

Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe FLA arbeitet an hochauflösenden Strahl-
diagnosesystemen für den VUV-FEL und den XFEL. **Abbildung 81 zeigt eine schematische Darstellung des VUV-FEL und der verschiedenen Mess-Einrichtungen. Zur Bestimmung der longitudinalen Ladungsverteilung in den komprimierten Elektronenpaketen werden drei Methoden angewandt: die elektro-optische Abtastung (*electro-optic sampling EOS*), die THz-Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung und die transversale Strahlablenkung mittels einer Hochfrequenz-Wanderwellenstruktur (LOLA). Die transversalen Strahlparameter werden in zwei Diagnostik-Sektionen vermessen. Ein wichtiges Zukunftsprojekt der Gruppe ist ein optisches Synchronisationssystem für supraleitende Linacs mit Femtosekunden-Genauigkeit, das für den International Linear Collider ILC und den Röntgenlaser XFEL von zentraler Bedeutung sein wird.**

Elektro-optische Vermessung der Elektronen-Pakete in Linearbeschleunigern

Am Linac des VUV-FEL ist vor dem Eintritt des Elektronen-Strahls in den Undulatorbereich ein Experiment aufgebaut worden, bei dem das mitgeführte Ladungsfeld der Elektronenpakete mit Hilfe des elektro-optischen Effekts direkt vermessen werden kann. Auf diese Weise entfallen die Beugungsverluste, die bei Messungen mit kohärenter Übergangsstrahlung das Frequenzspektrum nach unten beschneiden und damit Verzerrungen des Ladungsprofils vortäuschen. Der

Titan-Saphir-Laserstrahl tritt durch ein dünnes Fenster unter einem Winkel von 6° gegen den Elektronenstrahl ein. Mittels eines fahrbaren Schirms können der Laserstrahl und die optische Übergangsstrahlung (*optical transition radiation OTR*) auf eine schnelle Photodiode geleitet werden, mit deren Hilfe die zeitliche Synchronisation der Laserpulse mit den Elektronen-Bunchen mit ca. 100 ps Genauigkeit vorab eingestellt werden kann. Die eigentliche elektro-optische Messung, vor deren Beginn der OTR-Schirm herausgefahren wird, erfordert das Abtasten eines Zeitintervalls von einigen 100 ps in kleinen Schritten, um die Koinzidenz von Laserpuls und Elektronenbunch auf einer Pikosekunden-Zeitskala zu etablieren. Der schematische Aufbau des Experiments ist in Abbildung 82 dargestellt. Die Synchronisation der TiSa-Laserpulse (Wiederholrfrequenz 81 MHz) mit der Linac-HF (1300 MHz) erfolgt mit einer in Zusammenarbeit mit der Protvino-Gruppe gebauten Elektronik, in der die 16. Harmonische der Laserfrequenz mit der Linac-HF gemischt wird. Die gemessenen Zeitschwankungen liegen unter 40 fs.

Im Frühjahr 2005 sind die Messungen zur elektro-optischen Abtastung gemacht worden. Bei dieser Methode (*electro-optic sampling EOS*) wird das Zeitprofil der Bunche durch sehr kurze TiSa-Pulse in kleinen Schritten abgetastet. Die Bunchform ergibt sich aus Messungen an sehr vielen Elektronenpaketen. Die Ergebnisse sind ähnlich wie in unseren im Vorjahr durchgeführten EOS-Messungen am Linac der Swiss Light Source, siehe den Jahresbericht 2004.

Interessanter für die Strahl diagnose sind Einzelbunchmessungen. Dafür wird der 15 fs-Laserpuls in einem dispersiven Material auf eine Länge von mehreren ps

