

Hochfrequenz-Photoinjektoren als Quellen für Elektronenpakete extrem kleiner Länge und Emittanz

Zusammenfassung

DESY plant in Zusammenarbeit mit anderen HGF Zentren und einer großen Zahl internationaler Partner ein internationales Institut für Angewandte- und Grundlagenforschung in Deutschland. Diese Anlage wird weltweit einmalige Forschungsmöglichkeiten in Bereichen von der Elementarteilchenphysik über die Festkörperforschung, Chemie und Materialwissenschaften bis hin zur medizinischen Diagnostik und Molekularbiologie anbieten. Die laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für TESLA werden zu einem integrierten Systemtest für einen supraleitenden Linac und einem SASE FEL im VUV und weichen Röntgenbereich führen (TESLA Test Facility, TTF).

Für den FEL und den Linac Betrieb werden Elektronenstrahlen mit höchster Strahlqualität benötigt. Deshalb wird bei DESY ein Entwicklungsprogramm im Bereich der Hochfrequenzelektronenquellen mit dem Ziel einer Optimierung der Strahlqualität und der Betriebsparameter wie z.B. der Betriebssicherheit, verfolgt. Zur Erreichung dieser Ziele sind neben einer Weiterentwicklung im Bereich der Simulationsrechnungen und theoretischer Ansätze insbesondere qualitativ hochwertige Messungen der Strahlemittanz unabdingbar. Nach bisherigen Erfahrungen ist ohne ein Experimentierprogramm, also nur aufgrund von Rechnungen, kein nennenswerter Fortschritt zu erwarten.

Eine wesentliche Herausforderung bei dieser Entwicklung ist der Bedarf nach leistungsstarken Laserpulsen, die in ihrer Pulsform auf der sub-pikosekunden-Skala wohldefiniert und mit der Zeitstruktur des Linacs synchronisiert sein müssen. Die hierfür am MBI ins Auge gefaßte Technologie auf TiSa-Basis ist ausbaufähig und im Hinblick auf Femtosekundenlaser hoher mittlerer Leistung von breitem Interesse.

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Das FEL Prinzip und die Abhängigkeit von der Qualität des Elektronenstrahles ...	4
3. Funktionsweise von Hochfrequenzelektronenquellen	7
4. Internationaler Stand	10
5. Forschungs- und Entwicklungsprogramm	10
6. Beitrag TU-Darmstadt: Selbstkonsistente Simulation von Photoinjektoren	13
7. Beitrag MBI: Der Photokathodenlaser für den Teststand	14
7.1. Das Designkonzept für den Photokathodenlaser	14
7.2. Im Laser genutzter Verstärkungsprozeß	15
7.3. Der Pumplaser des OPA mit 1.6 kW Laserleistung während des Pulszuges ..	16
7.4. Erzeugung der gewünschten Form der Mikropulse	17
7.5. Zusammenfassung Laser	17
8. Beitrag DESY: Der Teststand für Hochfrequenzelektronenquellen	18
8.1. Resonator- und HF-Koppler- Entwicklung und Bau:	20
8.2. Räumlichkeiten:	20
8.3. Hochfrequenzversorgung:	22
8.4. Wasser und Strom:	22
9. Beitrag BESSY: Diagnostik und Kontrollen	22
10. Referenzen	23
11. Erforderliche Mittel	24
12. Zeitplan	26

1. Einleitung

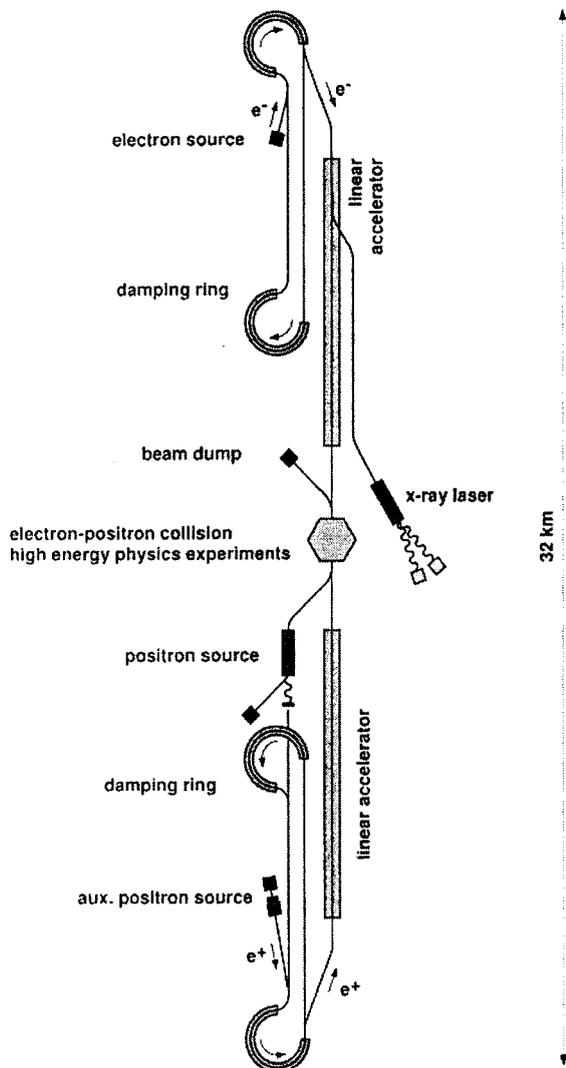


Abb. 1: Schematische Darstellung von TESLA

Der konzeptionelle Entwurf dieser Anlage wurde 1997 in einem zweibändigen „Conceptual Design Report“ [1] veröffentlicht.

Sowohl der Linear Collider als auch der Röntgenlaser hängen in ihrer Leistungsfähigkeit entscheidend von extrem kleinen Strahldimensionen ab. Da es im Linearbeschleuniger (anders als im Speicherring) keinen Mechanismus gibt, der das Phasenraumvolumen (Emittanz) des Strahls reduzieren kann, kommt der Strahlemittanz an der Quelle größte Bedeutung zu.

DESY plant in Zusammenarbeit mit anderen HGF Zentren und einer grossen Zahl internationaler Partner ein internationales Institut für Angewandte- und Grundlagenforschung in Deutschland. Diese Anlage wird weltweit einmalige Forschungsmöglichkeiten in Bereichen von der Elementarteilchenphysik über die Festkörperforschung, Chemie und Materialwissenschaften bis hin zur medizinischen Diagnostik und Molekularbiologie anbieten. Abb. 1 gibt einen schematischen Überblick der geplanten Anlage. Die zentralen Bausteine sind zwei supraleitende Linearbeschleuniger zur Kollision von Elektronen und Positronen („Linear Collider“) mit sehr hoher Bewegungsenergie (250 GeV je Strahl) und eine Röntgenlaser-Anlage, die aus mehreren Freie-Elektronen Lasern (FEL) und weiteren Strahlungsquellen für den Röntgenbereich besteht. Die erwartete Brillanz dieser neuartigen Quellen liegt um viele Größenordnungen über den Werten, die an gegenwärtigen Synchrotronstrahlungsquellen erreichbar sind, s. Abb. 2.

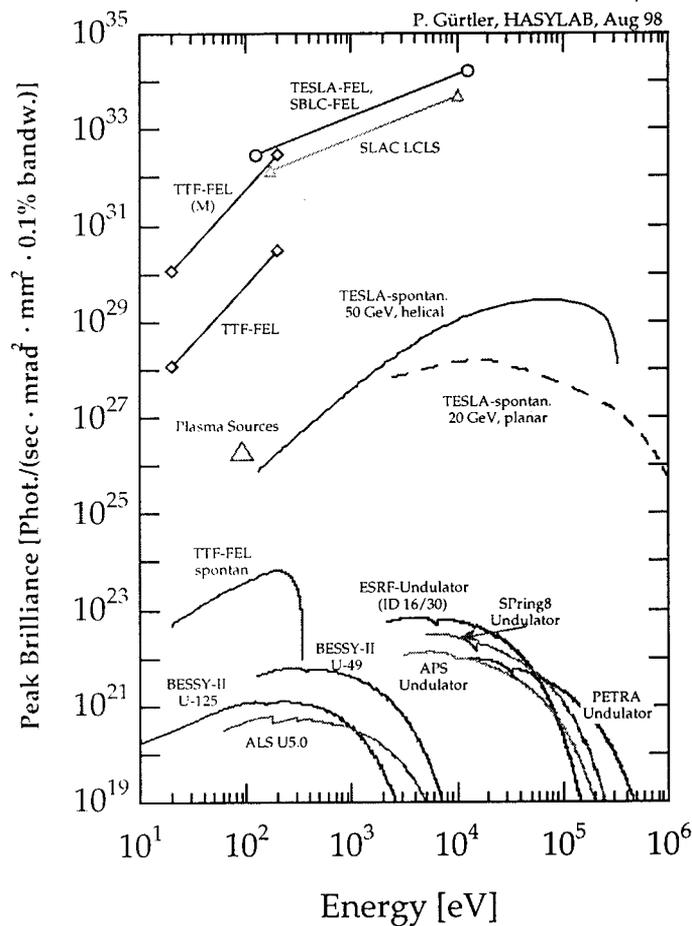


Abb. 2: Spitzenbrillanz an der TESLA-Röntgenlaser-Anlage im Vergleich zu Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation. Auch hinsichtlich der mittleren Brillanz (hier nicht dargestellt) beträgt der Unterschied noch mehrere Größenordnungen.

Die Entwicklung und der Systemtest geeigneter Elektronenquellen war deshalb von Anfang an ein zentraler Bestandteil der TESLA Test Facility (TTF), einer Anlage bei DESY, an der in internationaler Zusammenarbeit die technischen Grundlagen für den Bau von TESLA erarbeitet werden sollen. Es zeigte sich inzwischen jedoch, daß der erforderliche Fortschritt in angemessener Zeit nicht ohne einen separaten Teststand zu erreichen sein wird. Dies gilt vor allem im Hinblick auf den VUV FEL, der durch Ausbau der Test Facility bereits im Jahre 2003 ersten Nutzern einen VUV-Strahl zur Verfügung stellen soll. Dessen Betrieb darf nicht durch die erforderlichen umfangreichen Tests an der Quelle belastet werden.

2. Das FEL Prinzip und die Abhängigkeit von der Qualität des Elektronenstrahles

Um 1970 erkannte J.M.J. Madey, dass kohärente elektromagnetische Strahlung durch stimulierte Emission von Bremsstrahlung verstärkt werden kann, wenn relativistische Elektronen colinear mit dem Strahlungsfeld durch eine periodische Magnetfeldstruktur fliegen [2]. Das Funktionsprinzip mit einem Elektronenstrahl, einer monochromatischen elektromagnetischen Welle und einem Undulator, welcher das magnetische Feld erzeugt, ist schematisch in Abb. 3 dargestellt.

