

Abbildung 81: Bild der Verteilung der Elektronen im longitudinalen Phasenraum für unkomprimierte Elektronenpakete (on-crest-Betrieb der supraleitenden Resonatoren). Mit ausgeschalteter HF an der Struktur LOLA ergibt sich ein ausgedehnter Strahlfleck. Wenn LOLA horizontal ablenkt, wird die Energieverteilung innerhalb des Bunches sichtbar. Man erkennt sehr schön den Cosinusförmigen Verlauf des Beschleunigungsfeldes in den Resonatoren.

# Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe FLA arbeitet an hochauflösenden Strahldiagnosesystemen für FLASH und den XFEL. Zur Bestimmung der longitudinalen Ladungsverteilung in den komprimierten Elektronenpaketen werden drei Methoden angewandt: die elektro-optische (EO) Abtastung, die THz-Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung und die transversale Strahlablenkung mittels einer Hochfrequenz-Wanderwellenstruktur (genannt LOLA). Ein wichtiges Projekt 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 und in absehbarer Zeit am FLASH-Linac installiert und erprobt werden soll.

## Elektro-optische Vermessung der Elektronen-Pakete in Linearbeschleunigern

Die im Jahr 2005 begonnenen elektro-optischen (EO) Messungen an einzelnen Elektronenpaketen (*single-shot*) sind 2006 fortgeführt und erheblich verbessert worden. Mit der Methode der spektralen Codierung (siehe Jahresbericht 2005) sind Messungen an einem 175  $\mu\text{m}$  dicken Gallium-Phosphid-Kristall durchgeführt worden. Parallel dazu wurde die Bunchform mit der transversal ablenkenden Wanderwellenstruktur LOLA mit sehr guter Auflösung vermessen (siehe weiter unten). Der mit LOLA ermittelte zeitliche Verlauf des Pulses wurde als Eingangsgröße einer Simulation des

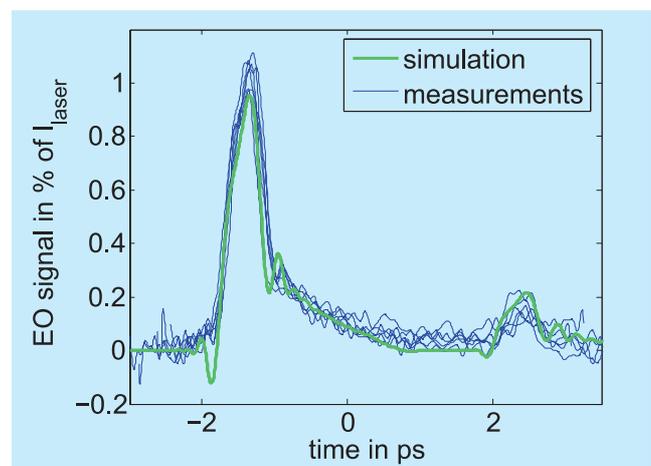


Abbildung 82: Die Pulsformen einzelner Elektronenpakete, gemessen mit der spektralen Codierungsmethode an einem 175  $\mu\text{m}$  dicken Gallium-Phosphid-Kristall. Die dickere durchgezogene Kurve zeigt die Vorhersage aufgrund der in der Struktur LOLA ermittelten Pulsform. Das kleine zweite Maximum in einem Abstand von 4 ps vom Hauptmaximum ergibt sich durch Zweifachreflektion des THz-Pulses im GaP-Kristall.

elektro-optischen Effekts in GaP verwendet unter Anwendung der im TESLA Report 2005-01 beschriebenen Methoden. In Abbildung 82 wird die vorhergesagte Form des EO-Signals mit den gemessenen EO-Signalen von 10 Elektronenbunchen verglichen. Die Übereinstimmung ist perfekt. Dies ist unseres Wissens die erste absolute Pulsformbestimmung von THz-Pulsen mit Hilfe des elektro-optischen Effekts.

In Zusammenarbeit mit Physikern des Infrarot-FEL-Labors FELIX in Nieuwegein (Niederlande), der Universitäten von Dundee und Aberty Dundee (Schott-

