Einsatz adaptiver Optik und Kompensation chromatischer Aberration beim Petawattlaser PHELIX

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften

> vorgelegt von Hans-Martin Heuck aus Münster

genehmigt von der Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

8. Dezember 2006

Inhaltsverzeichnis

| Verwendete Symbole x | | | | | | | | |
|----------------------|--------------|---|---|----|--|--|--|--|
| 1 | 1 Einleitung | | | | | | | |
| 2 | Der | Der PHELIX-Laser | | | | | | |
| | 2.1 | Hochle | eistungs- und Hochenergielaser – Ein kurzer Überblick | 3 | | | | |
| | | 2.1.1 | Wechselwirkung von Licht und Materie | 3 | | | | |
| | | 2.1.2 | Aktuelle Hochleistungs- und Hochenergielaser | 5 | | | | |
| | | 2.1.3 | Die Gesellschaft für Schwerionenforschung und der | | | | | |
| | | | PHELIX-Laser | 6 | | | | |
| | 2.2 | Das S | chema des PHELIX-Lasers | 8 | | | | |
| | | 2.2.1 | Der Oszillator und der Vorverstärker für Nanosekundenpulse | 10 | | | | |
| | | 2.2.2 | Der Oszillator und der Vorverstärker für Femtosekundenpulse | 10 | | | | |
| | | 2.2.3 | Der Zwischenverstärker | 11 | | | | |
| | | 2.2.4 | Der Hauptverstärker | 13 | | | | |
| | | 2.2.5 | Das PHELIX-Laserlabor mit dem Kompressor und dem | | | | | |
| | | | Nachverstärker | 14 | | | | |
| | | 2.2.6 | Das Strahldiagnosesystem am Ende des Hauptverstärkers . | 17 | | | | |
| 3 | Die | Die Hauptverstärkerspiegel | | | | | | |
| | 3.1 | 3.1 Die erste Spiegelgeneration | | 23 | | | | |
| | | 3.1.1 | Fehler im Entwurf der Spiegel | 24 | | | | |
| | | 3.1.2 | Messung großer Flächen mit aneinandergefügten Interfero- | | | | | |
| | | | grammen | 25 | | | | |
| | 3.2 | Die zv | veite Spiegelgeneration | 29 | | | | |
| 4 | Abe | Aberrationen im Zwischen- und Hauptverstärker | | | | | | |
| | 4.1 | Statische Aberration | | | | | | |
| | 4.2 | Thermooptische Aberrationen | | | | | | |
| | 4.3 | Thermooptische Aberrationen im Zwischenverstärker | | | | | | |
| | 4.4 | 4 Thermooptische Aberrationen im Hauptverstärker | | | | | | |
| | | 4.4.1 | Aufbau der Scheibenverstärker | 34 | | | | |
| | | 4.4.2 | Berechnung der Temperaturverteilung in den Verstärker- | | | | | |
| | | | scheiben | 36 | | | | |

