

OSWALD WILLI

Kürzeste Lichtpulse, höchste Felder, extreme Energiedichten: Moderne Laser-Plasmaphysik

Einleitung

Bahnbrechende Entwicklungen auf dem Gebiet der Lasertechnologien in den letzten Jahren erlauben heute, Laserpulse bis zu einer Leistung von mehreren Petawatt (Billiarden Watt) mit Subpikosekundendauer zu erzeugen. Diese ultrakurzen, superintensiven Laserpulse eröffnen damit einzigartige Möglichkeiten zur Untersuchung fundamentaler physikalischer Prozesse, was faszinierende Anwendungen in einem völlig neuen Parametergebiet ermöglicht. Fokussiert man beispielsweise einen Petawatt-Laserpuls (10^{21} W/cm²) mit 500 Joule (J) und 500 Femtosekunden (fs) Dauer auf eine Fläche mit 5 μ m Durchmesser, beträgt die Energiedichte im Fokus $2 \cdot 10^{11}$ J/cm³. Zum Vergleich: Die Energiedichte im Inneren der Sonne beträgt 10^{10} J/cm³. Möglich wird dies durch Laserpulse, die nur noch wenige fs dauern. Zum Vergleich: In 100 fs legt ein Lichtstrahl eine Strecke zurück, die der Dicke eines Haares entspricht. Weltweit erreichen heutzutage mehrere Lasersysteme routinemäßig Intensitäten von $5 \cdot 10^{20}$ W/cm². Der Druck, den das Licht dabei auf die Materie ausübt, liegt fokussiert bei $\sim 1,5 \cdot 10^{11}$ bar. Der Lichtdruck des Sonnenlichts auf der Erde ist mit $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ bar mehr als 20 Größenordnungen kleiner als der Laserdruck. Das elektrische Feld übersteigt mit $\sim 2 \cdot 10^{11}$ V/cm selbst die atomare Feldstärke im Wasserstoffatom von „nur“ $5,1 \cdot 10^9$ V/cm um zwei Größenordnungen. Numerische Simulationen sagen voraus, dass unter diesen Bedingungen extreme Magnetfelder entstehen, die eine Milliarde Mal größer sind als das Magnetfeld der Erde. Sobald der Laserpuls auf das Target auftritt, wird die Materie sofort ionisiert und ein Plasma erzeugt. Die unter diesen Bedingungen ablaufenden physikalischen Prozesse sind stark relativistisch. Die Elektronen bewegen sich im Lichtfeld fast mit Lichtgeschwindigkeit, wodurch die Teilchen schwerer werden. Diese Disposition verändert die Eigenschaften der Teilchen, und so kann man relativistische Effekte im Labor beobachten. Die Laserwechselwirkung mit Plasmen liefert daher ideale Bedingungen für Studien der nichtlinearen Dynamik im relativistischen Bereich, der so genannten *relativistischen Laser-Plasmaphysik*. Dieser neue Bereich erlaubt, exotische Materiezustände zu untersuchen, die Entwicklung einer *bubble accelerator* genannten Beschleunigertechnologie voranzutreiben und die Energieerzeugung durch lasergetriebene Fusion zu entwickeln. Dieses neue Gebiet wurde jüngst von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen eines Transregio-Sonderforschungsbereichs (SFB TR18) gefördert, bei dem die Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf als Sprecherhochschule fungiert.

Aber auch ohne gleich allerhöchste Intensitäten zur Verfügung zu haben, brachten Experimente mit ultrakurzen Laserpulsen eine Vielzahl unerwarteter Effekte zutage, die mittel- bis langfristig auch direkten wirtschaftlichen und medizinischen Nutzen versprechen. So wurde kürzlich demonstriert, dass mit ultrakurzen Laserpulsen Attosekunden-

Röntgenpulse (trillionster Teil einer Sekunde) erzeugt werden können. Durch sie wird erstmals ein neues physikalisches Regime zugänglich, wie zum Beispiel die Beobachtung ultraschneller elektronischer Vorgänge in Atomen.