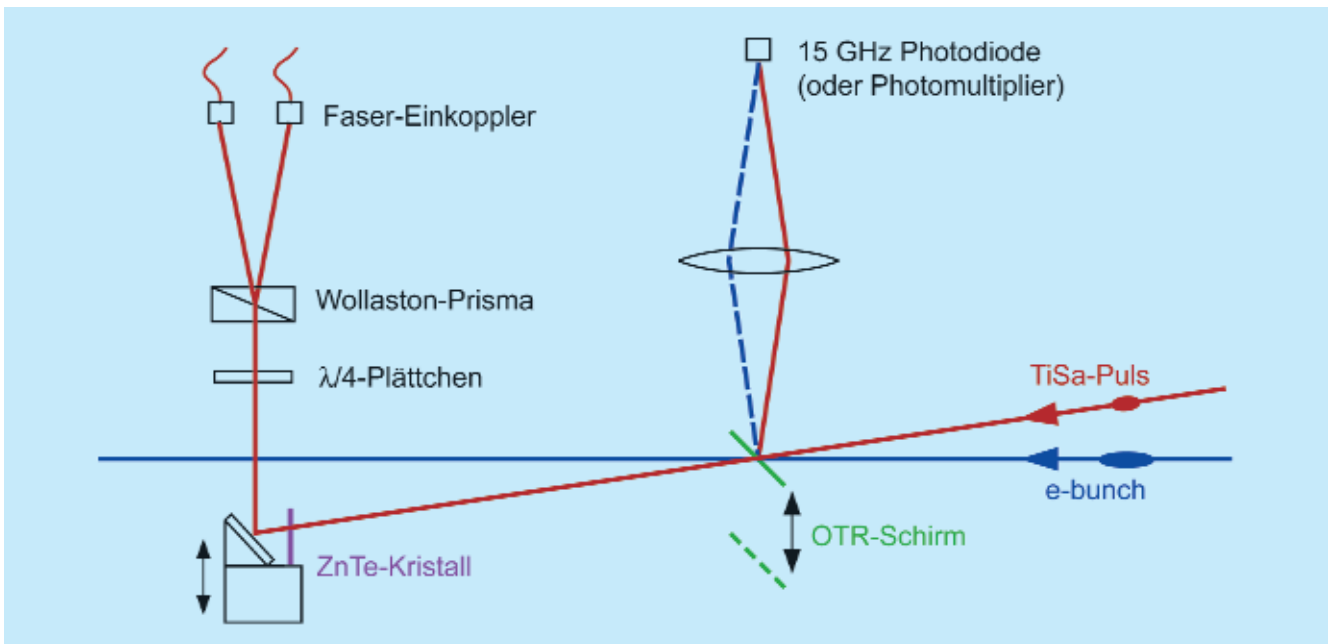


Abbildung 82: Elektro-optischer Aufbau am Linac des VUV-FEL.

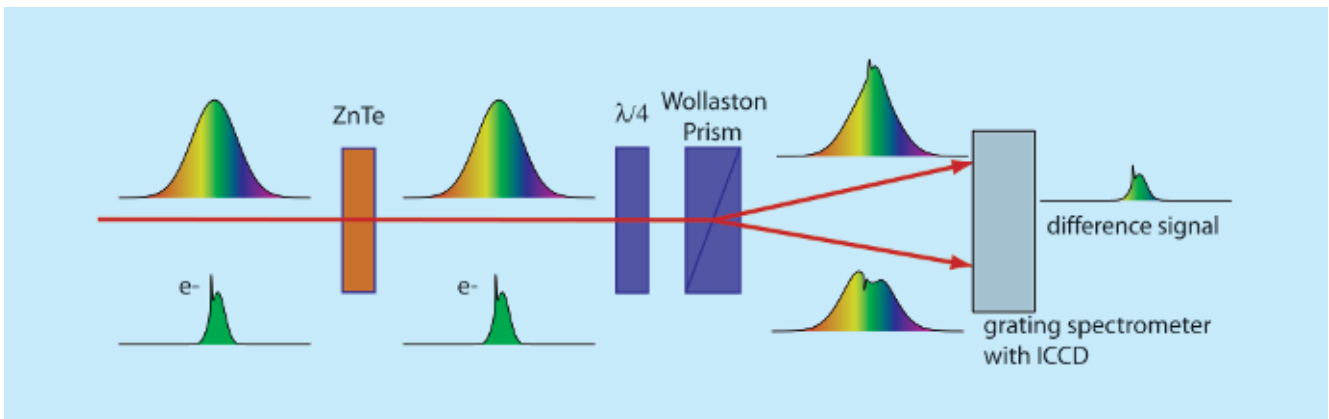


Abbildung 83: Schematische Darstellung der elektro-optischen Rekonstruktion der Ladungsverteilung in den Elektronenpaketen mit Hilfe der spektralen Codierung. Oben wird der auf mehrere Pikosekunden gestreckte Laserpuls gezeigt, bei dem die langwelligen Anteile zeitlich früher im Puls angeordnet sind, die kurzwelligen später (bei dem Bild liegen wie auf einem Oszillographenschirm frühe Zeiten links, späte rechts). Unten ist die typische zeitliche Ladungsverteilung eines Elektronenpakets im Linac des VUV-FEL dargestellt. Im Zink-Tellurid-Kristall wird die elektrische Feldverteilung des Bunches den beiden Polarisationskomponenten des Laserpulses aufgeprägt. Durch spektrale Zerlegung, Aufnahme der Spektren mit einer CCD-Kamera und Subtraktion der beiden Spektren gewinnt man das Zeitprofil des Bunches.

