

Elektronenjagd

mit Attosekundenblitzen

Attosekundenphysiker erobern den Mikrokosmos: Mittels ultrakurzer Laser- und Röntgenpulse verfolgen sie die Bewegung einzelner Elektronen nun in Echtzeit. Weitere Fortschritte könnten eine Geschwindigkeitsrevolution in der Computertechnik auslösen.

Von Reinhard Kienberger
und Ferenc Krausz

Wer tief in die Materie blickt, muss damit rechnen, dass seine zeitlichen Maßstäbe ihre Bedeutung verlieren. Denn alles, was im Mikrokosmos geschieht, spielt sich in winzigen Bruchteilen von Sekunden ab – und zwar umso schneller, je tiefer wir in ihn eindringen. Als Wissenschaftler Anfang der 1990er Jahre begannen, Bewegungen von Atomen und Molekülen während schneller chemischer Reaktionen routinemäßig zu »fotografieren«, mussten sie bereits mit femtosekundenkurzen Laserblitzen arbeiten – eine Femtosekunde sind gerade einmal 10^{-15} Sekunden. Doch selbst damals blieben Fragen unbeantwortet. Was genau geschieht im Inneren der Elektronenhülle, die jeden Atomkern umgibt? Wie lassen sich die Bewegungen einzelner Elektronen verfolgen? Und gibt es endlich eine Möglichkeit, unsere Vorstellung vom atomaren Aufbau anhand von »Bildern« zu überprüfen?

Diese Chance bietet erst die Attosekundenphysik, deren Geburtsstunde vor sieben Jahren schlug. Mittels Laserpulsen, die nur wenige hundert Attosekunden dauerten, konnten wir im Jahr 2002 erstmalig den Ablauf eines elektronischen Prozesses in einem Gasatom »filmen«. Eine Attosekunde sind 10^{-18} Sekunden, also der tausendste Teil einer Femtosekunde. Oder etwas anschaulicher gesprochen: Eine Attosekunde verhält sich zu einer Sekunde etwa so wie diese zum Alter unseres Universums.

Die Versuche, immer tiefer in den Mikrokosmos vorzudringen, werden schon bald weit reichende Konsequenzen haben. Lernen wir nämlich, elektronische Prozesse auf der Attosekundenskala zu verstehen und zu beherrschen, können wir die ultimativen Grenzen

von Technologien wie der Halbleiter- und Optoelektronik oder auch der Fotovoltaik ausloten. Dann wird sich zeigen, wie wir diese Grenzen technisch tatsächlich erreichen können. Denkbar ist etwa eine neue molekulare Elektronik, in der einzelne Moleküle die Funktion von Leiterbahnen und Transistoren auf Mikrochips übernehmen. Vielleicht geht die Entwicklung aber auch in Richtung der Plasmonik. Bei dieser sind es Dichtewellen von Elektronen, die sich entlang einer Materialoberfläche ausbreiten und auf diese Weise Information übertragen (siehe »Der Zauber der Plasmonik« in *ScW* 6/2007, S. 58).

Damit ist aber auch klar, dass es nicht genügt, elektronische Prozesse in Gasen zu untersuchen. Wir müssen unsere Experimente auf Festkörper ausweiten – vor allem auf jene, auf denen die moderne Elektronik beruht. Grundlage heutiger Elektronik ist der Transport von elektrischer Ladung in Form von Elektronen. Die Steuerung des Ladungstransports übernehmen Schaltelemente, die mit Mikrowellenspannungen betrieben werden und für einen Schaltprozess nur noch milliardstel Sekunden benötigen. Doch selbst das ist nicht mehr schnell genug, schließlich verlangen zahlreiche Forschungsdisziplinen und technische Anwendungen nach immer größerer Rechenleistung.

Noch aber limitiert die Geschwindigkeit der Schaltprozesse das Rechentempo von Computern. Diese Geschwindigkeit lässt sich aber steigern. Die obere Grenze wird offenbar durch die Zeit bestimmt, die ein Elektron benötigt, um durch die Strukturen zu wandern, von denen es kontrolliert wird. Je kleiner diese Strukturen, desto höhere Schaltgeschwindigkeiten können wir erreichen und desto größer wird die Dichte des Datenflusses.

Die kleinstmögliche Distanz für das Leiten und Schalten von Strömen ist der Abstand zwi-

In Kürze

- Die Geburtsstunde der Attosekundenphysik schlug erst vor wenigen Jahren. Seither sind Forscher in der Lage, nicht nur **die Bewegungen von Atomen und Molekülen zu »fotografieren«**, sondern sogar ins Innere der Elektronenhülle zu blicken.
- Ausgeklügelte Verfahren erlauben es mittlerweile, elektronische Prozesse wie die Bewegung von Elektronen durch Kristalle auf **billiardstel Sekunden genau** zu analysieren.
- Computerprozessoren werden **von Erkenntnissen aus diesen Experimenten profitieren**. Künftig könnte ein mikroelektronischer Schaltprozess nur so lange dauern, wie ein Elektron benötigt, um in einem Kristall von einem Atom zum nächsten zu wandern.

BEIDE FOTOS: THORSTEN NAESER, MPQ



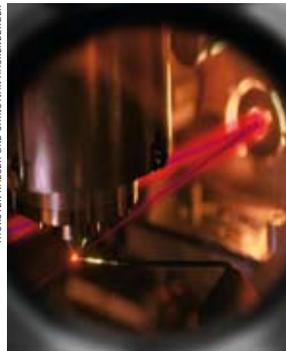
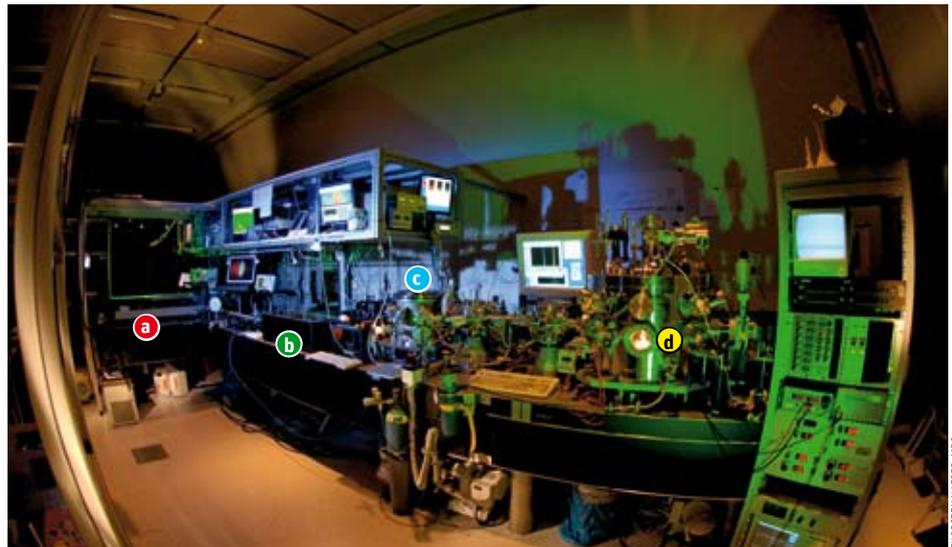
Der Aufbruch in die Attosekundenwelt findet im Labor statt. Mittels trickreicher Anordnungen untersuchen Forscher mittlerweile einzelne elektronische Prozesse, die auf einer Zeitskala von nur wenigen Attosekunden (10^{-18} Sekunden) stattfinden, und nähern sich allmählich dem Ziel einer künftigen Höchstgeschwindigkeitselektronik. Im Bild ist Max-Planck-Forscher Adrian L. Cavalieri zu sehen. Spezielle Laserspiegel (kleines Foto) dienen zur Erzeugung von Laserpulsen, die aus nur wenigen Wellenzyklen bestehen. Diese femtosekundenkurzen Pulse (10^{-15} Sekunden) bilden ihrerseits die Grundlage zur Erzeugung isolierter Attosekundenpulse.



