 das erste EOS-Experiment bei DESY durchgeführt worden. Um die Koinzidenz zwischen dem 15 fs-Titan-Saphirlaserpuls und dem mehrere Pikosekunden langen CTR-Puls zu finden, wurde die relative Verzögerung der beiden Pulse in Schritten von 0.3 ps durchgeföhren. Abbildung 49 zeigt die Amplitude des Detektorsignals als Funktion der Verzögerung.

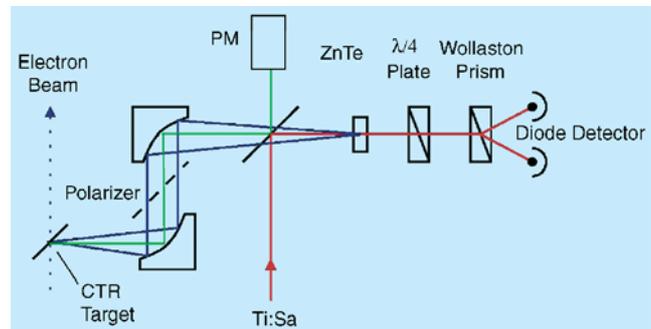


Abbildung 48: Schematische Darstellung der elektro-optischen Abtastung von Übergangsstrahlungs-Pulsen im THz-Bereich. Nach Durchlaufen des ZnTe-Kristalls werden die Titan-Saphir-Laserpulse mit einem balancierten Diodendetektor nachgewiesen. Der grobe Zeitabgleich (0.7 ns Genauigkeit) wird mit einem Photomultiplier PM vorgenommen, der die Laserpulse und die Signale der optischen Übergangsstrahlung registriert.

Es wurde ein klares Koinzidenzsignal beobachtet, aber bei dieser Messung waren die zeitlichen Schwankungen (time jitter) von 700 fs (rms) noch zu groß, um eine genaue Bestimmung der Bunchlänge zu erlauben.

EOS-Experimente stellen extrem hohe Anforderungen an die Qualität der Synchronisation zwischen den Elektronenpaketen und den Laserpulsen. Für die Experimente, die gegenwärtig in Kooperation mit dem Paul-Scherrer-Institut am 100 MeV-Linac der Swiss Light Source durchgeführt werden, wird ein Femtosekundenlaser mit 81 MHz Repetitionsrate benutzt. Die Synchronisation der Lasers mit der 500 MHz Hochfrequenz des PSI-Linacs wird über eine Vergleichsfrequenz von 3.5 GHz bewerkstelligt, die die 7. Harmonische der Linac-HF und die 43. Harmonische der Laserfrequenz ist. Sind beide 3.5 GHz Signale nicht exakt frequenzgleich, liefert ein Mischer ein Signal, mit dessen Hilfe die Resonatorlänge des Lasers über einen Piezospiegel nachgeregelt wird. Die gemessenen Zeitschwankungen in der Laser-Synchronisation (time jitter) liegen bei weniger als 200 fs. Die erste erfolgreiche Abtastung der Elektronenbunche am PSI-Linac ist vor kurzem gelungen. Abbildung 50 zeigt die Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers und des Diodendetektors auf einem 2 GHz-Oszilloskop.

Die Analyse der Daten ist noch in Arbeit.

