

Abbildung 105: Oben: Die horizontalen und vertikalen Verschiebungen des Elektronenstrahls. Unten: Variation des gemessenen und des berechneten EO-Retardationsparameters  $\Gamma$ .

# Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe FLA arbeitet wie in den Vorjahren an hochauflösenden Strahldiagnosesystemen für FLASH und den XFEL. Ein wichtiges Projekt der Gruppe ist ein optisches Synchronisationssystem für supraleitende Linacs mit Femtosekunden-Genauigkeit, das für den Röntgenlaser XFEL von zentraler Bedeutung sein wird und gegenwärtig am FLASH-Linac erprobt wird.

## Experimente mit elektro-optischen Detektoren

Die schon in den Vorjahren beschriebenen elektro-optischen (EO) Experimente wurden fortgesetzt, um

den Nutzen eines EO-Detektors zur Beschleunigerkontrolle zu demonstrieren.

Um die Abhängigkeit des EO-Signal vom Orbit der Elektronen zu untersuchen, wurde in Testmessungen die Sollbahn systematisch horizontal oder vertikal verschoben, und die Veränderungen des gemessenen EO-Signals (umgerechnet in den Retardationsparameter  $\Gamma$ ) wurden mit den berechneten Änderungen verglichen, siehe Abbildung 105. Man findet eine perfekte Übereinstimmung.

Die Ankunftszeit der Elektronenpakete am EO-Detektor hängt linear von kleinen Phasenänderungen im ersten Beschleunigungsmodul ab. Dies wird in Abbildung 106 gezeigt. Die Steigung der Anpassungsgeraden beträgt 1.79 ps/Grad. Im Normalbetrieb liegt die Messgenauigkeit der Ankunftszeit bei 60 Femtosekunden, wobei

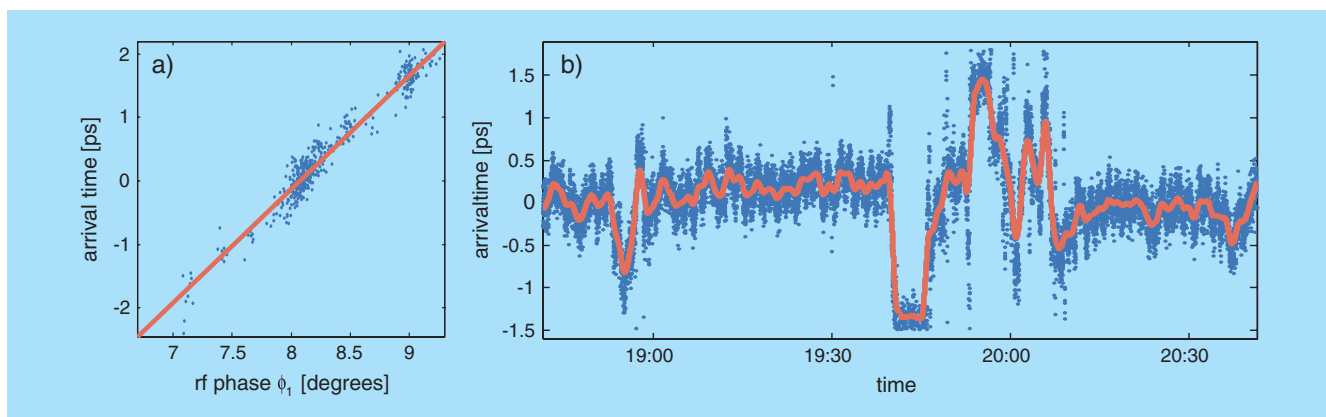


Abbildung 106: (a) Korrelation zwischen der Ankunftszeit der Bunche am EO-Detektor und der Hochfrequenzphase  $\phi_1$  im ersten Beschleunigungsmodul. Die Steigung der Anpassungsgeraden beträgt 1.79 ps/Grad. (b) Gemessener Verlauf der Ankunftszeiten während Einstellung von FLASH für den FEL-Betrieb.

Zeitschwankungen in der Synchronisation zwischen Titan-Saphir-Laser und Hochfrequenz den Hauptbeitrag liefern.

