

GROSSGERÄTE

# Licht für schwere Ionen

Der Hochleistungslaser PHELIX erlaubt es, hochenergetische Schwerionenstrahlen mit ultra-intensiven Laserpulsen zu kombinieren.

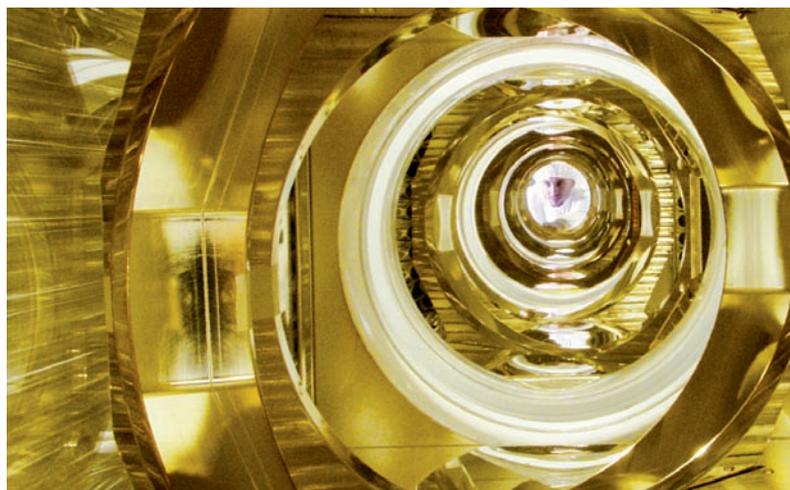
Vincent Bagnoud, Stefan Borneis, Thomas Kühl und Klaus Witte

Seit zwei Jahren steht am GSI Helmholtzzentrum in Darmstadt die stärkste Laseranlage Deutschlands. An der Grenze des technisch Machbaren erzeugt PHELIX Pulse mit einer Energie von bis zu 1000 Joule bzw. einer Leistung von fast 500 Terawatt. Damit und in Kombination mit Schwerionenstrahlen lassen sich extreme Materiezustände erzeugen und untersuchen, wie sie in Sternen oder im Innern von Gasplaneten vorkommen.

**W**eltweit existieren nur einige wenige Petawatt-Laser, die mit beeindruckenden Rekorden aufwarten: In ihrem Fokus mit einem Durchmesser von typischerweise 10  $\mu\text{m}$  beträgt die elektrische Feldstärke mehr als  $10^{14}$  V/m. Das liegt um viele Größenordnungen über der Feldstärke, die das Elektron im Wasserstoffatom bindet, oder sonst technisch realisierbaren Feldstärken – Teilchenbeschleuniger erreichen z. B. maximale Felder von rund  $10^7$  V/m. Die Intensität eines Petawatt-Lasers von  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>, die für wenige hundert Femtosekunden erreicht wird, entspricht der Intensität des gesamten auf die Erde einfallenden Sonnenlichts, fokussiert auf eine Bleistiftspitze. Trifft ein solcher Laserstrahl auf Materie, so ionisieren die hohen elektrischen Felder die Atome, erzeugen also ein Plasma und beschleunigen die freigesetzten Elektronen auf relativistische Geschwindigkeiten. Durch die entsprechend hohen Stromstärken entstehen die höchsten je im Labor erzeugten magnetischen Felder mit Feldstärken von über 1000 Tesla. Die Plasmatemperatur kann viele Millionen Grad betragen, der Plasmadruck einige Millionen Mal höher sein als der Atmosphärendruck. Damit lassen sich im Labor Plasmazustände erzeugen, wie sie in der Natur an Sternoberflächen vorkommen.

Während andere Laser höhere Spitzenwerte erreichen mögen, ist das Einzigartige des Petawatt-Hoch-Energie-Lasers für Schwerionenexperimente PHELIX die Kombination mit den Schwerionenbeschleunigern der GSI, die innovative Experimente der Atom-, Kern- und Plasmaphysik ermöglicht [1]. In den geplanten und zum Teil bereits angelaufenen Experimenten lassen sich mit dem Laser- oder dem Schwerionenstrahl extreme Materiezustände präparieren; anschließend dient der andere Strahl dazu, diese Zustände zu untersuchen („Diagnose“) (Abb. 1).

So lässt sich mit dem Laser ein heißes und dichtes Plasma erzeugen und anschließend die Wechselwir-



G. Otto, GSI

kung von energiereichen schweren Ionen mit dem Plasma untersuchen. Der gemessene Energieverlust der Ionen im Plasma und die Ladungsverteilung der Projektile liefern grundlegende Einblicke in die relevanten atomphysikalischen Prozesse. Dies ist z. B. wichtig für die durch Schwerionen induzierte Trägheitsfusion.

Ein weiterer Schwerpunkt des Forschungsinteresses bei der GSI liegt auf stark gekoppelten Plasmen bei hoher Dichte und Temperaturen von unter  $100 \text{ eV}^1$ , sog. warme, dichte Materiezustände (Warm Dense Matter). Dazu gehört z. B. metallischer atomarer Wasserstoff, der vermutlich den Jupiterkern ausmacht und dessen zentrale Eigenschaften wie kritische Punkte und Phasenübergänge unbekannt sind. Schwerionenpulse können solche Plasmen erzeugen, da sie tief in Materie eindringen, die Energie sehr homogen deponieren und daher ein relativ großes Volumen gleichmäßig heizen

Jeweils 20 Blitzlampen pumpen jeden der fünf Hauptverstärkerköpfe von PHELIX.