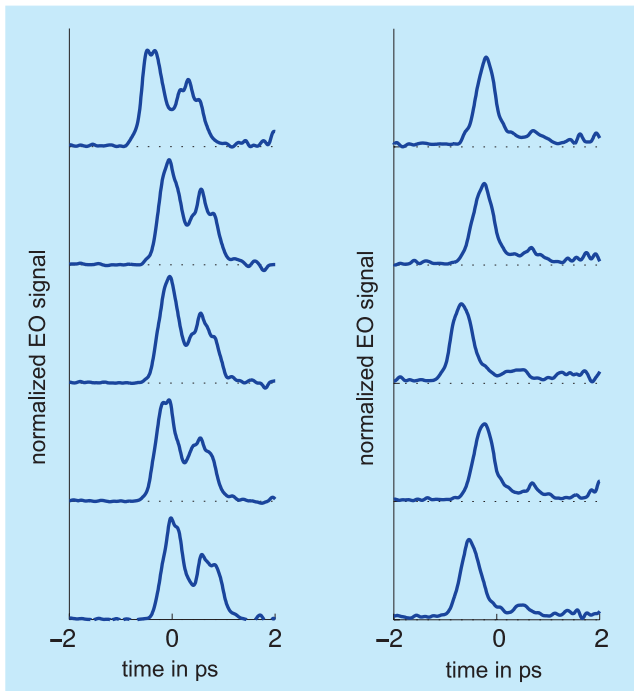


Abbildung 84: Pulsformen einzelner Elektronenpakete, gemessen mit der spektralen Codierungsmethode. Links: Pulsform der Elektronen-Pakete bei falsch eingestellten Parametern des Bunch-Kompressionssystems. Rechts: Form der Pakete bei optimaler longitudinaler Kompression.

gestreckt, wobei die langwelligen Spektralanteile sich am zeitlichen Anfang des gestreckten Laserpulses befinden und die kurzwelligen am Ende. Diesem Puls, der länger als der Elektronenbunch ist, wird im ZnTe-Kristall die Zeitstruktur des elektrischen Bunchfeldes aufgeprägt, siehe Abbildung 83. Durch eine Spektralanalyse des auslaufenden Laserpulses kann dann die longitudinale Ladungsverteilung im Elektronenbunch rekonstruiert werden. Diese Methode der spektralen Codierung ist im Sommer 2005 mit Erfolg in Betrieb genommen worden. Einzelbunchmessungen werden in Abbildung 84 gezeigt.

Man erkennt aus diesen Daten, dass falsch eingestellte Beschleunigerparameter sofort erkennbar sind und dass die Ankunftszeit der Bunche am ZnTe-Kristall um typisch ± 150 fs schwankt. Das EO-System kann die Ankunftszeit mit einer deutlich besseren Genauigkeit

(50 fs rms) ermitteln, die beobachteten Zeitschwankungen sind daher größtenteils Beschleunigerbedingt und im Wesentlichen auf kleine Energievariationen zurückzuführen, die sich im magnetischen Umweg des Bunchkompressors in Zeitschwankungen transformieren. Mit Hilfe des in der Entwicklung befindlichen Femtosekunden-Synchronisationssystems werden sich die Zeit- und Energieschwankungen deutlich reduzieren lassen.

Aufbau einer THz-Strahlführung für kohärente Übergangsstrahlung

Kohärente Übergangs- und Diffraktionsstrahlung im THz-Bereich bietet hervorragende Möglichkeiten, die Zeitstruktur der Elektronenbunche auf der Skala von 10–100 Femtosekunden zu studieren. Um die im Beschleunigervakuum erzeugte Übergangsstrahlung optimal für Diagnosezwecke nutzen zu können, ist es zweckmäßig, sie aus dem Beschleunigerbereich herauszuführen. Zu diesem Zweck wurde eine optische Strahlführung mit fünf fokussierenden Metallspiegeln entwickelt, die es erlaubt, THz-Strahlung von 0.2 THz bis 40 THz mit hoher Effizienz vom Beschleunigerbereich in eine externe Messhütte zu leiten. Die Strahlführung erfolgt in einem Vakuumrohr, um die starke Absorption von THz-Strahlung in feuchter Luft zu unterbinden. Für den Strahl-Austritt aus dem Ultrahochvakuum des Linacs wurde ein 0.5 mm dickes Diamantfenster mit 20 mm Durchmesser gewählt, da Diamant das einzige Material ist, das eine hohe und frequenzunabhängige Transmission im Bereich von 0.1–40 THz hat. Das Fenster wurde vom Fraunhofer-Institut Freiburg mittels der CVD-Technik (*chemical vapour deposition*) hergestellt. Die THz-Strahlführung ist so ausgelegt, dass sowohl Messungen der spektralen Intensitätsverteilung als auch zeitaufgelöste Messungen mit EO-Techniken oder Streak-Kameras möglich sind.