FISCHAUGENBLICK INS LABOR

Der experimentelle Aufbau

der Garching Forscher befindet sich im Labor für Attosekundenphysik des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik. In einer flachen Metallbox **(a)** ist das Lasersystem untergebracht. In der schwarzen Box **(b)** werden die Laserpulse auf eine Dauer von wenigen Femtosekunden verkürzt und in der Vakuumkammer **(c)** zur Erzeugung Hoher Harmonischer eingesetzt, Wellen also, die als »Rohmaterial« für Attosekundenpulse dienen. Die Probe befindet sich in der



THORSTEN MAESER UND CHRISTIAN HACKENBERGER

THORSTEN MAESER, MPQ

Vakuum-Experimentierkammer **(d)**, mit »Bullauge«. Das kleine Bild links zeigt den Blick durch das Bullauge. Attosekundenpulse (blau markiert) und ein infraroter Laserstrahl (rot markiert) werden hier über ein zweiteiliges Spiegelsystem auf Neongas (weißroter Lichtpunkt) fokussiert. Es strömt aus einer Zuleitung (schwarz), denn jeder »Schuss« mit einem Attosekundenpuls muss auf »frische« Atome treffen. Der Zylinder (links) mit der kegelförmigen Spitze ist der Flugzeitdetektor für Elektronen.

schen benachbarten Atomen oder Molekülen in einem Kristallgitter. Um solche Entfernungen zu überwinden, benötigen Elektronen nur einige Attosekunden. Solche Systeme müssen sich zwischen jedem Schaltvorgang zwar kurze Zeit »stabilisieren«, im Prinzip aber können Schaltkreise mit atomaren Bauteilen Ströme öfter als eine Billiarde (10^{15}) Mal, vielleicht sogar 10^{16} Mal pro Sekunde schalten. Damit wären wir in das Zeitalter der Petahertz-Elektronik eingetreten ($1 \text{ Phz} = 10^{15} \text{ Hz}$). Mit ihrer Hilfe ließe sich die Geschwindigkeit der heutigen Elektronik um fast ein Millionenfaches übertreffen. Sie wäre gleichzeitig die ultimative Grenze, die wir in elektronbasierten Informationstechnologien überhaupt erreichen können.

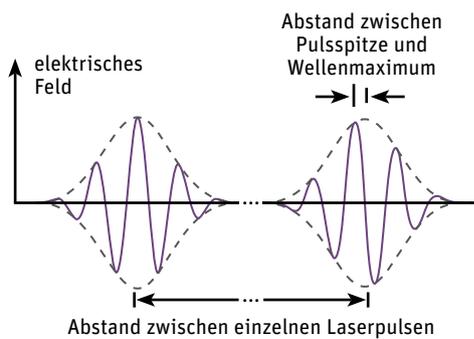
Der Weg, der uns dieser Grenze näherbringt, führt über die Techniken der Attosekundenphysik. Die Quantenmechanik sagt voraus, dass die typische Geschwindigkeit elektronischer Prozesse in Atomen durch die Energiedifferenzen gegeben ist, die dabei überwunden werden. Zum Beispiel kann ein Elektron, das an einen Atomkern gebunden ist, durch ein energiereiches Photon auf ein höheres Energieniveau angeregt werden oder sich gar aus dem Atom befreien. Die Bindungsenergie von Elektronen in Atomen liegt wiederum in der Größenordnung von einigen zehn bis hundert Elektronvolt, was der Quantenmechanik zufolge mit einer typischen Zeit-

skala elektronischer Prozesse im Attosekundenbereich einhergeht.

Wie lassen sich solche ultraschnellen Vorgänge untersuchen? Anrege-Abfrage-Experimente haben sich für diesen Zweck als direkteste Methode erwiesen. Dabei setzt ein Anregepuls, der aus Licht- oder Röntgenstrahlen, aber auch aus Teilchen wie Elektronen bestehen kann, einen mikroskopischen Prozess in Gang, und ein Abfragepuls tastet die zeitliche Entwicklung dieses Prozesses ab.

Je kürzer die untersuchten Prozesse, desto größer ist allerdings die Herausforderung für Experimentalphysiker im Labor. Das Problem beginnt mit der Suche nach einem Verfahren, das uns geeignete Anregepulse liefert. Wir benötigen eine Strahlungsquelle im weichen oder harten Röntgenbereich, die in der Lage ist, attosekundenlange und extrem energiereiche Pulse auszusenden. Zudem muss die Strahlung kohärent sein, die Berge und Täler jeder der sich fortbewegenden Wellen müssen also gleich bleibende Abstände zu denen der jeweils anderen Wellen aufweisen. Doch bislang existieren schlicht keine Laser, die ausreichend kurze Pulse bei Röntgenwellenlängen liefern.

Vor sieben Jahren gelang es uns jedoch erstmals, Röntgenpulse mit einer Dauer im Attosekundenbereich zu erzeugen. Dazu entwickelten wir eine Variante des schon länger bekannten Verfahrens der *High-Order Harmonic*



Kürzer als ein Schwingungszyklus der Trägerwelle (violette Linie) kann ein Laserpuls (gekennzeichnet durch die gestrichelte Pulseinhüllende) nicht sein. Die Nahinfrarot-Pulse im Bild besitzen eine Länge von 3,5 Zyklen. Die Wellenform wird durch den Abstand zwischen Pulsspitze und Wellenmaximum bestimmt. Sie kontrollieren zu können, ist Voraussetzung für die Erzeugung isolierter Attosekundenpulse.