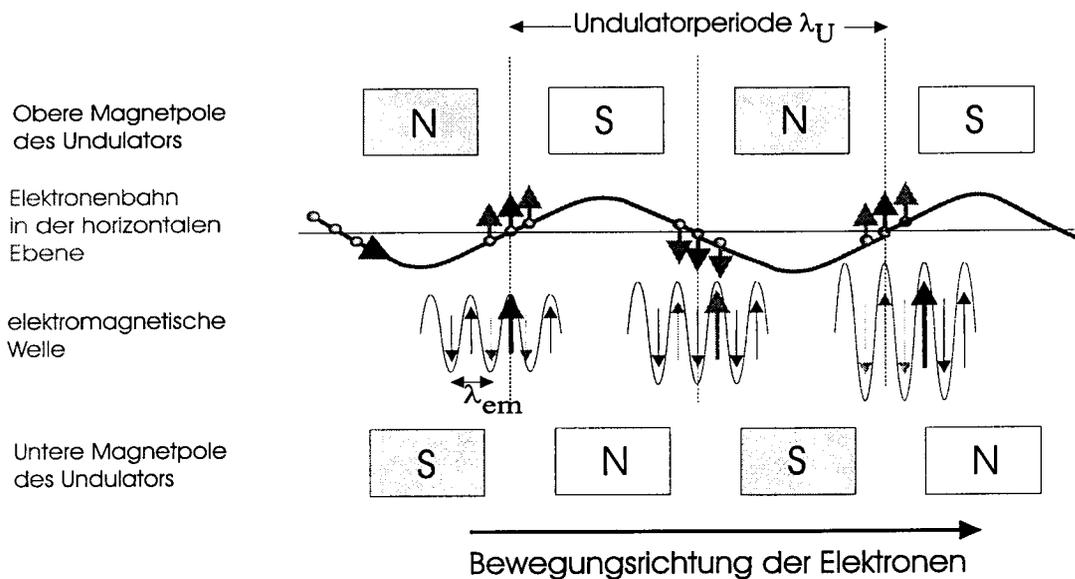


Abb. 3: Resonante Phasenbeziehung zwischen elektromagnetischer Strahlung und transversaler Elektronenbewegung in einem periodischen Magnetfeld.

Zur besseren Veranschaulichung wurde die Elektronenstrahltrajektorie von der Welle separiert dargestellt. Wenn die Strahlung in Resonanz mit der ersten harmonischen der Undulatorstrahlung ist, fällt ein Elektron um eine Photonenwellenlänge pro Undulatorperiode zurück, so dass die Beziehung zwischen der Wellenphase und der transversalen Elektronenbewegung stationär ist. Daher gewinnen einige Elektronen Energie, während andere Energie verlieren. Dies führt zu einer, zur Photonenwellenlänge korrespondierenden, Modulation der Ladungsdichte im Elektronenstrahl. Dieser Microbunching genannte Prozess führt schließlich zu einer verstärkten Emission und zu einer exponentiellen Verstärkung. Durch Änderung der magnetischen Feldstärke B_u des Undulators sowie der Undulatorwellenlänge λ_U und der Elektronenstrahlenergie kann die Photonenwellenlänge λ gemäss der Beziehung

$$\lambda = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

über einen großen Bereich variiert werden. Hier ist γ die Elektronenstrahlenergie in Einheiten der Elektronenruheenergie und $K = 0,934 \cdot B_U[\text{T}] \cdot \lambda_U[\text{cm}]$ der Undulatorparameter.

Hiermit war ein Prozess gefunden, der für Verstärker und Oszillatoren eingesetzt werden kann und einen weiten Frequenzbereich vom Infraroten bis zum

Röntgenbereich hin abdeckt. Basierend auf optischen Kavitäten wurde auch eine Anzahl solcher "Free Electron Laser" = FEL im infraroten und sichtbaren Bereich gebaut. Eine Erweiterung auf Wellenlängen des UV oder in den Röntgenbereich scheiterte aber an der Verfügbarkeit von optischen Komponenten hoher Reflektivität und am Fehlen starker, abstimmbarer und kohärenter Quellen für das Starten des FEL-Prozesses.

Es wurde aber schnell klar, dass der FEL-Prozess im Prinzip auch in einer single pass Anordnung durch die Verstärkung von spontaner Strahlung ablaufen würde, wenn Undulatoren genügender Länge zur Verfügung stehen [3,4]. In diesem Fall wechselwirkt die im ersten Teil des Undulators abgestrahlte, teilweise kohärente Undulatorstrahlung über eine große Distanz mit dem Elektronenstrahl, was schließlich zur Dichtemodulation und der exponentiellen Verstärkung bis zum Sättigungsniveau führt (Abb. 4). Diese sogenannte Selbstverstärkung spontaner Undulatorstrahlung (Self Amplified Spontaneous Emission, SASE) stellt somit eine attraktive Möglichkeit zur Erzeugung intensiver, abstimmbarer und kohärenter Strahlung bei kurzen Wellenlängen dar.

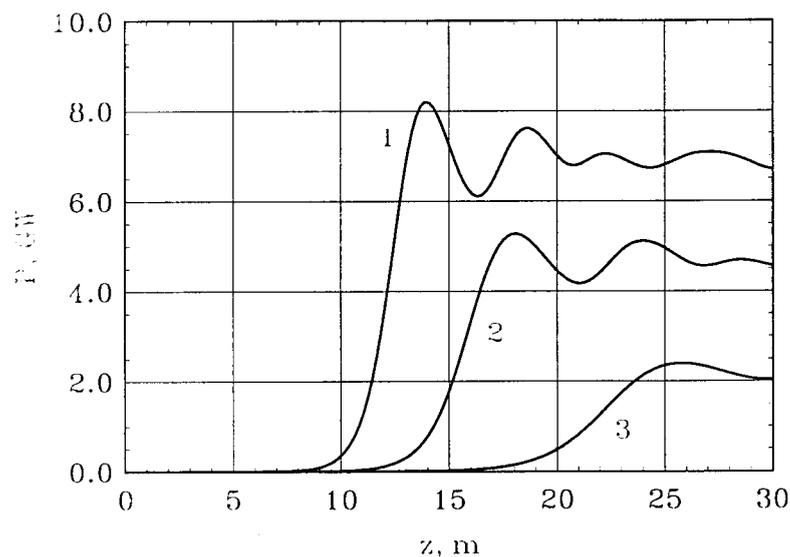


Abb. 4: Abhängigkeit der Ausgangsleistung eines FEL von der normierten Strahlemittanz am Beispiel des TTF FEL bei 6,4 nm. Energiebreite des Elektronenstrahles: 0,1%; transversale Strahlemittanz: (1) $\epsilon_n=10^{-6}$ m, (2) $\epsilon_n=2 \cdot 10^{-6}$ m, (3) $\epsilon_n=4 \cdot 10^{-6}$ m

Die grundlegenden Eigenschaften von SASE können in Form des sogenannten ρ -Parameters [4] ausgedrückt werden, welcher (in der eindimensionalen Theorie) definiert ist als:

$$\rho = \left(\frac{1}{64\pi} \left(\frac{K\lambda_U f_B}{\gamma\sqrt{2}} \right)^2 \frac{I_p}{I_A \beta \epsilon_n} \right)^{1/3}$$

Hier bezeichnet f_B den Entkopplungsfaktor, I_p den Spitzen-Elektronenstrom, I_A den Alfven-Strom (~ 17 kA), β die Betafunktion des Elektronenstrahls im Undulator und

ϵ_n die normierte Strahlemittanz. Typische Werte des ρ -Parameters liegen um 10^{-3} . Der ρ -Parameter legt die gain length $I_g = \lambda_U / 4\pi\rho$ und die maximale Leistung bei Sättigung, $P_{sat} = \rho \cdot P_{beam}$ (P_{beam} ist die Elektronenstrahlleistung) fest (Abb. 4). ρ hängt stark von den Elektronenstrahlparametern ab. Eine hohe Raumladungsdichte bei gleichzeitiger Anpassung des Elektronenstrahldurchmessers und der Elektronenstrahldivergenz im Undulator sind notwendig, um die Wechselwirkung des Strahlungsfeldes mit dem Elektronenstrahl zu maximieren. Nur so können hohe Verstärkung und Sättigung innerhalb einer vernünftigen Undulatorlänge realisiert werden. Zusätzlich muss die Elektronenstrahlenergiebreite $\Delta E/E$ innerhalb eines Strahlpaketes klein genug sein ($< \rho$), damit alle Elektronen die Resonanzbedingung erfüllen. Das exponentielle Wachstum sättigt nach $\sim 1/\rho$ Undulatorperioden durch die vergrößerte Energiebreite des Elektronenstrahls, die durch den FEL-Prozess verursacht wird.

Auch die kleinste mit einem FEL erreichbare Wellenlänge λ_{min} hängt direkt von Parametern ab, die durch die Elektronenquelle bestimmt werden [5]:

$$\lambda_{min} / \text{\AA} \approx 4\pi \frac{\epsilon_n / \text{mrad mm}}{\sqrt{I_p / \text{kA} \cdot L_U / \text{m}}}$$

Hierbei ist L_U die Länge des Undulators.

Diese Zusammenhänge verdeutlichen, wie sehr die Entwicklung im Bereich der Freie-Elektronen Laser für kurze Wellenlängen direkt von der Erzeugung von Elektronenstrahlen höchster Strahlqualität, d.h. von Entwicklungen im Bereich der Elektronenquellen abhängen. Erst durch die Entwicklung von Hochfrequenzelektronenquellen 1986 in den USA [6] können die geforderten Strahlqualitäten erreicht werden. Trotz der ständigen Weiterentwicklung, die seither weltweit stattfand, ist dieser Injektortyp inzwischen aber keinesfalls zur problemlosen Standardkomponente geworden. So sind neben einer weiteren Optimierung der Strahlemittanzen auch Fragen hinsichtlich der Stabilität, der Zuverlässigkeit sowie der Erzeugung flexibler Pulszugmuster zu beantworten.

Jüngste, vielversprechende Entwicklungen am DESY deuten zudem neue Einsatzmöglichkeiten für Hochfrequenzelektronenquellen an. Zu nennen sind hier die Erzeugung von hochbrillianten Strahlen für die Elektronenkühlung von Protonen in PETRA und die Erzeugung von flachen Strahlen für Linear Collider, wobei flach hier einen Strahl mit kleiner vertikaler und größerer horizontaler Emittanz meint.