Die Propagation der THz Strahlung durch das optische System wird auf Grund der langen Wellenlängen (7 μm bis 1.5 mm) wesentlich durch Beugungseffekte an den Strahlbegrenzungen und den optischen Elementen bestimmt. Das in unserer Gruppe entwickelte

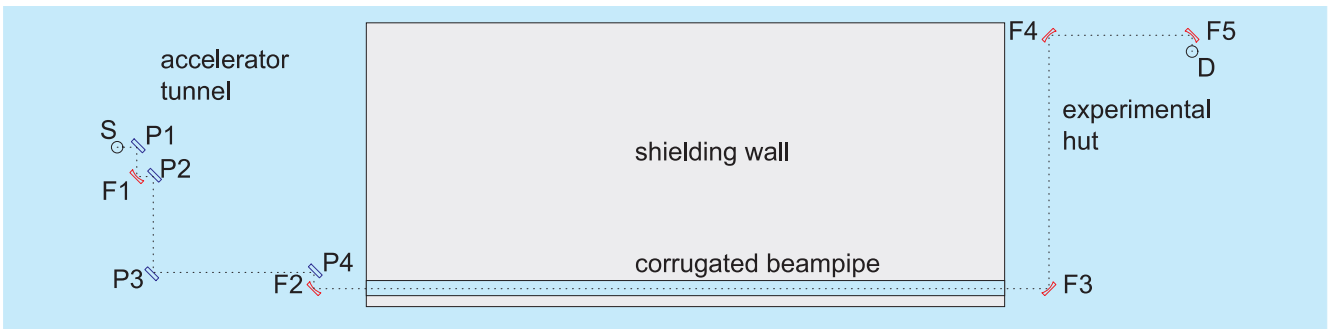


Abbildung 85: Darstellung der Auskopplung der THz-Strahlung und des optischen Transportweges vom Beschleunigerbereich bis in die Messhütte. Die kohärente Übergangsstrahlung wird am Schirm *S* erzeugt und durch ein Diamantfenster in 40 mm Abstand (nicht gezeigt) auf den ersten Spiegel geleitet. Die fokussierenden Spiegel sind mit *F1* bis *F5* bezeichnet, die Planspiegel mit *P1* bis *P4*. Die Spiegel sind aus Stahl bzw. Aluminium hergestellt worden. Die Bearbeitung erfolgte mit Diamantwerkzeugen, die Oberflächenrauigkeit liegt unter 10 nm. Die Spiegel sind mit Gold beschichtet, um ein hohes Reflektionsvermögen im THz-Bereich zu erzielen. Am Brennpunkt des letzten Spiegels befindet sich ein pyroelektrischer Detektor *D*.