Generation (HHG). Hohe Harmonische sind Wellen, die von ultrakurzen Laserpulsen erzeugt werden und deren Frequenzen jeweils einem ungeradzahigen Vielfachen der ursprünglichen Laserfrequenz entsprechen. Das HHG-Verfahren verwandelt Laserlicht also in laserartige Strahlung höherer Frequenzen. Das Wichtigste dabei: Es genügt schon ein Laser, der bei vergleichsweise großen Wellenlängen im nahen Infrarot (NIR) strahlt, um kurzwellige Strahlung im extrem ultravioletten (XUV) oder weichen Röntgenbereich zu liefern.

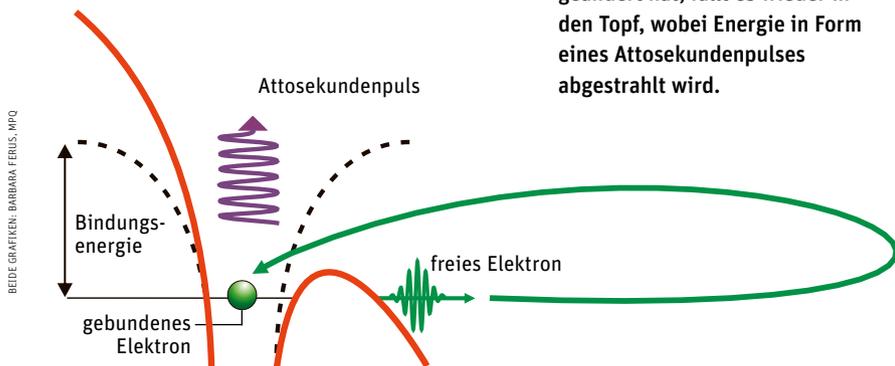
Frei – ganze 2000 Attosekunden lang

Um die Hohen Harmonischen zu erzeugen, richten wir einen NIR-Laser auf eine mit dem Edelgas Neon gefüllte Röhre, wo die elektrischen Felder des Laserstrahls die Bindung der Elektronen an ihre Atomkerne schwächen. Bereits kurz bevor die oszillierenden Felder ihre maximale Stärke erreichen, ist die Bindung so schwach, dass die Elektronen dank ihrer Quanteneigenschaften durch die verbliebene Potenzialbarriere »hindurchtunneln« können.

Allerdings erfreuen sie sich ihrer Freiheit nur kurze Zeit. Das Laserfeld beschleunigt sie zunächst einige Nanometer weit weg vom Atomkern. Dabei erreichen die Elektronen Geschwindigkeiten von einigen tausend Kilometern pro Sekunde. Weil das Feld aber oszilliert, kehrt sich die Richtung der Partikel bald wieder um. Am Ende, nach etwa 2000 Attosekunden, kollidieren sie mit ihren Ursprungsatomen und fallen in deren Elektronenhüllen zurück. Dabei wird die durch die Beschleunigung erlangte Energie in Form von Photonen im XUV- oder im noch höherfrequenten weichen Röntgenbereich frei.

Weil das Laserfeld diesen Vorgang perfekt synchron in Millionen von Atomen herbeiführt, werden sehr viele Photonen gleichzeitig synchron abgestrahlt und formen einen nahezu perfekt gebündelten, laserähnlichen Röntgenstrahl. Dieser Prozess wiederholt sich mehrfach: nämlich jedes Mal, wenn das elektrische Feld des Lasers erneut seinen höchsten Wert erreicht, was während jedes Schwingungszyklus

Physiker stellen sich Elektronen (grün), die an ein Atom gebunden sind, als in einem »Potenzialtopf« (gestrichelt) gefangen vor: Die Teilchen können sich nicht eher vom Atom lösen, als bis sie genügend Energie erhalten, um die »Wände« des Topfs zu überwinden. Trifft ein Laserstrahl im nahen Infrarot (nicht dargestellt) auf das Atom, verbiegt sein elektrisches Feld die Wände (rot). Dank eines quantenmechanischen Effekts kann das Elektron durch die nun viel niedrigere Potenzialwand »hindurchtunneln«. Dann wird es zunächst vom Feld des Laserstrahls wegbeschleunigt. Nachdem sich die Feldrichtung geändert hat, fällt es wieder in den Topf, wobei Energie in Form eines Attosekundenpulses abgestrahlt wird.



BILDE: GRAFIKEN: BARBARA FERBUS, MPO



wichtige onlineadressen

- ▶ **Brainlogs**
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

- ▶ **Managementwissen**
per Fernlehre kostengünstig
ortsunabhängig erwerben
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter
www.cqa.de

- ▶ **Ingwer und Meerrettich**
zur wirkungsvollen Entzündungshemmung
bzw. Antibiose bei Pferd und Mensch
www.freenet-homepage.de/Brosig-Pferde-Ingwer/

- ▶ **Kernmechanik –**
von Kernspin bis Kosmologie,
von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

- ▶ **KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

- ▶ **WISSENSlogs**
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

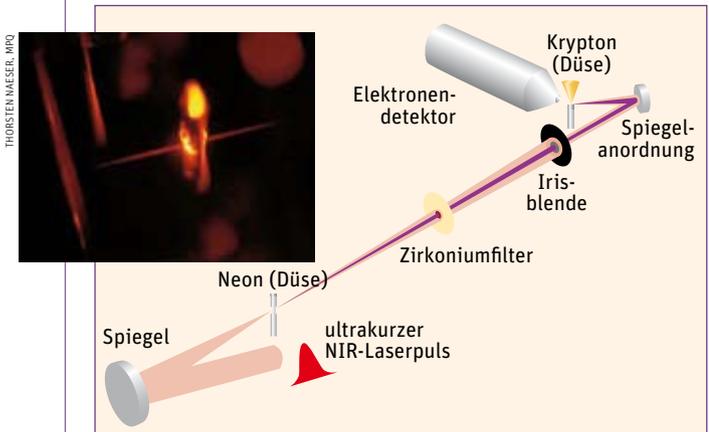
GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

DER EXPERIMENTELLE AUFBAU

Ein **Atomic Transient Recorder** basiert auf einem Nahinfrarot-Laser (NIR-Laser), der ultrakurze Pulse aussendet. Über einen Spiegel gelangen diese auf eine Probe des Edelgases Neon, wo sie Photonen («Hohe Harmonische») im extremen Ultraviolett

(XUV) oder im Röntgenbereich erzeugen. Ein Zirkoniumtransmissionsfilter sorgt dann dafür, dass sich im Inneren des austretenden kegelförmigen Strahls nur XUV-Strahlen, im äußeren nur Infrarotstrahlen befinden. Dank eines piezoelektrischen Mechanismus in der zweiteiligen Spiegelanordnung (rechts oben) lässt sich der Infrarotstrahl gegenüber dem XUV-Strahl kontrolliert verzögern. Derjenige Teil der Anordnung, der für die Reflexion der XUV-Strahlen verantwortlich ist, filtert zudem energieärmerere XUV-Pulse heraus und lässt nur die energiereichsten Harmonischen hindurch. Die Anrege-Abfrage-Prozesse in der Probe (ein Festkörper wie Wolfram oder ein Gas; in der Grafik strömt Krypton aus einer Düse) lassen sich schließlich mit Hilfe des Elektronendetektors vermessen.