<sup>1)</sup> In der Plasmaphysik werden Temperaturen häufig in eV angegeben, gemäß der Beziehung  $E = k_B T$  entspricht 1 eV einer Temperatur von 11600 K.

## KOMPAKT

- Der Laser PHELIX kann Pulse höchster Energie bei einer Dauer von einigen Nanosekunden oder höchster Leistung bei einigen hundert Femtosekunden erzeugen.
- Dazu werden die schwachen Laserpulse eines Ytterbium-dotierten Faserlasers bzw. eines Titan:Saphir-Lasers in drei Stufen und mithilfe der „chirped pulse amplification“ um viele Größenordnungen verstärkt.
- Nach tausend dokumentierten „Schüssen“ des Systems ist es bereits gelungen, einen Röntgenlaser und harte Röntgenquellen zu realisieren, Protonenstrahlen zu beschleunigen und kombinierte Pump/Probe-Experimente mit dem UNILAC-Strahl durchzuführen.

Dr. Vincent Bagnoud, Dr. Stefan Borneis, Prof. Dr. Thomas Kühl und Prof. Dr. Klaus Witte, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt

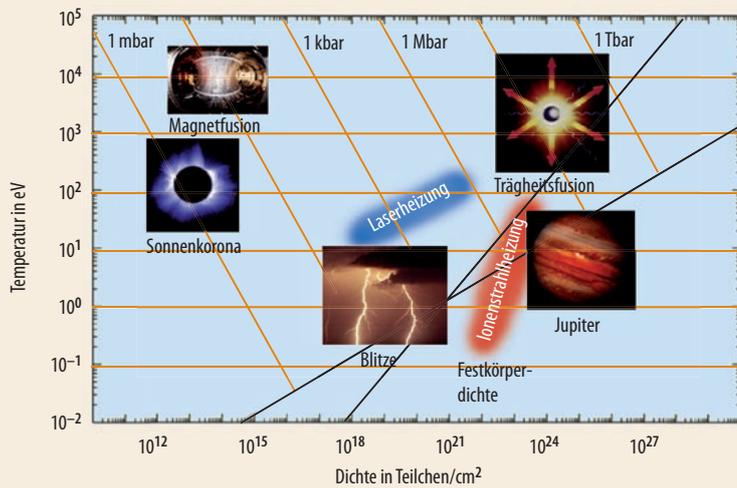


Abb. 1 Plasmen in der Natur oder der Fusionsforschung variieren stark in Druck und Temperatur. Mit der Laserheizung durch PHELIX (blau) bzw. den Schwerionenpulsen bei FAIR (rot) lassen sich unterschiedlichste Parameter erreichen.

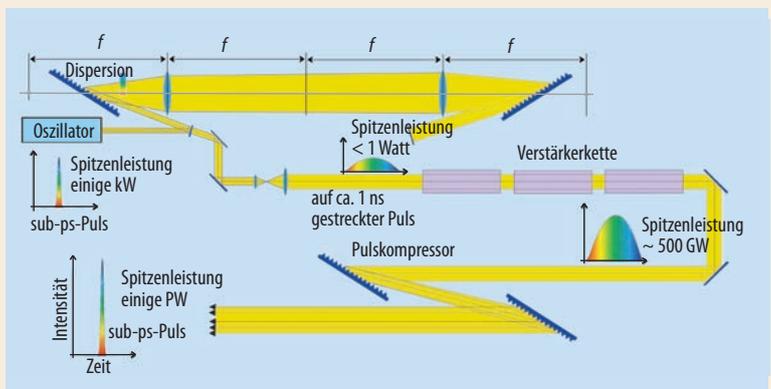
können. Damit ergänzen diese Plasmen entsprechende Experimente mit Hochleistungslasern oder Röntgen-Freie-Elektronen-Lasern (XFEL). PHELIX kann zu solchen Untersuchungen völlig neuartige Diagnosemethoden beisteuern, die auf lasergestützten Quellen für Röntgen- und Teilchenstrahlen basieren und deren Entwicklung einen großen Anteil am derzeitigen

Forschungsprogramm einnimmt. So lässt sich mithilfe der relativistischen Elektronen, die beim Beschuss eines Targets mit ultrakurzen Laserpulsen entstehen, schmalbandige Röntgenstrahlung mit einer Energie von einigen 10 keV erzeugen. Diese dringt in ein Plasma ein, wird daran elastisch gestreut (Thomson-Streuung) und erlaubt somit eine „elegante“ Diagnostik für Temperatur und Dichte des Plasmas.