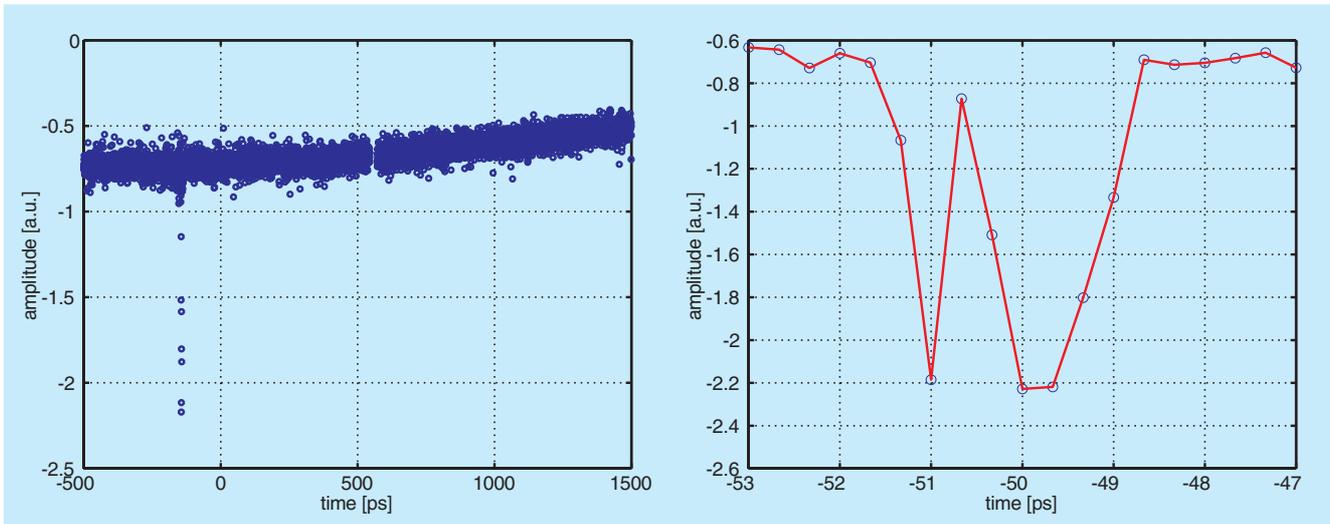


Abbildung 49: Links: Die Signalamplitude des Detektors als Funktion der relativen Verzögerung Δt zwischen Laser- und CTR-Puls. Rechts: vergrößerte Darstellung des Koinzidenzbereichs bei $\Delta t = -50$ ps. Die Struktur innerhalb des Bunches ist nicht real, sondern vermutlich durch time jitter verursacht.

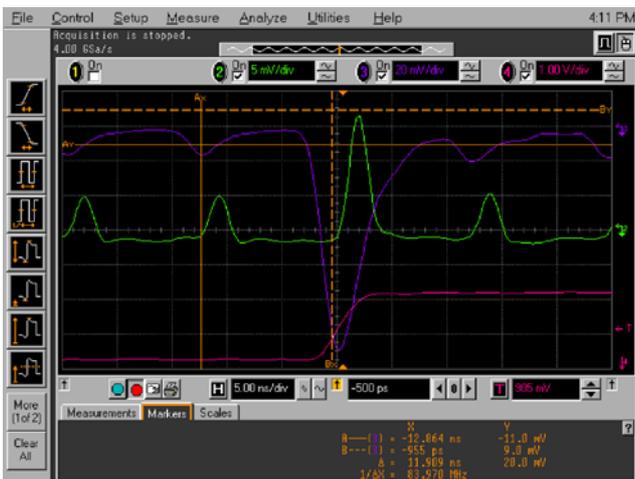


Abbildung 50: Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers (obere Spur) und des Diodendetektors (mittlere Spur). Die Pulse des Titan-Saphir-Lasers (TiSa) haben einen Abstand von 12,3 ns. In der Mitte des Bildes bei $t \approx 0$ sieht man die Überlappung des TiSa-Signals mit dem Puls der optischen Übergangsstrahlung. Die Diodendetektor hat bei $t \approx 0$ ebenfalls ein großes Signal: dies ist ein Beweis dafür, dass der TiSa-Puls genau zu dem Zeitpunkt den ZnTe-Kristall durchläuft, bei dem dieser durch den CTR-Puls des Bunches doppelbrechend gemacht worden ist. Damit ist die Überlappung von TiSa- und CTR-Puls auf einer Pikosekunden-Zeitskala realisiert.