Zur Erzeugung flacher Strahlen wird ein Solenoidfeld an der Kathode verwendet. Das beim Austritt aus dem Solenoiden normalerweise auftretende korrelierte Emittanzwachstum kann, nach einem Vorschlag von Ya. Derbenev, durch eine geeignete Anordnung von gedrehten Quadrupolen vollständig in die horizontale Ebene transformiert werden. In Simulationen konnten Emittanzen von $2 \cdot 10^{-7}$ m vertikal und $1 \cdot 10^{-5}$ m horizontal bei 1.6 nC Ladung erreicht werden. Dieser Entwicklung kommt eine große Bedeutung im Zusammenhang mit den Planungen für den Bau des Linear Colliders TESLA zu, weil sie einen bedeutenden Beitrag zur Kostenreduzierung und zu einer Vereinfachung der Inbetriebnahme führen kann.

3. Funktionsweise von Hochfrequenzelektronenquellen

Konventionelle Elektronenquellen, bestehend aus einer thermischen Kathode und einer statischen Beschleunigungsstrecke, sind nicht geeignet, die für den Betrieb eines kurzwelligen Freie-Elektronen Lasers notwendigen Elektronenpakete hoher Phasenraumdichte zu erzeugen. Nach der Entwicklung von Hochfrequenzelektronenquellen durch J. Fraser und R. Sheffield [6] Mitte der achtziger Jahre steht jedoch ein neuer Typ von Elektronenquelle zur Verfügung, der die geforderten Phasenraumdichten in greifbare Nähe rückt.

Während in einer statischen Quelle eine Extraktionsspannung von nur 100-300 kV über die kurze Strecke zwischen Anode und Kathode angelegt wird, befindet sich die Kathode in einer Hochfrequenzelektronenquelle innerhalb eines Hohlraumresonators. Die emittierten Elektronen werden durch das Hochfrequenzfeld extrem schnell auf relativistische Energien beschleunigt und verlassen den Resonator bereits mit einigen MeV Strahlenergie. Durch die schnelle, über eine lange Strecke wirkende Beschleunigung werden die Einflüsse der Raumladungskraft auf die Strahlemittanz klein gehalten. Das Prinzip der Hochfrequenzelektronenquelle birgt jedoch einen Konflikt in sich: Die fokussierenden Kräfte, welche die Elektronen im Hochfrequenzfeld erfahren, führen ihrerseits zu einem korrelierten Emittanzwachstum. Um diesen Effekt klein zu halten, ist es notwendig, die Strahldimensionen innerhalb des Resonators klein zu halten.

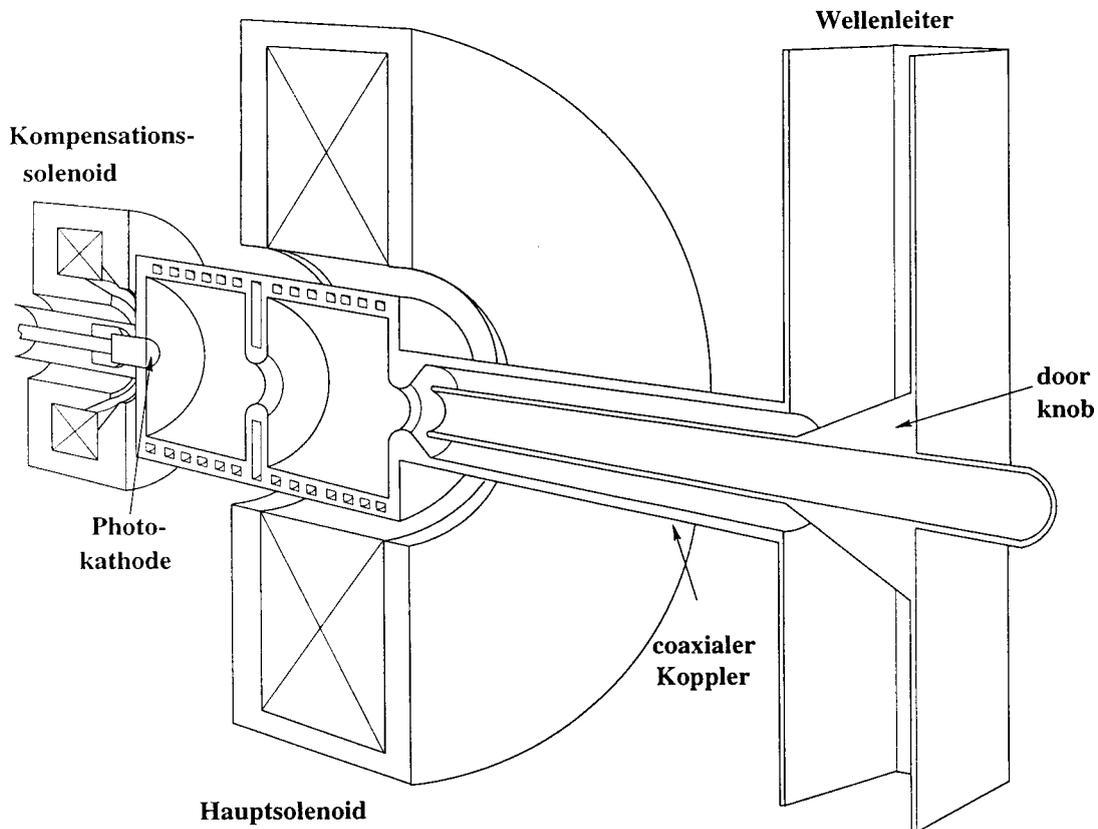


Abb. 5: Querschnittszeichnung der Hochfrequenzelektronenquelle für den TTF FEL (schematisch).

Die erhöhte Teilchendichte führt zu erhöhten Raumladungskräften, wodurch die positiven Eigenschaften der Hochfrequenzelektronenquelle nicht voll zum Tragen kommen. Andererseits reduziert die notwendigerweise kurze Strahlpaketlänge den Aufwand für das weitere Komprimieren des Strahles hinter dem Resonator und ist somit im Falle des Freie-Elektronen Lasers hochwillkommen. Abb. 5 zeigt schematisch einen Schnitt durch die bei DESY gebaute Quelle mit dem neu entwickelten axialsymmetrischen Einkoppler. Dieser Einkoppler vermeidet Feldasymmetrien, die als eine Quelle von Emittanzwachstum identifiziert wurden.

Eine weitere Komplikation der Hochfrequenzelektronenquellen ist, dass die Stromdichte, welche die Kathode emittieren muß, die Grenzen von thermischen Kathoden von ungefähr $100\text{A}/\text{cm}^2$ übersteigt. Typische Parameter von hochbrillianten Hochfrequenzelektronenquellen (z.B. 1nC Ladung, 10ps Pulslänge und 7mm^2 Emissionsfläche) führen zu Stromdichten von $1000\text{-}2000\text{A}/\text{cm}^2$. Deshalb werden Photokathoden verwendet, die nicht nur die notwendigen hohen Stromdichten liefern, sondern es zudem erlauben, mittels des verwendeten Lasers die Pulslänge und Form auf einer Pikosekunden-Zeitskala zu kontrollieren. Die Anforderungen für die Laserleistung und die Laserstabilität sind hoch; zudem ist die durch den Linearbeschleunigerbetrieb bzw. von den Nutzern geforderte Pulszugstruktur für konventionelle Lasersysteme außergewöhnlich. Die Anforderungen an das Lasersystem können jedoch entspannt werden, wenn Photokathoden mit hoher Quantenausbeute verwendet werden. Die Suche nach geeigneten Kathodenmaterialien, die eine hohe Quantenausbeute und eine hinreichende Lebensdauer unter den in einem Hochfrequenzresonator herrschenden Bedingungen erreichen, führte zur Entwicklung von Cäsium Tellurid (Cs_2Te) Kathoden am CERN [7]. Mit einer Quantenausbeute von 2% und einer Lebensdauer von einigen Monaten ist Cäsium Tellurid aus heutiger Sicht das am besten geeignete Material für den Betrieb von Hochfrequenzelektronenquellen mit hohem mittleren Strom.

Das raumladungsinduzierte Emittanzwachstum folgt zumindest teilweise aus einer Korrelation zwischen Phasenraumverteilung und longitudinaler Position im Strahlpaket und kann durch ein einfaches Fokussierungsschema korrigiert werden, wenn die Elektronenquelle innerhalb eines gewissen Parameterbereiches betrieben wird. Das Schema wurde von B. Carlsten [8] entwickelt; Abb. 6 zeigt schematisch die Entwicklung des Phasenraumes entlang verschiedener Positionen des Strahlweges. Ein Elektronenpaket mit verschwindend kleiner Emittanz wird in Abb. 6a gestartet. Die Raumladungskraft wirkt in erster Ordnung als defokussierende Linse, deren Stärke über die Länge des Paketes variiert. Entlang der longitudinalen Richtung ist die transversale Kraft in der Mitte des Paketes am stärksten und nimmt zu beiden Enden hin ab. Deshalb entwickelt sich eine doppelfächerartige Struktur im Phasenraum (Abb. 6b). Nachdem ein fokussierender Kick auf das Paket eingewirkt hat (Abb. 6c) wirkt die Raumladung der Strahldivergenz entgegen, was zu einem teilweisen schließen der Doppelfächerstruktur führt. An der Stelle, an der der Fächer geschlossen ist (Abb. 6d), muß der Prozeß gestoppt werden, um ein erneutes Öffnen des Fächers zu verhindern. Dies wird durch die geeignete Platzierung eines weiteren beschleunigenden Resonators erreicht.

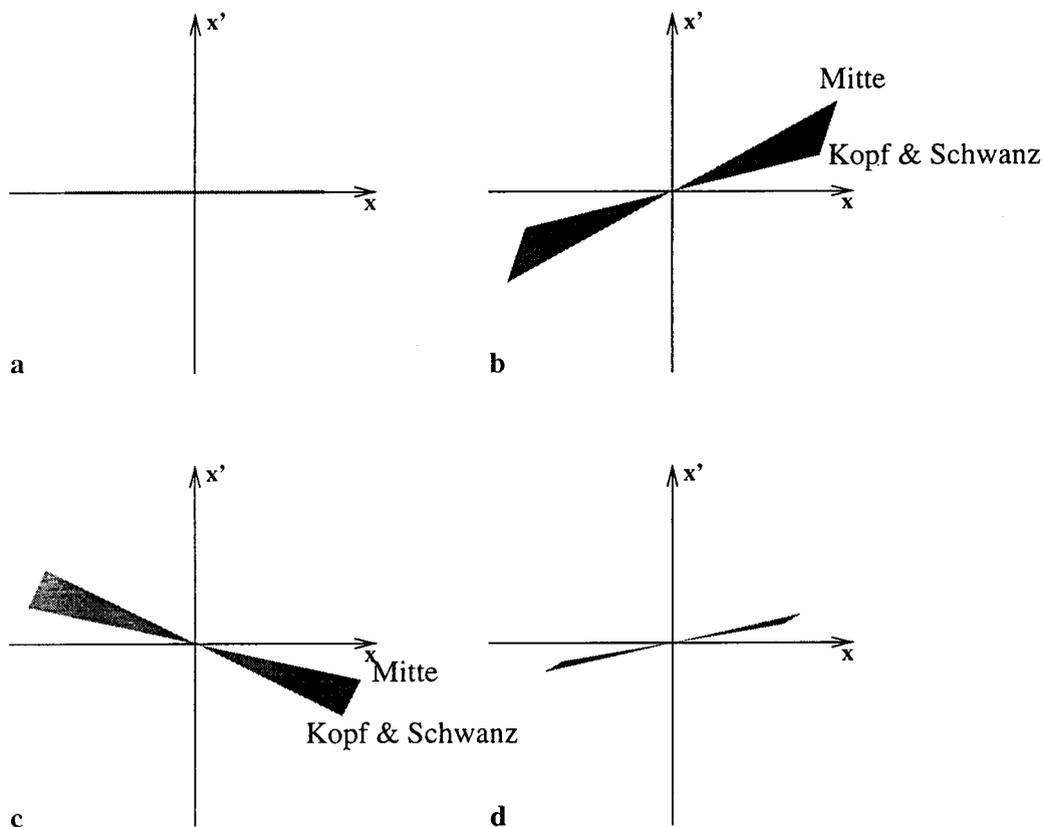


Abb. 6: Schematische Entwicklung des transversalen Phasenraumes beim Kompensationsprozess für raumladungsinduziertes, korreliertes Emittanzwachstum.