Im FLASH-Linac ist ein Feedback-System installiert, mit dem die Bunchkompression geregelt wird. Zur Steuerung wird das Signal eines pyro-elektrischen Detektors verwendet, der kohärente Diffraktionsstrahlung (coherent diffraction radiation CDR) registriert. Bei korrekter Kompression haben die Bunche minimale Breite und liefern maximale CDR-Signale. Die korrekte Funktion des Kompressions-Feedbacksystems kann aus der Breite der EO-Signale ermittelt werden (Abbildung 107). Nach Abschalten des Feedbacks wächst die Halbwertsbreite von 158 fs auf 181 fs an.

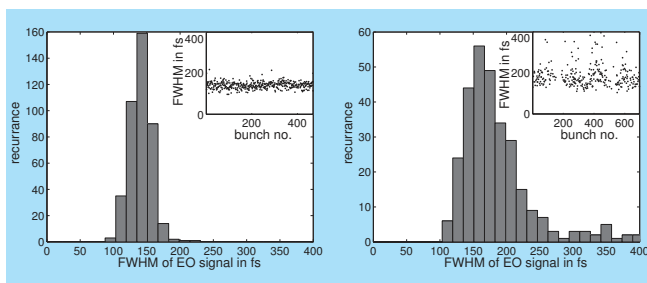


Abbildung 107: (a) Häufigkeitsverteilung der EO-Signalbreite bei korrekter Funktionsweise des Bunch-Compressions-Feedback. Der Mittelwert beträgt  $158 \pm 15$  fs (FWHM). (b) Vergrößerung der Halbwertsbreite auf  $181 \pm 34$  fs nach Abschalten des Feedback-Systems.

Ein neues EO-Experiment wurde an der CTR-Strahlführung aufgebaut, mit deren Hilfe kohärente Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) vom Beschleuniger in das Laserlabor geleitet wird. Abbildung 108 zeigt ein Einzelbunch-Signal, das mithilfe der spektralen Kodierung aufgenommen wurde. Die geringe Breite des Signals beweist, dass die Zeitstruktur der von den komprimierten Elektronenbunchen emittierten CTR-Pulse beim Durchlaufen der 19 m langen Strahlführung weitgehend erhalten bleibt. Die Energie der CTR-Pulse im Fokus der Strahlführung liegt über  $10 \mu\text{J}$ , der erfasste Frequenzbereich erstreckt sich von 200 GHz bis 100 THz. Die CTR-Strahlführung ist damit ein einzigartiges Instrument zur Erprobung

neuartiger elektro-optischer Materialien und Methoden.

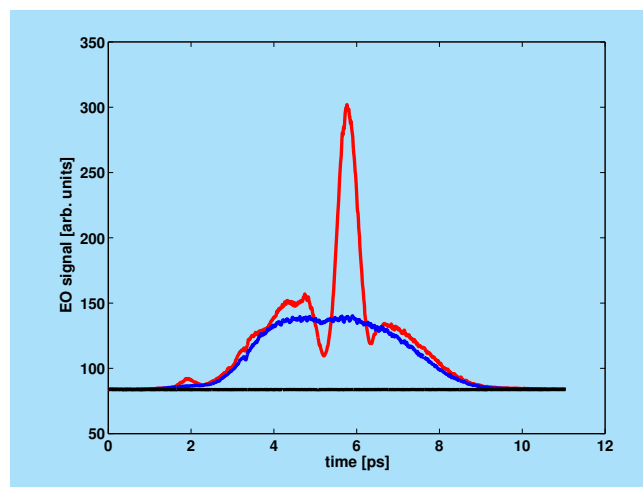


Abbildung 108: EO-Signal eines einzelnen Bunches, aufgenommen im Fokus der CTR-Strahlführung.

## Bau eines Faserlasers für einen elektro-optischen Zeitprofilmonitor

Die elektro-optischen (EO) Experimente zur longitudinalen Strahldiagnostik bei FLASH wurden bisher mit einem Titan-Saphir-(Ti:Sa)-Oszillator durchgeführt, der Pulse mit einer Breite von 30 fs und einer Energie von 5 nJ bei einer Wellenlänge von 800 nm liefert. Ti:Sa-Laser sind wartungsintensiv und teuer. Sie müssen häufig nachgeregelt werden, um im mode-lock-Betrieb zu bleiben. Aus diesem Grund sind sie nicht für die Installation im Linac-Tunnel geeignet. In 2007 wurde ein Ytterbium-Faserlaser entwickelt, der bei einer Wellenlänge von 1030 nm arbeitet und eine Pulsfrequenz von 54 MHz hat. Wichtige Gründe für einen Faserlaser sind seine Kompaktheit und Wartungsfreiheit, die es ermöglichen, das Lasersystem direkt neben der EO-Station im Beschleuniger-Tunnel aufzubauen, so dass aufwendige Strahltransportwege wegfallen. Bei der Wellenlänge von 1030 nm wird aufgrund einer besseren Anpassung der Gruppengeschwindigkeit

