

Abbildung 70: Aufbau des EOS-Experiments am 100 MeV-Linac der Swiss Light Source.

# Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe „Forschung Linearbeschleuniger-Technologien“ (FLA) ist Anfang 2004 aus dem Zusammenschluss der Gruppe FDET und eines Teils der Gruppe HERA B hervorgegangen. Die in den Vorjahren von FDET durchgeführten Untersuchungen zu supraleitenden Resonatoren mit höchsten Gradienten und die Messungen zur Oberflächensupraleitung sind im Wesentlichen Ende 2003 abgeschlossen worden. Im Jahr 2004 hat sich die Gruppe FLA darauf konzentriert, an höchstauflösenden Systemen zu arbeiten, die für die Strahldiagnose an supraleitenden Linearbeschleunigern benötigt werden mit der Zielrichtung Linear Collider und VUV/Röntgen-FEL. Eine Besonderheit dieser neuen Beschleuniger sind die extrem kurzen Elektronenbunche, die insbesondere beim FEL nötig sind, um hohe Laser-Verstärkung in den Undulatormagneten zu erreichen.

Die experimentelle Analyse dieser Bunche wird einmal durch direkte Zeitmessungen mit Hilfe der elektro-optischen Abtastung durchgeführt. Zum Anderen ist ein optisches Strahltransportsystem für Übergangsstrahlung im Bereich von 0.2 bis etwa 30 THz entwickelt worden, um durch Messungen im Frequenzbereich feinste Strukturen in den Ladungspaketen identifizieren zu können. Die Anwendung komplementärer Messmethoden hat sich schon bei unseren bisherigen Arbeiten zur Strahldiagnose als sehr wertvoll erwiesen.

Aus den Arbeiten zur höchstauflösenden Bunchlängendiagnostik hat sich als neues Arbeitsfeld die Entwicklung optischer Methoden zur Synchronisation der Beschleunigerkomponenten (Injektor, HF-Resonatoren usw.) und der Experimente mit Femtosekundengenauigkeit ergeben. In diesem Aufgabenfeld wurden eine Doktorarbeit begonnen und bereits erste Erfolge erzielt.

Die Gruppe FLA hat im Jahr 2004 mit Wissenschaftlern der Universität Hamburg, der RWTH Aachen und des Paul-Scherrer-Instituts zusammengearbeitet. Es sind

zwei Diplomarbeiten abgeschlossen worden. Eine Dissertation ist nahezu fertiggestellt, an drei weiteren wird gearbeitet.

## Arbeiten zur elektro-optischen Abtastung der Elektronen-Bunche in Linearbeschleunigern

### Experimente an der Swiss Light Source

Die in den Vorjahren begonnenen Messungen der longitudinalen Ladungsverteilung in den Elektronenpaketen wurden erfolgreich fortgesetzt. Die Methode der elektro-optischen Abtastung (electro-optic sampling EOS) wurde angewandt, um die Bunch-Länge am 100 MeV-Linac der Swiss Light Source zu bestimmen. Das Experiment, das in Kooperation mit dem Paul-Scherrer-Institut durchgeführt wurde, ist in Abb. 70 dargestellt. Die von den Elektronenpaketen erzeugte kohärente Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) wird aus dem Linac-Strahlrohr ausgekoppelt und mit zwei Paraboloid-Spiegeln auf den ZnTe-Kristall fokussiert. Der optische Anteil der Strahlung wird durch ein Loch im ersten Paraboloid-Spiegel geleitet und auf einen Photomultiplier abgebildet. Ein Teilstrahl des Titan-Saphir-Lasers wird ebenfalls auf den Multiplier geführt, der einen Zeitabgleich der beiden Signale mit einer Genauigkeit von 500 ps erlaubt. Der andere Teilstrahl des Femtosekundenlasers durchläuft einen Polarisator und wird auf den ZnTe-Kristall fokussiert. Hinter dem Kristall befindet sich eine  $\lambda/4$ -Platte und ein Wollaston-Prisma, welches die beiden orthogonalen Polarisationszustände des Laserstrahls trennt, die dann in zwei optische Fasern eingekoppelt und zum Diodendetektor außerhalb des Linac-Tunnels geleitet werden. Eine anspruchsvolle Aufgabe bestand

