

**Schlussbericht im Rahmen des Impuls- und Vernetzungsfonds
- Virtuelle Institute -**

Vorhabenskennzeichnung	
Impulsfonds-Projektnummer:	VH-FZ-005
Projekttitel:	Elektronenquellen für den TESLA-Röntgenlaser und Linear Collider
Federführende/r Wissenschaftler/in	Dr. Klaus Flöttmann
Federführendes Helmholtz-Zentrum:	DESY
Weitere beteiligte Helmholtz-Zentren:	
Beteiligte Universitäten und andere Partner:	Humboldt Universität Berlin, Technische Universität Darmstadt, Universität Hamburg
Berichtszeitraum (Förderungszeitraum)	1.10.2003 – 31.3.2007

1. Zusammenfassung

Der Photoinjektor-Teststand am DESY Zeuthen (PITZ) dient der Untersuchung von Elektronenquellen mit den für Freie-Elektronen Laser und zukünftige Linearcollider geforderten Eigenschaften. Die im Rahmen des HGF-Fonds bewilligten Mittel wurden für den weiteren Ausbau des Teststandes, sowie zur Finanzierung von Doktorandenstellen eingesetzt. So wurden Apparaturen zur Frequenzabstimmung und zur Reinigung von Gunkavitäten, sowie eine Boosterkavität gebaut. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden detaillierte Messungen des longitudinalen Phasenraumes des Elektronenstrahles durchgeführt und der hierfür benötigte Messaufbau optimiert. Eine weitere Doktorarbeit beschäftigte sich mit theoretischen Untersuchungen der Wechselwirkung des Strahles mit dem umgebenden Strahlrohr. In einer dritten, leider nicht zu Ende geführten, Doktorarbeit wurden erste Untersuchungen zur Stabilität und zur Zuverlässigkeit der Photoelektronenquelle durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse haben bereits zu einer Verbesserung des Injektors bei PITZ geführt. Diese Verbesserungen werden auch für die Injektoren bei FLASH und beim XFEL übernommen werden.

2. Arbeits- und Ergebnisbericht

a) Ausgangslage:

Der Photoinjektor-Teststand am DESY Zeuthen (PITZ) dient der Untersuchung von Elektronenquellen mit den für Freie-Elektronen Laser und zukünftige Linearcollider geforderten Eigenschaften. Hier steht vor allem die Erzeugung von Elektronenstrahlen mit besonders guten Strahleigenschaften, beispielsweise hoher Ladungsdichte bei kleiner Emittanz, im Vordergrund. Nachdem die ursprüngliche Ausbaustufe bereits erste Messungen ermöglichte, sollen in einer weiteren Ausbauphase die experimentellen Möglichkeiten erweitert werden. Um eine Verbesserung der Strahleigenschaften zu erreichen und die Einsatzmöglichkeiten an Freie-Elektronen Lasern besser vorzubereiten, muss die Strahlenergie erhöht werden. Dies erfordert nicht nur eine Ergänzung der bestehenden Beschleunigungssektion, sondern auch eine komplette Neukonzeption der Strahldiagnosesektion. Die im Rahmen des HGF-Fonds bewilligten Mittel sollten den weiteren Ausbau des Teststandes, detaillierte Messungen der Strahleigenschaften, sowie theoretische Untersuchungen der Wechselwirkung des Strahles mit dem umgebenden Strahlrohr unterstützen.

b) Fortschritt der durchgeführten Arbeiten:

Der Projektstart gestaltete sich an allen beteiligten Instituten schwierig.

Bei DESY konnte die Produktion bzw. Bestellung der Komponenten nicht gleich beginnen, weil die Vorarbeiten noch nicht abgeschlossen waren, so dass es anfänglich zu einem verzögerten Mittelabfluss kam. Die Verzögerungen konnten im weiteren Verlauf jedoch aufgeholt werden, so dass alle Mittel fristgerecht verbraucht wurden.

Da geeignete Kandidaten fehlten, konnten die Doktorandenstellen an allen drei Universitäten zunächst nicht besetzt werden. Ende 2004 bzw. Anfang 2005 wurden die Doktoranden an der Universität Darmstadt und an der Universität Hamburg dann eingestellt. Abgesehen von diesen Startproblemen wurden die Arbeiten an beiden Universitäten im Folgenden kontinuierlich und mit großem Erfolg betrieben, so dass jetzt zwei durch die HGF geförderte Promotionen kurz vor dem Abschluss stehen.