des Laserpulse und der Phasengeschwindigkeit der THz-Pulse im Galliumphosphid-Kristall ein besseres Signal-Rausch Verhältnis erwartet, und es können dickere Kristalle benutzt werden, was die Amplitude des EO-Signals erhöht. Es steht ein funktionsfähiger Prototyp eines Ytterbium-dotierter Faserlasers (YDFL) zur Verfügung. Dabei handelt es sich um einen Versuchsaufbau, der auch eine Verstärkerstufe umfasst. An einer kompakten, mechanisch ausgereiften Version wird gearbeitet. Bei diesem Laser handelt es sich um einen stretched-pulse-Faserlaser mit unidirektionaler Ring-Cavity, in dem ein Isolator und polarisierender Strahlteiler gemeinsam als intensitätsabhängiger Absorber fungieren. Das aktive Medium ist eine Ytterbium-dotierte single-mode Faser mit dem Kern-Durchmesser 8  $\mu\text{m}$ . Der Strahlteiler dient auch als Auskoppelport des Lasers, es wird linear polarisiertes Licht emittiert. Zur Kontrolle der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion wird als Bauteil mit negativer Dispersion ein Gitterkompressor eingesetzt, wobei ein Gitterpaar doppelt durchlaufen wird. Der Endspiegel ist zur Anpassung der Länge der Cavity auf einem motorisierten Schlitten montiert. Für eine schnelle Regelung ist zusätzlich ein Piezo-Faserstrecke eingebaut. Die Erzeugung des Regelsignals erfolgt durch eine fasergekoppelte Photodiode. Eine wichtige Eigenschaft des Faserlasers ist, dass er nach dem Einschalten automatisch in den gepulsten Betriebszustand (mode lock) übergeht, was beim Ti:Sa-Laser nicht der Fall ist.

Der Faserlaser emittiert positiv gechirpte Pulse. Vor Eintritt in den Faser-Verstärker werden die Pulse durch einen Gitterkompressor geschickt, wo der positive chirp überkompensiert wird. Mit einem akusto-optischen Modulator (AOM) werden 53 von 54 Pulsen unterdrückt, woraus ein 1 MHz-Pulszug resultiert. So wird eine deutliche höhere Verstärkung in der dotierten Faser erreicht. Der Verstärker ist aus einer polarisationserhaltenden Faser gebaut, so dass linear polarisiertes Licht emittiert wird, wie es für die Experimente gebraucht wird. Die Verstärkerfaser wird entgegen der Ausbreitungsrichtung der Laserpulse gepumpt. Der Gitterkompressor vor dem Verstärker hat einen variablen Gitterabstand, hier kann man die spektrale Verbreiterung optimieren, indem man den Ort des kürzesten Pulses

im Verstärker anpasst. Ein Gitterkompressor am Ausgang bringt die Pulse zurück auf minimale Länge, es wird ein Puls mit 2.5 nJ ausgekoppelt. Die spektrale Breite beträgt mindestens 80 nm. Damit steht jetzt ein funktionsfähiges Lasersystem zur Realisierung eines Echtzeit-Monitor für das zeitliche Profil der Elektronenpakete zur Verfügung.

## Feedbacksysteme zur Stabilisierung der FEL-Pulsenergie

Der von unserer Gruppe gebaute Ankunftszeitmonitor (bunch arrivaltime monitor BAM) ist im Jahresbericht 2006 beschrieben worden. Die Auflösung ist inzwischen wesentlich verbessert worden, und es wurden mehrere BAMs bei FLASH installiert. Die mit dem Elektronenstrahl gemessene Korrelation der Ankunftszeiten in zwei 60 m voneinander entfernten BAMs ist in Abbildung 109 aufgetragen. Aus der sehr geringen Streuung der Daten um die Anpassungsgerade errechnet man eine Zeitauflösung des BAM von 5 fs (rms). Dies ist ein Rekordwert für Zeitmessungen an einem Beschleuniger.