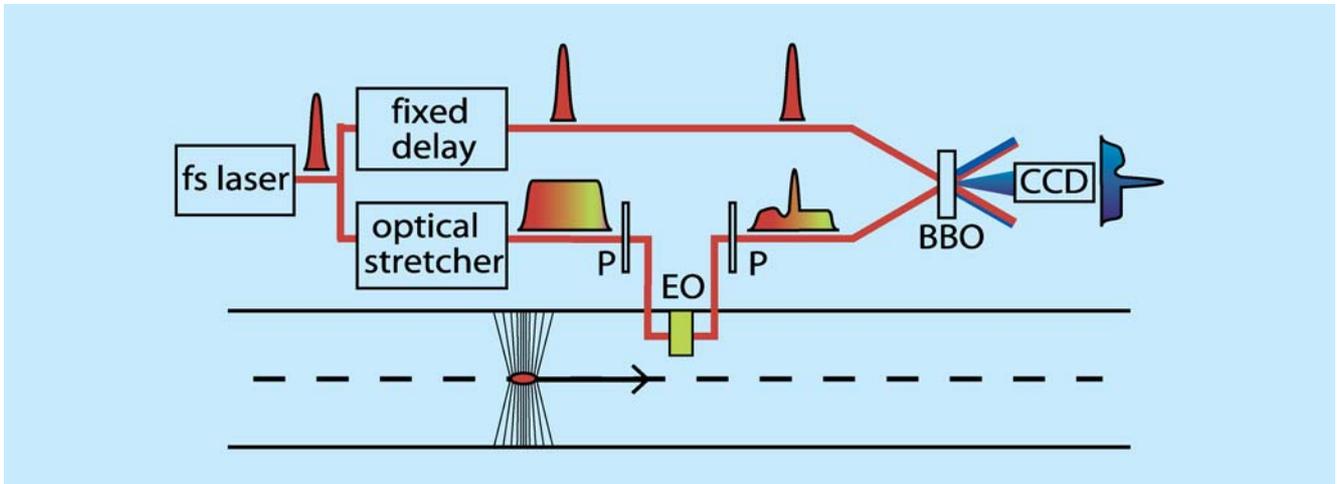


Abbildung 83: Schematische Darstellung der elektro-optischen Rekonstruktion der Ladungsverteilung in einzelnen Elektronenpaketen mit Hilfe der zeitlichen Codierung (electro-optic temporal decoding EOTD). Der verstärkte Laserpuls mit einer Energie von 1 mJ und einer Dauer von 30 fs wird in einen 30 fs langen Testpuls und einen auf 20 ps gestreckten Abtastpuls aufgespalten. Der Abtastpuls durchläuft einen Polarisator P und danach den im Strahlrohr befindlichen EO-Kristall, wo dem Laserpuls eine elliptische Polarisierung aufgeprägt wird, die proportional zur elektrischen Feldstärke des Bunches ist und den gleichen zeitlichen Verlauf hat. Diese elliptische Polarisierung wird im zweiten Polarisator in eine Intensitätsmodulation umgewandelt. Abtast- und Teststrahl werden im BBO-Kristall unter einem Kreuzungswinkel von  $38^\circ$  überlagert. Die UV-Strahlung aus der Überlagerung der beiden Strahlen verläuft in Richtung der Normalen des BBO-Kristalls. Sie ist dadurch räumlich von dem UV-Licht getrennt, welches von den Einzelstrahlen erzeugt wird.

land) und des Daresbury Laboratory (UK) ist ein EO-Experiment mit zeitlicher Codierung aufgebaut worden, das Einzelbunch-Messungen mit hervorragender Zeitaufösung erlaubt. Das Schema wird in Abbildung 83 gezeigt. Ein verstärkter Titan-Saphir-Laserpuls von 30 fs Länge wird in einen *Testpuls* (obere Spur) und einen *Abtastpuls* (untere Spur) aufgespalten. Der Abtastpuls wird mit einer Gitteranordnung auf 20 Picosekunden gestreckt. Im Gallium-Phosphid-Kristall wird die elektrische Feldverteilung des Bunches dem Abtastpuls aufgeprägt, der dabei eine zeitabhängige elliptische Polarisierung erhält. In einem frequenzverdoppelnden BBO-Kristall werden Abtast- und Testpuls unter einem Kreuzungswinkel von  $38^\circ$  überlagert. Die Zeitinformation des Abtastpulses setzt sich dabei in eine räumliche Verteilung der entstehenden UV-Strahlung um. Die UV-Strahlung wird mit einer

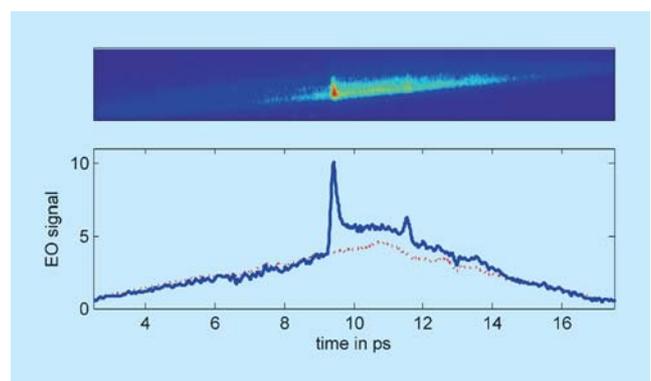


Abbildung 84: Oben: Zweidimensionales CCD-Bild der Lichtverteilung im BBO-Kristall. Die Zeitachse verläuft horizontal. Unten: zeitlicher Verlauf des EO-Signals. Der Kopf des Elektronenpakets befindet sich auf der linken Seite. Gestrichelt ist der Untergrund, der bei Abwesenheit des Elektronenpakets beobachtet wird.

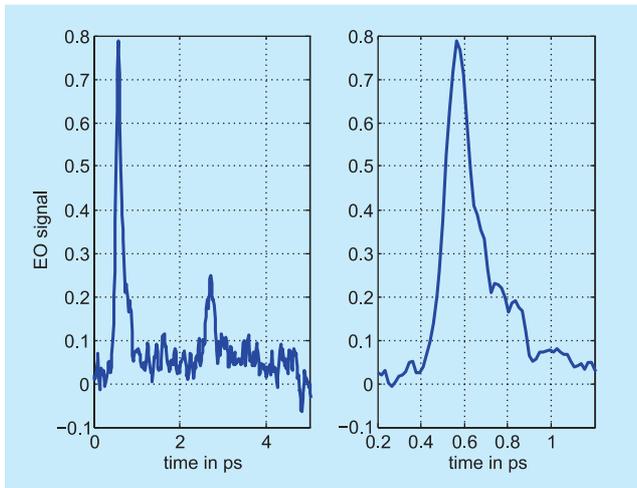


Abbildung 85: Links: Pulsform eines einzelnen Elektronenpakets, gemessen mit der zeitlichen Codierungsmethode. Der Kopf des Bunches liegt bei 0,6 ps. Die Dicke des GaP-Kristalls beträgt 65  $\mu\text{m}$ . Rechts: Form des Kopfes auf einer gestreckten Zeitskala.

bildverstärkenden CCD-Camera abgebildet, siehe Abbildung 84.