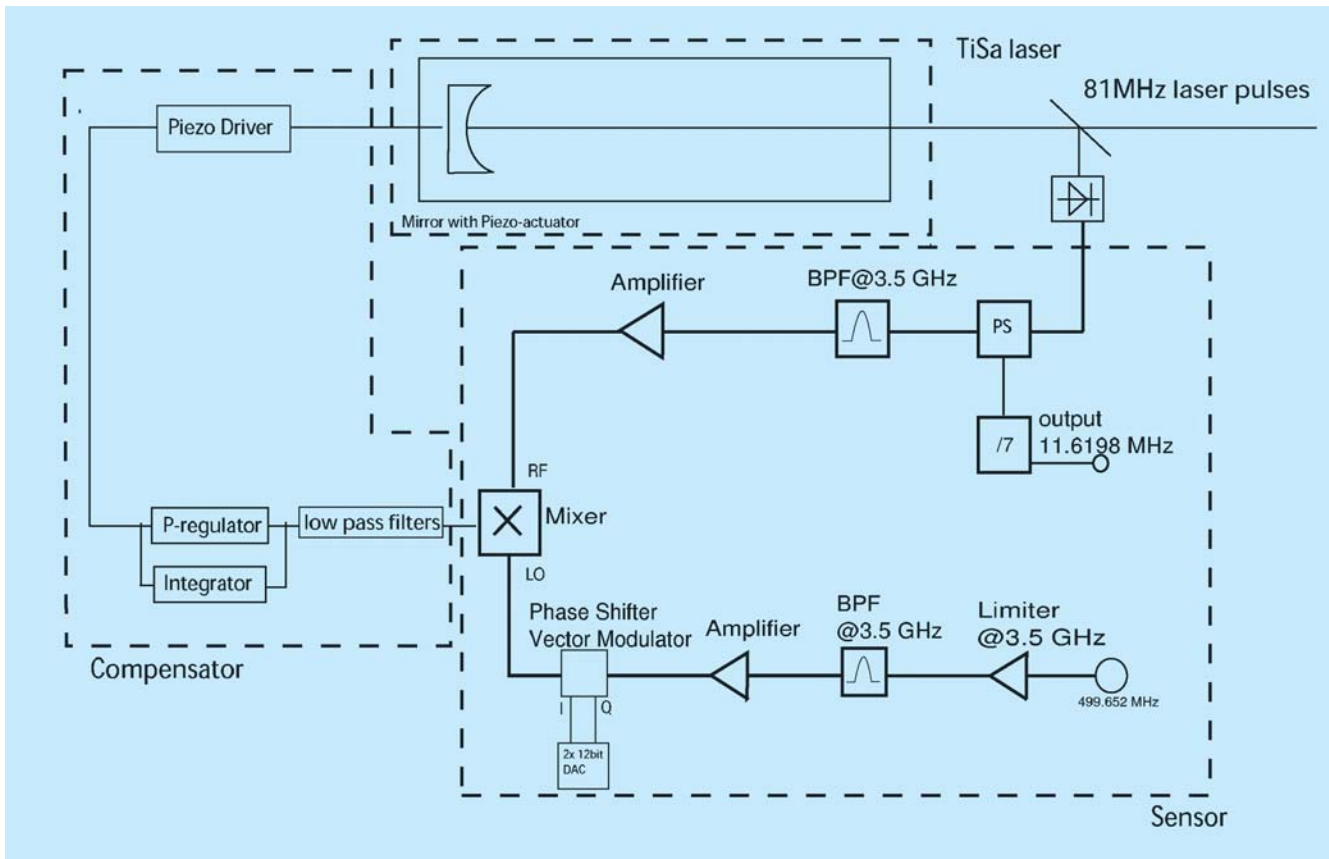


Abbildung 71: Elektronik zur Synchronisation des Titan-Saphir-Lasers mit der HF des SLS-Linacs.

darin, den Femtosekundenlaser mit einer Repetitionsrate von 81 MHz mit der 500 MHz-Hochfrequenz des PSI-Linacs zu synchronisieren. Dies wurde über eine Vergleichsfrequenz von 3.5 GHz bewerkstelligt, die die 7. Harmonische der Linac-HF und die 43. Harmonische der Laserfrequenz ist. Die dazu benötigte Elektronik (siehe Abb. 71) wurde in unserer Gruppe entwickelt und in Zusammenarbeit mit der Gruppe MHF gebaut.