Je nach Experiment unterscheiden sich die Anforderungen an Pulsdauer und -energie stark. So sind z. B. für die laserinduzierten Plasmen möglichst hohe Pulsenergien bei Pulsdauern von einigen Nanosekunden erforderlich. Die Erzeugung von Röntgenstrahlen zur Plasmadiagnose verlangt jedoch nach möglichst hohen elektrischen Feldern, die sich nur mit sub-ps-Pulsen erreichen lassen. Daher kann PHELIX entweder ns-Pulse mit Pulsenergien von ca. 1000 Joule erzeugen oder sub-ps-Pulse mit einer Spitzenleistung von derzeit fast 500 TW – zum Vergleich: Die Gesamtleistung aller elektrischen Kraftwerke weltweit beträgt etwa  $2 \text{ TW} = 2 \cdot 10^{12} \text{ W}$ . PHELIX ist damit gegenwärtig die stärkste Laseranlage Deutschlands. Mehr als 30 Wissenschaftler aus 12 in- und ausländischen Forschungseinrichtungen unterstützten den Bau von PHELIX, den das GSI-Direktorium Ende 1998 genehmigte. Der eigentliche Aufbau begann mit der Anlieferung der technisch besonders anspruchsvollen Hauptverstärker-

CHIRPED PULSE AMPLIFICATION

Zum Erreichen von Leistungen im Petawatt-Bereich verwendet PHELIX das Verfahren der Chirped Pulse Amplification (CPA) [3]. Hierbei wird der im Oszillator erzeugte, sehr kurze Puls zeitlich gestreckt und erst nach der Verstärkung wieder zu einem kurzen Puls komprimiert. Um tatsächlich die ursprüngliche Pulsdauer zu erreichen, müssen diese beiden Prozesse völlig identisch, aber mit umgekehrtem Vorzeichen ablaufen. Dies wird durch das breite Wellenlängenspektrum der kurzen Pulse ermöglicht. Dispersive Komponenten wie Prismen oder Gitter trennen die verschiedenen spektralen Komponenten dieses Lichts räumlich auf. Ein einfacher Aufbau mit zwei nacheinander angeordneten, parallelen Gittern, wie er bei PHELIX im Kompressor verwendet wird, hebt diese Trennung nach dem Durchgang wieder auf. Die Komponenten mit längerer Wellenlänge legen dabei insgesamt einen weiteren Weg zurück als die mit kürzerer Wellenlänge. Dadurch verlängert sich der Puls, wobei die Komponenten mit kürzerer Wellenlänge denen mit längerer Wellenlänge vorausseilen. Dies wird als „Down-Chirp“ (Chirp = Zwitschern eines Vogelrufs, down = mit fallender Stimmhöhe) bezeichnet. Die zeitliche Verzögerung zwischen den spektralen Anteilen ist dabei proportio-



nal zum Abstand der beiden Gitter. Für einen „Up-Chirp“ müsste der Abstand der Gitter „negativ“ sein, was sich als geometrischer Trick mit einem eingeschobenen optischen Teleskop bei antiparalleler Gitterstellung erreichen lässt. Ist die Entfernung der Gitter von der jeweilig benachbarten Linse kleiner als die Brennweite der Linsen, ergibt sich durch die Abbildungseigenschaft ein negatives Vorzeichen. Dies wird hier im Pulsstreckter – also vor der Verstärkerkette – angewendet, um für die hohe Leistungsdichte nach den Verstärkern die einfachere Anordnung mit negativem Chirp verwenden zu können.

Bei PHELIX wird der Lichtpuls zunächst mit „Up-Chirp“ von 150 fs auf 1,5 ns (räumlich von 45  $\mu\text{m}$  auf über

0,5 m Länge) gestreckt. Dieser ns-Puls mit wenigen nJ Pulsenergie und einer Spitzenleistung unter 1 W wird anschließend um etwa elf Größenordnungen auf etwa 500 J verstärkt (Spitzenleistung ca. 500 GW), bevor ein paralleles Gitterpaar im Vakuum ihn auf typisch 500 fs recomprimiert. Dass die ursprüngliche Pulsdauer nicht wieder erreicht wird, liegt an der unvermeidbaren spektralen Einengung in den Vor- und Hauptverstärkern. Der Kompressor am Ende des Hauptverstärkers ist ein opto-mechanisches Instrument höchster Präzision. Die Anforderungen an die Zerstörschwelle seiner optischen Komponenten liegen an der Grenze des Machbaren.

komponenten im Frühjahr 2003. Erste Experimente mit der vollständigen Verstärkeranordnung fanden Ende 2006 statt. Seit Dezember 2007 steht PHELIX einem breiten Benutzerkreis für Experimente zur Verfügung.

### Das Lasersystem

Die PHELIX-Laseranlage befindet sich in einem 400 Quadratmeter großen, zweigeschossigen Gebäude. Um die notwendige Stabilität und Sauberkeit zu garantieren, steht der Laser in einem auf  $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$  temperaturstabilisierten Reinraum der Klasse 10 000. Staubpartikel würden in dem intensiven Laserlicht verglühen, wie erstarrende Lavatröpfchen auf Linsen oder anderen Komponenten haften bleiben und diese schädigen. Das Fundament, ein Betonmonolith von einem Meter Stärke, dient als „optischer Tisch“.

PHELIX besteht aus drei Stufen, die die Pulsenergie sukzessive erhöhen (Abb. 2). Zunächst erzeugen zwei separate Laseraufbauten Pulse einer Dauer von einigen Nanosekunden bzw. sub-Pikosekunden. Diese sog. Frontends enthalten jeweils einen Laser im üblichen Verständnis (Master-Oszillator), der die kohärente Strahlung erzeugt, ihre spektralen Eigenschaften vorgibt und die Pulse auf ca. 20 mJ verstärkt. Der Vorverstärker hebt die Energie der Pulse anschließend auf einige Joule an, bevor im Hauptverstärker die Endenergie erreicht wird. Um die Hochleistungsoptiken nicht zu zerstören, steigt der Strahldurchmesser von 4 cm im Vorverstärker auf 30 cm im Hauptverstärker an.