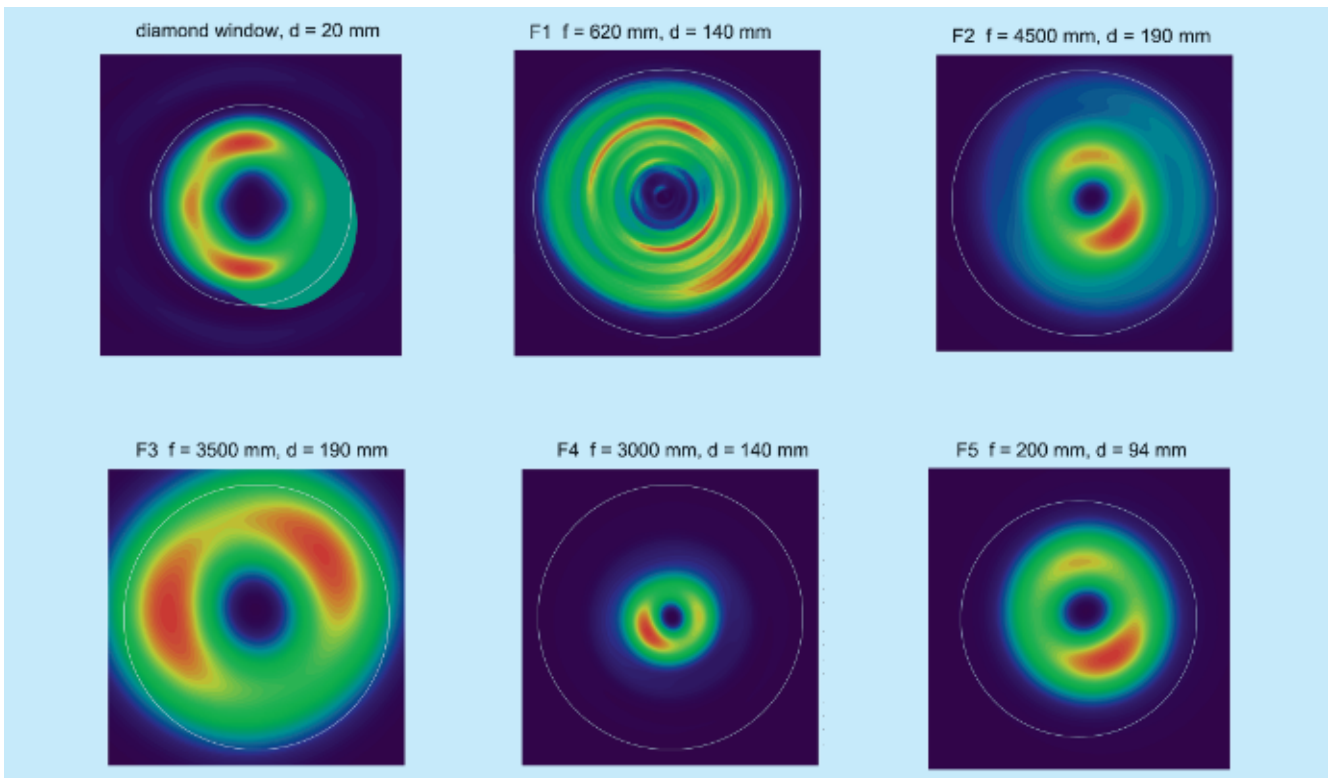


Abbildung 86: Intensitätsverteilung der kohärenten Übergangsstrahlung auf den optischen Elementen der THz-Strahlführung (Diamantfenster und fünf fokussierende Toroid-Spiegel). Die Aperturen des Fensters und der Spiegel sind durch die eingezeichneten Kreise angedeutet. Die Frequenz beträgt $f = 0.2 \text{ THz}$.

Mathematica-Programmpaket *THz-Transport* umfasst die Behandlung von Nah- und Fernfeldbeugung und erlaubt die Beschreibung von sphärischen, elliptischen, parabolischen und toroidalen Spiegelementen. Basierend auf Berechnungen mittels dieses Programms wurden die Metallspiegel der Strahlführung und das Diamantfenster zur Auskopplung der THz-Strahlung aus dem Beschleunigervakuum optimiert. Diese Komponenten sind industriell gefertigt und in die THz-Strahlführung eingebaut worden. Die Anordnung der optischen Elemente ist in Abbildung 85 dargestellt. Abbildung 86 zeigt exemplarisch die berechnete Intensitätsverteilung auf den optischen Elementen für eine Frequenz von 200 GHz.

Messung der transversalen Strahlparameter

Die Verstärkung in einem Ultraviolett- oder Röntgen-FEL hängt sehr kritisch von den Elektronenstrahl-Parametern ab. Die Verstärkungslänge L_g (*gain length*) ist gegeben durch

$$L_g \propto \left(\frac{\epsilon}{I_{\text{peak}}} \right)^{1/3}$$

wobei ϵ die transversale Emittanz ist und I_{peak} der Spitzenstrom innerhalb des Elektronenpakets. Um hohe Effizienz im SASE-Prozess (*self amplified spontaneous emission*) zu erzielen und die notwendige Länge des Undulatormagneten zu minimieren, muss ein sehr fein kollimierter Strahl mit hoher lokaler Ladungsdichte erzeugt werden. Die auf den Teilchenimpuls normierte Emittanz hat bei einer FEL-Wellenlänge von 6 nm der Bedingung $\epsilon_n \leq 2 \text{ mm mrad}$ zu genügen, der Spitzenstrom muss einige 1000 A betragen.

Bestimmung der mittleren Emittanz vieler Bunche

In zwei Diagnostik-Sektionen (siehe Abbildung 81) werden Emittanzmessungen unter Verwendung einer Mehrschirm-Methode durchgeführt. An vier Positionen wird die transversale Strahlverteilung vermessen,

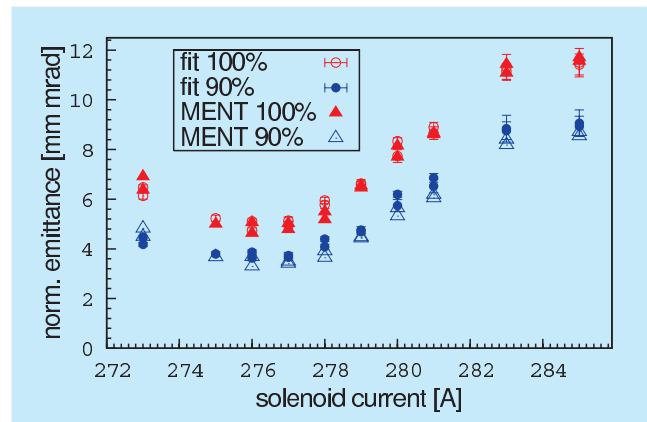


Abbildung 87: Die vertikale Emittanz als Funktion des Stroms im Hauptsolenoidmagneten der HF-Elektronenquelle. Die Emittanz wird mit zwei Methoden berechnet: durch eine Anpassungsrechnung (fit) und durch die Phasenraumtomographie mittels der Maximum-Entropie-Methode (MENT). Ergebnisse sind für 100% und 90% der Strahlintensität angegeben.