Sind die beiden 3.5 GHz-Signale nicht exakt frequenzgleich, liefert ein Mischer ein Signal, mit dessen Hilfe die Resonatorlänge des Lasers über einen Piezospiegel nachgeregelt wird. Aus dem Rauschspektrum am Ausgang des Mixers kann man die Zeitschwankungen (time jitter) in der Laser-Synchronisation relativ zur Linac-HF bestimmen. Diese liegen unter 40 fs (Femtosekunden) und sind damit sehr viel geringer als die zeitlichen Schwankungen der Elektronen-Bunche relativ zur HF des Linacs.

Abbildung 72 zeigt die Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers und des Diodendetektors auf einem 2 GHz-Oszilloskop.

Die Experimente zur Abtastung der Elektronenbunche am PSI-Linac sind im Sommer 2004 erfolgreich abgeschlossen worden. Eine gemessene Zeitverteilung wird in Abb. 73 gezeigt. Die Unterschwinger im Signal werden durch Beugungseffekte beim Auskoppeln und Fokussieren der Übergangsstrahlung verursacht. Die gemessene Bunchlänge von 2 ps (Halbwertsbreite) ist in Übereinstimmung mit den theoretischen Erwartungen.

## Elektro-optischer Aufbau am Linac des VUV-FEL

Am Linac des VUV-FEL ist vor dem Eintritt des Elektronen-Strahls in den Undulatorbereich ein EOS-



Abbildung 72: Oszillographenbild der Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers (obere Spur, negative Pulse) und des Diodendetektors (mittlere Spur, positive Pulse). Die Zeitskala beträgt 5 ns/Einteilung. Die Pulse des Titan-Saphir-Lasers (TiSa) haben einen Abstand von 12.3 ns. In der Mitte des Bildes bei  $t \approx 0$  sieht man die Überlappung des TiSa-Signals mit dem Puls der optischen Übergangsstrahlung. Der Multiplier dient dazu, die zeitliche Koinzidenz mit einer Genauigkeit von 500 ps herzustellen. Der Diodendetektor hat bei  $t \approx 0$  ebenfalls ein großes Signal: dies ist ein Beweis dafür, dass der TiSa-Puls genau zu dem Zeitpunkt den ZnTe-Kristall durchläuft, bei dem dieser durch den CTR-Puls des Bunches doppelbrechend gemacht worden ist. Damit ist die Überlappung von TiSa- und CTR-Puls auf einer Pikosekunden-Zeitskala realisiert.

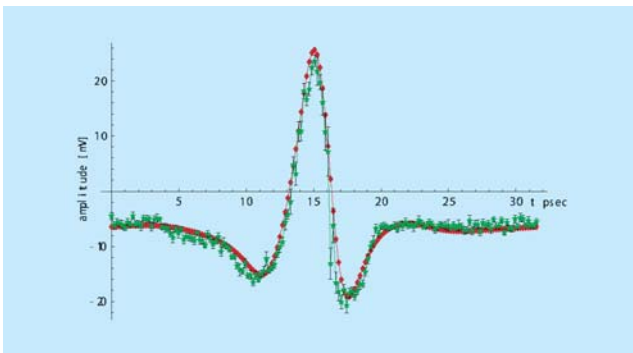


Abbildung 73: Das gemessene Zeitprofil der SLS-Linac-Bunche (Punkte mit Fehlerbalken) im Vergleich mit einer Anpassungsrechnung, die die Beugung der Übergangsstrahlung berücksichtigt.