| | | 4.4.3 | Berechnung der Schussaberrationen | 39 | | | | |
|---|----------------|---------|---|-----|--|--|--|--|
| | | 4.4.4 | Berechnung der Langzeitaberrationen | 44 | | | | |
| | 4.5 | Chara | kterisierung des Hauptverstärkers | 46 | | | | |
| | | 4.5.1 | Messaufbau | 46 | | | | |
| | | 4.5.2 | Messung der Schussaberrationen | 47 | | | | |
| | | 4.5.3 | Messung der Langzeitaberrationen | 53 | | | | |
| 5 | Adaptive Optik | | | | | | | |
| | 5.1 | Übers | icht | 57 | | | | |
| | | 5.1.1 | Adaptive Optik in erdgebundenen Teleskopen | 57 | | | | |
| | | 5.1.2 | Neuere Anwendungen | 58 | | | | |
| | | 5.1.3 | Adaptive Optik in Laserverstärkern | 59 | | | | |
| | 5.2 | Direkt | te Berechnung des Spiegelkontrollsignals | 59 | | | | |
| | | 5.2.1 | Die Einflussmatrix | 60 | | | | |
| | | 5.2.2 | Die Kontrollmatrix | 62 | | | | |
| | | 5.2.3 | Die Methode der Singulärwertzerlegung | 63 | | | | |
| | 5.3 | Der e | volutionäre Algorithmus | 66 | | | | |
| | | 5.3.1 | Vorteile eines evolutionären Suchalgorithmus in der adap- | | | | | |
| | | | tiven Optik | 66 | | | | |
| | | 5.3.2 | Vergleich mit anderen Suchalgorithmen | 67 | | | | |
| | | 5.3.3 | Historische Entwicklung der evolutionären Optimierungsal- | | | | | |
| | | | gorithmen | 68 | | | | |
| | | 5.3.4 | Konzepte der Evolution | 68 | | | | |
| | | 5.3.5 | Umsetzung des evolutionären Algorithmus | 73 | | | | |
| | | 5.3.6 | Demonstration des evolutionären Algorithmus | 74 | | | | |
| | | 5.3.7 | Verbesserungspotential des evolutionären Algorithmus | 76 | | | | |
| | 5.4 | Defor | mierbare Spiegel | 79 | | | | |
| | | 5.4.1 | Überblick | 79 | | | | |
| | | 5.4.2 | Membranspiegel | 83 | | | | |
| | | 5.4.3 | Bimorphe deformierbare Spiegel | 90 | | | | |
| | | 5.4.4 | Der deformierbare Glasspiegel DM2 | 97 | | | | |
| | 5.5 | Das R | Regelsystem der adaptiven Optik am PHELIX-Laser | 100 | | | | |
| | | 5.5.1 | Aberrationsquellen | 100 | | | | |
| | | 5.5.2 | Erste Experimente zur Kompensation der Langzeitaberra- | | | | | |
| | | | tionen | 103 | | | | |
| 6 | Chro | omatisc | he Aberration | 109 | | | | |
| | 6.1 | Pulsze | eit-Verzögerung durch chromatische Aberration | 110 | | | | |
| | 6.2 | Pulsze | eit-Verzögerung in Hochleistungslasern | 113 | | | | |
| | 6.3 | Weller | noptische Propagation bandbreitenlimitierter Laserpulse $\ . \ .$ | 114 | | | | |
| | | 6.3.1 | Abfall der Intensität durch Pulszeit-Verzögerung | 117 | | | | |

| | | 6.3.2 | Einfluss der Pulszeit-Verzögerung auf Laserpulse mit unter- schiedlicher Intensitätsverteilung | 118 | | |
|-----|---|-------------------------------------|---|-----|--|--|
| | | 6.3.3 | Wechselwirkung von räumlichen Aberrationen und Puls- | 110 | | |
| | | | zeit-Verzögerung | 119 | | |
| | 6.4 Kompensation der Pulszeit-Verzögerung | | ensation der Pulszeit-Verzögerung | 120 | | |
| | | 6.4.1 | Nahfeldpropagation eines Laserpulses mit Pulszeit-Verzö- | | | |
| | | | gerung | 121 | | |
| | | 6.4.2 | Spektrales Filtern in den Raumfrequenzfiltern | 122 | | |
| | | 6.4.3 | Vorschläge zur Vorkompensation der Pulszeit-Verzögerung . | 123 | | |
| | 6.5 | .5 Der Shifted-Field-Autokorrelator | | 126 | | |
| | | 6.5.1 | Der Aufbau des Shifted-Field-Autokorrelators | 127 | | |
| | | 6.5.2 | Messung und Berechnung der Pulsdauer | 129 | | |
| | | 6.5.3 | Messung und Berechnung der Pulsfrontkrümmung $\ .\ .\ .$ | 129 | | |
| 7 | Zusa | mmenfa | assung | 135 | | |
| Lit | Literaturverzeichnis | | | | | |
| Da | Danksagung | | | | | |

Kapitel 1 Einleitung

"PHELIX" ist das Akronym für einen Laser mit einer Pulsspitzenleistung von einem Petawatt (1 PW = 10^{15} Watt), der zurzeit bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt installiert wird. (PHELIX = Petawatt High Energy Laser for Heavy-Ion Experiments). Der Laser auf der Basis von Neodymdotiertem Glas wird eine Pulsenergie von 500 J bei einer Pulsdauer von 500 fs haben. Die Leistungsdichte von über 10^{21} W/cm², die mit dem PHELIX-Laser erreicht werden kann, ermöglicht neue physikalische Experimente wie z. B. die Erzeugung von hochenergetischen Teilchenstrahlen, die Röntgenstrahlerzeugung mit Lasern und die Erzeugung von Plasmen, die so heiß sind, dass sich die Teilchen mit relativistischer Geschwindigkeit bewegen [1, 2].

