

# Schalten mit Lichtblitzen

Die elektronische Signalverarbeitung wird immer schneller. Bei der Weiterentwicklung der nötigen Bauteile stoßen Ingenieure jedoch allmählich an die Grenzen des technisch Machbaren. Einen möglichen Ausweg bieten ultrakurze Laserpulse.

Von Martin Schultze und Ferenc Krausz

**E**in kleines elektrisches Bauteil führte Mitte des 20. Jahrhunderts zu einer technischen Revolution: Der Feldeffekttransistor erlaubte es fortan, Strom relativ einfach zu beeinflussen und begründete so unsere moderne Datenverarbeitung und Kommunikation.

Heute enthält der Prozessor eines Smartphones rund eine Milliarde dieser Transistoren. Jeder von ihnen ist nur etwa 20 Nanometer groß – kleiner noch als viele Viren. Doch die stetige Miniaturisierung der Schaltkreise wird bald an physikalische Grenzen stoßen. Brauchen wir also eine neue Revolution?

Das Funktionsprinzip ist seit den ersten Feldeffekttransistoren im Wesentlichen gleich geblieben. Das Bauteil besteht aus Halbleitern, in denen Strom normalerweise nicht fließt. Erst eine kleine angelegte Spannung »legt den Schalter um« und macht das Material leitfähig für elektrischen Strom.

Der Gedanke, der dieses Prinzip revolutionieren könnte: Obwohl die Bauelemente nicht unbegrenzt verkleinert werden können, ließen sich Schaltvorgänge dennoch radikal beschleunigen – mit Hilfe von Lichtwellen. Statt konventionell angelegter Spannungen könnten die elektrischen Felder von Laserblitzen Ströme durch die Schaltkreise fließen lassen und dabei wesentlich schnellere Geschwindigkeiten erlau-

ben. Ließe sich ein Transistor mit dem Feld eines Laserpulses steuern, wie sie heute etwa bereits in Medizin und Materialbearbeitung eingesetzt werden, wären diese Vorgänge innerhalb von Femtosekunden (Millionstel einer Milliardstel Sekunde) möglich und damit noch viele tausende Male schneller als die Schaltzyklen bei den besten herkömmlichen Transistoren.

Tatsächlich fanden wir ein Material – Quarz –, dessen Leitfähigkeit wir mit einem solchen ultrakurzen Laserpuls, in dem das elektrische Feld kaum mehr als eine Schwingung ausführt, an- und wieder ausschalten konnten. Diese am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) erzeugten Impulse ermöglichten uns zudem, die Dynamik dieser Schaltprozesse im Verlauf des Lichtblitzes zu verstehen.

Um diese Effekte nicht nur auszulösen, sondern auch im Detail zu untersuchen, mussten wir sie jedoch noch wesentlich feiner abtasten, die femtosekundenschnellen Prozesse also in noch kleinere Zeitintervalle zerlegen. Dazu benutzten wir Techniken aus der Attosekundenphysik, die ihre Entwicklung vor mittlerweile mehr als zehn Jahren begann. Im Vergleich zu Experimenten mit Femtosekundenlasern können wir noch einmal tausendfach schnellere Vorgänge im Bereich von milliardstel Milliardstel Sekunden zu beobachten (siehe »Elektronenjagd mit Attosekundenblitzen«, SdW 2/2009, S. 32).