Grundsätzlich funktionieren Vor- und Hauptverstärker nach dem gleichen Laserprinzip wie der Master-Oszillator. Allerdings muss sichergestellt sein, dass sie nicht selbst spontan anschwingen, sondern stattdessen nur die vom Master-Oszillator erzeugten Laserpulse durch stimulierte Emission verstärken. Die zentrale Wellenlänge beträgt 1053 nm, da das System auf die Nd:Glas-Komponenten des Hauptverstärkers abgestimmt sein muss. Eine ausführliche Beschreibung von PHELIX ist in [2] zu finden.

#### Am Anfang steht der Laserpuls, ...

Wie bereits erwähnt, erfordern verschiedene wissenschaftliche Fragen eine völlig unterschiedliche Form und Dauer des Laserpulses. Um ein mit Schwerionen erzeugtes Plasma zu untersuchen, sind meist die einzigartigen neuen Möglichkeiten wichtig, die sub-Pikosekundenpulse mit einer Leistung im Petawatt-Bereich eröffnen. Im Gegensatz dazu erlauben es Pulse im Bereich von Nanosekunden, eine größere Targetfläche oder ein größeres Volumen gleichmäßig aufzuheizen. Dafür muss der Puls in der Regel jedoch eine sehr spezielle Form aufweisen: Typisch ist ein mehrere Nanosekunden dauernder Vorpuls mit moderater Intensität zum „Vorheizen“ vor dem kürzeren Hauptpuls hoher Intensität.

■ Beim *ns-Frontend* dient ein Ytterbium-dotierter Faserlaser als Master-Oszillator (Abb. 3). Ein Faser-

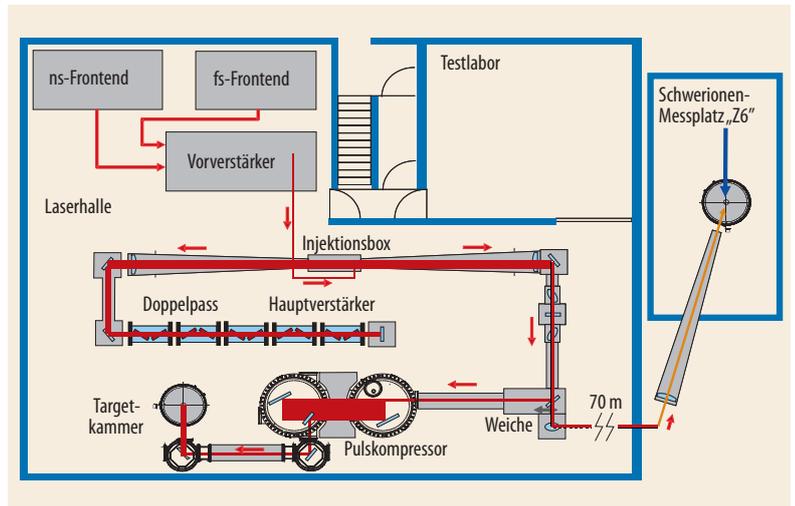


Abb. 2 Die wichtigsten Komponenten des PHELIX-Lasersystems sind die beiden Frontends sowie Vor- und Hauptverstärker.

modulator, den ein digitaler Pulsformgenerator ansteuert, formt den Puls. Ein regenerativer Verstärker erhöht anschließend die Energie pro Puls von einigen Nanojoule auf 10 bis 50 mJ. Als Lasermedium dient im Verstärker – wie im folgenden Vor- und Hauptverstärker – mit Neodym dotiertes Glas.

■ Im alternativ verwendeten *fs-Frontend* kommt als Master-Oszillator ein kommerzieller Ti:Saphir-Laser zum Einsatz, der Pulse mit einer Dauer von ca. 150 fs erzeugt. Das CPA-Verfahren (chirped pulse amplification, siehe Infokasten) dient dazu, diese Pulse auf eine Leistung im PW-Bereich verstärken zu können, ohne dass sie das optische System zerstören und ohne dass die Strahlqualität unter nichtlinearen Effekten leidet [3]. Dazu wird der kurze Puls unter Nutzung der hohen spektralen Dispersion von optischen Gittern zunächst auf ca. eine Nanosekunde gestreckt, entsprechend sinkt die Leistung um sechs Größenordnungen (Abb. 4). In der räumlichen Dimension verlängert sich der Puls von ca. 50  $\mu\text{m}$  auf ca. 0,5 m. Anschließend erhöhen zwei Ti:Saphir-Verstärker, die jeweils mehrfach passiert werden, die Pulsenergie um sieben Größenordnungen (von einigen nJ auf 20 mJ). Die große Bandbreite der Ti:Saphir-Verstärker ist wichtig, um die Einengung der Bandbreite des Lasers gering zu halten.

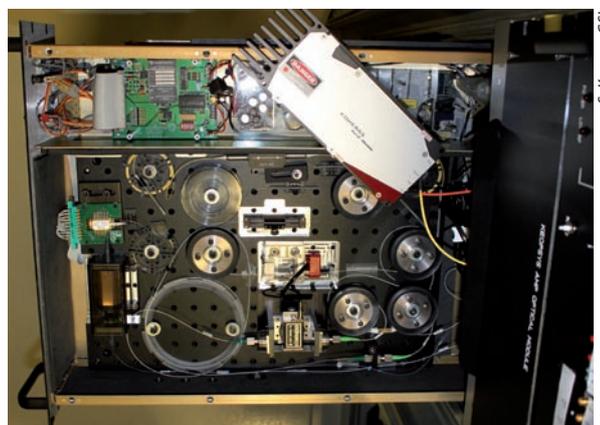


Abb. 3 Die einige Nanosekunden langen Laserpulse entstehen in einem Ytterbium-dotierten Faserlaser.