Die Erzeugung Hoher Harmonischer findet in einer Düse statt, die oben verschlossen ist (orangegeletter «Propfen» im Foto) und in die von unten Neon strömt. Ein auf das Gas fokussierter Laserblitz (feiner roter Strahl, für die Farbe sorgt das Leuchten ionisierten Gases) durchbohrt die Düse und regt Gasatome an, Lichtblitze im Attosekundenbereich auszustrahlen.



Treffen viele Pulse in kurzer Zeit auf ein Material, stören sie die Messung – wir brauchen daher einzelne, isolierte Pulse

zweimal der Fall ist. Wir erhalten also einen »Zug« vieler kurz aufeinander folgender XUV-Pulse, die jeweils weniger als eine Femtosekunde dauern und einem Laserstrahl ähneln.

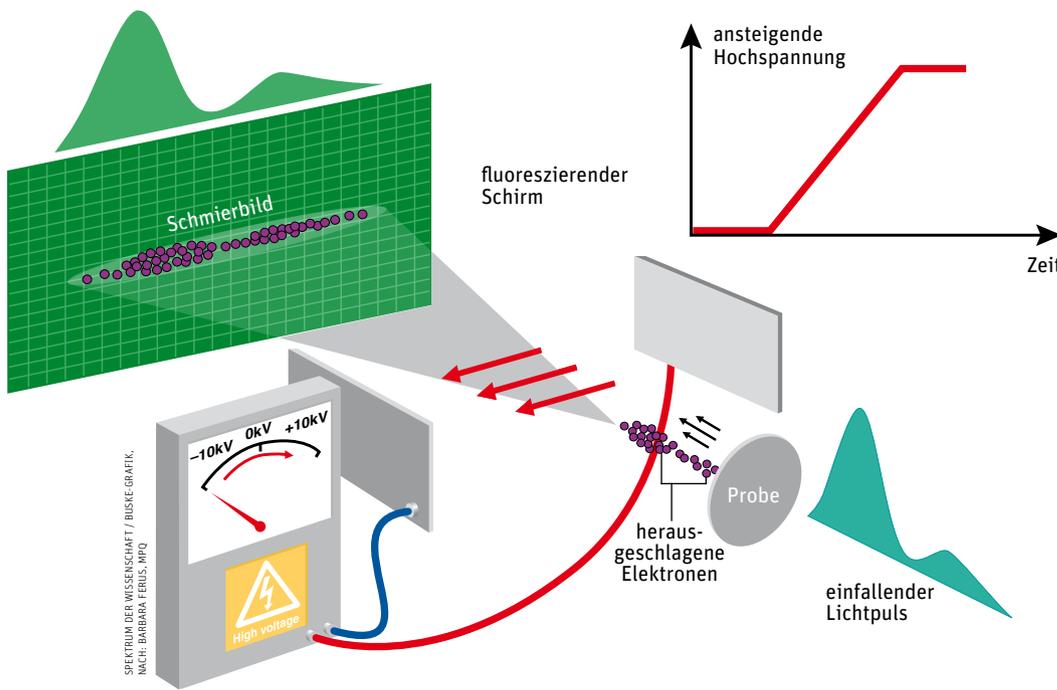
Für den Zweck der Untersuchung mikroskopischer Vorgänge ist ein solcher Strahl allerdings noch nicht geeignet. Treffen viele Pulse in kurzer Zeit auf ein Material, regen sie die uns interessierenden Prozesse während ihres Ablaufs immer wieder an oder stören sie auch, so dass sie sich nicht mehr eindeutig untersuchen lassen. Wir brauchen daher einzelne, isolierte Attosekundenpulse, um bestimmte elektronische Prozesse genau einmal auslösen und sie dann eindeutig nachweisen zu können. Das gelang uns erst mit einem »few-cycle«-NIR-Laser, dessen Pulse aus nur wenigen Schwingungszyklen bestehen (Bild S. 34). In ihnen ist die Amplitude der zentralen Schwingungsperiode im Vergleich zu den anderen deutlich größer, so dass sich mehr als die Hälfte der gesamten Pulsenergie darin konzentriert.

Diese extrem kurzen Lichtpulse mit einer Energie von rund einem Millijoule stammen aus Titan-Saphir-Lasern, die Licht mit einer Wellenlänge von rund 750 milliardstel Metern erzeugen, also im nahen Infrarot am Rand des sichtbaren Spektrums strahlen. Bei dieser Wellenlänge entsprechen 1,5 Zyklen einer Pulsdauer von rund 3,7 Femtosekunden. Ebenso wichtig für HHG ist eine konstante Wellenform der NIR-Laserpulse, wie wir sie erst auf Basis der von Theodor Hänsch entwickelten Frequenzkammtechnik erreichen konnten. Hänsch forscht wie wir beide am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und war für diese

Technik im Jahr 2005 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden (siehe »Von Sirius zum Laserkamm«, SdW 12/2005, S. 20).

Nun müssen wir noch die Harmonischen mit der höchsten Energie heraussortieren, denn nur sie sind geeignet, die gewünschten Prozesse in unserer Probe auszulösen. Die höchsten Harmonischen erzeugt der NIR-Laserpuls dann, wenn seine Amplitude gerade ihren größten Wert erreicht hat. Dann nämlich verfügen die freigesetzten Elektronen bei der Rückkehr zu ihrem Kern und der Kollision mit ihm über die höchste Energie. Wenn die Laserpulse tatsächlich nicht viel länger als 1,5 Zyklen sind, wachsen die energiereichsten Harmonischen bei etwa 100 Elektronvolt Photonenenergie zu einem spektralen Kontinuum zusammen. Aus der Fouriertheorie weiß man nun, dass dies ein eindeutiger Hinweis auf ein Einzelereignis ist. Oder anders ausgedrückt: Der Effekt zeigt, dass die an der Erzeugung dieser Hohen Harmonischen beteiligten Elektronen nur durch die einzelne, ausgeprägte Feldspitze beschleunigt wurden, die das elektrische Feld im Zentrum des NIR-Pulses aufwies.