In der Praxis wird das Korrekturprinzip durch einen als Phasenraumbifurkation bezeichneten Prozeß limitiert. Das Problem lässt sich mit einem Vergleich erläutern: Der Versuch, das Elektronenpaket entgegen der Raumladungskraft zu fokussieren, ist vergleichbar mit dem Versuch, Kugeln entgegen der Schwerkraft auf einen Bergkamm zu schießen. Wenn der zugeführte Impuls zu groß oder der Berg zu niedrig ist, rollen die Kugeln über den Kamm des Berges hinaus und auf der anderen Seite herrunter. Genau dies passiert mit Elektronen an den Enden des Elektronenpaketes aufgrund der lokal kleineren Raumladungskraft. Während sich das Gros der Elektronen im Phasenraum vom vierten Quadranten (Abb. 6c) in den ersten Quadranten zurück bewegt (Abb. 6d), läuft ein kleiner Teil der an den Enden befindlichen Elektronen vom vierten Quadranten in den dritten und führt so zur Ausbildung eines Strahlhalos. Abgesehen von der Fokussierungsstärke hängt die Ausbildung des Halos stark von der longitudinalen Dichteveriation des Strahlpaketes ab und lässt sich daher über die Form des Laserpulses beeinflussen.

Die Korrektur von raumladungsinduziertem Emittanzwachstum kann in Simulationsrechnungen gezeigt werden und ist in weiten Teilen auch experimentell demonstriert worden. In Simulationen werden transversale Emittanzen von 1π mrad mm und longitudinale Emittanzen von 20 keV mm erreicht. Messungen ergeben i.a. höhere Emittanzwerte als die Simulationen. Neben der Möglichkeit von fehlerhaften oder unvollständigen Simulationen sind hier auch messtechnische Probleme als Ursache zu nennen. Die Messung kleiner Emittanzen ist insbesondere bei niedrigen Energien, wo die Raumladung noch nicht ganz vernachlässigbar ist, sehr schwierig und zum Teil nur durch neu entwickelte Komponenten möglich.

4. Internationaler Stand

Das zunehmende Interesse an Hochfrequenzelektronenquellen spiegelt sich in einer wachsenden Anzahl von theoretischen und experimentellen Entwicklungsarbeiten. Auf experimentellen Gebiet ist das Brookhaven National Laboratory (BNL) hervorzuheben, an dem eine Arbeitsgruppe seit den späten achtziger Jahren auf diesem Gebiet tätig ist. Neben der Entwicklung grundlegender Konzepte zur Gestaltung einer Hochfrequenzelektronenquelle wurden wertvolle Messungen zur Strahldynamik, sowie zum Verhalten metallischer Photokathoden durchgeführt. In Zusammenarbeit mit dem BNL wurde auch eine Hochfrequenzelektronenquelle am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) gebaut, die nun am SLAC in einem Teststand aufgebaut ist. Diese Entwicklung steht in direktem Zusammenhang mit dem am SLAC geplanten LCLS FEL-Projekt und verfolgt z.T. ähnliche Ziele wie die am DESY geplanten Untersuchungen. Im Rahmen einer Collaboration für das TESLA Projekt wurde am Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) eine Hochfrequenzelektronenquelle gebaut und ein Teststand eingerichtet. Eine Kopie dieser Quelle ist seit Kurzem am TTF-Linac im Betrieb. Sie wird wahrscheinlich die für die erste TTF-Betriebsphase notwendigen Strahlparameter erreichen und ist für lange Pulszüge, d.h. für eine hohe thermische Belastung ausgelegt. Sie ist jedoch nicht in Hinblick auf die Erzielung kleinster Emittanzen optimiert. Entwicklungen in Hinblick auf die Erzeugung möglichst hoher Strahlpaketladungen wurden vorwiegend am CERN in Zusammenhang mit dem CLIC Linear Collider Projekt durchgeführt.

Theoretische Arbeiten wurden in den letzten Jahren vorwiegend am INFN in Mailand und an der Universität von Los Angeles durchgeführt. Wichtige Untersuchungen zum Verhalten von Photokathoden wurden ebenfalls am INFN in Mailand sowie am CERN durchgeführt. Das INFN liefert auch die Photokathoden für die TESLA Test Facility.

Im Bereich der Laserentwicklungen wird vorwiegend auf Eigenentwicklungen der einzelnen Laboratorien gesetzt. Der Einsatz an einem supraleitenden Linac und die damit verbundene Pulsstruktur, sowie die an eine User-Facility gestellten Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Stabilität erfordern jedoch die Zusammenarbeit mit Laser Instituten. So wurde, neben der Entwicklung des MBI für DESY, der am FNAL im Einsatz befindliche Laser von der Universität Rochester konzipiert und gebaut. Die Laserentwicklung am MBI ist somit von zentraler Bedeutung für TESLA, und für die FEL- und Photoinjektorentwicklung weltweit.

5. Forschungs- und Entwicklungsprogramm

Neben den erwähnten völlig neuen Einsatzmöglichkeiten und den damit verbundenen Fragestellungen ist für die Entwicklung der Hochfrequenzelektronenquellen für Freie-Elektronen Laser die Frage nach der ultimativ kleinsten erreichbaren Emittanz und dem diese Emittanz bestimmenden Prozess von zentraler Bedeutung. Um diese Fragen angehen zu können ist, neben einer Weiterentwicklung analytischer Ansätze, die Neuentwicklung von Computerprogrammen zur Simulation der Elektronenquellen notwendig, weil die zur Verfügung stehenden Programme, trotz einiger Verbesserungen jüngerer Datums, den gestiegenen Anforderungen nicht gerecht werden. Ein bei DESY im letzten Jahr neu geschriebenes Programm (ASTRA) liegt jetzt in einer ersten Version vor und wird die Grundlage für weitere Entwicklungen in den nächsten Jahren legen. Desweiteren wird in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt und der Universität Rostock an einer Kombination verschiedener

Programme gearbeitet, die es erlauben werden, die Simulation über den Injektor hinaus durch den Linearbeschleuniger und die Bunchkompressoren bis hin zum Undulator zu erweitern (*Track).

Das neue Programm erlaubt neben einer präzisen und schnellen Simulation des Strahltransportes eine detailliertere Analyse der Entwicklung des Phasenraumes als dies bisher möglich war, so dass ein besseres Verständnis der Strahldynamik zu erwarten ist. Als erste Aufgaben sind vorgesehen:

- großräumige Parameterscans.
- Untersuchung der Entwicklung des Raumladungsfeldes und des Emittanzwachstums beim Austritt der Elektronen aus der Kathode.
- Untersuchung zum Einfluss des Feldverlaufes des Hochfrequenzfeldes auf die Strahldynamik und Optimierung des Feldverlaufs bzw. der Hohlraumresonatorgeometrie.
- Untersuchung des Einflusses der longitudinalen Laserpulsform auf die Strahlemittanz und die Haloformation.
- Untersuchungen zur Strahldynamik des Dunkelstromes.

Parallel zu den theoretischen Arbeiten ist eine experimentelle Verifikation der gewonnenen Erkenntnisse zur Absicherung und zur Weiterentwicklung unverzichtbar.

Ein wichtiger, aber nicht sehr gut bekannter Beitrag zur Strahlemittanz, ist die sogenannte thermische Emittanz, womit die intrinsische Emittanz der Elektronen beim Austritt aus der Kathodenoberfläche bezeichnet wird [9]. Sie hängt vom Kathodenmaterial, der Energie der verwendeten Laserphotonen und wahrscheinlich von der Belegung der Kathodenoberfläche mit Adsorbatschichten ab. Messungen der thermischen Emittanz unter variierenden Bedingungen sind am INFN in Mailand in Vorbereitung. Neben einer Messung bzw. Beeinflussung der thermischen Emittanz sind Weiterentwicklungen der Kathoden im Hinblick auf eine Erweiterung der Lebensdauer bzw. der Robustheit gegenüber schlechten Vakuumbedingungen wünschenswert.

Im Hinblick auf den Betrieb eines Freie-Elektronen Lasers an einem supraleitenden Linearbeschleuniger und den dadurch möglichen langen Pulszügen mit hohem mittleren Strom sind eine Reihe von technologischen Fragen zu untersuchen. Dies betrifft insbesondere die mit der Einleitung eines langen Hochfrequenzpulses großer Leistung in einen normalleitenden Hohlraumresonator verbundenen thermischen und hochfrequenztechnischen Probleme. Da eine weitere Erhöhung der Hochfrequenzleistung aus Sicht der Strahldynamik wünschenswert erscheint werden sich diese Probleme in der Zukunft noch verschärfen.

Im Bereich der Strahldiagnostik sind in den letzten Jahren zahlreiche Weiterentwicklungen und neue Konzepte vorgeschlagen und teilweise realisiert worden, die z.T. auch für die niedrigen Energien am Injektor nutzbar sind. Zu nennen sind hier die Bunchlängenmessung, z.B. mittels Josephson-Kontakten, aber auch neue hochauflösende Strahlschirme auf der Basis von Nd:YAG-Pulver und Verbesserungen im Aufbau von Schlitzmasken, den sogenannten Pepperpots.