## AUF EINEN BLICK

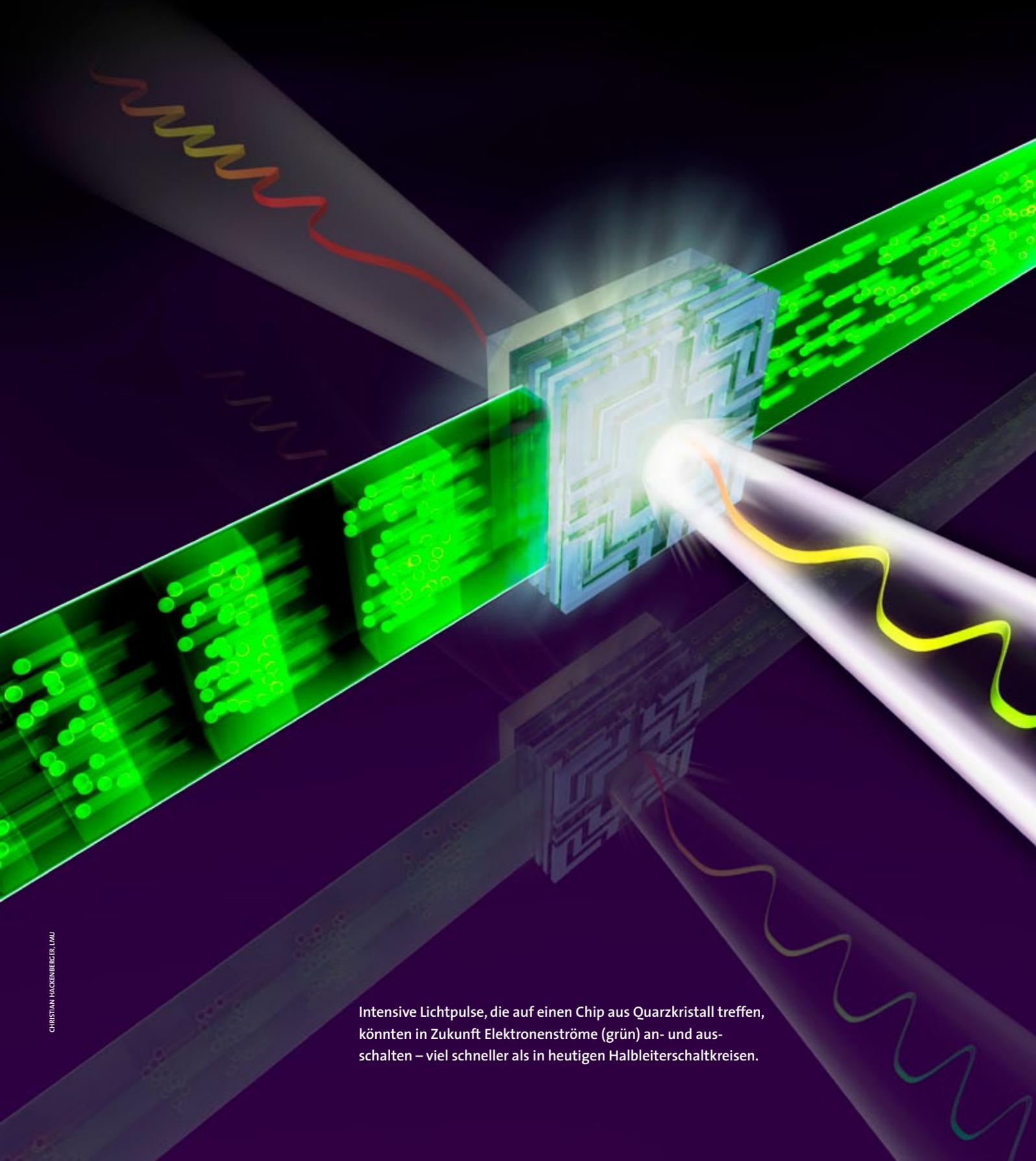
### EINE GANZ NEUE ELEKTRONIK

- 1** Im starken Feld intensiver Laserpulse können Nichtleiter (Dielektrika) **elektrischen Strom** transportieren.
- 2** Der Effekt ist vergleichbar mit den **Vorgängen** in Halbleitertransistoren beim Anlegen einer Spannung – allerdings **vieltausendfach schneller**.
- 3** Auf die Spur kamen die Forscher diesem Effekt dank **ultrakurzer Laser- und Röntgenpulse** aus der Trickkiste der Attosekundenphysik.

### Ein höchst ungewöhnlicher Laser

Seit etwa 20 Jahren können Physiker mit speziellen Lasern einzelne Impulse erzeugen, die nur einige Femtosekunden lang sind und nur wenige Schwingungen des elektrischen Feldes dauern. Viele ihrer Eigenschaften unterscheiden sich von denen herkömmlicher Laser. Der augenfälligste Unterschied ist, dass sie als weißes Licht erscheinen, da ihr Spektrum aus vielen verschiedenen Frequenzen, also Farben, zusammengesetzt ist.

Daher können die Lichtblitze auch unfassbar kurz sein, denn die mögliche zeitliche und die spektrale Breite eines Si-



Intensive Lichtpulse, die auf einen Chip aus Quarzkristall treffen, könnten in Zukunft Elektronenströme (grün) an- und ausschalten – viel schneller als in heutigen Halbleiterschaltkreisen.

gnals sind miteinander verknüpft. Die Abstände zwischen den einzelnen Impulsen sind im Vergleich dazu scheinbar endlos. Die Laser erzeugen im Lauf einer Sekunde einige tausend Lichtpulse von wenigen Femtosekunden Dauer. Wäre ein solcher Kurzpuls laser 100 Jahre lang Tag und Nacht in Betrieb, so hätte er in diesem Zeitraum zusammengenommen lediglich eine tausendstel Sekunde lang Licht ausgesendet.

Solche Laserpulse wollten wir einerseits verwenden, um die Eigenschaften der untersuchten Materialien gezielt zu verändern. Andererseits konnten wir mit ihrer Hilfe zugleich die im Material ausgelösten Prozesse studieren – über den Umweg der Erzeugung von Attosekundenimpulsen. Dabei regt ein Femtosekunden-Lichtpuls Elektronen in Atomhüllen an, die daraufhin Röntgenstrahlung aussenden (siehe Kasten »Der Trick hinter den Röntgenblitzen« unten).

Diese Blitze aus Röntgenlicht dauern nur etwa 70 Attosekunden. Sie sind die kürzesten Signale, die heute technisch erzeugt werden können. Mit ihnen lassen sich sogar die Bewegungen von Elektronen im Inneren von Atomen und Molekülen in Echtzeit abbilden und – wie in unserer Studie – die Elektronendynamik in Festkörpern verfolgen. Da die Röntgenblitze ausgehend von den Laserimpulsen erzeugt werden, haben sie eine ideale Form für Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung: Röntgen- und Lichtblitz sind ein perfekt synchronisiertes Paar von Pulsen, deren zeitliche Abfolge sich sehr genau einstellen lässt.

