

Freie-Elektronen-Laser

◆ Lässt man ein Elektronenpaket (blaue Wolke, Abbildung 1 unten links) von wenigen hundert Femtosekunden Länge bei gleichzeitig sehr kleiner (etwa 1 mrad) Winkeldivergenz durch eine Anordnung von Magnetfeldern mit alternierender Feldrichtung, einen Undulator, fliegen, beginnt das emittierte Licht mit dem Elektronenpaket so wechselzuwirken, dass die Elektronen mehr und mehr in Phase geraten: Sie bewegen sich im Gleichtakt und die von den einzelnen Elektronen emittierte Strahlung wird kohärent. Alle abgestrahlten Lichtwellen überlagern sich nun konstruktiv: Die Intensität I des emittierten Lichtpulses ist nicht mehr, wie bei einem normalen, etwa 2 m langen Synchrotron-Undulator proportional zur Zahl N der Elektronen im Paket, sondern proportional zu deren Quadrat: $I \sim N^2$. Da $N \sim 10^9$ ist, kann die abgestrahlte Lichtintensität dadurch bis zu 10^9 mal größer werden. Gleichzeitig ist die Strahlung im Idealfall vollständig kohärent, hervorragend gebündelt, und die Pulse sind nur wenige Femtosekunden lang.

Dass dieses Prinzip tatsächlich funktioniert, demonstriert der erste Freie-Elektronen-Laser (FEL) in Hamburg, FLASH.¹⁾ Er stellte am 4. Oktober 2007 einen Weltrekord auf, als man bei einer Elektronenenergie von 1 GeV Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 6,5 nm beobachtete. In höheren Harmonischen erreichte man sogar das Wasserfenster, den Wellenlängenbereich zwischen der K-Absorptionskante des Kohlenstoffs und des Sauerstoffs.¹⁾ Dieser Spektralbereich ist wichtig für die Röntgenmikroskopie an biologischen Systemen in wässriger Umgebung.

Weltweit entstehen nun bei noch kürzeren Wellenlängen mehrere Å-Röntgenlaser: Am DESY wurde am 5. Juni 2007 der Projektstart für den europäischen X-FEL bekannt gegeben, der mit supraleitender Technik bei einer maximalen Elektronen-