Laserentwicklung

Seit der Erfindung des Lasers 1960 haben die zur Verfügung stehenden Intensitäten exponentiell zugenommen. Dabei konnte die Energie der Laserpulse kontinuierlich gesteigert werden, aber auch die Pulslänge hat sich drastisch verkürzt. Insbesondere mit der Einführung der so genannten *Chirped Pulse Amplification*-Technik (CPA) Mitte der 1980er Jahre hat die Entwicklung hochintensiver Laserpulse einen gigantischen Aufschwung erlebt.¹ Leistungen bis zu einem Petawatt wurden bereits demonstriert, und Laserintensitäten bis zu $\sim 5 \cdot 10^{20} \text{ W/cm}^2$ werden mittlerweile routinemäßig erreicht, wenn diese Laserpulse mit guter Optik fokussiert werden. Abbildung 1 zeigt die Evolution der erreichten Laserintensität seit der Erfindung des Lasers. Schon früh reichte die Intensität, um die Materie zu ionisieren, d. h., Elektronen von den Atomrümpfen zu lösen und ein Plasma zu bilden. Auf der rechten Seite ist die Bewegungsenergie aufgetragen, die ein Elektron erreicht, das im Laserfeld schwingt. Bei Intensitäten von 10^{18} W/cm^2 erreicht das Elektron quasi Lichtgeschwindigkeit, und faszinierende relativistische Effekte treten auf. Dieser Schwellenwert zur *relativistischen Laser-Plasmaphysik* wurde ca. 1995 überschritten. Die Abbildung zeigt sehr deutlich, dass seitdem weiter in das neue Gebiet der Physik vorgedrungen werden konnte.

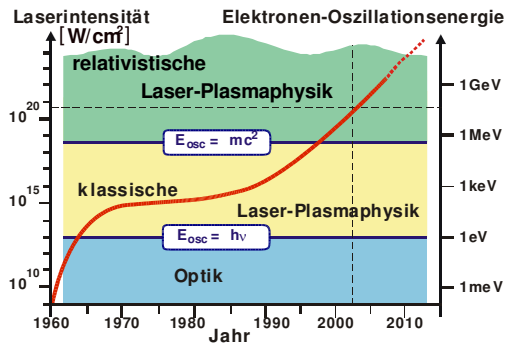


Abb. 1: Neuartige Laserentwicklungen ermöglichen es, im Laserfokus Intensitäten von weit über 10^{20} W/cm^2 zu erreichen. Die Elektronen schwingen im elektrischen Feld des Laserpulses mit Energien von vielen Megaelektronvolt (MeV), ihre Bewegung ist stark relativistisch. Dies ist die Ursache für eine Vielzahl faszinierender Effekte der so genannten *relativistischen Laser-Plasmaphysik*.

Nicht nur höhere Leistungen, sondern auch kürzere Laserpulse mit einer Pulsdauer von einigen fs (10^{-15} s) können im Labor erzeugt werden. Mit fs-Pulsen kommt man jedoch nahe an das Limit einer optischen Periode des Lichts. Bereits ein 5-fs-Ultrakurzpuls besteht nur noch aus wenigen Schwingungen des elektrischen Feldes. Dies ist in Abbildung 2

¹ Vgl. Strickland und Mourou (1985).

dargestellt. Um noch kürzere Pulse zu erzeugen, muss man zu kürzeren Wellenlängen gehen. Mit so genannten *höheren Harmonischen* wurden in Experimenten kürzlich kohärente Pulse im XUV-Spektralbereich demonstriert.² Diese haben besonders im medizinischen Bereich ein hohes Anwendungspotenzial.

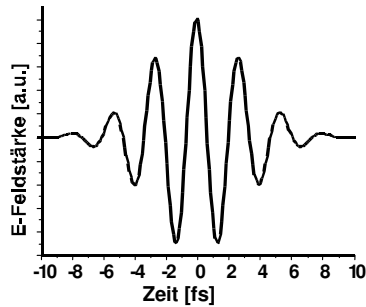


Abb. 2: Elektrische Feldstärke eines 5-fs-Laserpulses.

Um höhere Energien mit fs-Pulsen zu erreichen, müssen neue Lasersysteme entwickelt werden. Eine Möglichkeit ist ein System, das die neue Technik der so genannten *optical parametric chirped pulse amplification* (OPCPA) verwendet. An der Heinrich-Heine-Universität wird zurzeit ein neuartiges Lasersystem entwickelt, das Pulse von < 10 fs und einer Energie von etwa 10 mJ zur Verfügung stellen wird. Zurzeit besteht hier ein funktionierendes Lasersystem mit einer Pulslänge von 8 fs, aber mit einer geringeren Energie. Dies wurde benutzt, um K_{α} -Strahlung bis zu circa 10 Kiloelektronvolt (keV) und sehr dichte Plasmen mit einer Temperatur von etwa 100 Elektronvolt (eV) zu erzeugen.