Aufgrund der Wellennatur des Lichtes wird ein Laserpuls auf die kleinste mögliche Fläche fokussiert, wenn die Intensitätsverteilung gaußförmig und die räumliche Phase sphärisch ist. Die Dauer eines Femtosekundenpulses ist von der spektralen Phase und der spektralen Amplitude abhängig. Aberrationen der räumlichen oder spektralen Phase sowie der räumlichen oder spektralen Amplitude reduzieren somit die erreichbare Intensität eines Laserpulses.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit den räumlichen und zeitlichen Aberrationen des PHELIX-Lasers. Der Schwerpunkt der Arbeit besteht dabei in der Kompensation räumlicher Phasenstörungen mittels adaptiver Optik und in der Untersuchung und Kompensation chromatischer Aberration.

Räumliche Aberrationen entstehen z. B. durch die endliche Oberflächengenauigkeit der Spiegel und Kompromisse im optischen Design. Den größten Anteil an den räumlichen Aberrationen haben jedoch thermooptische Aberrationen. Die durch das Pumpen eingebrachte Wärme bildet insbesondere in den mit Luft gekühlten, 631 x 340 x 43 mm³ großen Nd:Glas Verstärkerscheiben einen über mehrere Stunden abklingenden Temperaturgradienten. Die daraus resultierenden thermischen Aberrationen reduzieren die Repetitionsrate des PHELIX-Lasers auf einen Schuss in zwei Stunden. Adaptive Optik wird es ermöglichen, die thermischen Aberrationen zu kompensieren und die Repetitionsrate deutlich zu steigern. Ein adaptiver Spiegel mit 8 cm Durchmesser, dessen Oberflächenform aktiv geregelt werden kann, wird vor den Verstärkerscheiben des Hauptverstärkers in den Strahlengang eingeführt. Bisher erfolgt die Regelung, indem die räumliche Phase am Ausgang des Hauptverstärkers mit einem Wellenfrontsensor gemessen wird. Durch eine zuvor aufgenommene Einflussfunktion des adaptiven Spiegels kann die benötigte Spiegeleinstellung aus der Wellenfrontmessung errechnet werden. Der adaptive Spiegel kann so die thermooptischen Aberrationen vorkompensieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein zweiter Regelkreis, basierend auf einem evolutionären Suchalgorithmus, entwickelt. Der Vorteil besteht darin, dass der Strahldurchmesser oder die Intensität im Fokus als Messgröße herangezogen werden können. Beide Parameter sind einfacher und zuverlässiger zu messen als die Wellenfront. Der Algorithmus kann also direkt die in den Experimenten benötigten Parameter optimieren.

Die thermooptischen Aberrationen konnten mithilfe des ersten Regelalgorithmus nach einer Stunde kompensiert werden. Die Leistungsfähigkeit des evolutionären Suchalgorithmus konnte noch nicht am PHELIX-Laser überprüft werden, jedoch konnte die prinzipielle Leistungsfähigkeit in zwei experimentellen Aufbauten nachgewiesen werden.

Die zeitliche Kohärenz eines Femtosekundenpulses kann aufgrund nicht-linearer optischer Effekte oder durch Dispersion in den Optiken gestört werden. Nichtlineare Effekte verändern z. B. die Krümmung der Phase in Abhängigkeit von der spektralen Amplitude. Die chromatische Aberration der klassischen Optik wurde im ursprünglichen Entwurf des PHELIX-Lasers und anderer vergleichbarer Laser bisher nicht berücksichtigt, da man davon ausging, dass sie bei Lasern mit Pulslängen von mehr als 100 fs vernachlässigbar ist. Bei dieser Annahme wurde jedoch die Verzögerung des Pulses in sehr großen Linsen vernachlässigt.