Experiment aufgebaut worden, bei dem das mitgeführte Ladungsfeld der Elektronenpakete direkt gemessen werden kann. Auf die Weise entfallen die Beugungsverluste, die bei Messungen mit kohärenter Übergangsstrahlung das Frequenzspektrum nach unten beschnei-

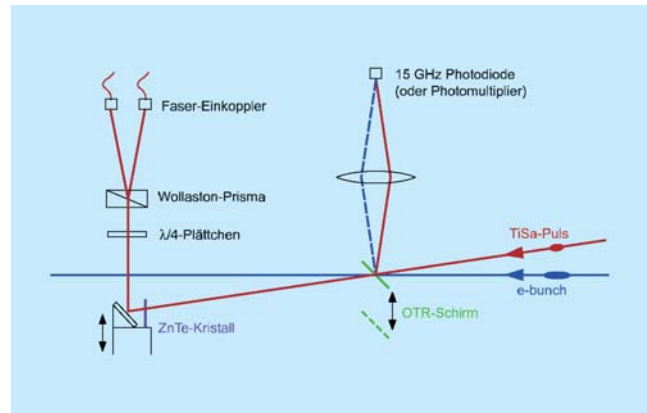


Abbildung 74: EOS-Aufbau am Linac des VUV-FEL.

den und damit Verzerrungen des Ladungsprofils vortäuschen. Es wurde eine spezielle Vakuumkammer entworfen und gebaut, in die der Laserstrahl durch ein dünnes Fenster unter einem Winkel von  $6^\circ$  gegen den Elektronenstrahl eintritt. Mittels eines fahrbaren Schirms können der Laserstrahl und die optische Übergangsstrahlung (optical transition radiation OTR) auf eine schnelle Photodiode (oder wahlweise einen Photomultiplier) geleitet werden, mit deren Hilfe die zeitliche Synchronisation der Laserpulse mit den Elektronenbunchen mit ca. 100 ps Genauigkeit eingestellt werden kann. Vor Beginn der elektro-optischen Abtastung wird der OTR-Schirm herausgefahren. Der schematische Aufbau ist in Abb. 74 dargestellt.

Das Experiment ist weitgehend fernsteuerbar aufgebaut, da der Zugang zum Beschleuniger nur beschränkt möglich ist. Die Synchronisation des TiSa-Lasers (81 MHz) mit der Linac-HF (1300 MHz) erfolgt mit einer neu gebauten Elektronik (Abb. 71), in der die 16. Harmonische der Laserfrequenz mit der Linac-HF gemischt wird. Der EOS-Aufbau ist ausgetestet und betriebsbereit, die Messungen können beginnen, sobald Strahlzeit am Linac zur Verfügung steht.

## Numerische Studien zur Pulsverbreiterung in elektro-optischen Kristallen

Die Anregung transversal-optischer (TO) Gitterschwingungen setzt eine untere Grenze für die kürzeste auflösbare Pulsdauer. Für Zink-Tellurid (ZnTe) liegt die niedrigste TO-Schwingung bei 5.3 THz, dort zeigt