Die Arbeit an der HUB war überschattet von personellen Problemen. Zunächst war es trotz mehrfacher Ausschreibung sehr schwierig, einen geeigneten Kandidaten für die vorgesehene Doktorandenstelle zu finden. Im Dezember 2004 konnte die Stelle schließlich besetzt werden. Da das ursprünglich vorgesehene Thema der Vermessung des longitudinalen Phasenraums zu diesem Zeitpunkt bereits anderweitig abgedeckt war, wurde der Schwerpunkt der Doktorarbeit in den wichtigen Bereich der Untersuchung der Stabilität und Zuverlässigkeit der Photoelektronenquelle verschoben.

Leider verließ der Doktorand die Arbeitsgruppe aus persönlichen Gründen bereits nach einem Jahr wieder. Im Juni 2005 konnte die Arbeitsgruppe durch einen Postdoc verstärkt werden, der zusammen mit Elektronikern der HUB und DESY in Zeuthen eine sogenannte Quadrantendiode entwickelte. Eine Quadrantendiode ist eine Anordnung von vier dicht beieinander stehenden Dioden, die es ermöglicht, die Position der Einzellaserpulse in einem Pulszug von vielen Hundert Laserpulsen zu beobachten und damit auf die Stabilität des Photokathodenlasers zu schließen. Seit dem Wechsel des Postdocs an ein anderes Institut im April 2006 wird das Thema von anderen Kollegen aus der PIZ-Gruppe weitergeführt. Am 28.01.2006 verstarb dann nach langer schwerer Krankheit der Arbeitsgruppenleiter Prof. Dr. Nikolaj Pavel. Da in dieser Situation die effiziente Weiterführung des Teilprojektes an der HUB kaum möglich erschien, wurden noch verbliebene Restmittel in Höhe von 90901,- Euro nicht abgefordert und den anderen beteiligten Instituten zur Verfügung gestellt. In Absprache mit allen beteiligten Instituten und der HGF wurden die Mittel bei DESY für den Bau von Komponenten für PIZ bzw. für Personalmittel verbraucht.

c) Darstellung der erzielten Ergebnisse:

Bei DESY wurde die Fertigung von drei größeren Komponenten durch die HGF Mittel unterstützt.

Die neu gebaute Apparatur zur Frequenzabstimmung der Gunkavitäten erlaubt es, die Kupferresonatoren mechanisch zu deformieren (typischerweise um einige 10 Mikrometer) und so die Frequenz auf den Sollwert abzustimmen. Die Apparatur wurde bereits für vier Gunkavitäten erfolgreich benutzt und steht zukünftig zur Frequenzabstimmung weiterer Kavitäten für PIZ, FLASH und XFEL zur Verfügung.

Zur Reduzierung des von einer Gunkavität emittierten Dunkelstromes ist es nötig die Anzahl der auf der Oberfläche befindlichen Emitter durch eine spezielle Reinigungstechnik zu minimieren. Die Reinigung mittels CO₂-Schnee ist eine in der Halbleiterindustrie entwickelte Methode, die sich zur Reinigung von Kupferkavitäten anbietet. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung wurde eine zu den Gunkavitäten passende Reinigungslanze entwickelt und in eine Reinigungsapparatur integriert. Eine besondere Herausforderung war hierbei, dass die Düse am Ende der Reinigungslanze schwenkbar sein muss, um alle Flächen der Kavität effektiv reinigen zu können. Nach sehr erfolgversprechenden Vorversuchen an Kupferproben ist die erste Gunkavität nun erfolgreich gereinigt worden. Die Erprobung

der Gun im Betrieb wird in den nächsten Monaten zeigen, ob die gewünschte Reduzierung des Dunkelstromes mittels CO₂-Reinigung erreicht werden kann.

Die für PITZ zu bauende Boosterkavität ist eine relativ komplexe Struktur, die in dieser Form zum ersten Mal gebaut wird. Nach Abschluss der Konstruktionsarbeiten wurden deshalb umfangreiche Vorversuche zur Fertigung der Zellen, zum Lötten, sowie zum Tunen durchgeführt. Nach der anschließenden Fertigung aller Beschleunigungszellen, sowie der Kopplerzelle wurden alle Komponenten hinsichtlich ihres HF-Verhaltens sorgfältig vermessen und in mehreren Schritten abgestimmt. Derzeit werden die Zellen miteinander verlötet. Nach der anschließenden Feinabstimmung steht die Kavität dann zur Konditionierung und zum Betrieb zur Verfügung.