Aus der Sicht der Laserentwicklung ist ein Photokathodenlaser für eine RF-Gun mit der Pulsstruktur des TESLA Beschleunigers durch folgende primäre Parameter bestimmt:

die *Mikropulslänge*, hier im ps- oder Sub-ps-Bereich, die aus der angestrebten Emittanz des Beschleunigers folgt; die *Makropulslänge* von ca. 1 ms; die beiden *Taktfrequenzen* der Mikro- und Makropulse (1 MHz bzw. 10 Hz); die *Wellenlänge* der Photonen (250 nm), die durch die Austrittsarbeit der Kathode vorgegeben ist,

sowie die *Pulsenergie* der Mikropulse, in die das Produkt der Quanteneffizienz der Photokathode und der gewünschten Bunch-Ladung des Beschleunigers eingeht.

Sekundäre Parameter aus der Sicht des Laserdesigns (wenn auch für die Anwendung ebenso wichtig) sind die *Synchronisierbarkeit* auf die externe RF-Frequenz mit ps-Genauigkeit, die *Amplitudenstabilität* im Bereich weniger Prozent, und eine vergleichsweise hohe *Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit* des Gesamtsystems.

Nach dem heutigen Stand der Technik können diese Parameter jeweils einzeln relativ leicht erfüllt werden, ihre Kombination erfordert jedoch eine neuartige, äußerst anspruchsvolle Laserentwicklung an der Grenze des technisch Machbaren.

Mit der einzigen Beschränkung auf eine minimale Pulslänge (bzw. Flankensteilheit) von wenigen ps konnte in den letzten Jahren am Max-Born-Institut in Berlin ein TTF-Photokathodenlaser entwickelt werden, der die obigen Spezifikationen als weltweit erstes und einziges System vollständig erfüllt. Neben der sorgfältigen Auswahl des aktiven Materials (Nd - dotiertes Yttrium-Lithium-Fluorid, Nd:YLF) war dazu die Entwicklung neuartiger Design-Elemente notwendig, wie z.B. ein Pulszug-Oszillator der geforderten Zeitstruktur, aktive elektronische Regelung des Blitzlampen-Stroms zum Pumpen des Materials, adaptive Optik und eine neuartige Synchronisations-Elektronik. Der Laser ist seit einigen Monaten am TTF-Beschleuniger sehr erfolgreich im Einsatz.

Mit dem vorliegenden Projekt eines Teststands für Hochfrequenzelektronenquellen extrem kleiner Länge und Emittanz ergibt sich eine neue Herausforderung an die Laserentwicklung. Während alle anderen Spezifikationen praktisch unverändert bleiben, bewirkt allein die Forderung nach einer Pulsdauer bzw. Flankensteilheit im sub-ps-Bereich, dass das bisher eingesetzte aktive Medium Nd:YLF nicht mehr verwendet werden kann. Eine einfache Substitution durch ein anderes Medium höherer Bandbreite, z.B. mit Titan dotierter Saphir (Ti:Sa), Nd-dotiertes Glas oder Chrom-dotierte Fluoridkristalle, ist nicht möglich. Sei es die geringere optische Speicherfähigkeit von Ti:Sa, die geringe Wärmeleitfähigkeit von Glas oder die Schwierigkeit, großvolumige Fluoridkristalle geeigneter Qualität herzustellen: in jedem Fall ist es fraglich, ob die geforderte mittlere Leistung bei gleichzeitig kürzesten Pulsdauern im Mikropuls prinzipiell erreicht werden kann. Theoretische Abschätzungen ergeben, dass mit dem vorhandenen Nd:YLF-Laser offenbar die Möglichkeiten einer konventionellen Oszillator-Verstärker-Anordnung weitgehend ausgeschöpft sind, wenn es gilt, die TESLA Spezifikationen gleichzeitig zu erfüllen. Andererseits ist die Forderung nach kürzeren Pulsen bzw. höherer Flankensteilheit unverzichtbar für einen derartigen Teststand. Nur auf experimentellem Wege kann das Optimum der Laserpulslänge bzw. -form herausgefunden und damit sichergestellt werden, dass künftige Beschleuniger in ihrer Emittanz nicht unnötig durch den Laser eingeschränkt sind.

Für das vorliegende Projekt wird daher vorgeschlagen, einen neuartigen Photokathodenlaser mit der TESLA-Zeitstruktur zu entwickeln, der wesentlich kürzere Pulse (< 1 ps) und weitgehend frei wählbare Pulsform besitzt. Dieses Ziel kann nur unter Verwendung modernster Techniken und innovativer Verstärkerkonzepte erreicht werden. Das vollständige Lasersystem wird in einem der folgenden Kapitel vorgestellt.

Diese Laserentwicklung, obwohl aus den spezifischen Bedürfnissen der Photokathodenentwicklung entstanden, enthält neue Elemente, die in einem wesentlich weiteren Umfeld von Interesse und Nutzen sein können. Der wichtigste Aspekt ist, dass die positiven Eigenschaften des wohl modernsten aktiven Lasermaterials, Ti:Saphir, mit den Erfordernissen einer sehr hohen mittleren Leistung

verbunden werden. Die mittlere Leistung von 200 W wird während des gesamten Makropulses erreicht, also über Zeiten, die sehr lang im Vergleich zur optischen Speicherzeit des Mediums sind. Damit wird zumindest während dieser Zeit die mittlere Leistung üblicher Ultrakurzpuls-Laser (1-10W) um mindestens eine Größenordnung übertroffen.

Dies ist insofern bemerkenswert, als die Ultrakurzpulstechnik im Femtosekundenbereich viele potentielle Anwendungsgebiete hat (Materialbearbeitung einschließlich Ultrapräzisionsbearbeitung von Oberflächen, Erzeugung inkohärenter Röntgenpulse aus Plasmaquellen, Femtochemie, nichtlineare Prozesse in der Meßtechnik, Analytik, medizinischen Diagnostik und Therapie, u.a.), die bisher hauptsächlich wegen der unzureichenden mittleren Leistung der Laser wenig Verbreitung finden konnten. Darüberhinaus werden neue Möglichkeiten der flexiblen Pulsformerzeugung und der optisch parametrischen Verstärkung erprobt, die sich sofort auf eine Vielzahl anderer Anwendungen übertragen lassen.

6. Beitrag TU-Darmstadt: Selbstkonsistente Simulation von Photoinjektoren

Die Standardprogramme zur Berechnung von Elektronenquellen sind EGUN für statische Quellen und PARMELA für die Berechnung von Hochfrequenzelektronenquellen. Beide Programme sind bereits sehr lange verfügbar, aber nutzen die durch die neuen Entwicklungen im Computer- und Softwarebereich gegebenen Möglichkeiten nicht voll aus. Auch den gestiegenen Anforderungen der Programmbenutzer wird nicht Rechnung getragen. Das bei DESY neu entwickelte Programm ASTRA basiert auf ähnlichen Prinzipien wie PARMELA. Einen alternativen Ansatz zu ASTRA und PARMELA verfolgen Particle-In-Cell (PIC) Verfahren im Zeitbereich, die beispielsweise im Programm TS2/TS3 des MAFIA-Programmpaketes verwendet werden [10]. Diese Verfahren erlauben im Prinzip eine vollständig dreidimensionale und selbstkonsistente Behandlung von raumladungsdominierten Strahlwegen. Bedingt durch globale Stabilitätskriterien ergibt sich für jede explizite, voll selbstkonsistente Analyse im Zeitbereich ein maximaler Zeitschritt auf der diskreten Zeitachse. Dies führt zu erheblichen Problemen im direkten lokalen Bereich der Emission, da die Anfangsgeschwindigkeiten der Elektronen sehr gering sind, woraus eine unakzeptabel lange Simulationszeit resultiert [11]. Diese Probleme können durch vereinfachende Modellbildungen umgangen werden. In einem vorbereitenden Schritt sollen die Modellbildungen für den einfacheren Fall statischer Quellen realisiert werden, bevor die Berechnung auf den Fall der Hochfrequenzquellen ausgedehnt wird.

Ein weiteres Forschungsfeld ist das der Sekundäremission und der damit eng verbundenen Dunkelströme. Hier sind zwar schon eine Reihe von Arbeiten publiziert, es fehlt jedoch nach wie vor an einer realitätsnahen Methode für eine dreidimensionale Simulation. Durch eine Erweiterung der vorhandenen PIC-Module kann ein solches Werkzeug realisiert werden.

Für beide hier skizzierten Anwendungsgebiete sind experimentelle Vergleiche unabdingbar. Die reine Feldsimulation ist durch direkte Lösung der Maxwell'schen Gleichungen sehr genau und nur durch numerische Ungenauigkeiten begrenzt. Ähnliches gilt für die Lösung der Bewegungsgleichung. Der Bereich der Emissionsmechanismen, sowohl an der Quelle als auch für Sekundäremissionen, ist jedoch durch stark vereinfachende Modellbildungen charakterisiert und bedarf

umfangreicher Validierungen. Nur so wird das Ziel erreichbar sein, Elektronenquellen durch Computersimulation zuverlässig analysieren und optimieren zu können.

Die erhebliche Erweiterung der Simulationsmöglichkeiten auf volle Dreidimensionalität für den unmittelbaren Bereich der Kathode sowie für Dunkelströme stellt eine optimale Ergänzung zu anderen Simulationsmöglichkeiten, wie z.B. ASTRA, dar und paßt sich nahtlos in die *Track Initiative ein, die eine umfassende Simulation für Linearbeschleuniger als Ziel hat.

7. Beitrag MBI: Der Photokathodenlaser für den Teststand

7.1. Das Designkonzept für den Photokathodenlaser

In den vergangenen Jahren wurde am Max-Born-Institut ein Photokathodenlaser entwickelt und an der Tesla-Test-Facility erfolgreich erprobt, der nun zur Erzeugung von Elektronenbunchen dient. Dieser Photokathodenlaser erfüllt die Mehrzahl der Parameter, die vom Laser des Teststandes verlangt werden.

Nun besteht jedoch eine besondere Forderung an den für den Teststand bereitzustellenden Laser darin, dass dieser Pulse mit kürzeren Anstiegsflanken generieren muß. Derartig kurzen Anstiegsflanken lassen sich mit dem jetzigen TTF-Photokathodenlaser prinzipiell nicht erreichen. Aus diesem Grund erfordert der Photokathodenlaser für den Teststand ein grundsätzlich anderes Designkonzept, welches in Abb. 7 skizziert ist.

Das neue Konzept sieht vor, einen ca. 0.3 ps langen Laserpulse mit einem resonatorgeschalteten Titan-Saphir-Oszillator zu erzeugen. Die Pulse werden anschließend auf 20 ps Halbwertsbreite gechirpt und in einem optisch-parametrischen Verstärker verstärkt. Mit Hilfe zweier nichtlinearer Kristalle wird die Wellenlänge auf 260 nm transformiert. Am Ausgang des Lasersystems wird die für die Anwendung optimale Pulsform hergestellt. Zum Pumpen des parametrischen Verstärkers dient eine erweiterte Version des TTF-Photokathodenlasers, dessen Ausgangsleistung um etwa eine Größenordnung erhöht werden muß.