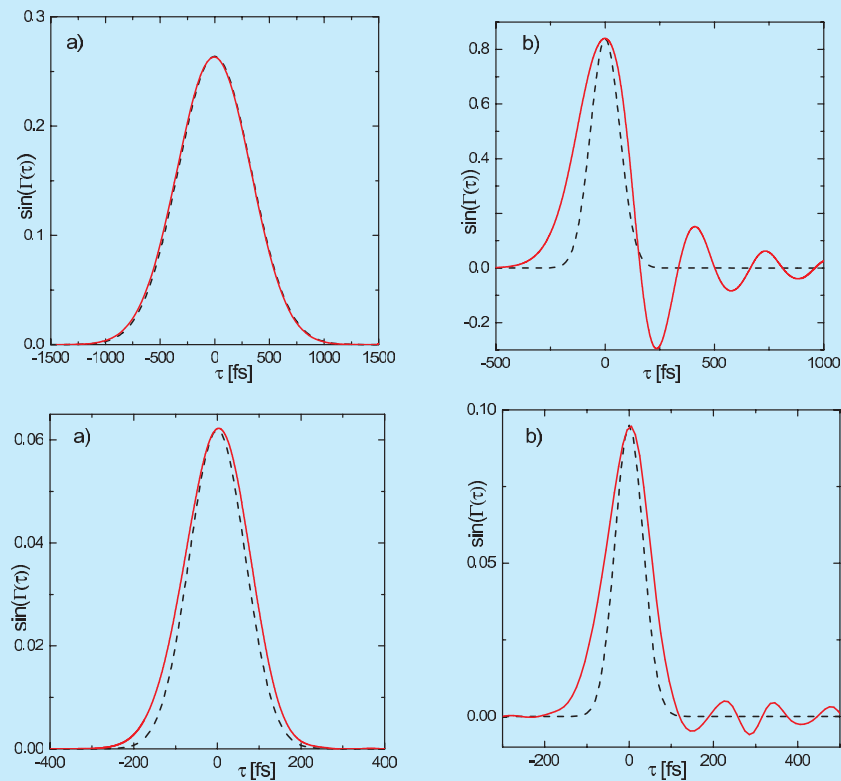


Abbildung 75: Erwartetes Signal im Diodendetektor des EOS-Aufbaus (durchgezogene Kurven) im Vergleich zu Originalform des Bunches (gestrichelte Kurven).  
 Obere Bilder: ZnTe-Kristall von 300  $\mu\text{m}$  Dicke; links:  $\sigma = 100 \mu\text{m}$ , rechts:  $\sigma = 20 \mu\text{m}$ .  
 Untere Bilder: GaP-Kristall von 100  $\mu\text{m}$  Dicke; links:  $\sigma = 20 \mu\text{m}$ , rechts:  $\sigma = 10 \mu\text{m}$

der Brechungsindex ein resonanzartiges Verhalten. Es sind detaillierte numerische Studien zur Signalverbreiterung und -verformung in elektro-optischen Kristallen durchgeführt worden um zu ermitteln, ob ultrakurze Elektronen-Bunche noch unverfälscht rekonstruiert werden können. Bei ZnTe beginnt eine merkliche Verbreiterung für Pulslängen von weniger als 30  $\mu\text{m}$  (rms). Der TiSa-Laser-Puls wird ebenfalls breiter und hat eine geringere Gruppengeschwindigkeit als der THz-Puls. Die Verbreiterung und die verschiedenen Gruppengeschwindigkeiten haben eine Signalverzerrung im Diodendetektor zur Folge, siehe Abbildung 75.

Es zeigt sich, dass ein gaußförmiger Elektronen-Bunch mit  $\sigma \geq 40 \mu\text{m}$  perfekt durch die elektro-optische Abtastung in ZnTe rekonstruiert werden kann. Kürzere Bunche erscheinen dagegen verlängert, bei  $\sigma = 20 \mu\text{m}$  fast um einen Faktor 2, und außerdem entwickeln sich Oszillationen, die man durch resonante Verstärkung der Fourierkomponenten nahe der TO-Gitterschwingung erklären kann.

Gallium-Phosphid (GaP) hat seine niedrigste TO-Schwingung bei 11 THz und ermöglicht daher die Messung von kürzeren Pulsen. Der 20  $\mu\text{m}$ -Puls wird bei Abtastung in GaP praktisch originalgetreu wiederge-