Die typische Pulsform eines einzelnen Bunches wird in Abbildung 85 gezeigt. Die Zeitauflösung beträgt 50 fs (rms) und ist um einen Faktor 2 besser als bei der spektralen Codierung.

## Hochpräzise Ankunftszeitmessung der Elektronenpakete

Für zeitkritische Experimente bei FLASH besteht großes Interesse an einem Messgerät, das die Ankunftszeit der Elektronenpakete am Undulator mit hoher Genauigkeit bestimmen kann. Zu diesem Zweck ist ein Monitor entwickelt worden, der direkt die 1550 nm Laserpulse des optischen Synchronisationssystems verwendet. Das Schema und die Funktionsweise werden in Abbildung 86 gezeigt. Die hochfrequenten Signale einer breitbandigen Strahlantenne (*beam pickup*) werden zu einem elektro-optischen Modulator (EOM) geleitet. Die Pulsform der Signale entspricht im Wesentlichen

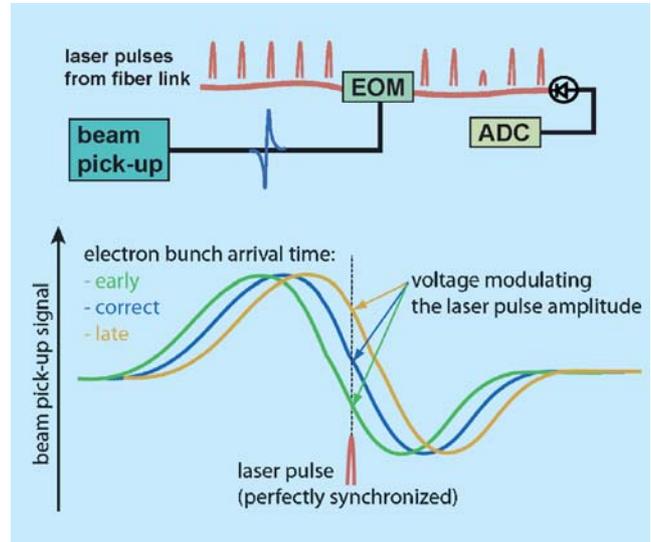


Abbildung 86: Oben: Funktionsprinzip des Ankunftszeitmonitors. Der dritte Laserpuls ist koinzident mit einem Bunch. Unten: Relative zeitliche Lage zwischen Laserpuls und HF-Signal des Bunches. Die mittlere Kurve zeigt perfekte zeitliche Koinzidenz.

der zeitlichen Ableitung des elektrischen Feldes  $E(t)$  des Bunches. Im EOM wird ein mit dem Bunch koinzidenter Laserpuls durch das HF-Signal amplitudenmoduliert. Um möglichst gute Zeitauflösung zu erhalten, wird in der Nähe des steilen Nulldurchgangs des HF-Transienten gemessen. Ändert sich die Ankunftszeit des Bunches, so kommt das HF-Signal zeitlich früher oder später, und entsprechend erhöht oder erniedrigt sich die Modulationsspannung des abtastenden Laserpulses. Die Amplitude des modulierten Laserpulses ist somit ein empfindliches Maß für die Ankunftszeit des Elektronenpakets.

Über einen längeren Bunchzug beobachtet man eine systematische Variation der Ankunftszeit, siehe Abbildung 87. Dies deutet auf eine systematische Energievariation innerhalb des Bunchzuges hin, die sich in den magnetischen Umwegen der Bunch-Kompressoren in eine Zeitverschiebung übersetzt. Daraus erkennt man, dass der Ankunftszeitmonitor auch ein wichtiges Diagnoseinstrument für FLASH darstellt. Neben der systematischen Verschiebung gibt es noch zeitliche Schwankungen, die aber innerhalb eines Bunchzuges