Messung der Kohärenz der FEL-Strahlung

Der VUV-FEL bei DESY arbeitet nach dem Prinzip der Self Stimulated Spontaneous Emission (SASE), das einen sehr langen Undulatormagneten und einen sehr fein kollimierten Elektronenstrahl mit hoher Ladungsdichte voraussetzt. Im ersten Abschnitt des Undula-

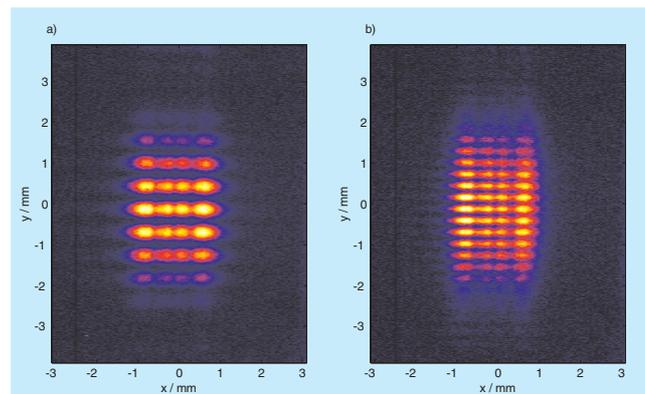


Abbildung 51: Gemessene Beugungsbilder für Doppelspalte mit 0,5 mm bzw. 1 mm Abstand. Die 100 nm FEL-Strahlung wird in einem Fluoreszenzkristall in sichtbares Licht umgewandelt.