indem optische Übergangsstrahlung mit einer CCD-Kamera abgebildet wird. Alternativ wird die Strahldichteverteilung durch Abtasten mit einem dünnen Draht ermittelt (mit einem sog. *wire scanner*). Beide Methoden ergeben das über viele Bunche gemittelte transversale Ladungsdichteprofil. Die Kenntnis der Strahltransfermatrizen zwischen den Messpositionen erlaubt es, die Betafunktion, ihre Ableitung, sowie die Emittanz aus den gemessenen transversalen Strahlprofilen zu berechnen. Eine tomographische Rekonstruktion der Phasenraumverteilung wird mit Hilfe eines Maximum-Entropie-Algorithmus durchgeführt.

Abbildung 87 zeigt die Abhängigkeit der vertikalen Emittanz vom Strom im Hauptsolenoidmagneten der HF-Elektronenquelle. Mit optimierten Parametern konnte in der BC1-Diagnostiksektion eine normierte Emittanz von weniger als 2 mm mrad gemessen werden, was als ausgezeichneter Wert anzusehen ist.

Einzelbunch-Messungen

Ein äußerst leistungsfähiges Gerät zur Diagnose einzelner Elektronenpakete ist die in Zusammenarbeit

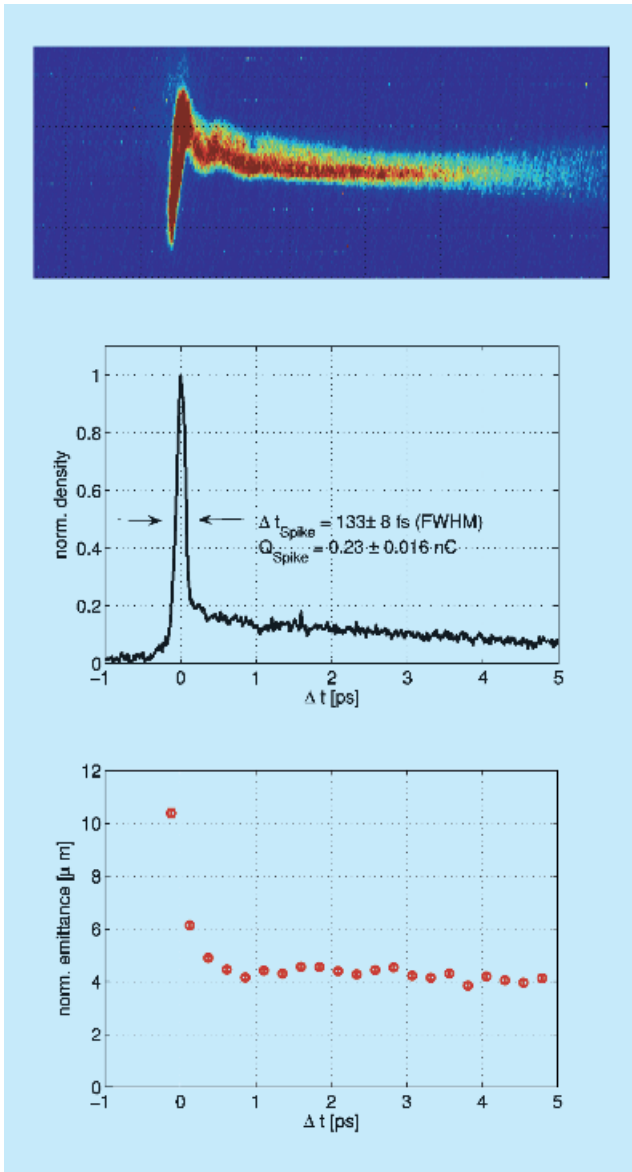


Abbildung 88: Oben: CCD-Aufnahme eines einzelnen Bunches mit Streckung durch LOLA. Der Kopf des Bunches befindet sich auf der linken Seite.

Mitte: Das mit dem LOLA-Aufbau gemessene zeitliche Ladungsdichte-Profil eines Bunches.

Unten: Die normierte horizontale Scheiben-Emittanz als Funktion der zeitlichen Position im Bunch.

von DESY und SLAC installierte und betriebene HF-Wanderwellen-Struktur LOLA. Die Struktur wird zu einer TE-Eigenschwingung hoher Feldstärke angeregt und überträgt auf die Elektronen eine vertikale Ab-

lenkung, die linear von der zeitlichen Lage der Teilchen innerhalb des Bunches abhängt. Auf diese Weise kann das Zeitprofil eines einzelnen Bunches mit hoher Auflösung gemessen werden. Die vertikal gestreckten Bunches werden auf einen Übergangsstrahlungs-Schirm gelenkt und mit einer CCD-Kamera fotografiert. Die Aufnahme eines gestreckten Bunches ist in Abbildung 88 zu sehen. Die Abbildung zeigt auch die daraus berechnete longitudinale Ladungsdichteverteilung im Bunch. Man beobachtet ein scharfes Maximum am Kopf des Bunches mit einer Halbwertsbreite von 133 fs sowie einen langen Ausläufer zu späteren Zeiten. Das scharfe Maximum enthält etwa 20% der Bunchladung. Nur in diesem Bereich ist die lokale Stromdichte hoch genug, um den SASE-FEL-Prozess auszulösen.