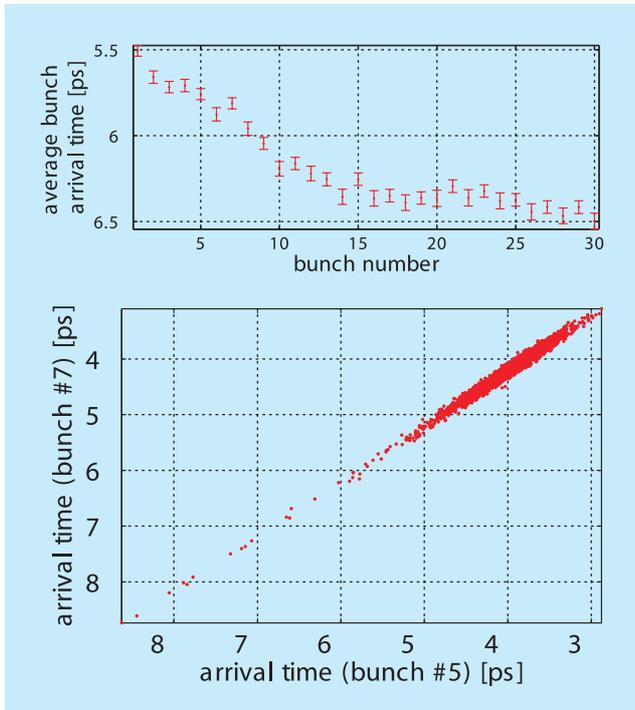


Abbildung 87: *Oben: Systematische Variation der Ankunftszeiten in einem Zug von 30 Bunchen. Unten: Korrelation zwischen den Ankunftszeiten von Bunch 5 und Bunch 7 in einem langen Bunchzug.*

weitgehend korreliert sind. Aus der Streuung der Daten ergibt sich eine Genauigkeit von 30 fs (rms) für die Bestimmung der Ankunftszeit.

## Experimente mit kohärenter Übergangsstrahlung

Die Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung stellt ein wichtiges Instrument zur Untersuchung der longitudinalen Ladungsverteilung der Elektronenpakete dar. Der hierbei interessante Wellenlängenbereich ist durch die Größe der typischen Strukturen der Elektronenpakete (Bunche) gegeben; beim FLASH-Linearbeschleuniger liegen diese im Bereich von einigen Mikrometern bis zu mehreren hundert Mikrometern. Es handelt sich also um Strahlung im mittleren und fernen Infrarotbereich (0.2–50 THz). Die gemessene Intensitätsverteilung in der Fokalebene der THz-Strahlführung (siehe Jahresbericht 2005) wird in Abbildung 88 mit der berechneten Verteilung verglichen. Die Übereinstimmung ist sehr gut.

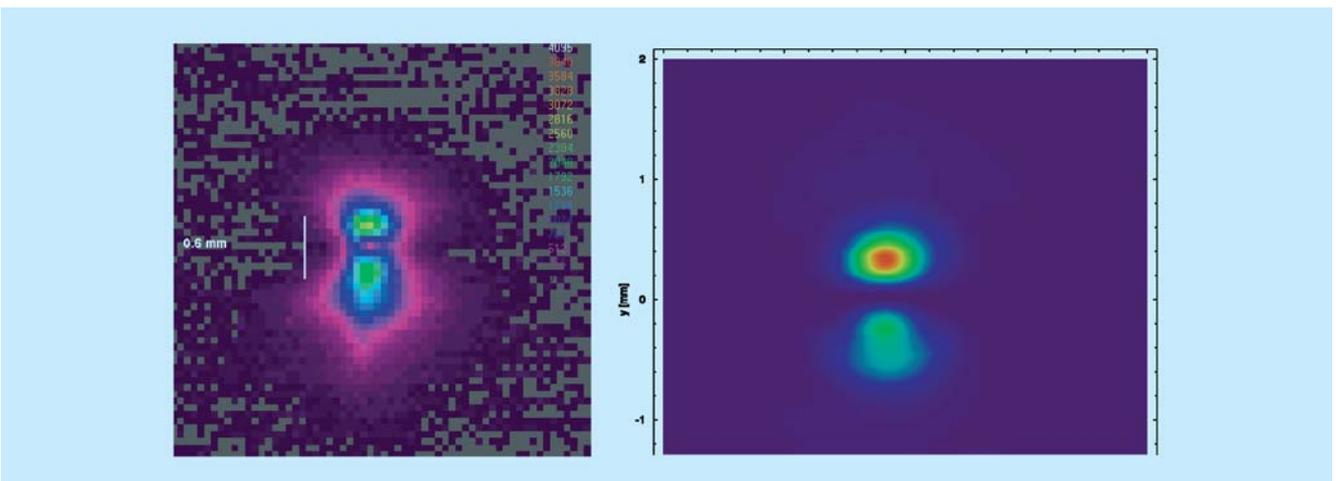


Abbildung 88: *Links: Gemessene zweidimensionale Intensitätsverteilung der kohärenten Übergangsstrahlung in der Fokalebene der THz-Strahlführung. Rechts: Berechnete Verteilung für eine Frequenz von 10 THz (dort liegt das Maximum der beobachteten Strahlung). Die Strahlung ist linear polarisiert in vertikaler Richtung.*



Abbildung 89: 30-Kanal pyroelektrischer Detektor. Die Sensoren sind halbkreisförmig angeordnet. Die Spektrometeranordnung befindet sich in einem evakuierten Behälter in der Fokalebene der im Jahresbericht 2005 beschriebenen THz-Strahlführung.