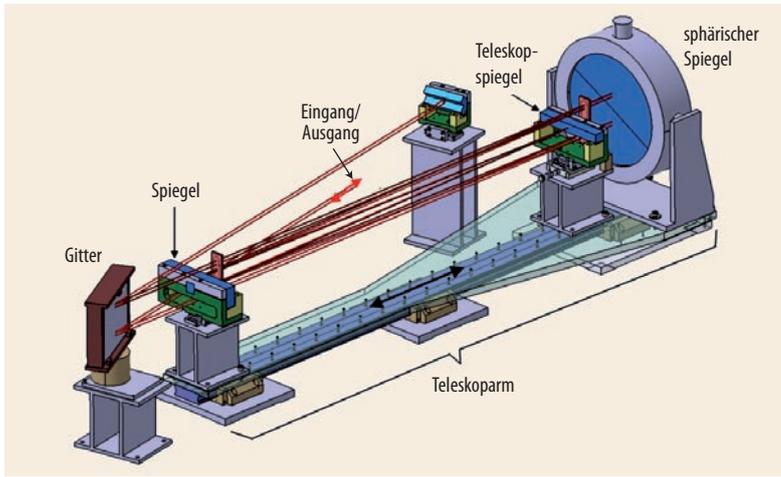


Abb. 4 Der Pulsstreckter erzeugt mithilfe eines Gitters mit 1740 Linien pro Millimeter einen Weglängenunterschied von ca. 0,5 Meter (entsprechend einem Zeit-

unterschied von 1,5 ns) für die verschiedenen Wellenlängenanteile des vom Oszillator gelieferten Kurzpulses.

Die beiden Ti:Saphir-Verstärker sind eine Weiterentwicklung des Frontends des weltweit ersten Petawatt-Lasers, den M. D. Perry und sein Team 1996 am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien fertig gestellt haben [4]. PHELIX erreicht einen wesentlich verbesserten Pulscontrast, unerwünschte Vorpulse sind auf wenige Millionstel Bruchteile reduziert. Außerdem wird das Spektrum durch optische Filter gezielt geformt, um den letztlich unvermeidlichen Verlust an Bandbreite zu unterdrücken. Der Pulsstreckter erlaubt es, das Streckungsverhältnis in einem weiten Bereich zu ändern, sodass sich die Pulsdauer am Target mit geringem Justageaufwand verändern lässt.

**... der sukzessive verstärkt wird**

Im Vorverstärker durchlaufen die Laserpulse drei blitzlampengepumpte Nd:Glas-Verstärker, in denen die Energie von ca. 30 mJ auf 5 bis 10 J ansteigt. Mit der Energie wachsen auch die Abmessungen: Die Glasstäbe der Verstärker haben einen Durchmesser von 19 bzw. 45 mm (Abb. 5). Ein adaptiver Spiegel dient im Vorverstärker als Stellglied eines Regelkreises, der durch Messung der Wellenfront gesteuert wird. Hiermit lassen sich Verzerrungen korrigieren, wie sie ins-



Abb. 5 Damit die Luft nicht ionisiert wird, verläuft im Vorverstärker ein großer Teil des Lichtwegs in Vakuumrohren. In der Bildmitte befindet sich der Verstärker mit 45 mm Durchmesser.

besondere durch die Erwärmung der Verstärkererläser beim Schuss auftreten.

Das Kernstück von PHELIX ist der Hauptverstärker. Er besteht aus fünf blitzlampengepumpten Verstärkerkomponenten, die von den für die Fusionsforschung erbauten Laseranlagen Nova (LLNL, USA) und Phebus (CEA, Frankreich) stammen (Abb. auf S. 35). Jedes Verstärkermodul besitzt 20 Blitzlampen, die insgesamt 300 kJ elektrischer Energie benötigen. Als Verstärkermedium dienen pro Kopf zwei mit Neodym dotierte, 5 cm dicke Glasplatten.

Eine Sammellinse und ein Injektionsspiegel in der Mitte eines 15 m langen 1:1-Teleskops koppeln die Ausgangspulse des Vorverstärkers in den Hauptverstärker ein. Die Sammellinse zusammen mit der Austrittslinse des Teleskops weiten den Vorverstärkerstrahl auf den Durchmesser der Hauptverstärker von 31,5 cm auf. Trotz dieses großen Durchmessers sowie der durch das CPA-Verfahren um sechs Größenordnungen verringerten Leistung operiert der Laser knapp unterhalb der Zerstörschwelle der optischen Komponenten. Nach dem ersten Durchgang durch die Verstärkergruppe wird der Strahl mit einem leichten Winkel für einen zweiten Durchgang zurückreflektiert. Aufgrund des Winkelversatzes lassen sich injizierter und verstärkter Strahl rein geometrisch voneinander trennen.