Die CCD-Bilder erlauben zudem die Bestimmung der horizontalen Strahlausdehnung in Abhängigkeit von der zeitlichen Position im Bunch. Aus Messungen dieser Breiten für verschiedene Quadrupolstärken kann die horizontale Emittanz einzelner Zeitscheiben des Bunches rekonstruiert werden. Diese Scheibenemittanz (*slice emittance*) ist ebenfalls in Abbildung 88 dargestellt. Sie liegt bei $\epsilon_n = 10$ mm mrad ganz am Anfang des Bunches, reduziert sich dann auf 6 mm mrad im Maximum der Ladungsverteilung und sinkt schließlich auf 4 mm mrad im Schwanz der Verteilung ab.

Femtosekunden-Synchronisation der Beschleuniger-Hochfrequenz

Der International Linear Collider ILC und der Europäische Röntgenlaser XFEL basieren auf supraleitenden Linearbeschleunigern (Linacs) von vielen Kilometern Länge. Die Hochfrequenz-(HF)-Leistung muss den supraleitenden Resonatoren mit hoher Phasen- und Amplitudenkonstanz zugeführt werden, um die engen Toleranzen hinsichtlich der Energie- und Zeitgenauigkeit der Strahlen einhalten zu können. In bisherigen supraleitenden Maschinen wie dem VUV-FEL bei DESY dient ein hochstabiler Mikrowellenoszillator als Referenz (*master oscillator*). Die HF-Signale werden über koaxiale Festmantelkabel entlang des Tunnels

geleitet und auf die verschiedenen Klystrons und supraleitenden Resonatoren verteilt. Auch der UV-Laser der Hochfrequenz-Fotokathode wird phasenstarr an den Referenzoszillator angekoppelt.

Bereits beim VUV-FEL zeigt sich, dass das jetzige Synchronisationssystem die extremen Anforderungen an die Zeitgenauigkeit der FEL-Pulse nur unzureichend erfüllen kann. Für den Röntgenlaser wird ein deutlich verbessertes System gebraucht. Um die kurzen XFEL-Pulse (typische Dauer einige 10 Femtosekunden) sinnvoll nutzen zu können, z. B. in *pump-and-probe*-Experimenten, müssen die Elektronenpakete (*Bunche*) mit einer Präzision von typisch 10 fs relativ zur Hochfrequenz der Maschine synchronisiert werden. Die besten Mikrowellenoszillatoren können diese Stabilität gerade noch gewährleisten, allerdings führt die Verteilung der HF-Signale über Koaxialkabel von mehreren Kilometern Länge zu merklichen Qualitätseinbußen durch Zeitschwankungen (*time jitter*) aufgrund von Mikrophonie, elektromagnetischen Störsignalen und Längenänderungen durch Temperaturvariationen. Im ILC sind zwar die Bunche nicht ganz so kurz wie im XFEL, aber wegen der mehr als zehnmals größeren Länge des Colliders ergeben sich analoge Synchronisationsprobleme.

Ein vielversprechendes neues Konzept ist die Frequenzverteilung mit Hilfe von periodischen optischen Pulsen. Die wesentlichen Komponenten eines optischen Referenzoszillator-Systems sind: ein ringförmig aufgebauter gepulster Faserlaser mit hochstabiler Repeatsionsrate, längenstabilisierte Glasfaserleitungen, die die optischen Pulse in der Maschine verteilen, sowie opto-elektronische Geräte zur Konversion der optischen Signale in elektronische HF-Signale am Ende der Glasfasern. Der Hauptvorteil dieses Konzepts liegt darin, dass Glasfasern durch ein Rückkopplungssystem längenstabilisiert werden können. Dazu wird am Ende der Glasfaserleitung ein Teil der Laserintensität reflektiert, durch die Glasfaser zurückgeleitet und zeitlich mit der periodischen Laserpulsreihe verglichen. Über einen piezo-elektrisch regelbaren Faserstrecke (*fiber stretcher*) wird die Lichtlaufzeit in der Glasfaserleitung auf einen vorgegebenen Wert stabilisiert. Dieses Konzept hat das Potenzial, HF-Signale über viele Kilometer