Da die Form der Elektronenbunche und damit das Strahlungsspektrum von Puls zu Puls stark variiert, ist es notwendig, das gesamte Spektrum aus einem einzelnen Strahlungspuls zu gewinnen. Bisher benutzte Methoden, die auf interferometrischen Messungen (Autokorrelationsfunktion) des Strahlungsspektrums beruhen, sind dazu nicht in der Lage. Für die THz-Strahlführung wurde daher ein neuartiges Gitterspektrometer mit großer Bandbreite entwickelt, das eine sequentielle Anordnung von Reflexions- und Transmissionsgittern zur spektralen Zerlegung der Strahlung benutzt. Zum Nachweis der Strahlung wurde ein pyroelektrischer Vielkanaldetektor (30 Kanäle) entwickelt, der es erlaubt, Einzelschusspektren mit hoher Sensitivität und für Wiederholraten von 1 MHz aufzuzeichnen. Ein Bild wird in Abbildung 89 gezeigt. Die pyroelektrischen Sensoren wurden nach unseren Spezifikationen von einer Firma (Infratec in Dresden) entwickelt. Sie sind mit speziellen Oberflächenbeschichtungen versehen, die die Reflektion der THz-Strahlung an der Vorder- und Rückseite des Detektorchips weitgehend unterdrücken. Auf diese Weise erreicht man ein nahezu frequenzunabhängiges Ansprechvermögen. Herkömmliche kommerzielle Pyro-Detektoren weisen dagegen periodische Einbrüche der Sensitivität als Funktion der Frequenz auf und sind für spektroskopische Anwendungen wenig geeignet.

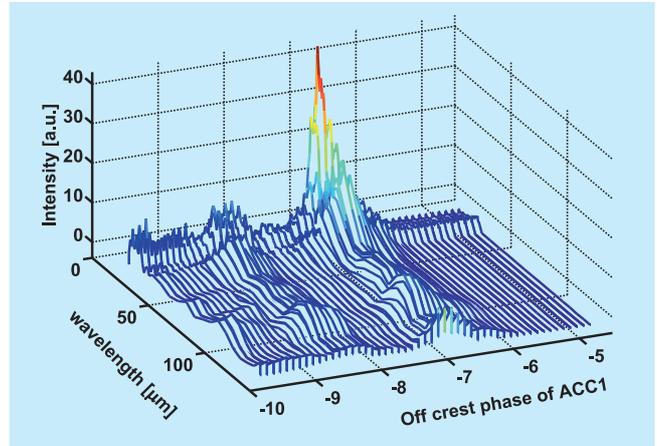


Abbildung 90: Spektrum der kohärenten Übergangsstrahlung als Funktion der HF-Phase in dem Beschleunigungsmodul ACC1.

Ein ganz entscheidender Parameter für die longitudinale Bunchkompression ist die Hochfrequenzphase im Beschleunigungsmodul ACC1, in welchem den Teilchen eine positionsabhängige Energie aufgeprägt wird. In Abbildung 90 sind die mit dem pyroelektrischen Vielkanaldetektor gemessenen Spektren für verschiedene Werte der HF-Phase aufgetragen. Bei der für den SASE-Betrieb optimalen Phase beobachtet man ein starkes Anwachsen der spektralen Intensität im Bereich von 20 – 50  $\mu\text{m}$ . Dies zeigt sich auch in dem Spektrum in Abbildung 91, bei dem Messungen mit verschiede-

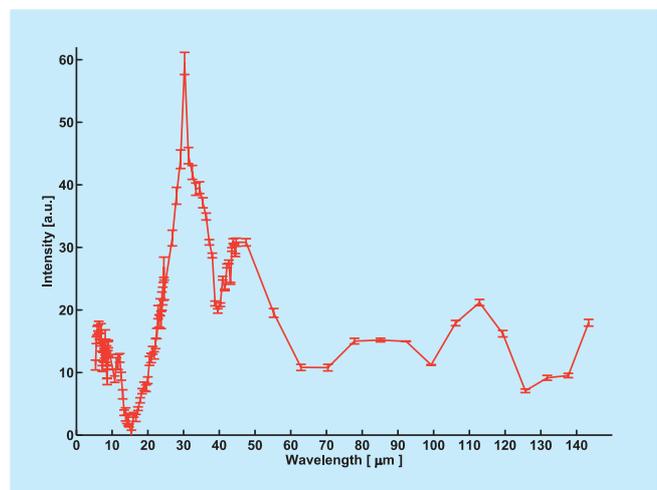


Abbildung 91: Kombiniertes Spektrum von verschiedenen Transmissions- und Reflektionsgittern.

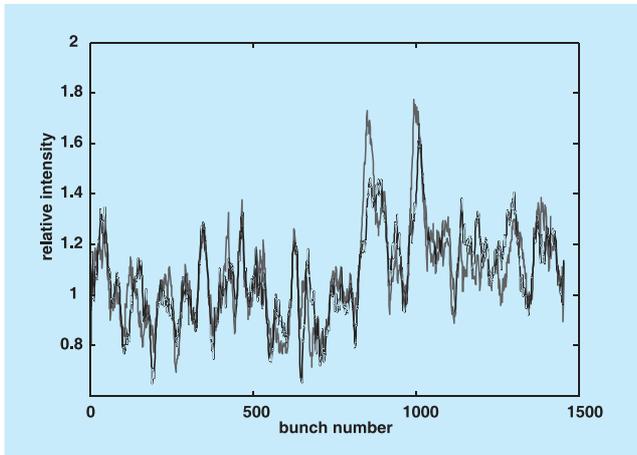


Abbildung 92: Die gemessene Pulsenergie des FEL-Lichts (schwarze Kurve) und die Intensität der kohärenten Übergangsstrahlung im Bereich 20–40  $\mu\text{m}$  (graue Kurve) als Funktion des Bunchnummer.