Der Pulskompressor transformiert die gestreckten und auf mehrere hundert Joule verstärkten Pulse des fs-Frontends auf eine Dauer von wenigen 100 fs zurück (Abb. 6). Er besteht aus zwei holografisch hergestellten Gittern mit dielektrischer Vielschichtverspiegelung sowie einer Vorrichtung zur Diagnose der Pulsparameter. Bisher ließen sich Pulsdauern von knapp über 350 fs erreichen. Die Pulsenergien sind zurzeit auf 150 Joule begrenzt, darüber ist eine Zerstörung der Reflektionsbeschichtung der Gitter zu befürchten. Größere Gitter, die ca. 500 J Energie erlauben sollten, sind in Vorbereitung.

Angesichts der enormen Laserleistung darf sich während des Betriebs keine Person in der PHELIX-Halle aufhalten. Daher ist PHELIX vollständig ferngesteuert. Circa 10 000 Prozessvariable müssen überwacht bzw. gesetzt werden, um PHELIX sicher zu betreiben. Das Kontrollsystem ist objektorientiert,



Abb. 6 Im Vordergrund steht die aus zwei zylindrischen Rezipienten bestehende Kompressorkammer. Im Hintergrund ist die Experimentierkammer zu erkennen.

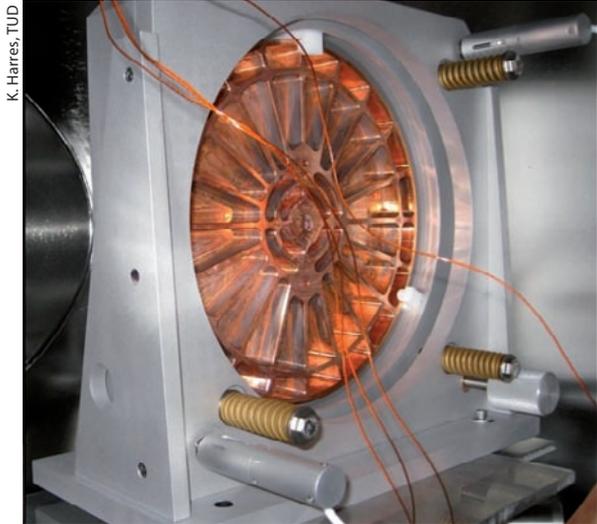


Abb. 7 Rückansicht der Kupferparabel, die den Laserpuls fokussiert. Die wabenförmige Struktur reduziert das Gewicht.

ereignisgesteuert und läuft verteilt auf 20 Rechnern [5]. Ein komplexer Hardwareschaltkreis überwacht ständig die Bedingungen, die für die verschiedenen Freigabezustände des Lasers erforderlich sind. Eine Reihe von rechnergesteuerten Gate- und Delaygeneratoren dient dazu, die Signale für interne Abläufe – vor allem die präzise Ansteuerung von optischen Schaltern (Pockels-Zellen) – bereitzustellen und zu verteilen. Der Zeitablauf lässt sich mit den GSI-Beschleunigerpulsen mit einer Genauigkeit von besser als einer Nanosekunde synchronisieren, wenn PHELIX als Lichtquelle in kombinierten Laser-/Ionen-Experimenten eingesetzt wird.

### Das Experimentierprogramm

Im Dezember 2007 begannen erste Experimente mit dem kompletten Lasersystem inklusive Pulskompressor. Da herkömmliche Fokussierlinsen durch nichtlineare Effekte die Strahlparameter deutlich verschlechtern würden, dient eine diamantgefräste Kupferparabel, die den Strahl unter 90° reflektiert, zur Fokussierung (Abb. 7). Bei diesem Strahldurchmesser ist das ein technologisches Novum. Die Oberflächenrauigkeit liegt unter 5 nm, die Abweichung von der Parabel über die 30 cm Durchmesser beträgt weniger als 0,5 µm. Das Kupfer reflektiert das Laserlicht zu ca. 98 %. Bei einer Pulsenergie von bis zu 150 J und einer Brennweite von 1,5 Metern entsteht im Fokus eine Leistungsdichte von  $10^{20}$  Watt/cm<sup>2</sup>.

Diese Parameter wurden bereits in einer Vielzahl von Experimenten ausgenutzt. Als wichtige Lichtquelle, z. B. für die Diagnostik von Plasmazuständen, wurde ein Röntgenlaser mit 180 eV Photonenenergie (6,8 nm Wellenlänge) realisiert [6]. Hierzu musste PHELIX innerhalb von einigen 100 ps zwei Pulse liefern, um zunächst ein Plasma zu erzeugen und dann die Inversion der Röntgenübergänge zu erzielen. Ein wichtiges Anwendungsfeld der ultra-intensiven Laserpulse ist auch die Teilchenbeschleunigung. In diesem Zusammenhang gelang es, Protonenstrahlen mit

30 MeV Energie zu erzeugen und in Magnetfeldern zu bündeln [7]. Die hohen Feldstärken im Laserfokus beschleunigen Elektronen innerhalb der vom Laser bestrahlten Folien auf relativistische Energien von mehreren hundert MeV. Als direkte Anwendung wurden intensive harte Röntgenquellen realisiert, die sich als Lichtquelle für Thomson-Streuung eignen [8]. Außerdem wurde durch spektrale und räumliche Analyse der erzeugten Bremsstrahlung der Transport der lasergetriebenen relativistischen Elektronen innerhalb des Targets untersucht.