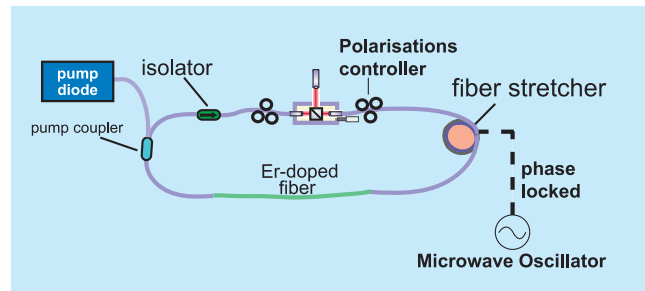


Abbildung 89: Schematischer Aufbau eines Erbium-dotierten Faserlasers mit Phasen-Kopplung an einen Mikrowellenoszillator.

mit Zeitschwankungen von unter 10 Femtosekunden zu verteilen.

In Kooperation mit der Laserphysik-Gruppe von Prof. F. Kärtner am Massachusetts Institute of Technology (MIT) arbeitet ein Doktorand (Axel Winter) an der Entwicklung eines ultrastabilen optischen Referenzoszillators. Passiv modengekoppelte Faserlaser (Abbildung 89) sind vielversprechende Kandidaten, die erforderliche Stabilität und Zuverlässigkeit des Systems

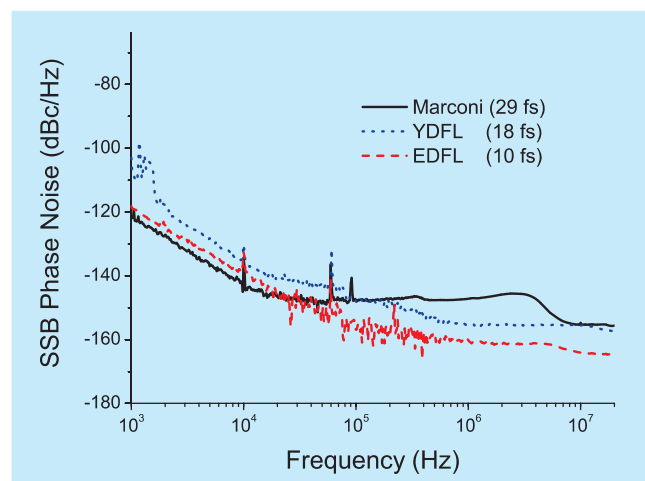


Abbildung 90: Durchgezogene Kurve: Rauschspektrum eines hochstabilen elektronischen Frequenzgenerators der Fa. Marconi. Gestrichelte Kurve: Gemessenes Phasenrauschspektrum eines Erbium-dotierten Faserlasers (EDL). Punktierte Kurve: Gemessenes Phasenrauschspektrum eines Ytterbium-dotierten Faserlasers (YDL).

sicherzustellen. Bei diesem Lasertyp wird der Kerr-Effekt in einer Erbium-dotierten Glasfaser ausgenutzt, der eine intensitätsabhängige Änderung der Polarisation verursacht. Dies bedeutet, dass die Polarisation des intensiven Zentralbereichs des Laserpulses nach dem Durchlaufen der Faser anders ist als die der Flanken. Stellt man ein Polarisationsfilter so ein, dass der Zentralteil des Pulses durchgelassen und die Flanken abgeschnitten werden, so wirkt das Filter als sättigbarer Absorber und bewirkt damit die Modenkopplung.

Erste Messungen haben gezeigt, dass das Hochfrequenzrauschen im Bereich von 1 kHz bis zur Nyquistfrequenz von 10 MHz hinreichend klein ist, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen (Abbildung 90). Bei den Messungen werden die periodischen Laserpulse auf einen Photodetektor geleitet, und es wird eine höhere Harmonische der Repetitionsfrequenz des Lasers mit

einem Bandpassfilter selektiert. Das Phasenrauschen dieses nun sinusförmigen Signals wird mit Hilfe eines Phasenrauschmessplatzes detektiert. Der momentan erreichte Wert von 10 fs liegt immer noch weit über dem theoretischen Grenzwert und wird vermutlich durch die Konversion von Amplituden- zu Phasenrauschen im Photodetektor bestimmt.

Im Bereich kleiner Frequenzen ($f < 1$ kHz) haben Faserlaser ein erhöhtes Rauschen, das durch Effekte wie die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex der Glasfaser, Mikrophonie und Vibrationen verursacht wird. Da Mikrowellenoszillatoren hier stabiler sind, wird der Faserlaser über eine Phasenrückkopplungsschleife an einen Mikrowellenoszillator gekoppelt. Auf lange Sicht ist auch denkbar, den Faserlaser an eine Atomuhr zu koppeln und so einen absoluten Frequenzstandard zur Verfügung zu stellen.