Mit Hilfe von Spiegeln, die bestimmte Wellenlängen selektiv reflektieren, können wir die höchsten Harmonischen nun vom Rest der Strahlung, den energieärmeren Harmonischen, separieren. Wir erhalten dann isolierte XUV- beziehungsweise Röntgenpulse mit einer Dauer von nur noch 100 Attosekunden. Dafür war allerdings zunächst die Frage geeigneter Spiegel zu klären, denn Röntgenstrahlen werden beim Eindringen in Materie kaum gebrochen und daher auch schlecht reflektiert.



Ursprünglich dienten elektronenoptische Schmierbildkameras nur dazu, die Dauer kurzer Lichtblitze im Femtosekundenbereich zu messen. Dazu schlägt ein Lichtpuls aus einer Probe Elektronen, die durch ein elektrisches Feld (schwarze Pfeile) zu einem fluoreszierenden Schirm beschleunigt werden. Eine ansteigende und quer zur Flugrichtung angelegte Hochspannung (rote Pfeile) sorgt dann dafür, dass Elektronen umso stärker abgelenkt werden, je später sie diese passieren. Dadurch verteilen sich ihre Auftreffpunkte auf dem Schirm, sie »verschmieren«. Aus der Breite des Schmierbilds lassen sich schließlich Informationen über die Dauer des ursprünglichen Lichtpulses gewinnen.

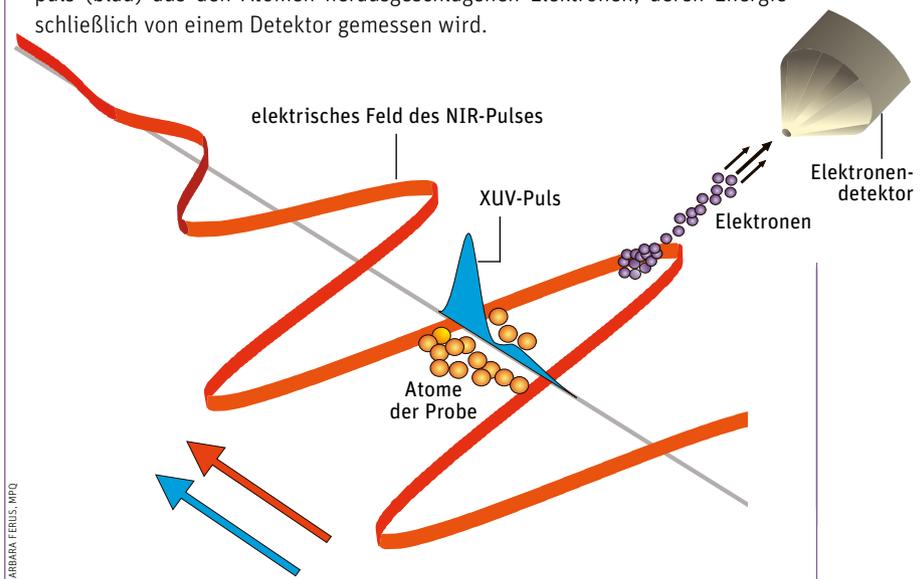
Doch glücklicherweise konnten wir auf hoch entwickelte Vielschichtspiegel zurückgreifen, die ursprünglich in der Halbleiterlithografie zum Einsatz kamen und immerhin eine Reflexivität von einigen Prozent besitzen. Diese Spiegel werfen Strahlen mit einer Wellenlänge um 13 Nanometer zurück, also im Bereich der sehr weichen Röntgenstrahlung. Je kürzer ein Puls, desto breiter ist allerdings sein Spektrum (auch dies eine Konsequenz aus der Fouriertheorie). Er setzt sich also aus Wellenlängen deutlich größerer beziehungsweise kleinerer Energie zusammen. Dem entspricht, dass die Bandbreite unserer Spiegel bei bis zu 30 Elektronvolt liegt, sie reflektieren daher auch Photonen entsprechend höherer beziehungsweise niedrigerer Energie. Entwickelt wurden diese speziellen Vielschichtspiegel von unseren Kollegen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik Michael Hofstetter und Ulf Kleineberg.

Nun verfügen wir also endlich über energiereiche, isolierte und ultrakurze XUV-Attosekundenpulse. Zwar erfolgen noch immer etwa 4000 Pulse pro Sekunde, aber da wir ein Zeitfenster von nur rund zehn Femtosekunden betrachten und dort Prozesse auf der Attosekundenskala untersuchen, sind sie für unsere Zwecke ausreichend »isoliert«. Um mit diesen Pulsen die Elektronendynamik in einem Festkörper zu vermessen, müssen wir sie als Anregepulse auf eine Probe lenken, um dort kontrolliert elektronische Prozesse auszulösen. Als Abfragepuls wird der verbleibende NIR-Puls verwendet, denn weil er die XUV-Pulse selbst erzeugt hat, ist er perfekt mit ih-

nen synchronisiert. Die entsprechenden experimentellen Aufbauten werden als *Atomic Transient Recorder* bezeichnet (übersetzt etwa: Aufzeichnung energetischer Übergangsprozesse in Atomen, siehe Kästen auf dieser Doppelseite). Es handelt sich dabei um das derzeit einzige Verfahren, mit dessen Hilfe sich die

ELEKTRONISCHE PROZESSE IN ECHTZEIT MESSEN

Ein *Atomic Transient Recorder* erweitert das Prinzip der Schmierbildkamera (Grafik oben). Er misst nicht nur die Dauer von Ultrakurzpulsen, sondern untersucht auch elektronische Prozesse mit höchster Zeitauflösung. Das Feld von oszillierenden Infrarotlaserstrahlen (rot) sorgt dabei für die zeitveränderliche Hochspannung. Es beschleunigt (oder bremst) die durch einen Attosekundenpuls (blau) aus den Atomen herausgeschlagenen Elektronen, deren Energie schließlich von einem Detektor gemessen wird.



zeitlichen Abläufe attosekundenschneller Elektronenprozesse in Echtzeit beobachten lassen. Damit können wir nicht nur die äußeren Elektronen eines Atoms auf ihr Verhalten im Attosekundenbereich untersuchen, sondern sogar jene, die näher am Kern liegen und daher stärker gebunden sind.