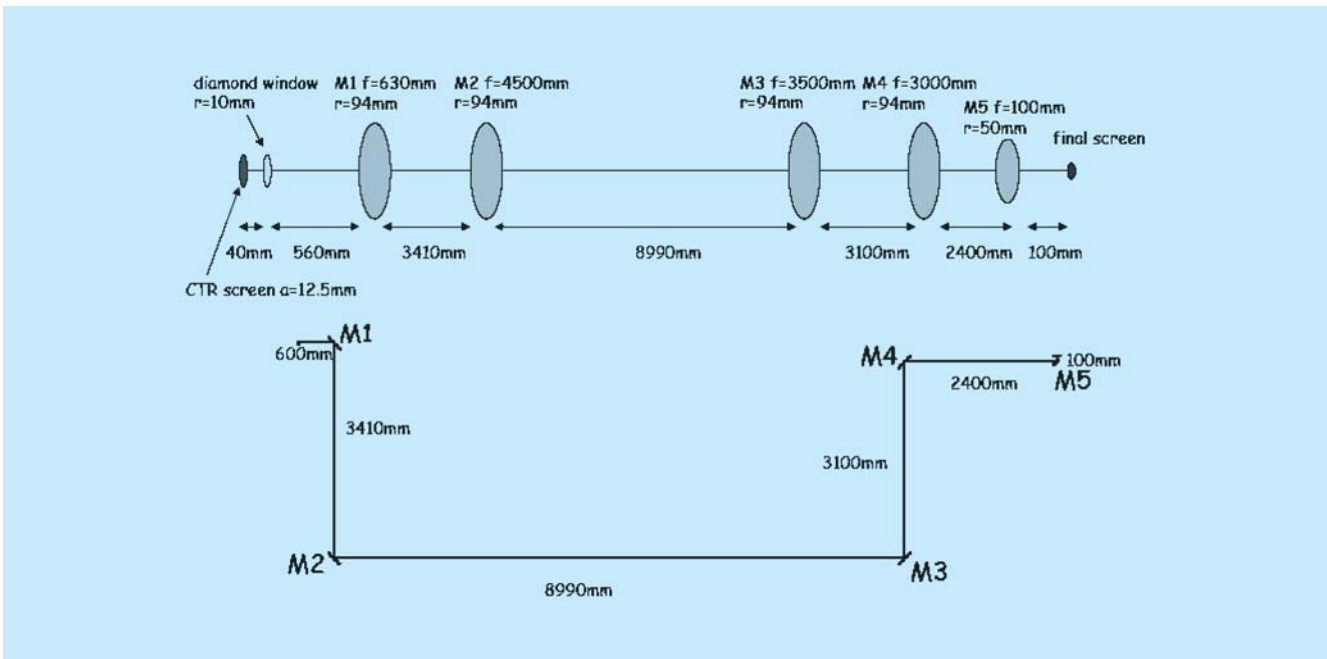


Abbildung 76: Schematische Darstellung der Auskopplung der THz-Strahlung und des optischen Transportweges vom Beschleunigerbereich bis in die Messhütte.

geben, erst ein Puls mit  $\sigma = 10 \mu\text{m}$  erscheint deutlich breiter. Die kürzeste Halbwertsbreite, die mit ZnTe als EO-Kristall aufgelöst werden kann, beträgt 200 fs, bei GaP sind es 100 fs. Allerdings ist der elektro-optische Koeffizient von GaP um einen Faktor 8 kleiner, und die Detektorsignale sind entsprechend niedriger. Am EOS-Aufbau an der 140 m-Position des VUV-FEL Linacs sollen ZnTe, GaP und evtl. andere elektro-optische Materialien verglichen werden.

## Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung

Die Spektroskopie der kohärenten Übergangsstrahlung im THz-Bereich ist eine Methode, die Zeitstruktur der Elektronenbunche auf der Skala von 10–100 fs zu studieren. Dieser Zeitbereich ist mit elektro-optischen Techniken kaum zugänglich. Um die im Beschleunigervakuum erzeugte Übergangs- oder Diffraktions-

strahlung optimal für Diagnosezwecke nutzen zu können, ist es zweckmässig, die Strahlung aus dem Beschleunigerbereich herauszuführen. Zu diesem Zweck wurde eine quasi-optische Strahlführung auf der Basis von Metallspiegeln entwickelt, die es erlaubt, THz-Strahlung von 0.2 THz bis 30 THz mit hoher Effizienz vom Beschleunigerbereich in eine externe Messhütte zu leiten. Die Strahlführung ist so ausgelegt, dass sowohl Messungen der spektralen Intensitätsverteilung als auch zeitaufgelöste Messungen mit EO-Techniken oder Streak-Kameras möglich sein werden.

Die Propagation der THz Strahlung durch das optische System wird auf Grund der langen Wellenlängen (10  $\mu\text{m}$  bis 1 mm) wesentlich durch Beugungseffekte an den Strahlbegrenzungen und den optischen Elementen bestimmt. Da kommerziell verfügbare Computerprogramme sich in diesem Wellenlängenbereich als unzureichend erwiesen, die Details der Beugungsphänomene korrekt zu beschreiben, wurde ein eigenes *Mathematica* Programmpaket zur Lösung dieses Problems entwickelt.