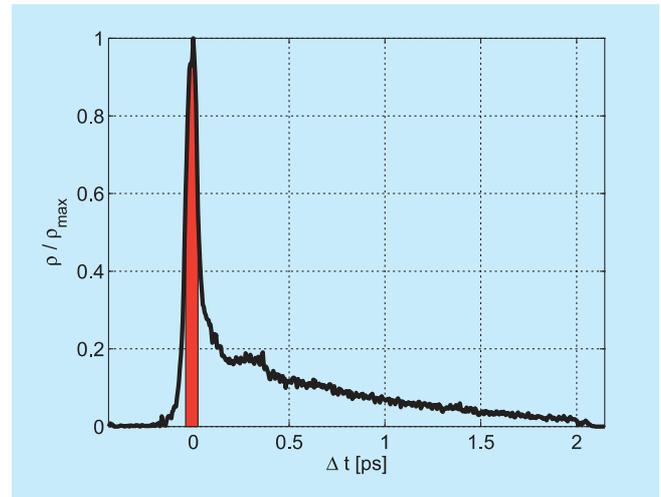


Abbildung 93: Das mit dem LOLA-Aufbau gemessene zeitliche Ladungsdichte-Profil eines Bunches.

nen Transmissions- und Reflektionsgittern kombiniert wurden.

Einzelschuss-Messungen der spektralen Intensität erlauben es, eine Korrelation mit der gemessenen FEL-Pulsenergie herzustellen, siehe Abbildung 92.

## Messungen mit der transversal ablenkenden HF-Struktur

Ein äußerst leistungsfähiges Gerät zur Diagnose einzelner Elektronenpakete ist die HF-Wanderwellen-Struktur LOLA, die ähnlich wie ein Oszillograph funktioniert, aber eine tausendfach bessere Zeitauflösung hat. Anstelle der Sägezahnspannung dient eine Superposition von transversalen elektrischen und magnetischen Eigenschwingungen hoher Feldstärke zur transversalen Ablenkung der Elektronen. Auf diese Weise wird das Zeitprofil einzelner Bunches auf einem Leuchtschirm sichtbar und kann mit höchster Genauigkeit vermessen werden. Abbildung 93 zeigt die gemessene longitudinale Ladungsdichteverteilung im Bunch. Man beobachtet ein scharfes Maximum am Kopf des Bunches mit einer Halbwertsbreite von 70 fs sowie einen langen Ausläufer zu späteren Zeiten.

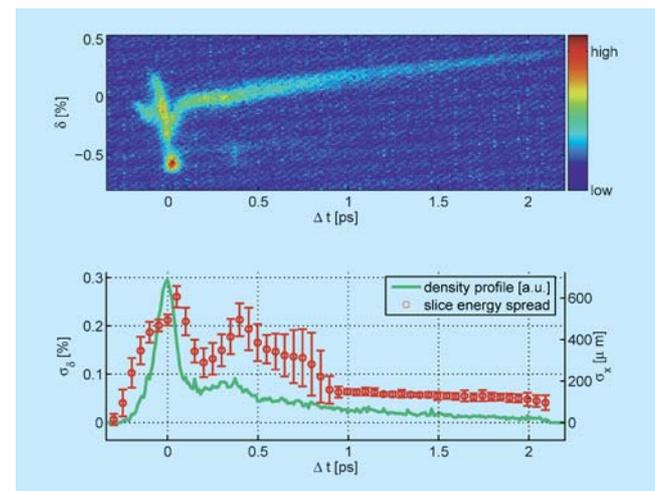


Abbildung 94: Oben: Bild der Verteilung der Elektronen im longitudinalen Phasenraum für optimale Kompression. Die Abszisse gibt die zeitliche Abweichung  $\Delta t$  der Teilchen vom Kopf des Bunches an, der sich bei  $\Delta t = 0$  befindet. Die Ordinate zeigt die relative Abweichung  $\delta = (E - E_0)/E_0$  von der Nominalenergie  $E_0$ . Unten: Die Kurve zeigt die Ladungsdichte als Funktion von  $\Delta t$ , die Punkte mit Fehlerbalken geben die Energieverschmierung (energy spread) an.

In Abbildung 94 wird die Verteilung der Elektronen im longitudinalen Phasenraum gezeigt. Der Kopf des Bunches hat eine besonders komplizierte Energiestruktur,