Die Doktorandin der Universität Hamburg beschäftigt sich mit Untersuchungen des longitudinalen Phasenraumes am Photoinjektor, sowie mit seiner weiteren Entwicklung hinter der Boosterkavität.

Die ersten Messungen des longitudinalen Phasenraums und seiner Projektionen (Impulsverteilung und longitudinale Verteilung) des vom Photoinjektor erzeugten Strahles wurden durchgeführt und ausgewertet. Generell ist eine Übereinstimmung der Form des simulierten und gemessenen longitudinalen Phasenraums festzustellen. Jedoch ist die Auflösung der Messung nicht ausreichend, um die simulierte longitudinale Emittanz in allen Einzelheiten zu reproduzieren. Die Auflösung der Messung wurde detailliert analysiert. Eine Optimierung des Systems befindet sich in der Entwicklung. Detaillierte Messungen des Impulses zur Bestimmung der Feldbalance, sowie der Impulsverteilung als Funktion diverser Eingangsparameter wurden durchgeführt.

Eine Schirmstation zur Messung der Bunchlänge und der transversalen Strahleigenschaften wurde entwickelt. Die Optik dieser Schirmstation soll demnächst so modifiziert werden, dass Slice-Emittanz Messungen mittels eines Quadrupolmagneten, sowie Aerogel und Streak-Kamera ebenfalls möglich sind.

Ein hochauflösendes Dipolspektrometer (HEDA1) wurde entwickelt und die zugehörigen Schirmstationen zur Messung des longitudinalen Phasenraums, der Impulsverteilung und der Slice-Emittanz wurden spezifiziert. Das gesamte System soll Ende des Jahres in Betrieb genommen werden.

An der technischen Universität Darmstadt wurden die notwendigen Simulationen von Komponenten des Injektors erfolgreich durchgeführt. Hierzu wurden sowohl vorhandene Programme genutzt, als auch neue Algorithmen und Techniken zur Simulation geladener Teilchen in Beschleunigern und deren abgestrahlten Felder entwickelt und implementiert. Hauptaugenmerk bei den Simulationen waren dabei Unsymmetrien im Strahl bedingt durch den, zunächst dielektrischen, Laserspiegel sowie durch das Doppeldiagnosekreuz.

Die Ergebnisse der Simulationen fanden Eingang in die Weiterentwicklung des Injektors. So konnte mittels Simulationen gezeigt werden, dass der dielektrische Spiegel durch Dunkelstrom statisch geladen wird und im Folgenden eine Unsymmetrie im transversalen Strahlprofil erzeugt. Dieser Spiegel wurde daraufhin durch einen metallischen Spiegel ersetzt. Die Ergebnisse von Wakepotential Berechnungen haben auch Eingang in die Neugestaltung des Diagnosedoppelkreuzes finden.

Während der Laufzeit des Projekts entstanden zwei neue Programme. *tamBCI* ist ein selbst-konsistentes Programm zur Simulation der Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen und elektromagnetischen Feldern. Diese Felder beinhalten externe Felder, wie Beschleunigungsfelder und magnetische Felder zur Beeinflussung der Teilchenbahnen ebenso wie Felder, die von den Teilchen abgestrahlt werden. Das Programm basiert auf einem flexiblen Ansatz und benutzt im Gegensatz zur üblichen Praxis kein festes Gitter zur Diskretisierung des Raumes. Das Gitter wird vielmehr adaptiv angepasst und ist in kritischen Bereichen, wie der Umgebung der Teilchen, feiner als in anderen Bereichen.

PBCI ist ein Programm zur Berechnung von Wakepotentialen. Es basiert auf einem Ansatz, der Dispersionsfreiheit entlang der Propagationsrichtung der Teilchenpakete gewährleistet. Das Programm ist parallelisiert und ermöglicht als erstes seiner Art die

Berechnung von Wakepotentialen nicht-rotationssymmetrischer, annähernd beliebig langer Beschleunigerstrukturen unter Berücksichtigung der vollen dreidimensionalen Geometrie.

Im Rahmen der von der Humboldt Universität Berlin gestalteten Arbeiten wurden seismische Vibrationsmessungen bei PITZ vorbereitet und durchgeführt. Die verwendeten Messdetektoren wurden auch bei der Bewertung der verschiedenen Standorte für den International Linear Collider verwendet. Mit den Messungen bei PITZ kann der Einfluss der benachbarten Landstraße und der Eisenbahnlinie untersucht werden.