Für kombinierte Experimente mit Schwerionenstrahlen wird der Laserstrahl über eine Distanz von etwa 60 Metern zu dem Experimentierplatz Z6 transportiert (Abb. 8). PHELIX liefert an diesem Messplatz ns-Pulse mit einer Pulsenergie von bis zu einem Kilojoule. Die Pulse bestrahlen eine dünne Kohlenstofffolie, sodass ein dichtes (nahezu Festkörperdichte) und heißes (2 Mio. °C) Plasma entsteht. Im Frühjahr 2008 gelang es erstmals, den Schwerionenstrahl mit einer Teilchenenergie von 4 MeV pro atomarer Masseinheit auf das Plasma-Target zu richten. Der gemessene Energieverlust und die Ladungsverteilung der Projektile erlauben es, den Ablauf der Wechselwirkung genau zu analysieren [9, 10].

Nach jedem Laserschuss müssen die Komponenten des Hauptverstärkers abkühlen, bevor sie einen weiteren Laserpuls unbeschadet überstehen und ihn unverzerrt transmittieren. Zuzüglich einer Sicherheitsreserve ist daher eine Pause von eineinhalb bis zwei Stunden zwischen zwei Schüssen nötig, sodass am Tag maximal zehn Schüsse möglich sind. Im November 2009 wurde der tausendste dokumentierte Schuss gefeuert.

In wenigen Jahren werden die neuen Beschleuniger an der Schwerionen- und Antiprotonen-Anlage FAIR relativistische Schwerionenstrahlen höchster Intensität mit einer kinetischen Energie von bis zu 10 Kilojoule erzeugen. Damit lassen sich im Labor Bedingungen realisieren, wie sie im Erdinneren oder in gigantischen Gasplaneten wie Jupiter herrschen. Für diese Untersuchungen sind die neuartigen lasergestützten Diagnostiken unabdingbar. Auch die Physik ultrahoher Felder, an der GSI sehr intensiv an schweren Ionen untersucht, wird künftig für Experimente mit PHELIX eine wich-

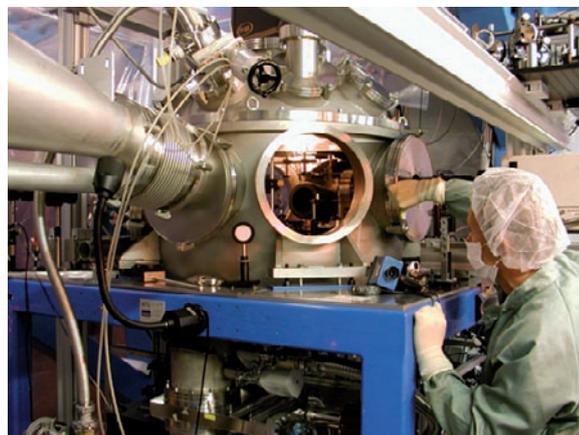


Abb. 8 In dieser Targetkammer treffen Laser- und Schwerionenstrahl aufeinander.

2) [www.gsi.de/fair bzw. xfel.desy.de](http://www.gsi.de/fair bzw. xfel.desy.de)

3) [www.hi-jena.de/](http://www.hi-jena.de/)

tige Rolle spielen. Der Laser kann auch hierbei sowohl hohe Felder direkt erzeugen als auch zur Diagnostik mit neuartigen Röntgenquellen beitragen.

Entscheidende Grundlage für solche neuen Entwicklungen, insbesondere in Hinblick auf die zukünftigen internationalen Forschungsanlagen FAIR und XFEL<sup>2)</sup>, liefert das kürzlich gegründete Helmholtz-Institut Jena an der Friedrich-Schiller-Universität Jena<sup>3)</sup>, in dem die kumulierte Expertise in den Bereichen Teilchenbeschleuniger, Hochleistungslaser und modernster Röntgentechnologien zusammentrifft und in das auch Mitarbeiter von PHELIX eingebunden sind.

Das PHELIX-Projekt ist außerdem eng mit dem europäischen und außereuropäischen Forschungsumfeld vernetzt. Die vom amerikanischen DOE (Department of Energy) und dem französischen CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) zur Verfügung gestellten Hauptverstärkerkomponenten der Superlaser Nova (Livermore) und Phebus (Limeil) waren eine wesentliche Starthilfe für das Projekt. Zusammen mit dem Lawrence Livermore und dem Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien wurde ein wissenschaftliches Forschungsprogramm aufgestellt, das zu einer deutsch-amerikanischen Kooperationsvereinbarung zwischen dem BMBF und dem DOE führte. Ähnlich enge Beziehungen bestehen zu den französischen Laserlaboratorien LULI in Palaiseau sowie CELIA und CESTA bei Bordeaux. Zusammen mit den wichtigsten Laserlaboratorien Europas ist PHELIX Partner in der Integrierten Infrastrukturinitiative „Laserlab Europe“. Wissenschaftler können einmal jährlich Strahlzeit für Experimente mit PHELIX beantragen. Nutzern aus dem europäischen Ausland steht das „Transnational

Access Programme“ der Integrierten Infrastrukturinitiative „Laserlab Europe“ offen.