Grundlagenforschung und Anwendungen

Die hohen Energiedichten, die mit diesen Laserpulsen erreicht werden, sind der Grund für ein enormes Potenzial in der Anwendung von lasergenerierten Plasmen. Mit der Entwicklung ultrakurzer, superintensiver Laserstrahlung wurde gerade auf dem Gebiet der relativistischen Plasmaphysik eine Vielzahl neuartiger Effekte gefunden: relativistische Selbstfokussierung, Lichtausbreitung in ultradichten Plasmen, Solitonen, relativistische sowie atomare Wechselwirkung und Weiteres. Sie eröffneten neue Fragestellungen und bilden ein hochaktuelles, internationales Forschungsgebiet; aber auch mittel- bis langfristig zeichnen sich schon jetzt wirtschaftliche Anwendungen ab. Mit ultraintensiven Laserpulsen können intensive Röntgen- und Teilchenpulse erzeugt werden. Anwendungen sind in der Medizin und in der Kernphysik möglich, zum Beispiel in der Isotopenerzeugung und bei Messungen von photoinduzierten Querschnitten. Studien von Teilchenjets und filamentiertem Transport sind von fundamentaler Bedeutung für die Astrophysik.

Eine der faszinierendsten Anwendungen ist die direkte Sichtbarmachung von sich zeitlich schnell ändernden elektrischen Feldern in dichten Plasmen, die bis vor kurzem experimentell nicht zugänglich waren. Dies geschieht mit Hilfe laserbeschleunigter Protonen,

² Vgl. Kienberger *et al.* (2002).

die, da sie geladene Teilchen sind, von elektrischen Feldern abgelenkt werden können. Dies ermöglicht eine neuartige Diagnostik, die so genannte *Protonenradiographie*.

Protonenradiographie

Bei der Wechselwirkung von intensiven Laserpulsen mit dünnen Metallfolien werden gepulste Elektronen- und Protonenstrahlen mit sehr hohen Dichten und Energien erzeugt. Es wurden in Experimenten bereits Protonenstrahlen mit einer Energie von einigen MeV nachgewiesen. Abbildung 3 zeigt das Schema der Protonenerzeugung. Die Plasmaelektronen werden im Fokus in Propagationsrichtung des Lasers beschleunigt. Experimentell wurden bereits MeV, Megaampere-Elektronenströme beobachtet. Die Beschleunigung von Elektronen durch den Laserpuls führt zwangsweise zur Ausbildung von sehr starken Raumladungen, da die Ionen auf Grund ihrer Massenträgheit den Elektronen nicht instantan folgen können. Diese sehr starken elektrischen Felder (bis 10^{12} V/m) auf der Rückseite dünner bestrahlter Folien sind wiederum dafür verantwortlich, dass die zurückgebliebenen Protonen/Ionen ebenfalls beschleunigt werden und mit hohen Energien (multi-MeV) das Target verlassen. Diese neuartige „Protonenquelle“ hat einzigartige Eigenschaften, die von der Protonenradiographie bis zur Krebstherapie reichen. Sie ist nur wenige μm groß, hat eine exzellente Strahlqualität, die Emission erfolgt innerhalb \sim ps, der Fluss ist mehrere Größenordnungen dichter als bei klassischen Beschleunigern und das Energiespektrum folgt einer quasi Boltzmann-Verteilung und ist daher eine hervorragende Quelle für neuartige Anwendungen, etwa der Untersuchung kurzlebiger, dichter Plasmen.³ Sie ermöglichen dort die Detektion transienter, elektrischer Feldverteilungen, da die Protonenstrahlen auf Grund ihrer Ladung sehr empfindlich auf die Anwesenheit dieser Felder reagieren. Mit dieser neuartigen Technik des *Proton Imaging* ist es seit kurzem zum ersten Mal möglich, sich schnell zeitlich ändernde elektrische und magnetische Felder mit hervorragender räumlicher ($\sim \mu\text{m}$) und zeitlicher (\sim ps) Auflösung in dichten Plasmen sichtbar zu machen.⁴