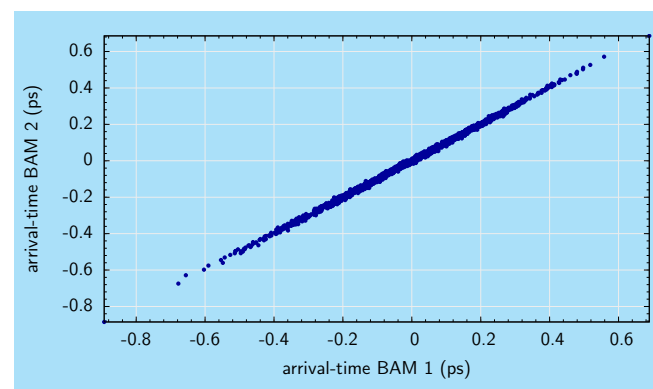


Abbildung 109: Korrelation der Ankunftszeiten in zwei 60 m voneinander entfernten Ankunftszeitmonitoren (BAMs).

Die Feldstärke in ersten Beschleunigungsmodul ACC1 hat einen starken Einfluss auf die Ankunftszeit der Bunche am Ausgang des Bunchkompressors. Die mit einem

BAM gemessene Ankunftszeit ist als Regelgröße in einer Feedbackschleife zur Stabilisierung der Feldstärke verwendet worden. Auf diese Weise konnten die Ankunftszeitschwankungen stark reduziert werden.

Ein zweiter Regelkreis wurde aufgebaut, bei dem das Signal eines Bunch-Compression-Monitors (BCM) zu Regelung der Hochfrequenzphase in ACC1 verwendet wurde. Die Kombination beider Regelkreise resultierte in einer bemerkenswerten Steigerung und Stabilisierung der FEL-Pulsenergie im SASE-FEL-Betrieb. Dies wird in Abbildung 110 gezeigt.

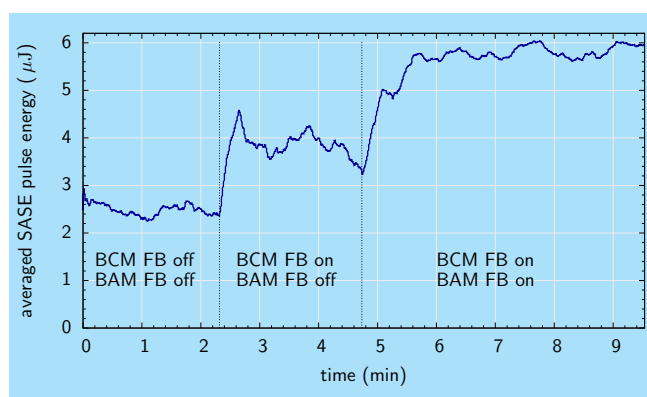


Abbildung 110: Die mittlere Energie der FEL-Pulse ohne Feedback (links), mit Bunch-Compression-Feedback (Mitte) und mit Bunch-Compression-Feedback und Ankunftszeitfeedback (rechts).

Die mittlere FEL-Pulsenergie beträgt bei dieser Messserie 2.5 µJ ohne Feedback, sie wächst auf 4 µJ nach Einschalten des Bunch-Compression-Feedback, und sie wächst auf 5.7 µJ wenn Bunch-Compression-Feedback und Ankunftszeitfeedback beide wirksam sind.

## Optischer Kreuzkorrelator

Das optische Synchronisationssystem von FLASH muss verschiedene Lasersysteme, die über den gesamten Beschleunigerkomplex verteilt sind, mit dem gepulsten Elektronenstrahl mit einer Genauigkeit im Femtosekundenbereich synchronisieren. Dazu gehören die Laser für zeitaufgelöste *pump-probe*-Experimente, der zukünftige Seed-Laser sowie Lasersysteme zur

Strahldiagnose. Eine Schlüsselkomponente des Synchronisationssystems ist der optische Kreuzkorrelator, mit dem die einzelnen Laser an die Zeitreferenz des Beschleunigers, den sogenannten Master-Laser-Oszillator (MLO), gekoppelt werden sollen. Der Kreuzkorrelator nutzt die MLO-Pulse, um in einem nichtlinearen optischen Kristall (Beta-Bariumborat BBO) das Summenfrequenzsignal der MLO- und der betreffenden Laserpulse zu erzeugen, welches als Regelsignal für eine Phasenkopplungsschleife (PLL) verwendet wird. Der Kreuzkorrelator kann so realisiert werden, dass eine hintergrundfreie Detektion des Regelsignals möglich ist.