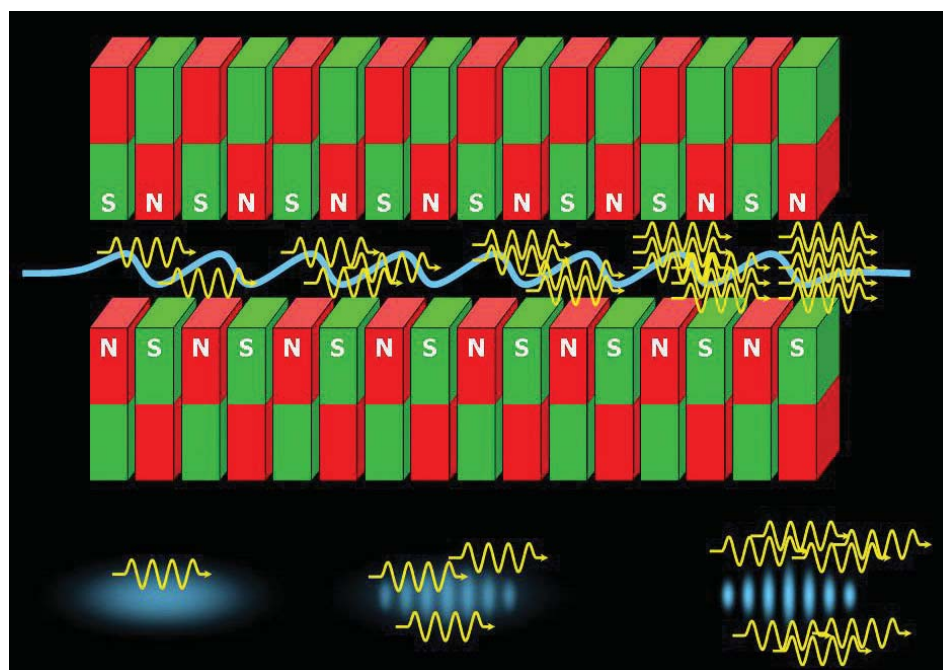


Abb. 1. Selbsterstärkende Lichtemission aus dem Elektronenpaket im Undulator. Beim Durchflug durch die alternierende Magnetstruktur strahlen die Elektronen an den Umkehrpunkten Licht ab, welches durch den relativistischen Effekt der Lorentz-Kontraktion scharf in Vorwärtsrichtung gebündelt ist. Durch Wechselwirkung mit dem Lichtfeld wird dem Elektronenpaket eine Dichtemodulation mit der Laser-Wellenlänge aufgeprägt (unten im Bild anhand der blau angedeuteten Dichteverteilung des Pakets dargestellt), die zu einer verstärkten kohärenten Lichtemission führt.

energie von 20 GeV, einer Gesamtlänge von mehr als 3 km und 200 m langen Undulatoren ab 2013 die bislang höchsten Photonenflüsse erzielen soll. In Stanford/USA soll im nächsten Jahr die Linear Coherent Light Source, LCLS, in Betrieb gehen und 2010 eine Maschine in Japan. Darüber hinaus befinden sich weltweit mehrere FEL mit niedrigeren Energien im Planungsstadium.

Zeitaufgelöste Messungen

◆ Von den neuen Lichtquellen mit Wellenlängen zwischen 100 nm und 1 Å erhofft man sich zeitaufgelöste Messungen zur Struktur und zur Funktion komplexer Systeme auf atomarer Zeit- (10^{-17} s) und Längenskala (10^{-10} m): Wie bildet sich oder bricht eine chemische Bindung und wie bewegen sich hierbei Elektronen und Kerne? Wie schnell lassen sich nanoskalige Ferromagnete umpolen und damit ultraschnelle Speicher entwickeln? Wie verlaufen Schmelzprozesse, was ist die Dynamik heißer und dichter Plasmen im Inneren von Sternen? Gelingt es, die Struk-

tur einzelner Nanoteilchen, von Makromolekülen, Proteinen, Bakterien oder Viren in einem einzigen Lichtblitz abzubilden?

Grundlegende Prozesse, einfache Systeme

◆ Mit der Verfügbarkeit erster FLASH-Lichtblitze im Jahr 2005 startete in Hamburg ein Forschungsprogramm, dessen Ergebnisse das Potenzial dieser Lichtquellen unterstreichen. Zu Beginn konzentrierte sich die Forschung auf die einfachsten Systeme: Atome,^{2,3)} Ionen,⁴⁾ einfache Molekülonen⁵⁾ und Moleküle sowie Cluster.⁶⁾ Ziel war es, die grundlegenden Prozesse der Wechselwirkung dieses extrem intensiven Lichts mit Materie zu verstehen. Aber auch Oberflächen^{7,8)} und Plasmen⁹⁾ wurden bereits untersucht und erste zeitaufgelöste Messungen durchgeführt.^{10,11)} Im Fokus standen besonders nichtlineare Effekte. Solche Effekte sind im Sichtbaren mit intensiven optischen Lasern seit längerem bekannt. Nun treten sie jedoch erstmals auch bei diesen kur-