Wie gehen wir nun genau vor? Zunächst generiert ein ultrakurzer »few-cycle«-NIR-Laserpuls den XUV-Strahl, der – parallel zum Laserstrahl – den Attosekundenpuls trägt (Kasten S. 36). Auf parallelem Weg bewegen sich beide Strahlen dann auf eine zweiteilige Spiegelanordnung zu, die sie umlenkt und in Richtung der Probe fokussiert. Je ein Spiegel ist dabei für den NIR-Laserstrahl beziehungsweise die XUV-Pulse zuständig. Außerdem dient die Anordnung dazu, nur die Attosekundenpulse aus dem hochenergetischen Kontinuum herauszufiltern und weiterzuleiten.

Anschließend dringen die XUV-Pulse in die Probe ein und schlagen dort Elektronen aus ihren Atomen heraus. Geschieht dies in den obersten Atomsschichten der Probe, schaffen es die meisten der Partikel, sich durch sie hindurchzubewegen, ohne bei Kollisionen mit anderen Atomen Energie zu verlieren. Genau in dem Moment, in dem sie schließlich die Oberfläche der Probe verlassen, bekommen sie auch das Feld des Abfragelasers zu spüren. Sie erhalten also nicht nur Energie durch die XUV-Photonen, sondern werden kurz darauf zusätzlich beschleunigt oder abgebremst.

Blick in die Elektronenhülle

Misst man ihre Energie nun in einem Elektronendetektor, erhält man ein »Schmierbild« (Bild S. 37 oben). Dieses altbekannte Konzept wurde bis vor Kurzem lediglich zur Messung der Dauer kurzer Lichtblitze, allerdings im Pikosekundenbereich (10^{-12} Sekunden), verwendet. Dabei schlägt ein Lichtblitz Elektronen aus einer Metallplatte heraus, die anschließend durch ein statisches elektrisches Feld in Richtung eines fluoreszierenden Schirms beschleunigt werden. Bevor sie dort einschlagen, werden sie von einem weiteren Feld seitlich abgelenkt, dessen Stärke mit der Zeit zunimmt. Je später die Elektronen dieses Feld durchqueren, desto stärker ist also ihre Ablenkung. Weil die Breite des Schmierbilds mit der Zeit korrespondiert, während derer Elektronen aus der Metallplatte freigesetzt wurden, gibt sie Auskunft über die Dauer des Lichtblitzes.

Unsere Neuerung, die wir ab 2001 eingeführt, bestand nun zum einen darin, dass wir das zeitveränderliche Feld durch das elektrische Feld des NIR-Lasers ersetzen. Der Zeitraum, in dem der Attosekundenpuls Elektronen aus der Probe herausschlägt, passt dabei in einen halben Schwingungszyklus des Laserlichts. Außerdem verwenden wir statt eines fluoreszierenden Schirms, auf dem sich die Elektronen räumlich verteilen, einen Detektor, der die Energie der eintreffenden Elektronen misst. Unser Schmierbild zeigt also keine räumlich verschmierten Auftreffpunkte, sondern eine verschmierte Energieverteilung.

Ziel ist es nun, eine ganze Serie solcher Schmierbilder aufzunehmen. Dabei verschieben wir den Attosekundenpuls von Bild zu Bild zeitlich ein wenig gegen den Laserpuls, indem wir den entsprechenden Spiegel mittels eines piezoelektrischen Elements nanometergenau vor- oder zurückbewegen. Daher spüren die Elektronen zu dem Zeitpunkt, zu dem sie aus der Probe austreten, jeweils einen anderen Wert des Laserfelds und erhalten entsprechend weniger oder mehr Energie.

ELEKTRONENTRANSPORT IM FESTKÖRPER

Das Prinzip des Experiments, das den Elektronentransport in einem Festkörperkristall in Echtzeit beobachten hilft, zeigen diese Abbildungen. Ein NIR-Puls (rot) und ein XUV-Puls (lila) fallen auf einen Wolframkristall. Während der Laserpuls an dessen Oberfläche reflektiert wird, dringt der XUV-Puls in den Kristall ein (a) und setzt dort Leitungselektronen sowie stark an den Atomkern gebundene Rumpfelektronen frei (b). Die schnelleren Leitungselektronen verlassen die Probe zuerst und »spüren« an deren Oberfläche das NIR-Feld (c). Weil das Feld oszilliert, spüren später austretende Elektronen eine andere (in diesem Fall geringere) Feldstärke und werden entsprechend langsamer zum Flugzeitdetektor beschleunigt (d). Aus dessen Messungen lässt sich schließlich die Zeitdifferenz zwischen der Ankunft schneller und langsamer Elektronen mit Attosekundengenauigkeit bestimmen.

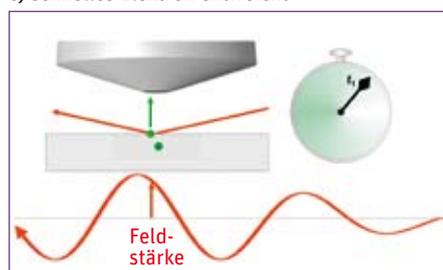
a) experimentelle Anordnung



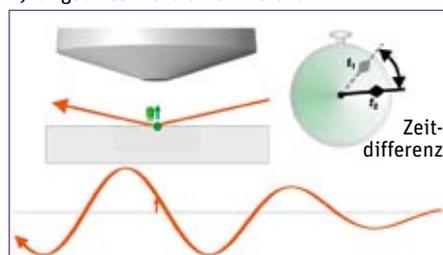
b) vom XUV-Puls freigesetzte Elektronen



c) schnelles Elektron entweicht



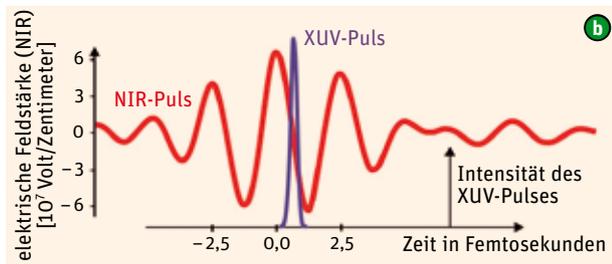
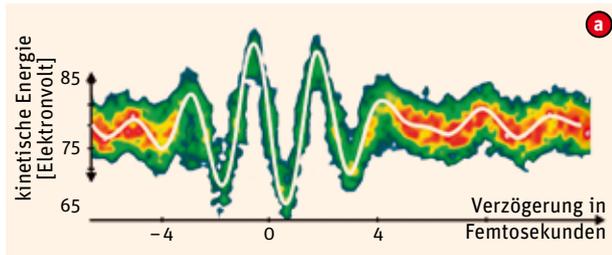
d) langsames Elektron entweicht