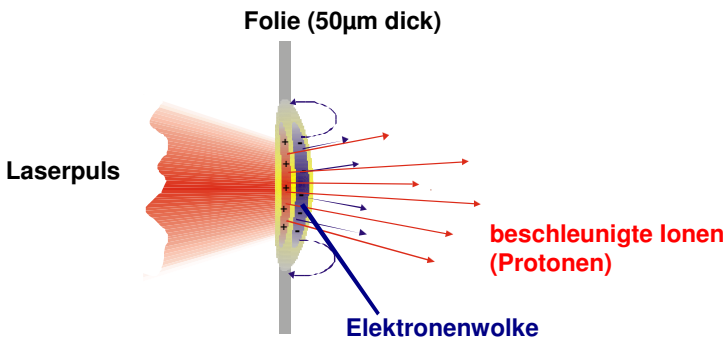


Abb. 3: Schema zur Erzeugung von Protonenstrahlen mit superintensiven Laserpulsen. Die Protonen verlassen die Folie als Strahl mit einer Energie von einigen MeV.

³ Vgl. Borghesi *et al.* (2003a) sowie Borghesi *et al.* (2004).

⁴ Vgl. Borghesi *et al.* (2003b).

Abbildung 4 demonstriert die elektrostatische Aufladung eines laserbestrahlten Kügelchens.⁵ Der Protonenstrahl wird von den elektrischen Feldern abgelenkt. Dies wird auf einem Film sichtbar gemacht. Es entstehen Aufnahmen, die an optische Photographien erinnern, die aber direkt mit geladenen Elementarteilchen statt mit Photonen gemacht wurden. Dadurch, dass die Protonenstrahlen selbst eine gewisse Energiedispersion besitzen, also einige schneller als die anderen fliegen, kann sogar eine Zeitauflösung von \sim ps erreicht werden. In Abbildung 4 ist die Zeitentwicklung des elektrischen Feldes anhand von zwei Bildern, die mit 4,5 und 8 MeV aufgenommen wurden, sehr eindrucksvoll demonstriert.

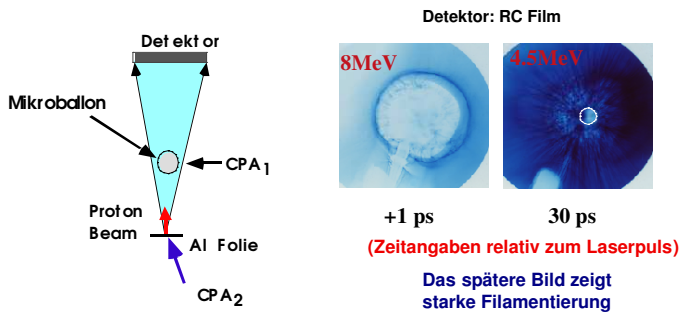


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung elektrischer Felder bei Glas-Mikroballons ($150 \mu\text{m}$); bestrahlt wird mit einem ultrakurzen, superintensiven Laserpuls (CPA₁). Der Protonenstrahl wird mit einem zweiten intensiven Laserpuls (CPA₂) erzeugt, der auf eine dünne Folie auftritt. Das Bild wurde mit einem protonenempfindlichen Film (Detektor) aufgenommen. Das zweite Bild, aufgenommen mit den 4,5 MeV-Protonen, zeigt starke Filamentierung, die durch eine Weibel-Instabilität erzeugt werden.

Ein weiterer, äußerst aktueller Effekt bei der Wechselwirkung hochenergetischer Laser mit Materie ist das Auftreten so genannter *Solitonen*, die lange nur theoretisch diskutiert werden konnten. Mit der neuen Diagnostik des *Proton Imaging* wurden kürzlich diese langlebigen, blasenähnlichen Strukturen (Abb. 5), die bis zu 40 Prozent der Laserenergie beinhalten können, in einem Plasma beobachtet.⁶

Zusammenfassung

Mit der Entwicklung leistungsstärkster Ultrakurzpuls-Lasersysteme wurden in den letzten Jahren bahnbrechende Entdeckungen auf dem Gebiet der Laser-Plasma-Wechselwirkung gemacht, die von der Teilchenbeschleunigung auf Energien von mehreren Zehn MeV bis zur Erzeugung intensiver keV-Röntgenstrahlung und kohärenter XUV-Attosekundenpulse reichen. Besonders seitdem Strahlungsintensitäten von über 10^{18} W/cm^2 zur Verfügung stehen, hat sich ein völlig neuartiges Gebiet der *relativistischen* Laser-Plasma-Wechselwirkung eröffnet, das mittel- bis langfristig auch direkten wirtschaftlichen und medizinischen Nutzen verspricht. Eine Vielzahl neuer Effekte kann jetzt experimentell

⁵ Vgl. Borghesi *et al.* (2003b).