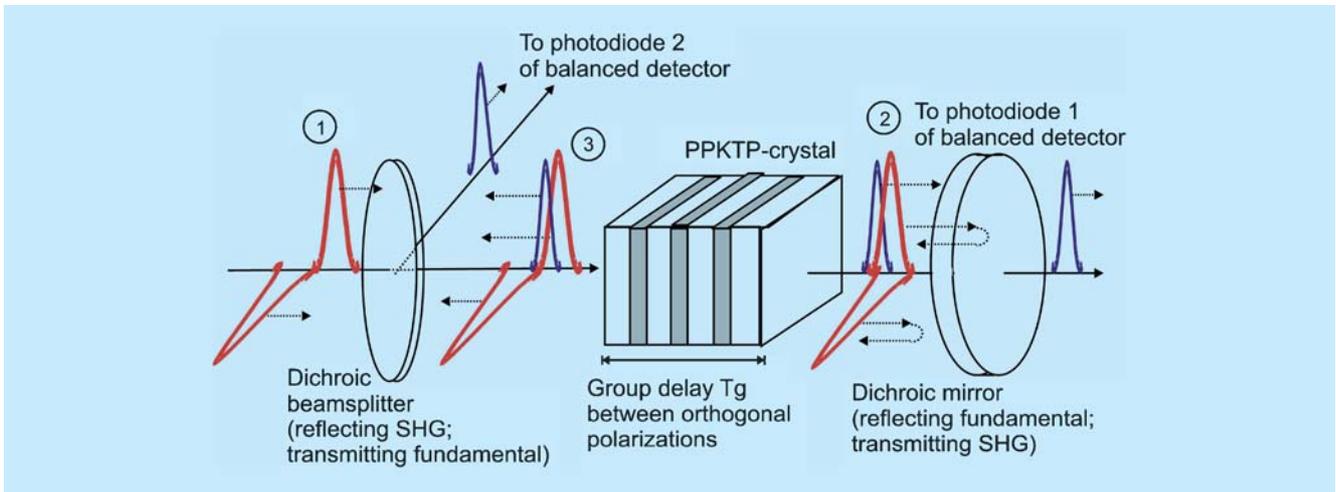


Abbildung 95: Schematischer Aufbau des balancierten Kreuz-Korrelators.

die durch Raumladungskräfte innerhalb des Bunches und kohärente Synchrotronstrahlung in den magnetischen Umwegen der Bunchkompressoren hervorgerufen wird.

Die Abbildung 81 demonstriert in eindrucksvoller Weise die vielseitigen Möglichkeiten des LOLA-Aufbaus, zum Verständnis der komplexen Vorgänge im FLASH-Linac beizutragen. Hier wurde die HF-Phase allen Beschleunigungsmodulen so gewählt, dass die Beschleunigung der Teilchen auf dem Maximum der HF-Welle erfolgte (sogenannter *on-crest*-Betrieb). Außerdem waren die Magnete der Bunchkompressoren ausgeschaltet.

## Femtosekunden-Synchronisation

Im Jahresbericht 2005 ist dargelegt worden, dass konventionelle Hochfrequenz-Verteilungssysteme außerstande sind, die extremen Anforderungen an die Phasengenauigkeit der HF im ILC und im XFEL zu erfüllen. Als neues Konzept ist die Frequenzverteilung mit Hilfe von periodischen optischen Pulsen vorgestellt worden, basierend auf Faserlasern bei 1550 nm Wellenlänge. Die Pulse werden über längenstabilisierte Glasfaserleitungen im Beschleunigertunnel verteilt. Die benötigten Faserlaser sind gebaut und erprobt worden.

## Entwicklung eines balancierten optischen Kreuz-Korrelators

Die optische Kreuz-Korrelation in einem frequenzverdoppelnden Kristall ist eine hochpräzise Methode, die Ankunftszeit von optischen Pulsketten aus verschiedenen Quellen relativ zu einander zu vermessen. In einem üblichen Kreuz-Korrelator hängt das Ausgangssignal nicht nur vom Grad der Überlappung der beiden Eingangssignale ab, sondern auch noch von deren Amplitude. Diese Amplitudenabhängigkeit kann durch die Verwendung eines balancierten Kreuz-Korrelators deutlich vermindert werden, in dem zwei Frequenzverdopplungen parallel durchgeführt werden. Dies wird so realisiert, dass eine zeitliche Verschiebung der beiden optischen Pulszüge gegeneinander zu einem Anwachsen des ersten frequenzverdoppelten Signals führt und zu einer Abnahme des zweiten. Das Differenzsignal verschwindet bei Gleichzeitigkeit, und zwar unabhängig von Amplitudenschwankungen der Eingangspulse.

In Zusammenarbeit mit dem MIT wurde ein balancierter optischer Kreuz-Korrelator für das optische Synchronisationssystem entwickelt, siehe Abbildung 95. Als frequenzverdoppelndes Medium wird ein periodisch gepolter KTP-Kristall vom Typ II verwendet,