Die im PHELIX-Laser mehrfach vorhandenen Linsen mit 300 mm Durchmesser erzeugen je Durchgang eine 150 fs große Verzögerung der Pulsfront zwischen der Strahlmitte und dem Strahlrand. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein numerisches Modell entwickelt, das die Berechnung der Ausbreitung eines kohärenten, breitbandigen Laserpulses bei Vorliegen von chromatischer Aberration erlaubt. Mit diesem Modell wird eine Vorhersage über den Einfluss der chromatischen Aberration auf die erreichbare Leistungsdichte unter Berücksichtigung der für Petawattlaser typischen Strahlparameter und räumlichen Aberrationen berechnet. Es wurden zwei Vorschläge ausgearbeitet, um chromatische Aberration bei kleinem Strahldurchmesser zu kompensieren. Zum Nachweis der Verzögerung der Pulsfront wurde ein selbstreferenzierender Autokorrelator entwickelt, mit dem die Pulsfront vermessen werden kann.

Kapitel 2 Der PHELIX-Laser

2.1 Hochleistungs- und Hochenergielaser – Ein kurzer Überblick

2.1.1 Wechselwirkung von Licht und Materie

Eine Lichtwelle ist eine Schwingung des elektrischen und des magnetischen Feldes. Beide Felder stehen in einem festen Verhältnis zueinander. Das elektrische Feld schwingt dabei senkrecht zum magnetischen Feld und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle. Trifft eine Lichtwelle auf Materie, werden Elektronen durch die elektrostatische Kraft parallel zum elektrischen Feld ausgelenkt und zur Oszillation angeregt. Im Modell der linearen Optik werden die Elektronen nur schwach ausgelenkt. Die Schwingung des am Atomkern gebundenen Elektrons kann analog einem Federpendel beschrieben werden. Die angeregten Elektronen schwingen mit der gleichen Frequenz wie die anregende Lichtwelle und emittieren eine neue Lichtwelle. In der linearen Optik werden die Materialeigenschaften mithilfe des komplexen Brechungsindexes bestimmt. Dieser wird in der linearen Optik aus der Amplitude und der Phase der Schwingung hergeleitet [3, S.90ff].

Die Entwicklung des Lasers Anfang der 60er Jahre machte es möglich, Licht mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Kohärenz, geringer Divergenz und einer geringen spektralen Linienbreite zu erzeugen und zu verstärken. Diese besonderen Eigenschaften ermöglichen die Fokussierung des Laserlichtes auf eine sehr kleine Fläche. Mit leistungsstarken Lasern kann deshalb eine deutlich größere Intensität erreicht werden als mit konventionellen Lichtquellen.

Schon in der Anfangszeit der Laserentwicklung wurde eine Intensität von mehr als 10^{10} W/cm² realisiert. In den folgenden Jahren konnte die Intensität durch die Entwicklung der Güteschaltung auf über 10^{11} W/cm² und durch die Entwicklung der Modenkopplung auf über 10^{13} W/cm² gesteigert werden [4]. Bei diesen Leistungsdichten ist die elektrische Feldstärke so groß, dass die Auslenkung des Elektrons nicht mehr durch eine lineare Näherung beschrieben werden kann [5]. Die resultierende anharmonische Schwingung führt zu einer Reihe neuer optischer Effekte, wie z. B. der Frequenzverdoppelung in doppelbrechenden Kristallen, der Selbstfokussierung, dem Kerr-Effekt und der Raman-Streuung. Die Energie eines Photons (im sichtbaren und infraroten Bereich des Lichtes) reicht dazu aus, Übergänge zwischen verschiedenen Atomschalen anzuregen, ist aber kleiner als die Bindungsenergie eines Elektrons an den Atomkern. Ein einzelnes Photon kann ein Atom nicht ionisieren. Erst ab einer Intensität von etwa 10^{14} W/cm² kann ein Elektron so stark ausgelenkt werden, dass die mittlere Energie der Elektronenschwingung größer ist, als die Bindungsenergie zwischen dem Elektron und dem Atomkern. Oberhalb dieser Schwelle wird die Wechselwirkung von Licht und Materie dominiert durch Mehrphotonenabsorption. Atome werden ionisiert.