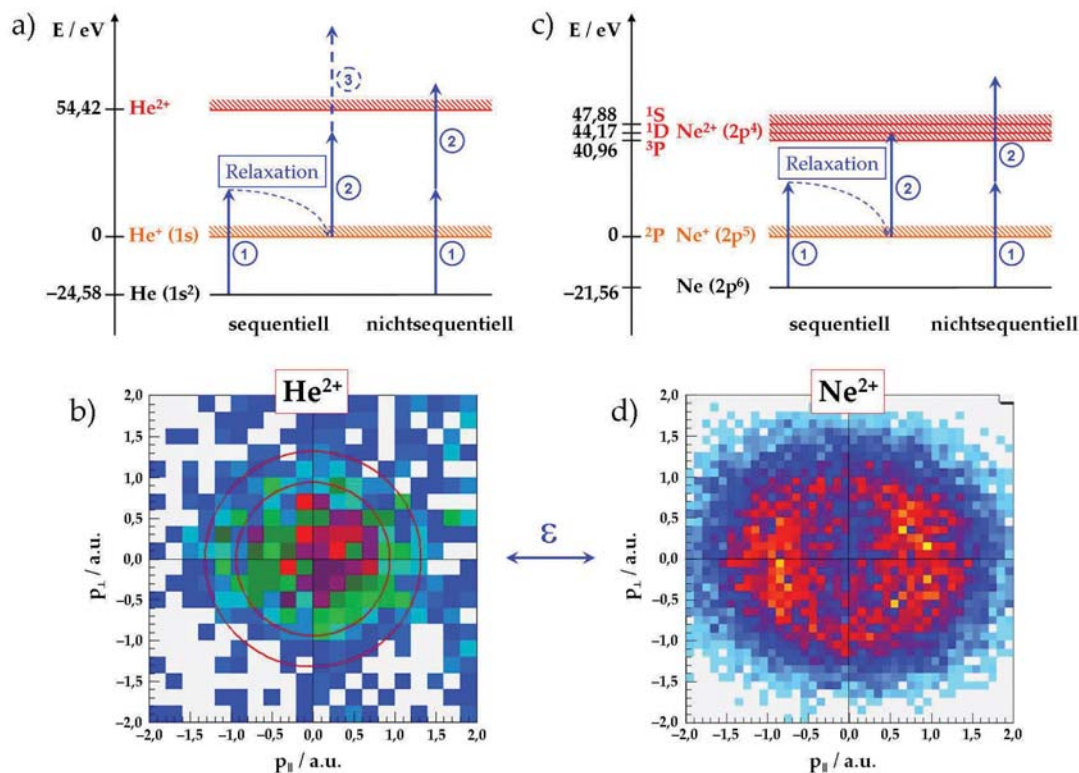


Abb. 2. Zwei-Photonen-Doppelionisation von Helium und Neon bei 28 nm Wellenlänge (44 eV);

a) Termschema für Doppelionisation von Helium mit zwei Photonen;

b) Impulsverteilung der He²⁺-Ionen in der Ebene senkrecht zur Richtung des Laserstrahls. Die Richtung der linearen Polarisation des Lasers ist durch den blauen Doppelpfeil angegeben.

c) Termschema für Doppelionisation von Neon mit zwei Photonen;

d) Impulsverteilung der Ne²⁺-Ionen in der Ebene senkrecht zur Richtung des Laserstrahls.

zen Wellenlängen auf, bei denen mehrere Photonen praktisch gleichzeitig oder aber auch kurz hintereinander mit den Elektronen des Objekts wechselwirken. Dabei werden die fundamentalsten Reaktionen dieser Art beobachtet: Wenige Photonen wechselwirken mit wenigen Elektronen.

Obwohl Maria Göppert solche nichtlinearen Prozesse bereits 1929 theoretisch vorhersagte,¹²⁾ lässt sich bis heute nicht verlässlich berechnen, wie zwei Photonen (mit zum Beispiel jeweils 44 eV wie in Abbildung 2a gezeigt) mit den beiden Elektronen des Heliumatoms interagieren. Sicherlich kann, energetisch erlaubt, doppelte Ionisation auftreten, und es stellt sich die Frage, mit welchen Energien die Elektronen in welche Richtungen emittiert werden. Zahlreiche Modellrechnungen widersprechen sich hier teilweise diametral. Klar ist lediglich, dass die Absorption zweier Photonen bei 44 eV Photonenenergie praktisch

gleichzeitig (nichtsequentiell) ablaufen muss: Würde zunächst nur ein einzelnes Photon absorbiert und dem He-Atom hinreichend Zeit gegeben, in den mit 54 eV gebundenen Grundzustand des He⁺ zu relaxieren, dann reicht ein weiteres Photon für die doppelte Ionisation nicht aus. Hierzu müssten im zweiten Schritt zwei Photonen gleichzeitig absorbiert werden, dies ist wesentlich unwahrscheinlicher.