BARBARA FERLUS, MPIQ

DIE INTERPRETATION DER DATEN

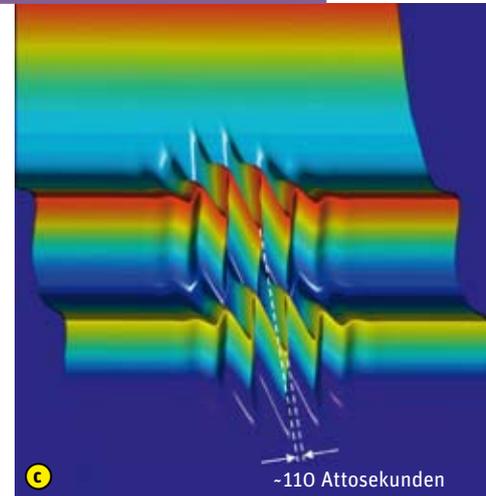
Dieses mit einem *Atomic Transient Recorder* aufgenommene Spektrogramm (a) ist Ergebnis zahlreicher Messungen mit unterschiedlich eingestellten Verzögerungen (x-Achse) zwischen XUV- und NIR-Pulsen. Auf der y-Achse ist die Energie der im Detektor eintreffenden Elektronen aufgetragen. Gemittelt ergibt sich die weiße Linie. Sie zeigt an, wie stark die Elektronen das NIR-Feld (genauer: sein Vektorpotenzial) spüren. Daraus lässt



sich die tatsächliche elektrische Stärke des NIR-Felds ermitteln (rote Linie, b). Am ebenfalls eingezeichneten XUV-Puls (lila, ohne Einheiten) kann man erkennen, wie seine Intensität zeitlich zum NIR-Puls liegt.

Untersucht man den Elektronentransport in einem Festkörper, erscheint in dem Spektrogramm auch ein Wellenzug für Elektronen geringerer kinetischer Energie, nämlich Rumpfelektronen, bei denen mehr Energie in Ablösung vom Atomkern investiert werden musste. Weil diese Elektronen das NIR-Feld später spüren, verschiebt sich die aus dem Spektrogramm ermittelte Stärke des NIR-Felds (wie sie in b zu sehen wäre) zeitlich entsprechend. Die Verschiebung entspricht dem gesuchten Laufzeitunterschied zwischen Rumpfelektronen und Leitungsbandelektronen.

c zeigt diesen Sachverhalt in drei Dimensionen. Dafür wurde b sowohl für Rumpf- als auch für Leitungsbandelektronen ermittelt. Als dritte Dimension fügten die Forscher die Zahl der jeweils gemessenen Elektronen hinzu.



BARBARA FERUS, MPQ

Die einzelnen Schmierbilder kann man schließlich zu einem Spektrogramm zusammensetzen (a in Grafik oben), das die Bewegungsenergie der Elektronen in Abhängigkeit von der zeitlichen Verschiebung zwischen Anrege- und Abfragepuls darstellt. Aus diesem Spektrogramm lassen sich zahlreiche Informationen ablesen. Neben den gesuchten Charakteristika der emittierten Elektronen können wir sogar auf die Wellenform des Infrarotlasers und die Dauer des Attosekundenpulses rückschließen und so die experimentellen Bedingungen überprüfen.

Mit diesem Verfahren haben wir ein weites Anwendungsfeld eröffnet. Blickt man in die Elektronenhülle um ein Atom, wird sehr schnell deren komplexe dynamische Struktur offensichtlich. Sehr viele Prozesse laufen gleichzeitig oder in Konkurrenz zueinander ab. Ein einfacher und typischer Fall ist ein Elektron, das sein Atom verlässt, nachdem es die Energie eines einfallenden Photons übernommen hat. Es kommt aber auch zu komplizierteren Situationen. So kann etwa das herausgeschlagene Elektron einen Teil seiner vom Photon erhaltenen Energie an ein weiteres Hüllenelektron abgeben, bevor es das Atom verlässt. Ebenso ist es möglich, dass ein Photon ein Elektron herausschlägt und die entstehende Lücke von einem anderen Elektron gefüllt wird – dabei

wird ebenfalls Energie frei, die ein drittes Elektron vom Atom lösen kann. Die Liste der Möglichkeiten ist lang, und nur die Attosekundenphysik gibt uns die Instrumente in die Hand, sie einzeln zu untersuchen.

Ein Beispiel ist die Frage nach der Population angeregter, elektronischer Zustände in Gasatomen. Erzeugen können wir eine solche Population über einen *shake-up*-Prozess, also einen energiereichen Puls, der Elektronen aus ihren Atomen schlägt. Dabei ist der Fall interessant, in dem ein Teil der Energie auf ein weiteres Elektron übergeht und dieses anregt. Blicke Letzteres im Grundzustand, könnten wir es mit einem Laser im relativ energiearmen nahen Infrarot nicht vom Atom lösen. Nun aber reichen die elektrischen Feldspitzen des Laserpulses aus, um seine Bindung weiter zu schwächen und ihm das Tunneln zu erlauben. (Gegenüber dem schon beschriebenen Anrege-Abfrage-Verfahren ist die Rolle der jeweiligen Strahlung hier übrigens vertauscht: Die energiereichen XUV-Pulse sorgen für die Anregung, den *shake up*, während der NIR-Laser für die Abfrage verantwortlich ist.)

Jedes Mal, wenn ein angeregtes Elektron davontunneln kann, erhöht sich nun der Ionisationsgrad der Gasatome. Diesen können wir messen, und zwar in Abhängigkeit von der Höhe der jeweils herrschenden Feldstärke. Da-



Ferenc Krausz (links) gehört zu den weltweit führenden Experimentatoren auf dem Gebiet der Attosekundenphysik. 2001 gelang ihm erstmals die Erzeugung von Röntgenpulsen, die kürzer waren als eine Femtosekunde. Der Ungar ist Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching und hat den Lehrstuhl für Experimentalphysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München inne. Mit dem Leibniz-Preis des Jahres 2006 wurde ihm die wichtigste wissenschaftliche Auszeichnung Deutschlands verliehen.

Reinhard Kienberger ist Professor für Experimentalphysik an der Technischen Universität München und leitet am MPQ die »Selbstständige Nachwuchsgruppe Attosekundendynamik« und die Experimente zur Attosekundenphysik. Er erhielt 2006 den mit rund einer Million Euro dotierten Sofja-Kovalevskaja-Preis der Alexander von Humboldt-Stiftung und 2008 den prestigeträchtigen »Starting Grant« des European Research Council.

Cavalieri, A. L. et al.: Intense 1.5-Cycle Near Infrared Laser Waveforms and their Use for the Generation of Ultrabroad-Band Soft-X-Ray Harmonic Continua. In: *New Journal of Physics* 9, S. 242, Juli 2007.