In **Hochenergielasern** wird ein Laserpuls mit einer Pulsdauer von etwa 10 ns auf eine Energie von einigen 1000 Joule verstärkt. Um nichtlineare Effekte in den optischen Materialien und Zerstörung von Beschichtungen an Grenzflächen zu vermeiden, muss die Intensität während der Verstärkung im Bereich der linearen Optik, also unter 10¹⁰W/cm² bleiben. Zur Reduzierung der Intensität wird der Laserstrahl daher während der Verstärkung in Stufen aufgeweitet. Bei einem Strahldurchmesser von 0.5 m ist die technisch realisierbare Größe von Laseroptiken erreicht. In den größten Hochenergielasern werden mehrere Verstärkerketten parallel zueinander aufgebaut. Aktuelle Hochenergielaser erreichen mit einer Verstärkerkette eine Intensität von ca. 10^{18} W/cm². Bei dieser Intensität werden neue physikalische Effekte beobachtet, wie z. B. die relativistische Selbstfokussierung [2]. Durch den intensiven Lichtpuls eines Hochenergielasers wird das Elektron so stark beschleunigt, dass die relativistische Massenzunahme des Elektrons bei der Berechnung der Elektronenbewegung berücksichtigt werden muss. Gleichzeitig muss auch die Kraft des magnetischen Feldes (Lorentz-Kraft) einbezogen werden, die bei Berechnungen im Bereich kleinerer Leistungsdichten vernachlässigt wird.

Ein weiterer Sprung zu höheren Leistungsdichten konnte durch die Entwicklung der Kerr-Linsen-Modenkopplung in Verbindung mit der Entwicklung der "chirped pulse amplification, (CPA) erreicht werden [6]. Diese Technologien ermöglichen die Erzeugung und anschließende Verstärkung von Lichtpulsen im Femtosekundenbereich. Selbst mit relativ kleinen Lasern können hiermit Leistungsdichten bis zu 10^{18} W/cm² erreicht werden. In **Hochleistungslasern** werden Femtosekundenpulse bis zur technisch realisierbaren Grenze verstärkt und erreichen so noch deutlich größere Intensitäten.

Die größte jemals erzeugte Intensität mit einem Laser von 10^{21} W/cm² wurde erstmals erreicht, indem ein Titan-Saphir-Femtosekundenlaser mittels der CPA-Technik mit einer Verstärkerlinie des inzwischen stillgelegten Hochenergielasers Nova des LLNL¹ kombiniert wurde. Ein Puls dieses Hochleistungslasers hatte eine Energie von 600 J in 600 fs und erreichte damit eine Leistung von einem Petawatt.

¹Für eine Erklärung der Abkürzungen von Lasern und Instituten siehe Tabelle 2.1

Kapitel 7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Steigerung der Intensität im Fernfeld des PHELIX-Lasers unter Einsatz adaptiver Optik und durch Kompensation chromatischer Aberration untersucht. Im ersten Teil der Arbeit wurden die räumlichen Aberrationen des PHELIX-Hauptverstärkers untersucht. Im zweiten Teil der Arbeit wurde die chromatische Aberration im PHELIX-Laser und ihre Auswirkung auf einen Femtosekundenlaserpuls untersucht. Chromatische Aberration wurde bislang beim Entwurf von Hochleistungslasern mit einer Pulslänge von mehr als 100 fs vernachlässigt. Jedoch hat die chromatische Aberration einen deutlichen Einfluss auf die Intensität im Fokus des PHELIX-Lasers. Die wesentlichen Aspekte dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die thermooptischen Aberrationen des Hauptverstärkers im einfachen Durchgang wurden charakterisiert. Die Messungen mit fünf Scheibenverstärkern zeigen, dass die Wellenfront des Laserpulses im Hauptverstärker direkt durch das Pumpen astigmatisch verformt wird. Die Peak-to-Valley (PV)-Differenz dieser Schussaberrationen des Hauptverstärkers beträgt ohne Defokus ca. $0.5 \ \mu m$ und mit Defokus ca. 1 μ m. Nach einem Schuss müssen die Verstärker abkühlen. Aberrationen die während der Abkühlung auftreten werden Langzeitaberrationen genannt. Kurz nach einem Schuss verursacht der Hauptverstärker eine Langzeitaberration mit einer PV-Differenz von 2 μ m, die innerhalb von drei Stunden auf den Ausgangszustand relaxiert. Die Langzeitaberrationen limitieren die Repetitionsrate des Hauptverstärkers auf einen Schuss in drei Stunden. In einem vorläufigen Versuchsaufbau, bei dem zwei der insgesamt fünf Scheibenverstärker zur Verfügung standen, wurden die Langzeitaberrationen mit einem bimorphen Spiegel kompensiert. In diesem Experiment konnte gezeigt werden, dass der Regelkreis die Langzeitaberrationen mit dem bimorphen Spiegel nach 79 Minuten ausgleichen kann. Die Repetitionsrate des PHELIX-Lasers wurde somit um den Faktor 2,3 gesteigert.