Hier stellen sich fundamentale Fragen: Wie lange dauert die Absorption eines Photons? (Dies erfordert eine zeitabhängige Betrachtung.) Wie und auf welcher Zeitskala reagiert die Elektronenhülle eines komplexeren Atoms, Moleküls oder Clusters? Eine Serie von Experimenten ist genau solchen Fragen nachgegangen.

Die Abbildungen 2b und 2d zeigen die Impulsverteilungen von doppelt ionisierten He²⁺- und Ne²⁺-Ionen in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Pho-

tonen, erzeugt durch Einstrahlung von 44-eV-Photonen. In beiden Fällen werden genau zwei Photonen absorbiert, und trotzdem unterscheiden sich die beobachteten Impulsverteilungen. So bleibt das zurückgebliebene He²⁺-Ion meist in Ruhe (Maximum der Verteilung bei Null-Impuls), was nur dadurch zu erklären ist, dass die beiden Photoelektronen im Wesentlichen in entgegengesetzte Hemisphären mit ähnlichen Impulsen emittiert werden: Das Ion nimmt gerade den Summenimpuls der beiden davontreibenden Elektronen auf. Dieses Resultat widerlegte einige Modellrechnungen.

Ganz anders im Fall von Neon (Abbildung 2d): Hier ist auch die sequentielle Absorption zweier Photonen energetisch erlaubt (Abbildung 2c), wobei der erste Schritt zu Ne⁺-Ionen in den Zuständen ³P, ¹D, und ¹S führt, von denen nun der am niedrigsten gebundene durch die erneute Absorption eines zweiten

44-eV-Photons weiter ionisiert werden kann. Wie die jetzt beobachtete, klar strukturierte Impulsverteilung des Ne^{2+} -Ions zeigt, ist diese Nacheinanderabsorption innerhalb nur eines Pulses von circa 25 fs favorisiert. Die Ringstruktur der Ne^{2+} -Impulse entspricht weitgehend dem Impuls des Ne^{1+} -Photoions nach Einfachionisation aus dem $(2p^6)$ -Grundzustand des Atoms, verbreitert durch den weitaus geringeren Rückstoßimpuls aus der Ionisation des intermediären ^3P -Zustandes des Ne^{1+} -Ions nach Absorption des zweiten Photons.

Falls, wie hier energetisch erlaubt, die Wirkungsquerschnitte um viele Größenordnungen höher als für die nichtsequentielle Absorption sind, so ergeben sich dramatische Konsequenzen für Systeme mit vielen möglichen Zwischenzuständen, etwa Moleküle: Bei Stickstoffmolekülen wurde jüngst die sequentielle Absorption von bis zu vier Photonen innerhalb von 20 fs beobachtet, dies zerstörte das Molekül in kurzer Zeit (Coulomb-Explosion). Bei höheren Intensitäten von nahezu $10^{16} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ und Photonenenergien von 93 eV (13,3 nm) wurden 21-fach geladene Xenon-Ionen gefunden,³⁾ somit muss ein Xe-Atom eine große Zahl von Photonen auf bisher nicht verstandene Art und Weise absorbiert haben. Bei Clustern wurde inverse Bremsstrahlung als ein wesentlicher, effizienter Absorptionsmechanismus identifiziert.¹³⁾

Solche Messungen und das Verständnis der zugrunde liegenden elementaren Prozesse sind möglicherweise entscheidend dafür, einzelne Nanoteilchen, Moleküle, Proteine, Bakterien mit einem einzigen superintensiven Lichtpuls von bis zu $10^{21} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ mit atomarer Auflösung abzubilden.¹⁴⁾ Hierzu sollen alle 10^{12} Röntgenphotonen innerhalb eines Pulses, jedes mit einer Energie von ca. 10 keV, auf eine Fläche von 100 nm^2 fokussiert werden. Dies kann voraussichtlich nur dann gelingen, wenn die Röntgenblitze nicht länger als 10 fs sind. Danach ist bei dieser Energiedichte kein Elektron des Moleküls mehr an seinem