⁶ Vgl. Borghesi *et al.* (2002).

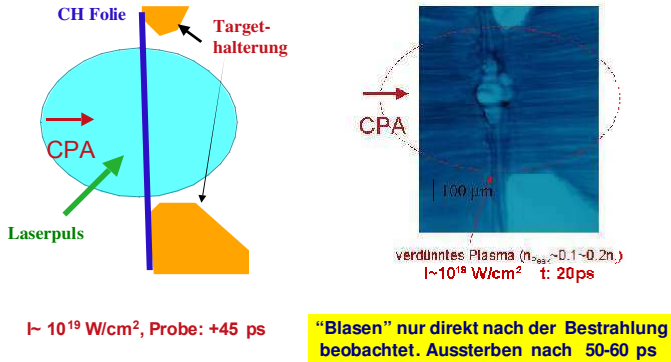


Abb. 5: Ein Plasma wird durch die Bestrahlung einer dünnen Plastikfolie mit einem Laserpuls erzeugt. Während der Wechselwirkung eines hochintensiven Laserpulses (CPA) mit dem Plasma werden Blasenstrukturen gebildet, die mit Hilfe von *Proton Imaging* sichtbar gemacht werden können.

nachgewiesen werden, die bisher nur theoretisch vorhergesagt wurden. Die Erzeugung von Protonenstrahlen mit hohen Dichten erlaubt es neuerdings, transiente, elektrische Felder in dichten Plasmen quantitativ zu vermessen. Ultrakurzpulslaser ermöglichen auch die Erzeugung von Attosekundenpulsen mit Anwendungen, wie die Beobachtung ultraschneller, elektronischer Vorgänge in Atomen.

Literatur

- BORGHESI, M., S. BULANOV, D. H. CAMPBELL, R. J. CLARKE, T. Zh. ESIRKEPOV, M. GALIMBERTI, L. A. GIZZI, A. J. MACKINNON, N. M. NAUMOVA, F. PEGORARO, H. RUHL, A. SCHIAVI und O. WILLI. „Macroscopic Evidence of Soliton Formation in Multiterawatt Laser-Plasma Interaction“, *Physical Review Letters* 88 (2002), 135002/1-135002/4.
- BORGHESI, M., A. SCHIAVI, D. H. CAMPBELL, M. G. HAINES, O. WILLI, A. J. MACKINNON, P. PATEL, M. GALIMBERTI und L. A. GIZZI. „Proton imaging detection of transient electromagnetic fields in laser-plasma interactions“, *Review of Scientific Instruments* 74 (2003a), 1688-1693.
- BORGHESI, M., L. ROMAGNANI, A. SCHIAVI, D. H. CAMPBELL, M. G. HAINES, O. WILLI, A. J. MACKINNON, M. GALIMBERTI, L. A. GIZZI, R.J. CLARKE und S. HAWKES. „Measurement of highly transient electrical charging following high-intensity laser-solid interaction“, *Applied Physics Letters* 82 (2003b), 1529-1531.
- BORGHESI, M., A. J. MACKINNON, D. H. CAMPBELL, D. HICKS, S. KAR, P. K. PATEL, D. PRICE, L. ROMAGNANI, A. SCHIAVI und O. WILLI. „Multi-MeV proton source investigations in ultra-intense laser-foil interactions“, *Physical Review Letters* 92 (2004), 055003/1 – 055003/4.
- KIENBERGER, R., M. HENTSCHEL, M. UIBERACKER, C. SPIELMANN, M. KITZLER, A. SCRINZI, M. WIELAND, Th. WESTERWALBESLOH, U. KLEINEBERG, U. HEINZMANN, M. DRESCHER und F. KRAUSZ. „Steering attosecond electron wave packets with light“, *Science* 297 (2002), 1144-1147.
- STRICKLAND, D. und G. MOUROU. „Compression of amplified chirped optical pulses“, *Optics Communications* 56 (1985), 219-222.