Zusätzlich wurde ein Benutzerprogramm entwickelt, mit dessen Hilfe Bilddaten des Laser- und Elektronenstrahls als Funktion beliebiger Anlagenparameter analysiert werden können. Dieses Programm wurde u. a. dazu verwendet die Variation der Laserposition auf der Photokathode zu analysieren. So konnte ein RMS-Jitter von ca. 10 μm in einem Zeitraum von 9 Stunden beobachtet werden. Als mittlere Abweichung ist dies nicht beunruhigend, jedoch gibt es einzelne Zeitintervalle, in denen die Variation größer ist. Diese müssen genauer untersucht werden. Darüber hinaus lässt sich mit diesem Werkzeug auch die Drift über einen längeren Zeitraum beobachten.

Während mit der zuvor beschriebenen Methode nur die Bewegung des Laserpulszuges, der ggf. aus vielen Hundert Einzelpulsen aufgebaut ist, als Ganzes beobachtet werden kann, erlaubt eine Quadrantdiode die Einzellaserpulse zu überwachen. Die weltweit außergewöhnliche Anforderung bei PITZ, lange Pulszüge aus Elektronenpaketen mit sehr guten Strahleigenschaften zur Verfügung zu stellen, ergibt sich aus der Verwendung von supraleitenden Kavitäten in den nachfolgenden Beschleunigersektionen für die Freielektronen Laser FLASH und European XFEL. Um bei der Erfüllung dieser Anforderungen mitzuwirken, wurde im Rahmen des „virtuellen Institutes“ eine Quadrantdiode mit entsprechender Auslese entwickelt. Diese ermöglicht es die Stabilität des Photokathodenlasers und der Laserbeamline innerhalb des Pulszuges zu überprüfen. Der Aufbau wurde erfolgreich getestet und soll in den nächsten Monaten in den Standardaufbau bei PITZ integriert werden.

d) Ausblick auf zukünftige Arbeiten, Nachhaltigkeit:

Der Aufbau der Apparatur zur Frequenzabstimmung der Gunkavitäten, sowie der CO₂-Reinigungsapparatur ist abgeschlossen. Kleinere Modifikationen an der Reinigungsanlage nach den ersten Erfahrungen mit der Reinigung von Gunkavitäten sind zu erwarten. Der Bau der Boosterkavität ist weit fortgeschritten und wird bis zum Ende des Jahres abgeschlossen sein.

Die Inbetriebnahme des hochauflösenden Dipolspektrometers (HEDA1), sowie der dazu gehörigen Schirmstationen steht unmittelbar bevor. Diese wird gefolgt von Messungen des longitudinalen Profils, von Messungen der Impulsverteilung, sowie des longitudinalen Phasenraums. Die Entwicklung eines auf reflektiver Optik aufbauenden optischen Systems zur Verbesserung der zeitlichen Auflösung der Messungen wird fortgeführt.

Bei den neu entwickelten Programmen zeigte sich, dass es auch bei der Verwendung adaptiver Gitter nicht einfach ist, die räumliche Auflösung zu erzielen, die für exakte Ergebnisse notwendig ist. Dies gilt speziell im Bereich der Kathode in dem die Teilchenenergie noch gering ist. Hier ist eine Auflösung von etwa 20 μm nötig. In Verbindung mit der Gesamtlänge der Simulationsstrecke, die sich im Bereich von Metern bewegt, ergeben sich Probleme mit den Speicheranforderungen und der Dauer einer Simulation. An dieser Problematik wird weiterhin gearbeitet und die Implementierung von Hybridverfahren, die außer der Finite Differenzen- / Finite Integrations-Methode auch Finite Volumen und Finite Elemente Techniken verwendet, wird geprüft.

Die Arbeiten zur Stabilität und Zuverlässigkeit der Photoelektronenquelle sind mit den bisherigen Arbeiten nicht abgeschlossen und werden am DESY in Zeuthen weitergeführt. Eine Weiterführung der Kooperation der beteiligten Partner wird angestrebt.

e) Verwertungspotenzial:

Die Apparatur zur Frequenzabstimmung steht für die Abstimmung von Gunkavitäten für PITZ, FLASH und XFEL zur Verfügung. Da der bei DESY entwickelte Guntyp zunehmend auch für andere Projekte von Interesse ist, ist der Einsatz der Apparatur auch an anderer Stelle, bzw. für weitere Projekte, zu erwarten. Ähnlich ist die Situation bei der Anlage zur CO₂-Reinigung. Die schwenkbare CO₂-Strahldüse könnte darüber hinaus ein weites Anwendungsfeld finden, weil sie die Reinigung komplexerer Geometrien erlaubt, als dies bisher möglich war. Der patentrechtliche Schutz der Reinigungslanze wird geprüft. Die für PITZ entwickelte Boosterkavität ist ebenfalls für andere Projekte von Interesse. So könnte sie z. B. beim ILC Projekt sowohl im Elektroneninjektor als auch im Positronenvorbeschleuniger zum Einsatz kommen.