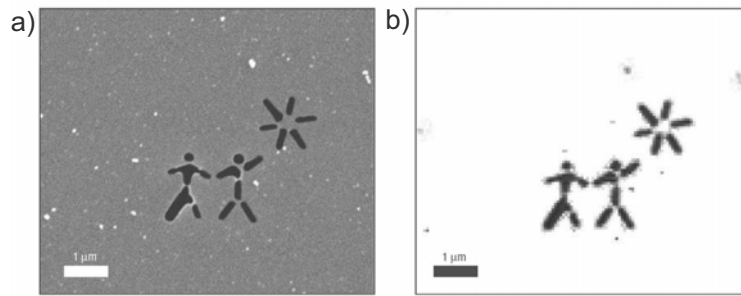


Abb. 3. Rekonstruktion einer Mikrostruktur aus dem holographischen Beugungsbild eines 25-fs-Röntgenpulses (32 nm Wellenlänge, Intensität $4\cdot 10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$) am FLASH.
a) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Struktur vor dem Beschuss mit dem Laser; b) Aus der Beugungsfigur der gestreuten Photonen rekonstruiertes Bild der Struktur. Die Übereinstimmung zeigt, dass es gelingt, die Struktur vor ihrer Zerstörung durch das intensive Lichtfeld über gestreute Photonen in einem einzigen Schuss abzubilden.
 (Bild aus Originalveröffentlichung, Lit.¹⁵⁾)

ursprünglichen Platz, und die Interpretation der daran elastisch gestreuten Photonen wird zunehmend aufwendig. Erste Messungen am FLASH nähren die Hoffnung, dass solche Experimente möglich werden.

Neue Detektoren

◆ Ein Pionierexperiment lieferte die Einzelschussabbildung einer Mikrostruktur (Abbildung 3).¹⁵⁾ Anschließend haben zeitaufgelöste Messungen Strukturveränderungen

von Nanoteilchen¹¹⁾ (Abbildung 4) sowie eine Pikoplankton-Zelle mit einem einzigen Röntgenlaserpuls abgebildet. Ein anderes Projekt fotografierte einzelne Cluster in einem Gasstrahl. Solche Messungen erfordern großflächige ($10\times 10 \text{ cm}^2$) CCD-Photodetektoren mit einer Orts- und Energieauflösung von bis zu 4 Millionen Pixel und 10 Millionen Auflösungspunkten.

Neben der Fähigkeit, einzelne Photonen aufzulösen und deren Energie zu bestimmen, müssen die

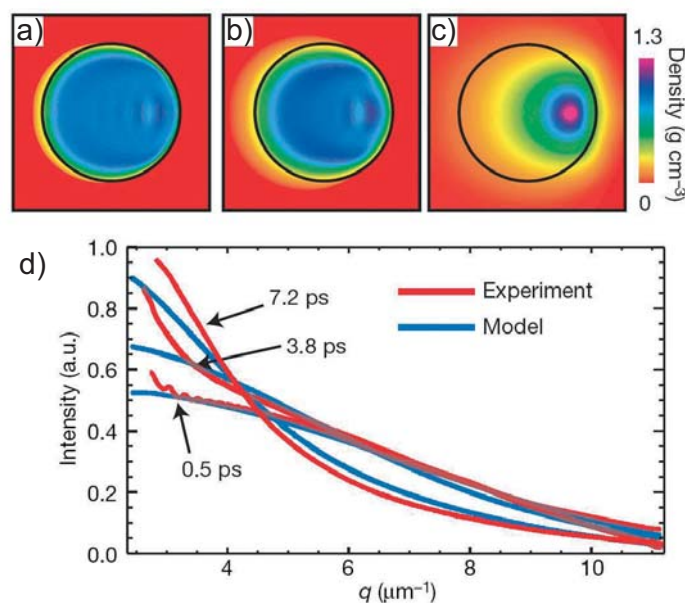


Abb. 4. Zeitaufgelöste Abbildung der Explosion einer Polystyrol-Nanokugel (Durchmesser 140 nm) nach Beschuss mit zwei 25-fs-Röntgenpuls (32 nm Wellenlänge, Intensität $0,5\cdot 10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$). Der erste Puls startet die Explosion, welche mit dem zweiten Puls mit einer variablen Verzögerung vermessen wird. a-c) Simuliertes Dichteprofil der Nanokugel a) 0,5 ps, b) 0,9 ps und c) 3,2 ps nach dem ersten Puls. d) Simulierte und gemessene Einhüllende der Beugungsbilder für 0,5 ps, 3,8 ps und 7,2 ps Verzögerung des zweiten Pulses.
 (Bild aus Lit.¹⁵⁾)