Pulslänge	6-20 ps FWHM
Form der Mikropulse	rechteckig, mit kurzen Anstiegsflanken
Neue Forderung an die Anstiegsflanke der Mikropulse	< 1 ps
Wellenlänge (UV)	$\lambda = 260 \text{ nm}$
Energie je Mikropuls im UV	20 μJ (bei 1 MHz)
Energie je Makro-Pulszug im UV	160 mJ
Länge des Makro-Pulszuges	max. 800 μs
Repetitionsfrequenz der Mikropulse	1 MHz und 9 MHz
Repetitionsfrequenz der Makro-Pulszüge	5...10 Hz

Tabelle 1: Angestrebende Pulsparameter des Photokathodenlasers

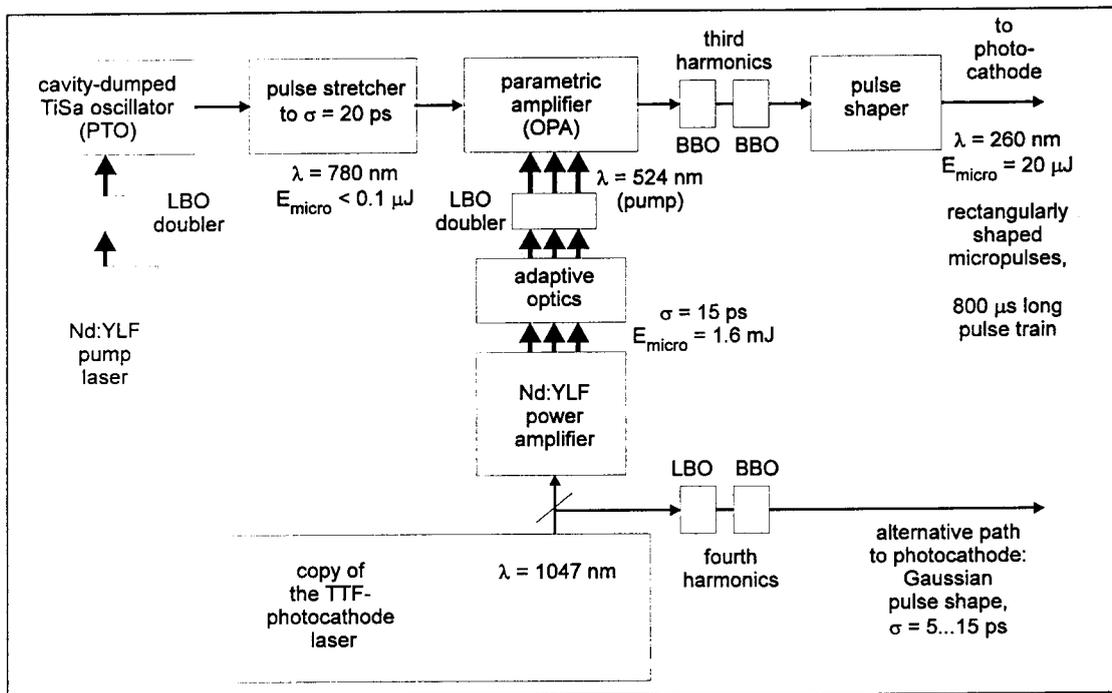


Abb. 7: Prinzipschema des Photokathodenlasers für den Teststand

7.2. Im Laser genutzter Verstärkungsprozeß

Der geplante Photokathodenlaser soll im Vergleich zum Photokathodenlaser der Tesla-Test-Facility Pulse generieren, deren Anstiegsflanken deutlich kürzer als 1 ps sind. Leider sind derartig kurzen Anstiegsflanken mit dem bei TTF verwendeten Lasermaterial Nd:YLF nicht zu erreichen. Nd:YLF zeichnet sich durch lange Lebensdauer des oberen Laserniveaus ($\tau = 480 \mu\text{s}$), einen genügend großen Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission ($\sigma = 1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) sowie vorteilhaft schwache thermische Linsenwirkung aus. Es besitzt aber nur eine Fluoreszenzbandbreite von 2 nm. Andere Materialien mit größerer Fluoreszenzlebensdauer, wie Cr:TiSa, Alexandrit, Neodym-dotierte Gläser wurden auf ihre Eignung zur Erzeugung von 800 μs langen Pulszügen untersucht. Alle diese Materialien haben jedoch im Vergleich zu Nd:YLF entweder eine kleinere Lebensdauer des oberen Laserniveaus (wie z.B. Cr:TiSa mit $\tau = 3.2 \mu\text{s}$) oder einen kleineren Wirkungsquerschnitt für stimulierte Emission (wie z.B. Neodym-dotierte Gläser mit $\sigma = 0.4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$). Daher müssten die Materialien intensiver als Nd:YLF gepumpt werden. Da die über einen 800 μs Laserpulszug gemittelte Laserleistung von etwa 200 W erreicht werden soll, wären je nach Wirkungsgrad des Pumpsystems während diese Pulszuges Pumpleistungen zwischen etwa 3 Kilowatt und einigen 100 Kilowatt erforderlich.

Wegen dieser hohen Pumpleistungen ist es extrem schwierig, einen bei 10 Hz Folgefrequenz und 800 μs Pulszuglänge arbeitenden Photokathodenlaser auf der Basis der genannten Materialien aufzubauen. Zumindest würde der Entwicklungsaufwand den des zum Bau des jetzigen mit Nd:YLF arbeitenden Lasers um ein Mehrfaches übersteigen.

Die aus der hohen Pumpleistung resultierenden Probleme können umgangen werden, wenn der Verstärkungschanal des Photokathodenlasers nicht auf dem üblichen Laserprinzip der stimulierten Emission beruht, sondern die sogenannte parametrische Verstärkung nutzt, welche in speziellen nichtlinearen Kristallen erreicht werden kann.

Bei dieser parametrischen Verstärkung wird im Gegensatz zur stimulierten Emission keine wesentliche Wärmeleistung im Verstärkungsmedium freigesetzt.

Parametrische Verstärker werden in der Fachliteratur seit längerem beschrieben, wobei in den letzten Jahren erstmalig Pulsenergien bis 400 J bei 21 fs Pulslänge diskutiert werden. Jedoch blieb die experimentelle Realisierung solcher Verstärker bisher auf Pulsenergien im Mikro- und Millijoulebereich bei mittleren Leistungen unterhalb von 1 W beschränkt. Die Abschätzungen zeigen aber deutlich, dass mit diesem Verfahren während des 800 μ s langen Pulszuges eine mittlere Ausgangsleistung von 200 W bei Pulslängen kürzer als 0.1 ps erreichbar ist, sofern ein genügend leistungsfähiger Pumplaser benutzt wird.

7.3. Der Pumplaser des OPA mit 1.6 kW Laserleistung während des Pulszuges

An den Pumplaser für den optisch-parametrischen Verstärker (OPA) werden äußerst hohe Anforderungen gestellt. Der Pumplaser muß im TEM-00-Mode arbeiten und ein nahezu beugungsbegrenztes Wellenfeld erzeugen. Da der OPA im Gegensatz zu Lasermedien keine Energiespeicherfähigkeit besitzt, muß der Pumplaser darüber hinaus die Strahlungsenergie mit demselben Pulsmuster wie der gewünschte Ausgangspuls, aber mit größerer Länge der Mikropulse bereitstellen.

Ein geeigneter Pumplaser für den OPA ist nicht kommerziell verfügbar. Jedoch erweist sich eine erweiterte Version des bereits bewährten TTF-Photokathodenlaser als optimal geeignet. Somit wird eine Kopie dieses TTF-Photokathodenlasers in den neuen Lasers direkt integriert. Dies hat ferner den Vorteil, dass der Pumplaser auch unabhängig vom OPA zur Bestrahlung der Photokathode benutzt werden kann, sofern für das jeweilige Experiment keine kurzen Pulse oder keine Pulse mit kurzen Flanken erforderlich sind.

Um den TTF-Photokathodenlasers als Pumplaser für den OPA einsetzen zu können, muß jedoch dessen Pulsenergie um den Faktor 10 vergrößert werden. Dieser Faktor setzt sich aus folgenden Verlustquellen zusammen:

- Die parametrische Verstärkung wird einen Wirkungsgrad um 15% erreichen.
- Zur Einstellung der gewünschten Pulsform des Laserpulses ist am Ausgang des Lasersystem ein entsprechendes Teilsystem vorgesehen, welches einen Verlustfaktor von 2 erzeugt.
- Ein leichter Energiegewinn um den Faktor 1.5 ist im Vergleich zum TTF-Photokathodenlaser zu erwarten, da am Ausgang des Lasersystems die Frequenz der auf die Photokathode gesendeten Strahlung verdreifacht (und nicht vervierfacht) wird.

Die genannte Leistungserhöhung des Pumplasers für den OPA soll durch einen zusätzlichen Nd:YLF-Verstärker mit 12 mm Stabdurchmesser erreicht werden, so dass dann die über den Pulszug gemittelte Laserleistung 2.0 kW beträgt.

Im TTF-Photokathodenlaser treten bereits bei viel kleinerer mittlerer Leistung Wellenfrontdeformationen infolge der Temperaturgradienten in den Laserstäben auf, die z.Z. mit Hilfe zweier verfahrbarer Zylinderlinsen kompensiert werden. Beim Pumplaser für den OPA ist es unbedingt erforderlich, die räumliche Auflösung dieses Kompensationssystem deutlich zu verbessern. Anderenfalls würden sich die Wellenfrontdeformationen des Pumpstrahls beim parametrischen Verstärkungsprozeß auf die Signalwelle übertragen oder zu nicht tolerierbaren Intensitätsmodulationen im Ausgangspuls führen.

7.4. Erzeugung der gewünschten Form der Mikropulse

Zur Erzeugung variabler Pulsformen von ps-Pulsen werden in der Fachliteratur zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren beschrieben:

1. Synthese des Pulses aus mehreren kurzen Einzelpulsen (Pulse-stacking). Die Einzelpulse werden durch Teilung des Strahls erzeugt und können in den Teilarmen des Systems je nach Erfordernis unterschiedlich abgeschwächt werden. Diese Verfahren zeichnet sich durch seine Einfachheit und Übersichtlichkeit bei ausreichender Flexibilität in der Pulsform aus. Nachteil des Systems ist die Restwelligkeit im Hauptteil des Laserpulses.
2. Optische Pulsformung durch spektrales Maskieren (pulse shaping by spectral masking). Bei diesem Verfahren werden die einzelnen Spektralkomponenten des Laserpulses mit Gittern zunächst räumlich aufgespalten. In der so erzeugten Fourierebene modifiziert man mit Hilfe von Masken und Transmissionfiltern das Spektrum derart, dass nach Rekombination der einzelnen Spektralkomponenten ein Puls der gewünschten Form entsteht.