Die Untersuchungen zum longitudinalen Phasenraum sind von fundamentalem Interesse für alle FEL-Projekte und für alle Projekte die ähnlich hohe Anforderungen an die Strahlqualität haben. Die Form des longitudinalen Phasenraums spielt eine entscheidende Rolle für die Wirkungsweise der Bunchkompressoren an Freie-Elektronen Lasern, da eine optimale Kompression nur bei linearer Phasenraumverteilung möglich ist. Eine Linearisierung der Phasenraumverteilung ist möglich, setzt aber eine genaue Kenntnis der einlaufenden Verteilung voraus. Die Überprüfung der von den Simulationsprogrammen gemachten Vorhersagen ist daher essentiell. Gleiches gilt für die genaue Impulsmessung, die für ein besseres Verständnis des Injektors notwendig ist.

Die Verbesserungen im Design des Doppeldiagnosekreuzes finden Einsatz bei PITZ, FLASH und beim XFEL. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Programme werden auch weiterhin zur Simulation und Optimierung von Komponenten des PITZ Injektors, sowie auch anderer Projekte genutzt werden.

Die Quadratendiode wird in Zukunft im Standardbetrieb von PITZ eingesetzt. Der Einsatz der Diode bei FLASH und dem European XFEL wird geprüft.

3. Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses:

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden zwei Doktorarbeiten vergeben, deren erfolgreicher Abschluss erwartet wird.

Der dritte Doktorand ist abgesprungen, um sich an einer Firmengründung zu beteiligen.

4. Publikationen:

Hier werden nur die Publikationen aufgelistet, die unmittelbar dem virtuellen Institut zugerechnet werden können.

A. Oppelt et al., "Tuning, conditioning, and dark current measurements of a new gun cavity at PITZ", FEL 2006, Berlin.

J. Bähr et al., "Upgrades of the laser beamline at PITZ", FEL2005, Stanford.

Y. Ivanisenko et al., "Poto Injector Cathode Laser Beam Intensity and Pointing Position Diagnostics at PITZ", DIPAC 2007, Venedig.

J. Rönsch et al., "Investigation of the Longitudinal Beam Properties at the Photoinjector Test Facility in Zeuthen", FEL 2006, Berlin.

S. Khodyachykh et al., "Design of a Multipurpose Dispersive Section at PITZ", FEL 2006, Berlin.

J. Rönsch et al., "Investigations of the Longitudinal Phase Space at PITZ", EPAC 2006, Edinburgh.

J. Rönsch et al., "Design Considerations of a Spectrometer Dipole Magnet for the Photo Injector Test facility at DESY in Zeuthen (PITZ) ", DIPAC 2007, Venedig.

S. Setzer, W. Ackermann, S. Schnepf, T. Weiland, "Influence of Beam Tube Obstacles on the Emittance of the PITZ Photoinjector", EPAC 2004 Luzern.

S. Schnepf, E. Gjonaj, T. Weiland, "Development of a Self-consistent Particle-in-cell (PIC) Code Using a Time-adaptive Mesh Technique", EPAC 2006, Edinburgh.

E Gjonaj, T Lau, S Schnepf, F Wolfheimer and T Weiland, "Accurate modelling of charged particle beams in linear accelerators", New Journal of Physics.

S. Schnepf, E. Gjonaj, T. Weiland, "A Time-Adaptive Mesh Approach for the Self-Consistent Simulation of Particle Beams", ICAP 2006, Chamonix.

E. Gjonaj, X. Dong, R. Hampel, M. Kärkkäinen, T. Lau, W.F.O. Müller, T. Weiland, "Large Scale Parallel Wake Field Computations for 3D-Accelerator Structures with the PBCI Code", ICAP 2006, Chamonix.

5. Öffentlichkeitsarbeit:

Eine allgemeinverständliche Darstellung der PITZ Testanlage ist auf der PITZ Homepage unter www.desy.de/pitz zu finden.