\*

Zum Erfolg von PHELIX haben viele in- und ausländische Experten beigetragen. Für die GSI sind hier insbesondere die PHELIX-Mitarbeiter zu nennen: B. Aurand, V. Bagnoud, S. Borneis, B. Becker-de Mos, A. Blazevic, H. Brand, C. Bruske, B. Ecker, U. Eisenbarth, E. Gaul, J. Fils, S. Götte, C. Haefner, T. Hahn, H. M. Heuck, D. Hochhaus, G. Klappich, H.-J. Kluge, F. Knobloch, M. Kreutz, T. Kühl, S. Kunzer, R. Lotz, P. Neumayer, T. Merz-Mantwill, E. Onkels, D. Reemts, I. Reinhard, Th. Stöhlker, A. Tauschwitz, R. Thiel, C. Will, K. Witte, B. Zielbauer und D. Zimmer.

Zudem gilt besonderer Dank D. Hoffmann und M. Roth und ihren Arbeitsgruppen an der TU-Darmstadt.

Für wesentliche Beiträge zum Gelingen des PHELIX-Projekts bedanken wir uns zudem bei J. Caird und E. Moses (LLNL Livermore, USA), E. M. Campbell (Logos Techn., Arlington, USA), M. D. Perry (GA San Diego, USA), G. Logan (LBL Berkeley, USA), A. Bettinger, M. Decroisette, F. Kovacs und A. Roussel (CEA, Frankreich), D. Habs (LMU München), F. Krausz (MPQ München), W. Sandner (MBI Berlin) und R. Sauerbrey (FZD Rossendorf).

### Literatur

- [1] R. Bock et al., *Inertial Fusion Sciences and Applications* **99**, C. Labaune, W. J. Hogan und K. A. Tanaka (Hrsg.), Elsevier Publishing, Paris, Amsterdam, Lausanne, New York, Oxford, Shannon, Tokyo (2000) S. 703
- [2] V. Bagnoud et al., *Apl. Phys. B*, DOI 10.1007/S00340-009-3855-7
- [3] D. Strickland und G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985)
- [4] M. D. Perry et al., *Opt. Lett.* **24**, 160 (1999)
- [5] D. Beck et al., *Nucl. Instrum. and Meth.* **527**, 3 (2004)
- [6] D. Zimmer et al., *Opt. Exp.* **16**, 10398, 2008; D. Ros et al., eingereicht bei *Laser & Particle Beams*
- [7] I. Albers et al., GSI report 2009-1, S. 319
- [8] P. Neumayer et al., to be published
- [9] A. Blazevic et al., GSI report 2009-1, S. 315
- [10] A. Frank et al., eingereicht bei *Phys. Rev. E*

### DIE AUTOREN

**Vincent Bagnoud** studierte an der Ecole Supérieure d'Optique in Orsay. 1999 promovierte er an der Universität Bordeaux mit dem Aufbau eines Terawatt-Lasers. Danach trug er am Laboratory for Laser Energetics in Rochester zur Entwicklung der Kurzpuls-Laser für das OMEGA EP-Projekt bei. 2005 wechselte er zum PHELIX-Projekt, wo er 2008 die Verantwortung für den technischen Aufbau und Betrieb des Systems übernahm. Vincent Bagnoud ist auch Mitglied des technischen Komitees für den Apollon-10P Pump-Laser im französischen ILE-Programm.



**Stefan Borneis** promovierte 1994 in Heidelberg. Anschließend arbeitete er als Projektleiter in der F&E und als Produktmanager für Industrie-Excimer-Laser bei Lambda Physik in Göttingen. 1998 wechselte er zur GSI, um in Kooperation mit LLNL und Coherent das fs-Front-End von PHELIX aufzubauen. Von 2001 bis 2003 hat er als Mitgründer der Photonics Division von General Atomics in San Diego, USA, die Abteilung „Laser Products“ geleitet. 2003 übernahm er bis zur Aufnahme des Routinebetriebs von PHELIX 2008 die Leitung des PHELIX-Laserprogramms. Seither ist er mit dem Aufbau einer Frequenzverdopplung für PHELIX betraut.



**Thomas Kühl** (FV Plasma- und Kurzzeitphysik) promovierte 1978 mit einem Projekt zur Laserspektroskopie radioaktiver Isotope am CERN. Nach einer Postdoc-Zeit am MIT baute er am GSI-Helmholtzzentrum eine Arbeitsgruppe für Laserspektroskopie auf. Im Zuge der Vorbereitung und Planung des PHELIX-Projekts, dessen wissenschaftliches Programm er koordiniert, arbeitete er 1997/98 am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien am Nova Petawatt Laser. Seit 2004 ist Thomas Kühl apl. Professor der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz und seit 2008 Mitglied im Int. Committee on Ultra-High Intensity Lasers (ICUIL).



**Klaus Witte** (FV Quantenoptik und Photonik sowie Plasmaphysik) promovierte 1968 an der TU Darmstadt und war anschließend Postdoc am MIT/Boston. 1971 wechselte er zum MPI für Plasmaphysik in Garching, wo er 1975 mit der Entwicklung des atomaren Jodlasers ASTERIX begann. Seit 1990 ist er apl. Professor an der TU Darmstadt. Von 1993 bis 2005 leitete er der Abteilung Laser- und Plasmaphysik im MPI für Quantenoptik in Garching. Danach wechselte er zur GSI, wo er bis 2008 die Leitung der Abteilung PHELIX übernahm. Seit 2009 ist er mit dem Projekt „Centre for Advanced Laser Applications – CALA“ der LMU München befasst.