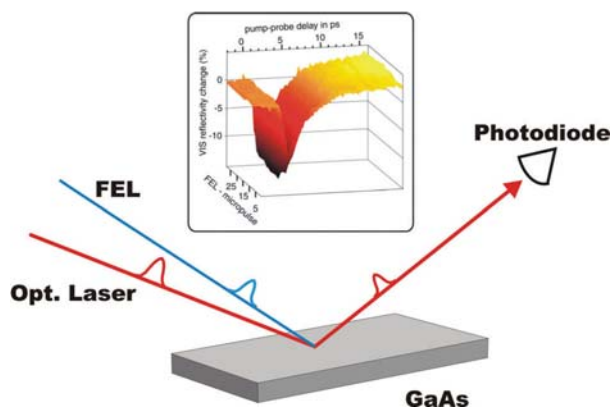


Abb. 5. Zeitaufgelöste Messung der Veränderung des Brechungsindex, den ein FLASH-Puls an einer GaAs-Oberfläche verursacht.

Detektoren insbesondere bei MHz-Repetitionsraten und Pulsen mit 10^{12} Photonen gigantische Datenmengen auslesen und verarbeiten. Derartige Detektoren entwickelt das gemeinsame Halbleiterlabor des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik und des Werner-Heisenberg-Instituts in München.

Eine weitere Klasse von Experimenten nutzt den enormen integralen Photonenfluss. Er erlaubt es, bisher unzugängliche Photoprozesse an Proben zu untersuchen, die im Labor nur in extrem geringen Dichten herzustellen sind. Dazu zählen hochgeladene Ionen, wie sie in den Koronen von Sternen auftreten, Molekülionen, die wichtige Bestandteile interstellarer und atmosphärischer Plasmen sind, oder massenselektierte Cluster. Bei hochgeladenen Ionen gelangen Präzisionsmessungen zur Quantenelektrodynamik.⁴⁾ Erste Messungen zur Dissoziationsdynamik des HeH^+ haben neue Erkennt-

nisse für astrophysikalische Modelle zur Molekülbildung in interstellaren Wolken geliefert.⁵⁾

Zeitaufgelöste Messungen, die vor allem die ultrakurze Pulsdauer der Lichtblitze nutzen, wiesen sehr schnelle röntgeninduzierte Reflexionsänderungen an Halbleitern nach und führten so zu ersten stroboskopischen Ultrakurzzeitexperimenten.⁸⁾ Durch die Absorption des FEL-Pulses verändert sich innerhalb weniger Femtosekunden die elektronische Struktur an der GaAs-Oberfläche so, dass das Reflexionsvermögen für den optischen Laserpuls sinkt (Abbildung 5). FEL-Pulse lassen sich mit einem zweiten optischen Laserpuls so gut synchronisieren und die relative Ankunftszeit der beiden Pulse so genau messen, dass zeitaufgelöste Pump-Probe-Experimente im Femtosekundenbereich möglich sind.

Nachdem eine erste Runde von Messungen grundlegende Erkenntnisse lieferte und Experimentier-techniken entwickelt und optimiert wurden, zielen die nächsten Untersuchungen am FLASH auf zeitaufgelöste Experimente mit Molekülen, Clustern an Oberflächen und Festkörpern, sowie auf Untersuchungen, welche die Kohärenzeigenschaften der Strahlung nutzen.

Um die Forschungsmöglichkeiten am FEL optimal zu nutzen, haben DESY, die Max-Planck-Gesellschaft und die Universität Hamburg, unterstützt durch die Stadt Hamburg, gerade das Center for Free-Electron Laser

Science, CFEL, gegründet, ein gemeinsames Institut mit insgesamt etwa 300 Mitarbeitern.