Es ist geplant, im Rahmen des Projektes beide Verfahren zu testen und das geeignetere auszuwählen. Ferner ist eine Entscheidung über den günstigsten Ort des Pulsformers zu treffen. Dabei hat man zu beachten, dass im Verstärkungskanal mehrere nichtlineare Prozesse wie Sättigung des OPA und der Frequenzkonversion in die 3. Harmonische ausgenutzt werden. Diese Nichtlinearitäten führen zu Veränderungen der Pulsform während des Durchganges durch den Strahlkanal. Deshalb erreicht man eine möglichst einfache Programmierung des Pulsform, wenn der Pulsformer am Ausgang des Lasersystems anordnet wird.

7.5. Zusammenfassung Laser

Die angestrebten Parameter des Photokathodenlasers liegen an der Grenze dessen, was mit dem derzeitig verfügbaren lasertechnischen Know-how erreichbar ist. Die angestrebten Laserparameter erfordern im Vergleich zum Photokathodenlaser von TTF ein neuartiges Designkonzept. Vom MBI wird ein Laserkonzept vorgeschlagen, welches auf einer Kombination der nachfolgend aufgelisteten Lasertechnologien beruht.

- Erzeugung kurzer Laserpulse ($\tau \ll 1$ ps) mit einem TiSa-Oszillator;
- Verstärkung der Laserpulse mit großer Bandbreite in einem optisch-parametrischen Verstärker (OPA);
- Effizientes Pumpen des OPA durch einen frequenzverdoppelten Nd:YLF-Pulszuglaser mit hoher Leistung der ps-Pulszüge;
- Korrektur der durch thermische Linsenwirkung im Endverstärker des Pumplasers verursachten Wellenfrontdeformationen mittels computergesteuerter Optiken.

Darüber hinaus ist das Konzept so ausgelegt, dass das Lasersystem prinzipiell Pulse mit zwischen 750 und 850 nm abstimmbarer Wellenlänge generieren kann. Damit ist das System nach entsprechender Modifikation zur Erzeugung polarisierter Elektronen mit GaAs-Kathoden geeignet.

Das MBI hat an der Anwendung und Weiterentwicklung der o.g. Technologien ein großes Interesse, da sie insbesondere für die Schaffung von Femtosekundenlasern hoher mittlerer Leistung bedeutsam sind.

8. Beitrag DESY: Der Teststand für Hochfrequenzelektronenquellen

Der geplante Teststand für Hochfrequenzelektronenquellen soll folgende Aufgaben erfüllen:

- Überprüfung von Simulationsrechnungen und theoretischer Vorhersagen.
- Konditionierung und Test von optimierten Hohlraumresonatoren zum anschließenden Betrieb am TTF Linac bzw. dem VUV FEL.
- Test von neuentwickelten Komponenten für den Laser und neuer Kathoden unter realistischen Bedingungen, unabhängig vom Betrieb des Freie-Elektronen Lasers.
- Test und Weiterentwicklung von Diagnosekomponenten.
- integrale Optimierung aller für eine Hochfrequenzelektronenquelle notwendigen Komponenten.
- Test neuer Konzepte zum Aufbau von Hochfrequenzelektronenquellen, z.B. zur Erzeugung flacher Strahlen.
- längerfristig eventuell Untersuchungen zum Aufbau polarisierter Quellen für Linear Collider.

Als Prototyp eines Teststandes wird im folgenden der bei DESY vorhandene Teststand beschrieben. Er wurde für die Inbetriebnahme der ersten bei DESY gebauten Elektronenquelle konzipiert und innerhalb der TTF Abschirmung aufgebaut. Dies bot den Vorteil des direkten Zuganges zu zahlreichen Betriebskomponenten, wie z.B. Klystron, Laser, Wasser, Netzgeräte und den TTF-Kontrollen. Nach der nun erfolgten Inbetriebnahme einer Hochfrequenzelektronenquelle am Linac stehen viele dieser Komponenten allerdings für weitere Tests praktisch nicht mehr zur Verfügung. Ein großer Nachteil des derzeitigen Standortes ist zudem, dass der Teststand während der Umbauarbeiten am Linac nicht betrieben werden kann und dass andererseits während einer Linacbetriebsphase der Zugang zum Teststand nur eingeschränkt möglich ist.

Der Teststand besteht aus drei aufeinander folgenden Abschnitten: Dem Kathodensystem, der Hochfrequenzelektronenquelle und der Diagnosesektion (Abb. 8).

Die im Einsatz befindlichen Cäsium Tellurid Kathoden haben nur eine begrenzte Lebensdauer von einigen Monaten und sind sehr empfindlich bzgl. einer Kontamination durch Gase. Daher müssen sie ständig im Ultrahochvakuum gehalten werden. Im Kathodensystem befinden sich bis zu sechs aktive Kathoden, welche durch Vakuummanipulatoren in die Hochfrequenzelektronenquelle eingesetzt werden können ohne das Vakuum zu brechen.

Die Hochfrequenzelektronenquelle setzt sich aus einem Hohlraumresonator und einem Einkoppler für die Hochfrequenz zusammen. Wegen der großen eingestrahnten Hochfrequenzleistung ist eine sehr gute Kühlung des Resonators nötig. Der Resonator wird von zwei Solenoidmagneten zur Strahlfokussierung umgeben. Zur Feinpositionierung der Magnete sind diese mit Motoren ausgerüstet. In Strahlrichtung hinter dem Hochfrequenz-Einkoppler befindet sich die Einkopplung für den Laserpuls, welcher mittels eines im Vakuum justierbaren Spiegels auf die Kathode gelenkt wird.

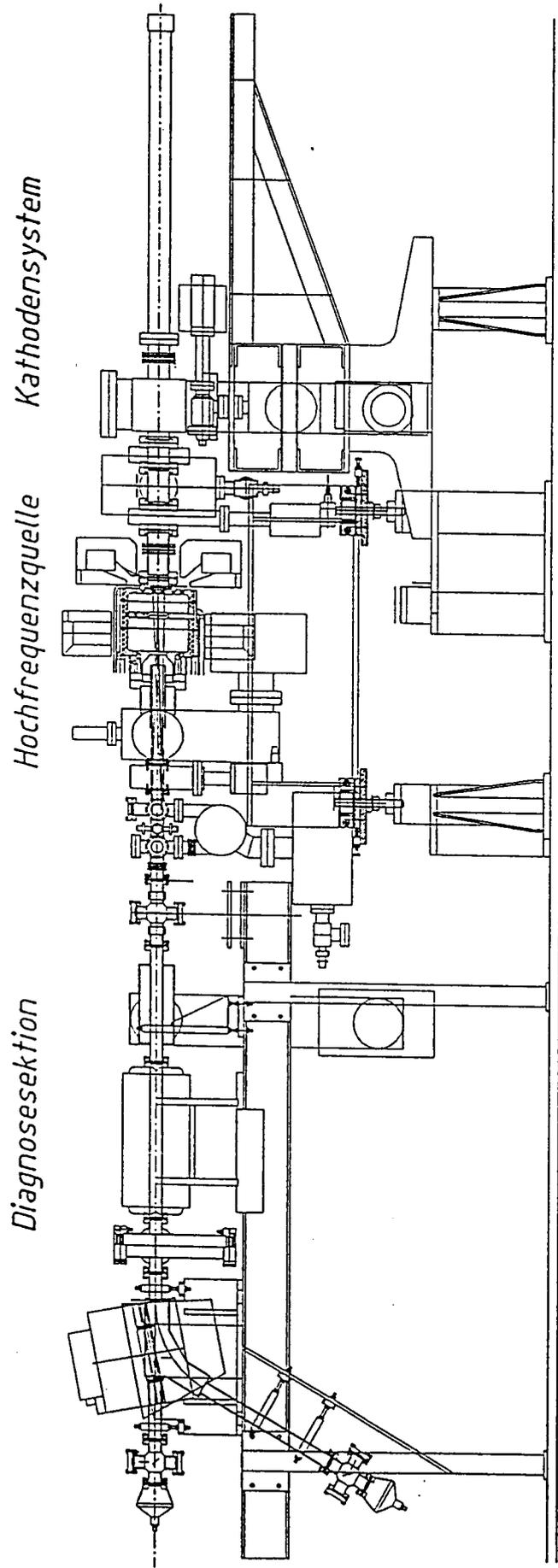


Abb. 8: Der Teststand für Hochfrequenzelektronenquellen am DESY (Länge ca. 5 m).

Wegen der großen Streufelder der Solenoide ist das Gestell für diese mittlere Sektion aus Edelstahl gefertigt.

Die Diagnosesektion setzt sich aus einem in gerader Richtung angeordneten Pepperpot zur transversalen Emittanzmessung und einem abgewinkelten, dispersiven Arm zur Messung der Strahlenergie und Energiebreite zusammen. An den Enden beider Arme kann die Ladung mittels eines Faraday Cups bestimmt werden. Strahlschirme, ein Strahllagemonitor sowie ein Quadrupoltriplet komplettieren die Diagnosemöglichkeiten.

Die hintere Diagnosesektion des jetzigen Teststandes steht für den Aufbau eines Teststandes an anderer Stelle zur Verfügung. Ein OTR Schirm für eine verbesserte Diagnose des longitudinalen Phasenraumes kann problemlos nachgerüstet werden.

Das an der TTF im Einsatz befindliche Kathodensystem wurde als Kollaborationsbeitrag vom INFN in Mailand gebaut. Ein zweites, equivalentes System könnte ebenfalls dort bestellt werden.

Der Neubau des mittleren Teilstückes, d.h. des Edelstahlgestells, der Solenoidmagnete inklusive der Magnetmotoren, sowie des kleinen Diagnosekreuzes inklusive Lasereinkopplung, wird sich zunächst an dem Aufbau der ersten Quelle orientieren. (Verbesserungen werden natürlich nach Maßgabe der mit der ersten Quelle gewonnenen Erfahrungen einfließen.) Ein neugebauter Hohlraumresonator sollte eine nochmalige Optimierung der Innengeometrie durchlaufen. Tests sollten insbesondere auch bei erhöhten Gradienten und mit variierenden Laserparametern durchgeführt werden. Alternativ ist der Aufbau eines zweieinhalbzelligen Resonators zu prüfen.

Dieser einfache Teststand eignet sich insbesondere zur Messung der transversalen Emittanz. Zur vollständigen Messung des longitudinalen Phasenraumes ist der Einbau eines zweiten Resonators (Boostercavity) zwischen Hochfrequenzelektronenquelle und Diagnosteteil notwendig. Dies sollte in einem zweiten Schritt geschehen, nachdem die erste Messphase abgeschlossen ist.

Um die Erzeugung flacher Strahlen zu testen ist ebenfalls ein zweiter Resonator nötig. Desweiteren werden zusätzliche Solenoidmagnete benötigt und der Diagnosteteil muss modifiziert werden.