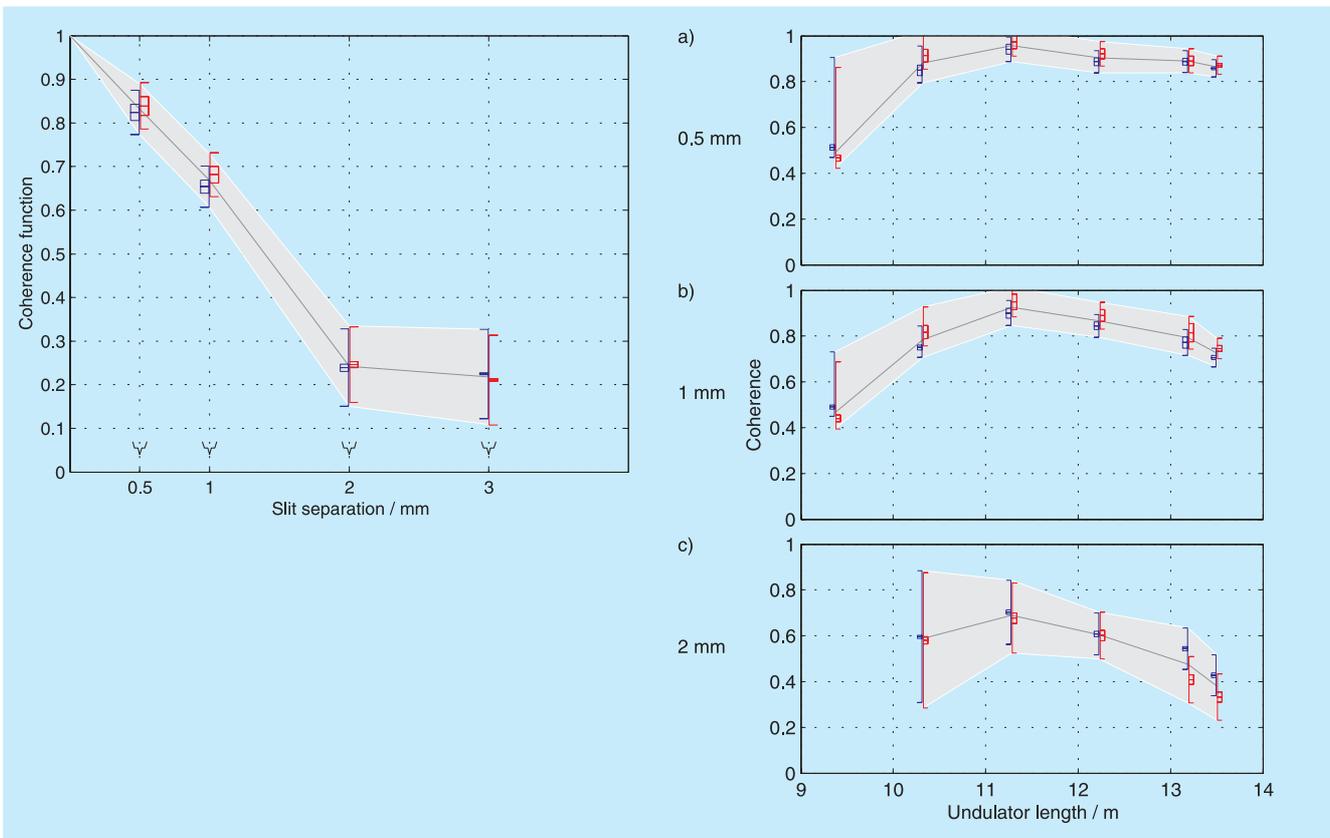


Abbildung 52: Links: Kohärenzgrad der 100 nm FEL-Strahlung als Funktion des Spaltabstands. Rechts: Entwicklung der Kohärenz als Funktion der Undulatorlänge für Spaltabstände von 0,5, 1 und 2 mm.

tors wird spontane Undulatorstrahlung erzeugt, die im weiteren Verlauf des Undulators mit dem Elektronenbunch wechselwirkt und eine räumliche Ladungsdichtemodulation („microbunching“) bewirkt. Dies hat eine kohärente Abstrahlung der Elektronen und ein exponentielles Anwachsen der Lichtintensität zur Folge. Der SASE-Prozess ist hochgradig nichtlinear und nur mit aufwändigen numerischen Rechnungen zu beschreiben.

Zur Bestimmung der transversalen Kohärenz der FEL-Strahlung sind Beugungsexperimente an Doppelspalten, Kreisblenden und kreuzförmigen Öffnungen vorgenommen worden. Hinter dem beugenden Objekt trifft die UV-Strahlung des FEL auf einen Fluoreszenzkristall, wo sie in sichtbares Licht umgewandelt und über ein hochauflösendes Nahaufnahme-Objektiv auf einen CCD-Sensor abgebildet wird. Die Beugungsbilder sind im Nahfeld-Bereich (Fresnel-Beugung) gemessen wor-

den, daher ist eine analytische Beschreibung im Rahmen der Fraunhofer-Näherung nicht möglich. Die numerische Behandlung wurde mit einem eigenen Programm, das auf der Kirchhoff'schen Beugungstheorie beruht, sowie mit einem kommerziellen Programm (GLAD) vorgenommen. Das Auflösungsvermögen des Objektivs sowie die Verbreiterung der Interferenzlinien im Fluoreszenzkristall und die Verringerung ihres Kontrastes durch Streulicht sind in einem Testaufbau ermittelt worden. Die Ergebnisse werden zur Entfaltung der am FEL gemessenen Interferenzbilder verwendet.

Interferenzbilder bei verschiedenen Spaltabständen (siehe Abb. 51) und Blendenöffnungen sind mit Simulationsrechnungen verglichen worden, die mit den theoretisch berechneten Wellenfronten der 100 nm-FEL-Strahlung am Ausgang des Undulators beginnen und die den experimentellen Aufbau mit Doppel-

spalt, Fluoreszenzkristall und CCD-Kamera inklusive aller Auflösungsbegrenzungen und anderer Störeffekte möglichst wirklichkeitsnah nachbilden. Die berechneten und gemessenen Interferenzbilder stimmen sehr gut überein. Der transversale Kohärenzgrad der FEL-Strahlung ist in Abbildung 52 als Funktion des Spaltabstands aufgetragen. Er liegt bei 90% im exponentiellen Anstiegsbereich der FEL-Verstärkungskurve und sinkt auf 80% im Bereich der Sättigung. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit Simulationsrechnungen zum SASE-FEL-Prozess. Die hohe räumliche Kohärenz ist von großer Bedeutung für zukünftige Experimente am VUV-FEL.