Nach verschiedenen Testaufbauten konnte ein mechanisches Design gefunden werden, das robust genug für den Einsatz in einer Beschleunigerumgebung erscheint und wartungsarm verspricht. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann die optische Kopplung an einen im Labor installierten Faserlaser allerdings nur auf einer Zeitskala von Minuten aufrecht erhalten werden. An der Verlängerung dieser Zeit wird gearbeitet. Zum Nachweis der Zeitschwankungen sowie zur Messung des Langzeitverhaltens wurde ein zweiter, identischer Kreuzkorrelator aufgebaut, mit dem bei rein optischer, d. h. ausgeschalteter elektronischer Phasenkopplung der Laser ebenfalls das entsprechende Ausgangssignal gemessen werden konnte. Die elektronische Phasenkopplung, die eine wichtige Voraussetzung für das Etablieren der optischen Kopplung darstellt, wurde erweitert und in ihrer Genauigkeit verbessert. Dazu gehört auch ein verbesserter Regel-Algorithmus, mit dessen Entwicklung und Implementierung begonnen wurde. Der Kreuzkorrelator ist so ausgelegt, dass unmittelbar nach der Installation der optischen Glasfaserleitung in das EO-Labor die Pulse des Master-Laser-Oszillators als Eingangssignal verwendet werden können. Damit sind dann Beschleuniger-basierte Messungen möglich. Die Adaption des Kreuzkorrelations-Schemas auf den Photoinjektor-Laser, mit der bereits begonnen wurde, kann für eine Ankunftszeitstabilisierung genutzt werden, um eine weitere Reduktion der Zeitschwankungen im Beschleuniger zu erreichen.

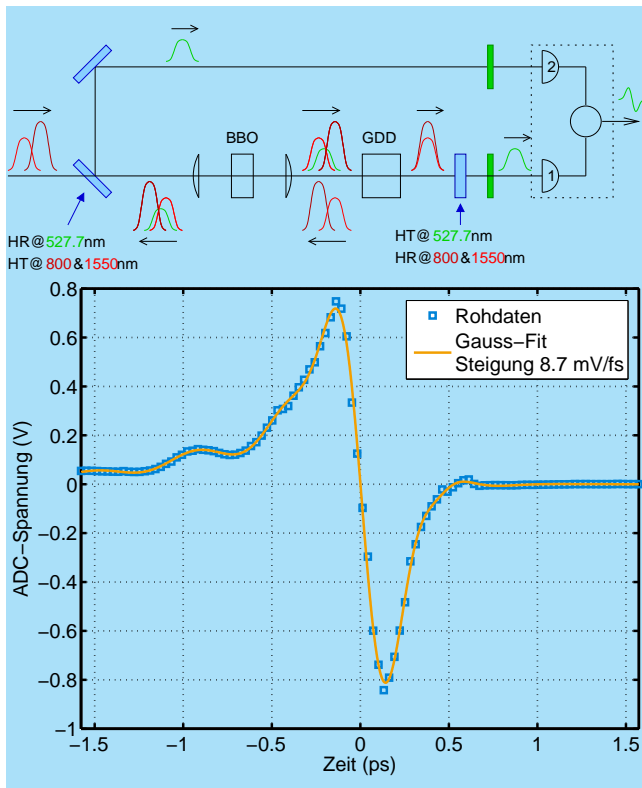


Abbildung 111: Oben: Funktionsweise des balancierten optischen Kreuzkorrelators: Die einlaufenden Pulse der beiden verschiedenen Laser werden nach dem ersten dichroitischen Spiegel auf den BBO-Kristall fokussiert, in dem die Summenfrequenz erzeugt wird. Das Summenfrequenzsignal gelangt durch einen weiteren dichroitischen Spiegel und einen Filter auf Detektor 1. Die an dem zweiten Spiegel reflektierten, fundamentalen Pulse durchlaufen ein Glaselement, in dem die Pulse getauscht und erneut auf den BBO-Kristall fokussiert werden. Das beim Rücklauf erzeugte Summenfrequenzsignal gelangt über den ersten dichroitischen Spiegel auf Detektor 2. Das Differenzsignal der beiden Detektoren ist in der Nähe des Nulldurchgangs höchst sensitiv auf Zeitschwankungen der beiden einlaufenden Laserpulse und dient als Eingangssignal für die Phasenkopplungsschleife. Unten: Gemessenes Differenzsignal der beiden Detektoren als Eingangssignal für die Phasenkopplungsschleife. Die große Steigung in der Nähe des Nulldurchgangs der Kurve verspricht eine Synchronisierung der beiden individuellen Laser auf der Femtosekunden-Zeitskala.