Im folgenden werden die für den Teststand notwendige Infrastruktur und die notwendigen Betriebskomponenten beschrieben.

8.1. Resonator- und HF-Koppler- Entwicklung und Bau:

Das mittlere Teilstück des Teststandes incl. Solenoide, Resonator und HF-Koppler wird neu gebaut. Zuvor wird die Innengeometrie des Cavities nochmals optimiert und die Anbindung des HF-Kopplers konstruktiv überarbeitet. Hierfür sind umfangreiche Simulationsrechnungen (Strahldynamik und Feldberechnungen) bei DESY durchzuführen.

8.2. Räumlichkeiten:

Es ist vorgesehen den Teststand nach Abbau des S-Band Testlinacs in der Experimentierhalle II aufzubauen. Die vorhandene Abschirmung bietet genügend Raum auch für den Fall einer Ergänzung des Teststandes durch ein Boostercavity (Abb. 9). Teile der für den S-Band Linac errichteten Infrastruktur wie z.B. der Kontrollraum und das Personeninterlock können übernommen werden.

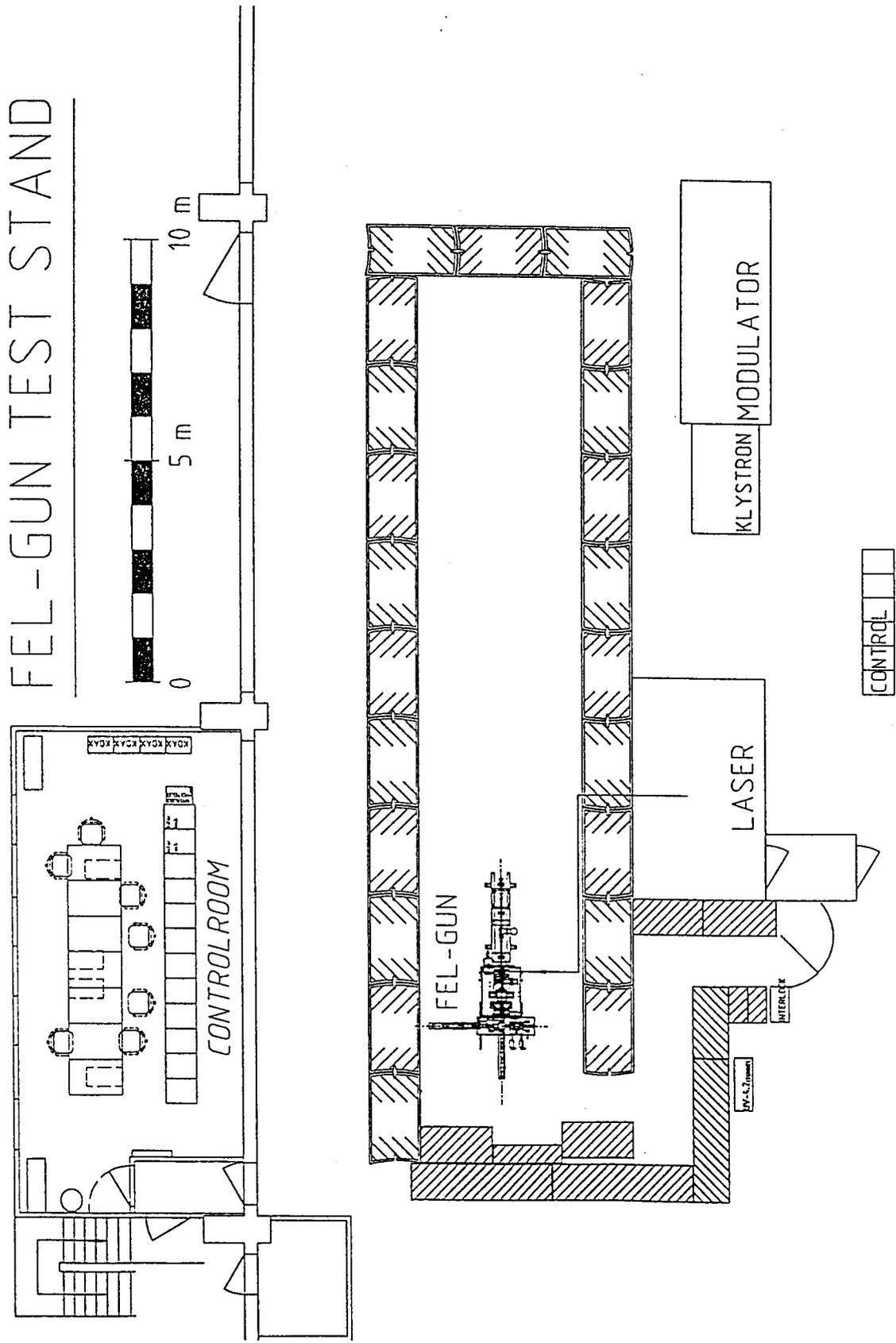


Abb. 9: Geplanter Aufbau des Teststandes im Gebiet des ehemaligen S-Band Testlinacs.

8.3. Hochfrequenzversorgung:

Für den separaten Betrieb des Teststandes ist ein 10MW-Klystron inklusive Modulator und Kontrollen notwendig. Der Aufbau des Wellenleitersystems ist unkritisch, es werden aber ein zweiter hochwertiger Richtkoppler (45dB Richtkopplung, Firma Spinner) und ein zweites Hochfrequenzfenster benötigt. Das im Einsatz befindliche Titan Beta Fenster kann eventuell durch das preiswertere bei DESY entwickelte Fenster ersetzt werden. Allerdings sind die seit längerem geplanten Hochleistungstests noch nicht abgeschlossen.

8.4. Wasser und Strom:

Neben dem normalen Kühlwasserbedarf für die Magnetkühlung etc. ist ein separater, temperaturstabilisierter Kühlkreislauf für die Cavitykühlung erforderlich. An der TTF ist dies durch einen extra Pumpstand mit Frischwassereinspeisung realisiert worden. Für die Stromversorgung sind neben einigen kleineren Netzgeräten zwei große Netzgeräte (420A und 320A) für den Betrieb der Solenoide notwendig.

9. Beitrag BESSY: Diagnostik und Kontrollen

Die derzeitige Situation bei der Berliner Elektronenspeicherring Gesellschaft für Synchrotronstrahlung (BESSY) stellt sich wie folgt dar:

Die Hochbrillanz Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II hat im Frühjahr 1998 ihren Probetrieb erfolgreich aufgenommen. Seither sind alle wesentlichen Designparameter erreicht bzw. deutlich überschritten, so dass schon im Januar 1999 mit dem regulären Nutzerbetrieb begonnen werden konnte. Nach allgemeiner Einschätzung wird die Anlage 15 - 20 Jahre Spitzenforschung erlauben. Ihre weitere Verbesserung, der Ausbau bis zur Maximalzahl der Insertion Devices und Strahlrohre sowie ein optimaler Nutzerbetrieb haben daher oberste Priorität bei BESSY.

Die langfristige Zukunft der Institution BESSY wird aber in enger Abstimmung der Forschungsprogramme mit dem Hahn Meitner Institut nicht in einer weiteren, in ihren Leistungsmöglichkeiten nur noch wenig zu verbessernden Speicherring Lichtquelle liegen, sondern in der neuen, auf der Grundlage des SASE-Prinzips entwickelten Generation Freier-Elektronen Laser (FELs).

BESSY hat daher in einem Kooperationsvertrag mit DESY seine Orientierung auf FELs durch eine Beteiligung am TTF I-Projekt und seiner anschließenden Weiterentwicklung zu TTF II sowie durch Mitarbeit an den Planungen für das TESLA-Projekt abgestimmt.

BESSY wird hierbei das für den Bau eines FELs im Photonenspektrum 10 eV bis maximal ca. 200 eV als zukünftige Nutzermaschine in Berlin Adlershof erforderliche Know How entwickeln um im BESSY ureigensten Spektralbereich in ca. sieben Jahren Strahlung bisher nicht erreichter Brillanz zur Verfügung zu stellen. BESSY wird sich daher auch kurzfristig an Entwicklung und Aufbau einer Hochfrequenzelektronenquelle für Elektronenpakete extrem kleiner Länge und Emittanz beteiligen.

Schwerpunkte der von BESSY übernommenen Arbeiten werden im Bereich der Strahldiagnostik, der Rechner- bzw. Timing Kontrollen, sowie bei der Datennahme (Meßschichten) und Datenanalyse liegen. Eine Neu- bzw. Weiterentwicklungen des Masterszillators wird geprüft.

Im Bereich der Diagnostik sind folgende Arbeiten vorgesehen:

- Charakterisierung der neuen Nd:YAG-Schirme.

- Arbeiten im Bereich der Datennahme und Analyse (z.B. der Pepperpotdaten).
 - Verbesserung der Analysemöglichkeit des longitudinalen Phasenraumes durch den Aufbau einer OTR-Station, sowie den Einsatz einer Streakkamera.
 - Ergänzung der Strommessung durch den Einsatz eines ICT-Monitors.
- Desweiteren wird der Aufbau des Laserstrahlweges von der Laserhütte incl. Strahlmanipulation durch Blenden sowie Aufbau einer virtuellen Kathode für Diagnosezwecke geprüft.

10. Referenzen

- 1 Conceptual Design of a 500 GeV e+ e- Linear Collider with Integrated X-ray Laser Facility, DESY 1997-048, auch verfügbar im WWW über:
<http://www.desy.de/~schreiber/cdr/cdr.html>.
- 2 J. M. J. Madey, J. Appl. Phys. 42, 1906, 1970.
- 3 A. M. Kondratenko, E. L. Saldin, Part. Acc. 10, 207, 1980.
- 4 R. Bonifacio, C. Pellegrini, L. M. Narducci, Optics Comm. 50, 373, 1984.
- 5 J. Rossbach, E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller, M. V. Yurkov, NIM A374, 401-407, 1996.
- 6 J. S. Fraser, R. L. Sheffield, E. R. Gray, NIM A250, 71-76, 1986.
- 7 E. Chevally, J. Durand, S. Hutchins, G. Suberluq, M. Wurgel, NIM A340, 146, 1994.
- 8 B. E. Carlsten, 'New Photoelectric Injector Design for the Los Alamos XUV FEL Accelerator', NIM A285, 313-319, 1989.
- 9 K. Flöttmann, 'Note on the Thermal Emittance of Electrons Emitted by Cesium Telluride Photo Cathodes', TESLA-FEL 97-01.
- 10 U. Becker, M. Dohlus, T. Weiland 'Three Dimensional Klystron Simulation' Particle Acceleratos 51, 135-154, 1995.
- 11 M. Zhang, P. Schütt, T. Weiland 'TESLA FEL Gun Simulations with PARMELA and MAFIA' Proc. of the Computational Accelerator Physice Conference (CAP), 1996, Williamsburg, Virginia, 21-26, 1996.