Oberflächensupraleitung von Niobproben

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg (Arbeitsgruppe Prof. J. Kötzer) sind systematische Untersuchungen zu den supraleitenden Eigenschaften der Niobleche durchgeführt worden, die zum Bau der TESLA-Resonatoren verwendet werden. Die zylindrischen Proben wurden den gleichen Behandlungsschritten unterworfen wie die Resonatoren: chemische Beizung (buffered chemical polishing BCP), Elektropolitur (EP), Ausbacken bei niedrigen Temperaturen (bake). Die Magnetisierungskurven und die komplexe magnetische Suszeptibilität wurden über einen weiten Temperatur- und Magnetfeldbereich vermessen. Die Volumenparameter stimmen mit Literaturwerten überein, z. B. $T_c = 9.26\text{ K}$ und $B_{c2}(0) = 410\text{ mT}$. In allen Proben wird Oberflächensupraleitung beobachtet, aber das kritische Oberflächenfeld B_{c3} ist größer als nach der Ginzburg-Landau-Theorie erwartet ($B_{c3} = 1.7B_{c2}$), siehe Abbildung 53.

Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die beiden wesentlichen Präparationsschritte, die zu hohen Gradienten in den supraleitenden Resonatoren führen, nämlich die Elektropolitur und das Ausbacken, auch das Oberflächenfeld in den Niobproben erhöhen. Aus der in Abbildung 54 gezeigten Magnetfeldabhängigkeit der komplexen Leitfähigkeit bzw. Resistivität im Bereich $B_{c2} < B < B_{c3}$ kann man weiterhin folgern, dass es zwei verschiedene Phasen der Oberflächensupraleitung gibt: eine kohärente Phase für $B_{c2} < B < B_{c3}^{\text{coh}} = 0.81B_{c3}$, die in einer dünnen Oberflächenschicht des Niobzylinders vorliegt

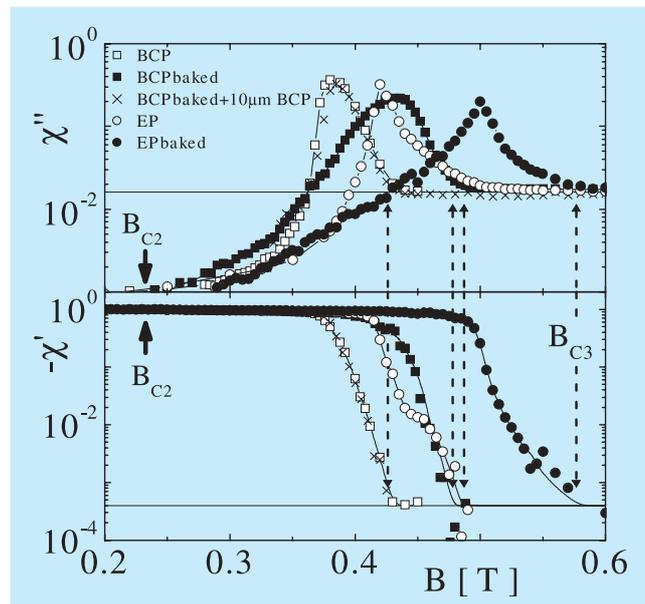


Abbildung 53: Imaginär- und Realteil der komplexen Suszeptibilität bei $T = 5\text{ K}$ für verschiedene Niobproben: BCP, BCP-bake, EP, EP-bake. Die oberen kritischen Felder B_{c3} sind durch Pfeile angedeutet. Die Ginzburg-Landau-Theorie sagt $B_{c3} = 1.7 B_{c2} \approx 0.39\text{ Tesla}$ bei $T = 5\text{ K}$ voraus.