## Experimente mit kohärenter Übergangsstrahlung

Im Linearbeschleuniger von FLASH werden die Bunches in einem zweistufigen Prozess longitudinal komprimiert, damit die für den FEL-Prozess erforderlichen Spitzenströme von einigen 1000 A erreicht werden. Die komprimierten Bunches haben eine stark asymmetrische Struktur, sie sind durch ein sehr scharfes Maximum im Kopfbereich und einen langen Schwanz gekennzeichnet. In den vergangenen Jahren ist das longitudinale Ladungsprofil mit zwei hochauflösenden Zeitmessverfahren untersucht worden, einem elektrooptischen (EO) Detektor und einer transversal ablenkenden Wanderwellenstruktur (transverse deflecting structure TDS). Die bei FLASH installierte TDS erreicht eine Auflösung von 25 Femtosekunden (rms) mit einer auf den FEL-Betrieb optimierten Strahloptik. Die gemessene Breite des scharfen Maximums am Kopfe des Bunches liegt nahe diesem Wert, so dass die wahre Breite wesentlich geringer sein könnte. Zur Zeit gibt es jedoch keine Messmethode im Zeitbereich mit einer Auflösung von deutlich unter 20 fs.

Um den Bereich extrem kurzer Zeiten zu erfassen, bietet sich die Spektroskopie der von den Bunches erzeugten kohärenten Strahlung an. Die CTR-Strahlführung, mit deren Hilfe kohärente Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) vom Beschleuniger in das Laserlabor geleitet wird, ist mit einem neuartigen Gitterspektrometer mit großer Bandbreite ausgerüstet worden. Eine sequentielle Anordnung von Reflexionsgittern wird zur spektralen Zerlegung der Strahlung benutzt. Der Nachweis der THz-Strahlung erfolgt in pyro-elektrischen Vielkanaldetektoren (je 30 Kanäle), die es erlauben, Einzelschuss-Spektren mit Wiederholraten von 1 MHz aufzuzeichnen. 2008 wurde das Spektrometer so modifiziert, dass der Spektralbereich zwischen 3 und 65  $\mu\text{m}$  abgedeckt werden kann. Abbildung 112 zeigt den schematischen Aufbau.

In Abbildung 113 wird das gemessene Spektrum der kohärenten Übergangsstrahlung (CTR) gezeigt, die von den komprimierten Bunches im FEL Betrieb emittiert wird. Zum Vergleich wird auch das CTR-Spektrum un-

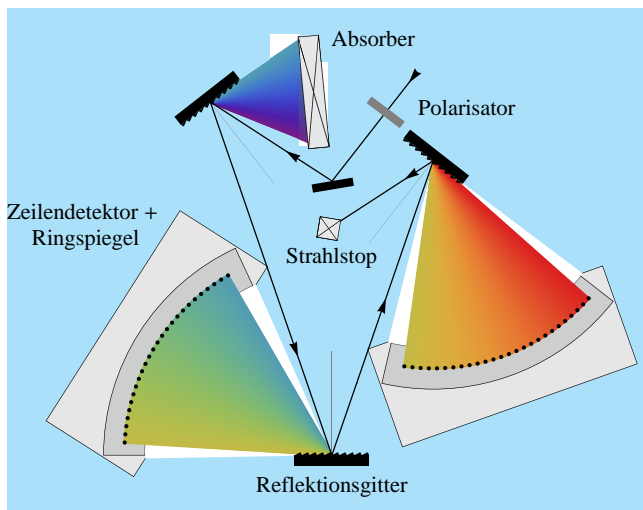


Abbildung 112: Das Gitterspektrometer mit zwei sequentiellen Reflexionsgittern und zwei auf einem Kreisbogen angeordneten Zeilendetektoren mit je 30 pyroelektrischen Sensoren.

komprimierter Bunche gezeigt. Die Unterschiede sind offensichtlich. Im Wellenlängenbereich oberhalb von  $10\ \mu\text{m}$  emittieren die komprimierten Bunche sehr viel CTR, während die nicht komprimierten Bunche hier kaum abstrahlen. Daraus folgt, dass der Spektralbereich  $10 - 65\ \mu\text{m}$  im wesentlichen aus dem scharfen Maximum im Kopfbereich des Bunches stammt. Eine Fourieranalyse dieser Daten ergibt eine Pulslänge des Kopfes von  $15\ \text{fs}$  (rms).