Cavalieri, A. L. et al.: Attosecond Spectroscopy in Condensed Matter, *Nature* 449, S. 1029–1032, 2007.

Goulielmakis, E. et al.: Single-Cycle Nonlinear Optics. In: *Science* 320, S. 1614–1617, 2008.

Goulielmakis, E. et al.: Attosecond Control and Measurement: Light-wave Electronics. In: *Science* 317, S. 769–775, 2007 (im Rahmen einer »Special Section: Attosecond Spectroscopy«).

Kienberger, R. et al.: Atomic Transient Recorder. In: *Nature* 427, S. 817–821, 2004.

Uiberacker, M. et al.: Attosecond Real-Time Observation of Electron Tunnelling in Atoms. In: *Nature* 446, S. 627–632, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974633.

bei zeigt sich: Der Ionisationsgrad steigt stufenartig an, und zwar immer dann, wenn das elektrische Feld des Laserpulses einen Extremwert erreicht. Damit konnten wir 2007 die schon vor rund 50 Jahren aufgestellte Theorie, dass der Tunneleffekt für die Ionisierung bei Bestrahlung mit Lasern verantwortlich sei, erstmals experimentell nachweisen. Außerdem erhielten wir Informationen über die Zeitdauer dieses Vorgangs, denn je steiler der Übergang von einer Stufe zur nächsten, desto schneller gehen die involvierten Prozesse vonstatten. Für die Dauer beider Prozesse zusammengenommen – sowohl *shake up* als auch Tunnelionisation – konnten wir so eine Obergrenze von weniger als 400 Attosekunden ermitteln.

Präziser »Kick«

Nicht nur dieses Experiment zeigt, dass die Attosekundenphysik den Kinderschuhen bereits entwachsen ist. Längst geht es nicht mehr nur darum, geeignete Ultrakurzpulsquellen zu entwickeln, sondern wir sind bereits in der Lage, inneratomare Prozesse, die sich auf einer Zeitskala von unter einer Femtosekunde abspielen, zeitlich aufzulösen. Kürzlich gelang uns mit Kollegen von der Universität Bielefeld, die Attosekundenmesstechnik auf die Untersuchung von Festkörperprozessen auszuweiten. Mit Hilfe der *Atomic-Transient-Recorder*-Technologie beobachteten wir in Echtzeit, wie Elektronen mehrere atomare Schichten eines Wolframkristalls durchquerten (Kasten S. 38). Dazu feuerten wir 300 Attosekunden lange XUV-Pulse gemeinsam mit einem NIR-Laserpuls auf die Oberfläche des Kristalls. Der Attosekundenpuls drang in den Kristall ein und schlug Elektronen aus ihren Atomen. Dies waren zum einen leicht gebundene Leitungsbandelektronen, wie sie in Festkörpern für die Leitung von Strömen verantwortlich sind. Weil der XUV-Puls so energiereich war, schlug er zum anderen auch Rumpfelektronen heraus, solche also, die weiter innen im Atom lokalisiert und entsprechend stärker an den Kern gebunden sind. Treten sie nun an der Kristalloberfläche aus, besitzen sie die Energie, die sie vom XUV-Photon erhalten hatten, abzüglich der Energie, die nötig war, um sie aus der Bindung an ihr Atom zu lösen. Weil die ursprünglich stärker gebundenen Rumpfelektronen eine höhere Bindungsenergie überwinden mussten, sind sie aber energieärmer als ihre Pendanten aus dem Leitungsband.

Indem wir die Energieverteilung der schnelleren Leitungsband- und der langsameren Rumpfelektronen vermessen, können wir ihre Ankunftszeit an der Oberfläche bestimmen. Das oszillierende Laserfeld funktioniert dabei wie eine Stoppuhr mit Attosekun-

denauflösung: Zu jedem Zeitpunkt prägt es den Elektronen eine unterschiedliche Geschwindigkeit, einen »Kick«, auf. Je nachdem, wann sie aus der Oberfläche austreten, erhalten sie also einen stärkeren oder schwächeren Kick (Kasten S. 38).

Das Spektrogramm (Kasten S. 39) zeigt die beiden mit dem *Atomic Transient Recorder* gemessenen und nachbearbeiteten Spektrogramme der Leitungsband- und Rumpfelektronen aus der Wolframprobe. Eine sorgfältige Analyse ergab, dass die energiereicheren Elektronen etwa 100 Attosekunden vor den Rumpfelektronen an der Oberfläche des Kristalls ankommen. Die Verzögerung deutet darauf hin, dass sich die freigesetzten Leitungsbandelektronen doppelt so schnell wie die Elektronen bewegen, die nahe dem Atomkern lokalisiert waren – eine Erkenntnis, die sich auch mit theoretischen Vorhersagen deckt.

Zwar stehen wir auch heute noch erst am Beginn der Attosekundenphysik. Doch mit diesem Experiment haben wir bewiesen, dass wir in der Lage sind, ultraschnelle elektronische Prozesse in Festkörpern präzise zu messen. Schon jetzt können wir den Ladungstransport durch atomare Schichten in Echtzeit mit Attosekundenauflösung verfolgen, und bald wird auch die Untersuchung vieler weiterer subatomarer Vorgänge hinzukommen. Relaxationsprozesse, bei denen Atome und Moleküle von angeregten energetischen Zuständen in Zustände mit niedrigerer Energie zurückfallen, gehören dazu ebenso wie Wechselwirkungen zwischen gebundenen Elektronen. Auch die Dynamik von Valenzelektronen, die in Festkörpern für die Anziehung zwischen den Atomen und Molekülen verantwortlich sind, ist natürlich von großem Interesse.

Die Entwicklung der Attosekundentechnologie schreitet inzwischen in rasantem Tempo voran. Die unlängst, nämlich Mitte 2008, erzeugten XUV-Pulse mit einer Dauer von 80 Attosekunden lassen inneratomare Elektronenbewegungen erstmals auf der Zeitskala der atomaren Zeiteinheit (rund 24 Attosekunden) beobachten und enthüllen dadurch die Wechselwirkung von Elektronen innerhalb von Atomen und Molekülen.

Die Echtzeitbeobachtung elektronischer Prozesse und deren Kontrolle mit Licht wird nicht nur grundlegende neue Einblicke in die Vorgänge im Mikrokosmos und deren Auswirkungen auf die makroskopische Welt (sogar auf die Entstehung von Krankheiten) gewähren, sondern könnte sogar den Fortschritt der technischen Entwicklung bestimmen, indem sie der Mikroelektronik zu Geschwindigkeiten verhilft, die heutige Standards um mehrere Größenordnungen übertrifft. ◀