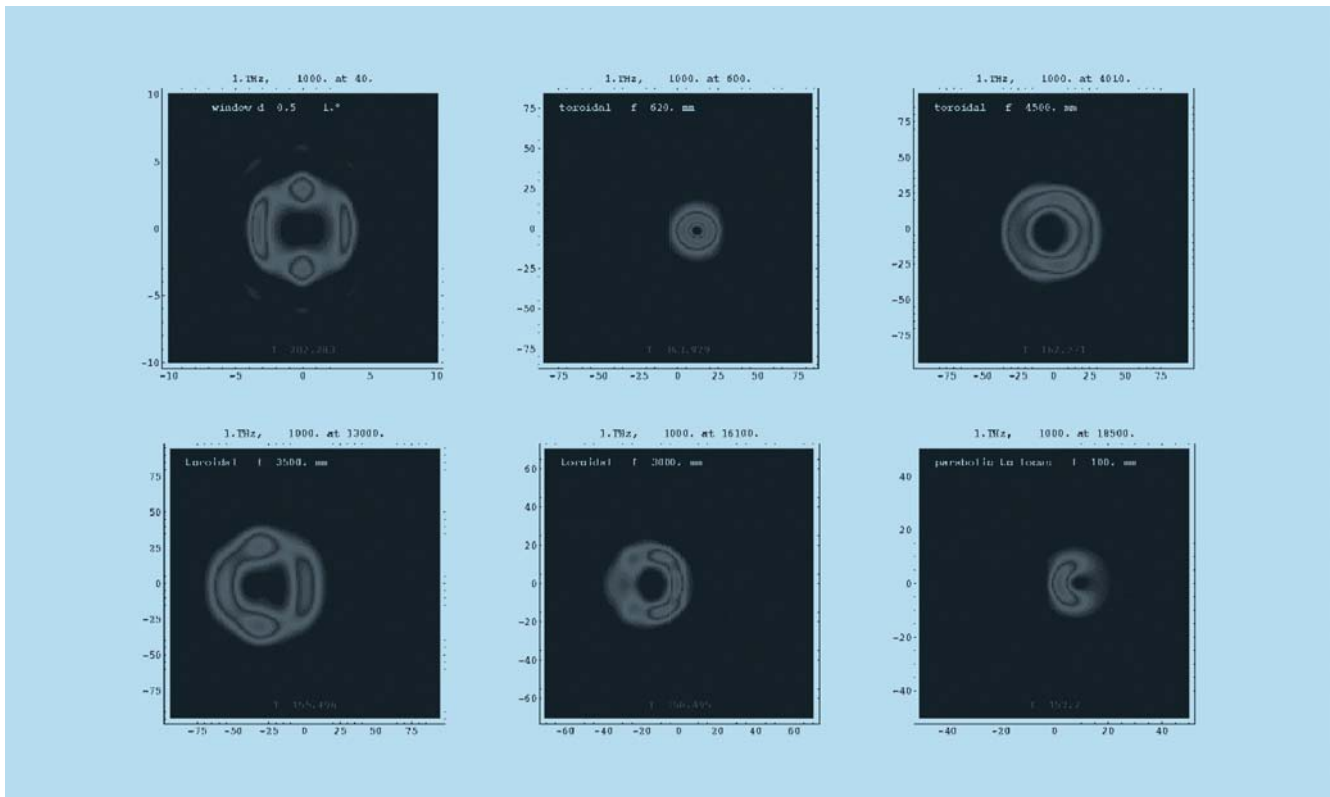


Abbildung 77: Intensitätsverteilung der kohärenten Übergangsstrahlung auf den optischen Elementen der THz-Strahlführung (Diamantfenster und fünf Spiegel).

Das Programm *THz-Transport* umfasst die Behandlung von Nah- und Fernfeldbeugung und erlaubt die Beschreibung von sphärischen, elliptischen, parabolischen und toroidalen Spiegelementen. Zudem können planparallele und keilförmige Fenster erfasst werden. Basierend auf Berechnungen mittels dieses Programms, dessen Entwicklung ca. 8 Monate in Anspruch nahm, wurden die Metallspiegel der Strahlführung und das Diamantfenster zur Auskopplung der

THz-Strahlung aus dem Beschleunigervakuum optimiert. Diese Komponenten wurden inzwischen bestellt und befinden sich in der industriellen Fertigung. Die Anordnung der optischen Elemente ist schematisch in Abb. 76 dargestellt (planare Spiegel sind nicht gezeigt), Abb. 77 zeigt exemplarisch die berechnete Intensitätsverteilung auf den optischen Elementen für eine Wellenlänge von 0.3 mm ( $f = 1 \text{ THz}$ ).