Sehr bemerkenswert ist die relativ starke CTR-Intensität im nahen Infrarot zwischen  $3$  und  $10\ \mu\text{m}$ , die sowohl bei komprimierten wie bei unkomprimierten Bunchen auftritt und in beiden Fällen ungefähr gleich stark ist. Daraus folgt, dass diese Strahlung nicht vorzugsweise aus dem scharfen Maximum im Kopfbereich der komprimierten Bunche stammen kann, denn sonst würde man sie bei unkomprimierten Bunchen nicht beobachten. Wir deuten die CTR-Strahlung in nahen Infrarot als experimentelle Evidenz für die theoretisch postulierte Mikrobunch-Instabilität in magnetischen Bunchkompressoren. Diese Mikrostrukturierung erstreckt sich über das gesamte Elektronenpaket und nicht nur über den Kopfbereich. Die Untersuchungen zu diesem hochaktuellen Thema werden fortgeführt.

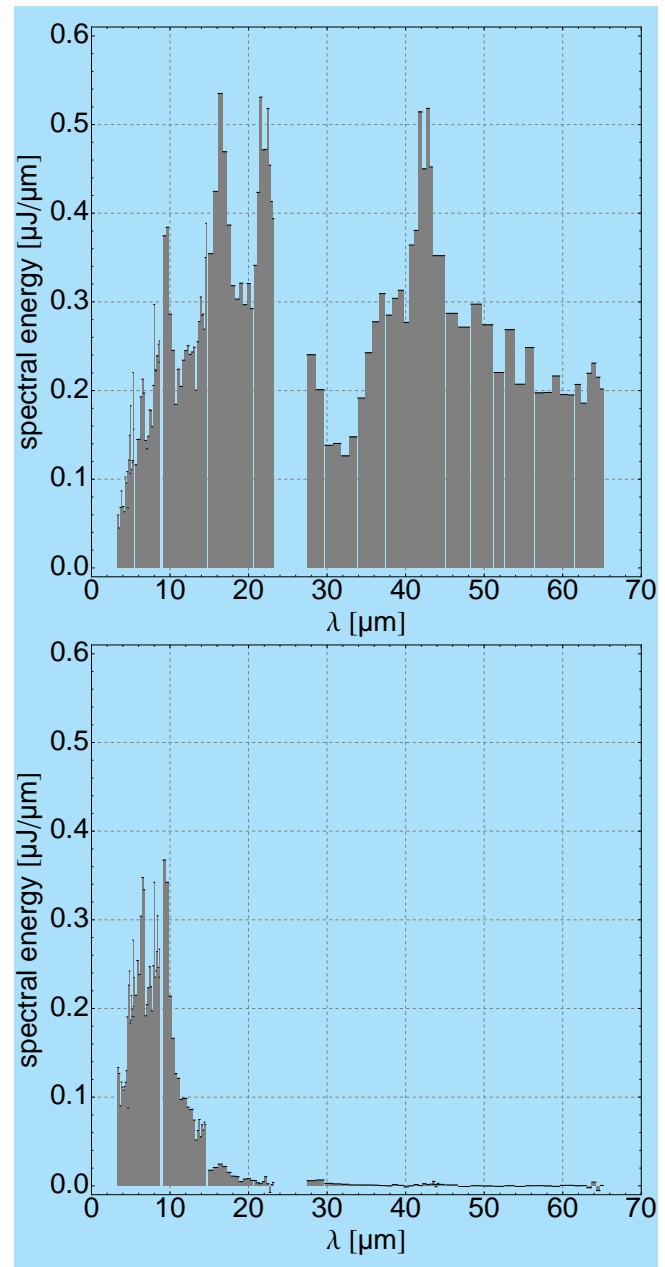


Abbildung 113: Oben: Das CTR-Spektrum der komprimierten Bunche während des FEL-Betriebs. Unten: CTR-Spektrum der unkomprimierten Bunche.