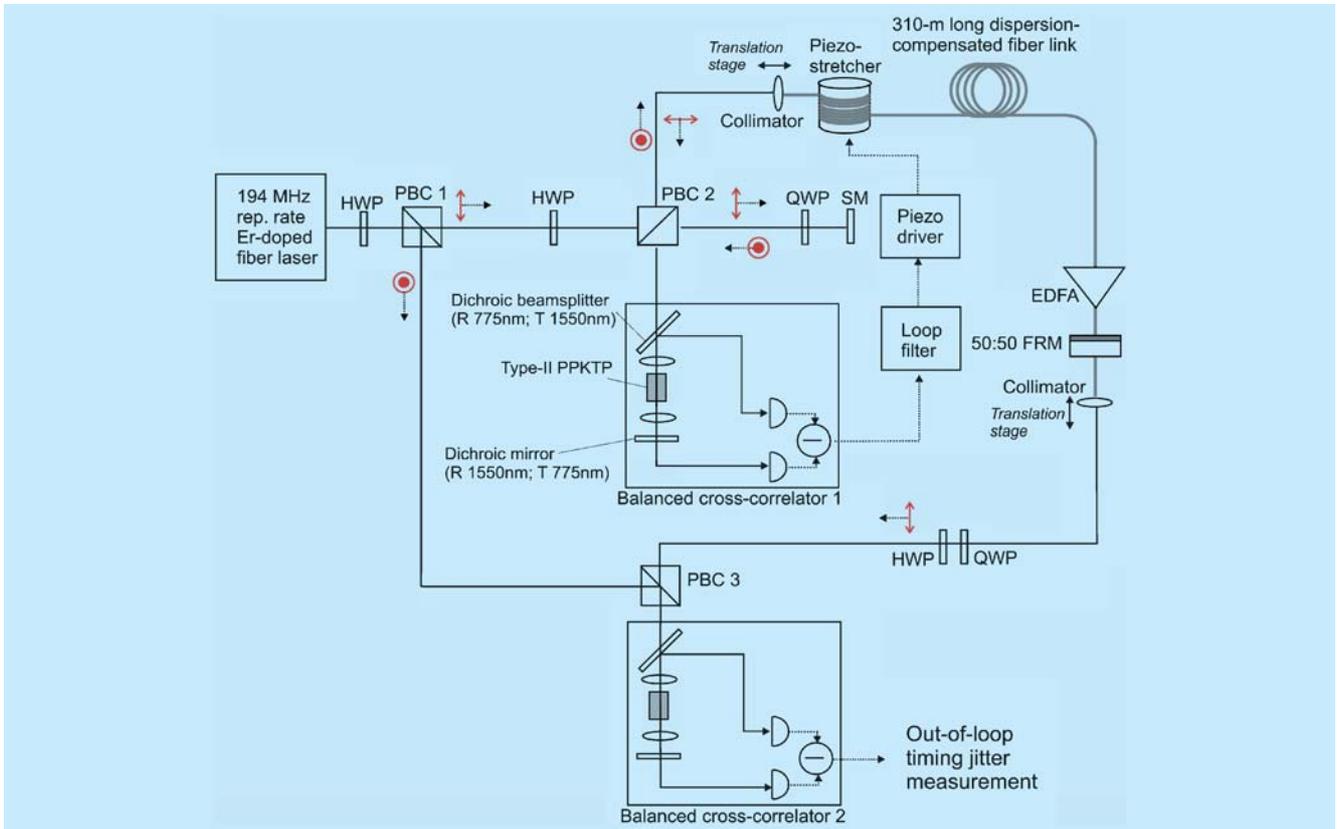


Abbildung 96: Aufbau zur Stabilisierung der optischen Länge einer Glasfaserleitung.

bei dem eine Frequenzverdopplung nur dann stattfindet, wenn orthogonale Polarisationen zum zeitlichen Überlapp gebracht werden. Dies hat den Vorteil, dass die Kreuz-Korrelation untergrundfrei stattfindet, was den Signal-Rauschabstand erhöht. Das frequenzverdoppelte Signal wird über einen dichroitischen Spiegel ausgekoppelt. Die Pulse der Grundfrequenz werden an diesem Spiegel reflektiert und durchlaufen den KTP-Kristall ein weiteres Mal, wobei sie das zweite frequenzverdoppelte Signal erzeugen.

Bei Tests konnte eine Auflösung des Kreuz-Correlators von deutlich unter 10 fs erreicht werden. Wichtige Anwendungen des Kreuz-Korrelators sind die Längenstabilisierung der Glasfaserverbindungen im Beschleuniger, die hochpräzise Vermessung der Synchronisation zweier Faserlaser sowie Phasenrauschenanalysen von Erbium-dotierten Faserlasern und -Verstärkern.

## Längenstabilisierung einer Glasfaserleitung

Ein Testaufbau für die Stabilisierung der optischen Länge einer dispersionskompensierten Glasfaserleitung ist in Abbildung 96 dargestellt. Ein Teil des übertragenen Lasersignals wird am Ende der Glasfaser über einen teilweise durchlässigen Faraday-Spiegel reflektiert (der durchlaufende Anteil steht für Synchronisationsaufgaben zur Verfügung). Durch den Faraday-Spiegel wird die Polarisation um  $90^\circ$  gedreht. In einem Kreuz-Korrelator wird die zeitliche Lage der reflektierten und der direkt aus dem Referenzlaser kommenden Pulse verglichen. Dieser Vergleich liefert das Regelsignal für einen piezo-elektrisch betriebenen Faserstretcher, mit dem die optische Länge der Leitung aktiv nachgeregelt wird.

Als Referenzlaser wurde ein Solitonlaser bei einer Repetitionsrate von ca. 200 MHz verwendet. Dieser bietet gegenüber *stretched-pulse* Lasern mit 50 MHz Repetitionsrate den Vorteil eines schmaleren optischen Spektrums, was die Dispersionskompensation in der Faser vereinfacht. Weiterhin kann bei gleicher Nichtlinearität eine vierfach höhere Leistung übertragen werden, wodurch das Signal des Kreuz-Korrelators einen Faktor vier besser ist.

Die Stabilität der Regelung wurde mit einem zweiten Kreuz-Korrelator vermessen. Die Zeitschwankungen (*time jitter*) liegen bei 9 fs (rms). Damit sind die Vorgaben für den ILC und den XFEL erreicht worden.

Die hervorragende Genauigkeit und Stabilität des Kreuzkorrelators und der Glasfiber-Leitung sind von großem Nutzen für das geplante Rückkopplungssystem bei FLASH, mit dem die Strahlenergie stabilisiert werden soll.