Die Einstellung der Spiegeloberfläche des bimorphen Spiegels erfolgt durch direkte Berechnung aus der gemessenen Wellenfront. Zur direkten Berechnung der Spiegeloberflächendeformation aus den Messdaten einer Wellenfrontmessung wurde ein Algorithmus vorgestellt, der auf der Singulärwertzerlegung der Spiegeleinflussmatrix beruht. Die berechneten Singulärwerte und -vektoren beschreiben einen Satz orthonormaler Spiegeloberflächenformen. Mithilfe dieser Spiegeloberflächenformen kann die Leistungsfähigkeit eines adaptiven Spiegels beurteilt werden. Es wurden exemplarisch ein Membranspiegel und der bimorphe Spiegel des PHELIX-Lasers charakterisiert. Der bimorphe Spiegel kann die Schuss- und Langzeitaberrationen kompensieren. Der Hub des Spiegels reicht allerdings nicht aus, um die statischen Aberrationen zu kompensieren.

Alternativ zur direkten Berechnung der Spiegeloberfläche aus der gemessenen Wellenfront wurde ein evolutionärer Suchalgorithmus entwickelt. Der Suchalgorithmus benötigt zum Auffinden der optimalen Spiegeloberfläche ein Maß für die Qualität des Lasers, z. B. das Strehl-Verhältnis des Laserstrahls. Dieses ist oft einfacher und zuverlässiger zu bestimmen als die Wellenfront. Der evolutionäre Suchalgorithmus wird im Labor für Photonik der FH Münster in zwei Projekten eingesetzt. Im ersten Projekt konnte die Strahlqualität eines MOPA-Lasers von der Beugungsmaßzahl 9 auf die Beugungsmaßzahl 3 verbessert werden. Das zweite Projekt hat das Ziel, einen Laserresonator mit adaptiver Optik aufzubauen.

Im PHELIX-Hochleistungslaser ist die chromatische Aberration bei einem Strahldurchmesser von 28 cm in den Linsen so groß, dass der Laserpuls in der Mitte signifikant verzögert wird. Die Pulszeit-Verzögerung zwischen der Mitte des Pulses und dem Rand beträgt 600 fs, die Pulsdauer des ungestörten Pulses beträgt 500 fs. Die Pulsfront ist somit stärker verkrümmt, als der Laserpuls "dick" ist. Um den Einfluss der Pulszeit-Verzögerung auf die erreichbare Intensität im Experiment vorherzusagen, wurde ein numerisches Modell entwickelt, mit dem die wellenoptische Propagation eines bandbreitenlimitierten Laserpulses mit Pulszeit-Verzögerung berechnet werden kann. Für den PHELIX-Laser wurde gezeigt, dass die Intensität eines Laserpulses durch chromatische Aberration auf 60% der Intensität eines idealen Laserpulses abfällt. Der negative Einfluss der chromatischen Aberration wird jedoch abgeschwächt, wenn der Laser zusätzlich räumliche Aberrationen hat. Erst wenn die räumlichen Aberrationen mit adaptiver Optik ausgeglichen werden, führt die Korrektur der Pulszeit-Verzögerung zu einer weiteren quantitativen Steigerung der Intensität um den Faktor 1,6 in der Brennebene des PHELIX-Lasers. Es wurden zwei Vorschläge erarbeitet, mit der die Pulszeit-Verzögerung bei kleinem Strahldurchmesser vorkompensiert werden kann. Zur Vermessung der Pulszeit-Verzögerung wurde ein neuartiger Autokorrelator, der Shifted-Field-Autokorrelator, entwickelt. Der Shifted-Field-Autokorrelator ist ein selbst-referenzierender Sensor, mit dem die Pulszeit-Verzögerung in der Verstärkerkette mit einem gechirpten oder ungechirpten Femtosekundenlaser vermessen werden kann.