und Abschirmströme erlaubt, welche den gesamten Zylinder umlaufen, und eine inkohärente Phase für $B_{c3}^{\text{coh}} < B < B_{c3}$, bei der nur noch kleine, getrennte Bereiche in dieser Oberflächenschicht supraleitend sind. Die kohärente Phase ist bei den elektropolierten Proben wesentlich deutlicher ausgeprägt, und dies erklärt auch die Überlegenheit der EP-Resonatoren.

Mikroskopische Oberflächenanalyse

Die Oberflächenanalyse von Niobproben ist ein wichtiges Hilfsmittel zum Verständnis der Vorgänge in supraleitenden Resonatoren. Am Institut für Angewandte Physik (IAP) steht eine Ultrahochvakuumanlage zur Oberflächenanalyse und -präparation zur Verfügung, die von DESY im Rahmen eines Kooperationsvertrages genutzt werden kann. Sie besteht aus vier Teilrezipienten, die durch ein Probentransfersystem verbunden sind:

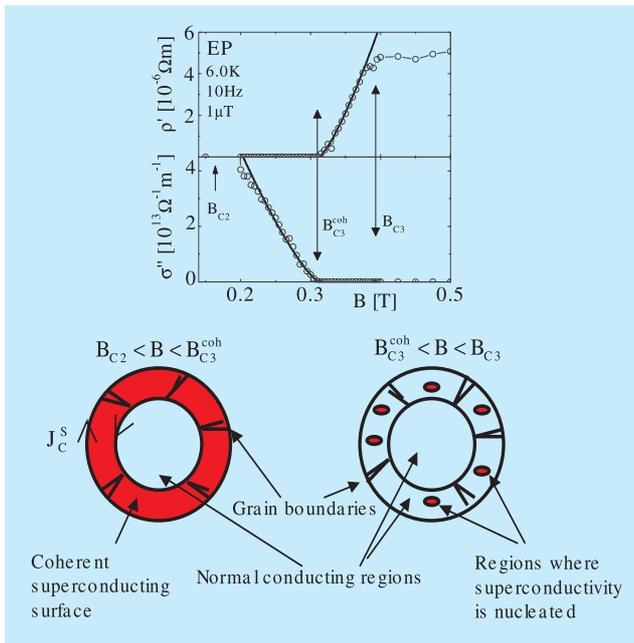


Abbildung 54: Oben: Der Realteil ρ' der komplexen Resistivität und der Imaginärteil σ'' der Leitfähigkeit als Funktion des Magnetfeldes. Unten: Schematische Darstellung der kohärenten und inkohärenten Oberflächensupraleitung.

- Luftschleuse
- RHEED-System (Reflected High Energy Electron Diffraction)
- XPS-System (X-ray Photoelectron Spectroscopy) mit Argon-Ionenkanone und vorgeschalteter Präparationskammer
- STM-System (Scanning Tunneling Microscope)

Im Jahr 2003 ist das nicht mehr funktionsfähige XPS-System von uns repariert und in Betrieb genommen worden. Bei Testmessungen an einer Niobprobe wurden Oberflächenbeschaffenheit und chemische Wertigkeit der Konstituenten bestimmt. Für die Gruppe MVP wurde eine Probe untersucht, die von einem kupferbeschichteten TTF-Edelstahlbalg stammt. An der Oberfläche und bis in 200 nm Tiefe zeigte sich Kohlenstoff als dominierende Verunreinigung. Der Aussagewert der Messungen ist allerdings durch das bislang erzielte Arbeitsvakuum von 10^{-8} mbar gemindert. Zur Zeit wird an der Verbesserung des Vakuums gearbeitet. Diese Apparatur wird auch für künftige Materialanalysen von großem Nutzen für DESY sein.