Joachim Hermann Ullrich,

Bernold Feuerstein

Max-Planck-Institut für Kernphysik,

Heidelberg

Joachim.Ullrich@mpi-hd.mpg.de

Bernold.Feuerstein@mpi-hd.mpg.de

Wilfried Wurth

Universität Hamburg und DESY

Wilfried.Wurth@desy.de

- 1) W. Ackermann, G. Asova, V. Ayvazyan et al., Nat. Photonics 2007, 1, 336.
- 2) R. Moshhammer, Y. H. Jiang, L. Foucar et al., Phys. Rev. Lett. 2007, 98, 203001.
- 3) A. A. Sorokin et al., Phys. Rev. Lett. 2007, 99, 213002.
- 4) S. W. Epp, J. R. Crespo López-Urrutia, G. Brenner et al., Phys. Rev. Lett. 2007, 98, 183001.
- 5) H. B. Pedersen, S. Altevogt, B. Jordan-Thaden et al., Phys. Rev. Lett. 2007, 98, 223202.
- 6) H. Wabnitz, L. Bittner, A. R. B. de Castro et al., Nature 2002, 420, 482.
- 7) N. Stojanovic, D. von der Linde, K. Sokolowski-Tinten et al., Appl. Phys. Lett. 2006, 89, 241909.
- 8) C. Gahl, A. Azima, M. Beye et al., Nature Photonics 2008, im Druck.
- 9) S. P. Hau-Riege, H. N. Chapman, J. Krzywinski et al., Phys. Rev. Lett. 2007, 98, 145502.
- 10) M. Meyer, D. Cubaynes, P. O'Keefe et al., Phys. Rev. A 2006, 74, 011401(R).
- 11) H. N. Chapman, S. P. Hau-Riege, M. J. Bogan, et al., Nature 2007, 448, 676.
- 12) M. Göppert, Naturwissenschaften, 1929, 17, 932.
- 13) C. Siedschlag, J. M. Rost, Phys. Rev. Lett. 2004, 93, 043402.
- 14) R. Neutze et al., Nature 2000, 406, 752.
- 15) H. N. Chapman, A. Barty, M. J. Bogan et al., Nat. Phys. 2006, 2, 839.



Joachim Ullrich, Jahrgang 1956, studierte Geophysik und Physik in Frankfurt und promovierte dort 1987. Er ging dann zur Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt und war Gastwissenschaftler an mehreren US-Universitäten. 1997 erhielt er einen Ruf an die Univ. Freiburg, 2001 wechselte er als Direktor an das Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg. Er ist Honorarprofessor an der Univ. Heidelberg und leitet die Advanced Study Group am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) in Hamburg. Ullrich erhielt mehrere Preise, darunter 1999 den Leibniz-Preis der DFG.



Bernold Feuerstein, Jahrgang 1969, studierte Physik an den Universitäten Gießen und Freiburg, wo er 1999 promovierte. Seit 2001 forscht er am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, unterbrochen von einem Forschungsstipendium an der Kansas State Univ. im Jahr 2002. Im Jahr 2006 habilitierte er sich in Heidelberg über die Dynamik kleiner Quantensysteme in intensiven Laserfeldern. Daneben widmet er sich der Vermittlung moderner Forschungsthemen an die Öffentlichkeit. Seit März 2007 ist er Pressesprecher des MPI für Kernphysik.



Wilfried Wurth, Jahrgang 1957, studierte Physik an der TU München und promovierte dort 1987. Nach einem Aufenthalt am IBM Almaden Research Center, San José/USA habilitierte er sich an der TU München. Im Jahr 2000 nahm er einen Ruf an die Univ. Hamburg an. Er ist im Board of Directors des Hamburger Synchrotronstrahlungslabors HASYLAB am DESY, Sprecher der Advanced Study Group der Univ. Hamburg am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) und Sprecher des BMBF-Forschungsschwerpunkts „FLASH – Materie im Licht ultrakurzer und extrem intensiver Röntgenpulse“.