Dadurch wird die so genannte Anrege-Abfrage-Technik möglich. Sie dient dazu, Vorgänge zu erfassen, die sich wegen ihrer Geschwindigkeit der Untersuchung mit anderen Methoden entziehen – bei unseren Experimenten also die extrem schnellen Bewegungen von Elektronen in Festkörpern.

Bei diesem Vorgehen regt ein erster Laserimpuls Elektronen im untersuchten Material an. Dann tastet ein nach einer

vorgegebenen Zeitverzögerung eingestrahler Attosekunden-Röntgenpuls die vom ersten Lichtblitz ausgelöste Entwicklung ab. Begrenzt wird die Zeitauflösung dieser Methode nur durch zwei Aspekte: erstens die Röntgenpulsdauer und zweitens die kleinstmögliche Schrittweite dabei, die Zeitverzögerung zwischen beiden Impulsen zu ändern. Beide liegen heute im Bereich von wenigen zehn Attosekunden. Durch wiederholte Messungen mit immer anderem Zeitunterschied wird der zu untersuchende Effekt allmählich abgetastet. So entsteht gewissermaßen Bild für Bild ein Film des Vorgangs. Das kann Prozesse sichtbar machen, die nur wenige Attosekunden dauern.

Attosekundenblitze eignen sich also ideal, um zu untersuchen, wie sich die Elektronen in einem Festkörper verhalten, nachdem sie das intensive elektrische Feld eines Kurzpuls lasers getroffen hat und sind damit das perfekte Werkzeug, um unsere Frage zu beantworten: Können wir in einem geeigneten Material lichtgetriebene Schaltprozesse erreichen?

### Eingespernte Elektronen

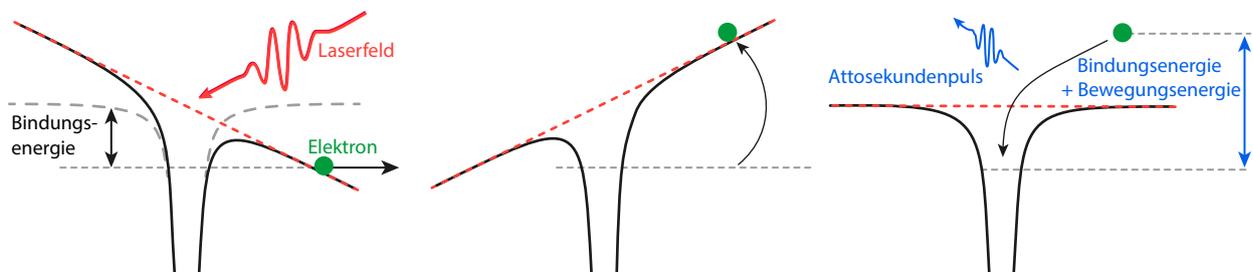
Atome sind in kristallinen Festkörpern in Form eines dreidimensionalen Gitters angeordnet. Sie teilen sich einige der an sie gebundenen Elektronen und werden zu positiv geladenen Rumpfatomen. Bewegt sich ein Elektron durch dieses Gitter, üben die Rumpfatome und die anderen Elektronen eine Kraft auf es aus. Diese verändert sich räumlich periodisch und führt letztlich dazu, dass sich das Elektron nur noch mit bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeiten bewegen und daher nur ausgewählte Energien besitzen kann. Diese Energien sind in so genannten Bändern sortiert. Sie bilden die Bandstruktur des Festkörpers.

Im Gegensatz zu Metallen weisen Halb- und Nichtleiter (Dielektrika) eine »Bandlücke« auf. Das bedeutet, dass zwi-

## Der Trick hinter den Röntgenblitzen

**Mit Femtosekundenlasern erzeugen** Physiker in einem dreistufigen Prozess ultrakurze Röntgenblitze: Trifft der Lichtimpuls auf ein Edelgasatom, verformt das elektrische Feld des Laserlichts (rot) kurzzeitig die Wände des so genannten Potenzialtopfs (graue gestrichelte Linie), der die Elektronen im Ausgangszustand an den Atomkern bindet (links). Daraufhin kann das Elektron den Bereich des anziehenden Atompotenzials ver-

lassen. Es ist nun frei und wird vom elektrischen Feld des Laserpulses beschleunigt. Nach einer halben Schwingungsperiode kehrt dieses Feld sein Vorzeichen um (Mitte). Das Elektron wird zurück zum Atomkern geschleudert und nimmt seinen ursprünglichen Zustand im Potenzialtopf wieder ein (rechts). Die überschüssige Bewegungsenergie strahlt es als Röntgenphoton (blau) ab.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MARTIN SCHULTZE UND FERENC KRAUSZ



Durch ein Röhrchen lassen Forscher im Max-Planck-Institut für Quantenoptik Edelgas in eine Experimentierkammer strömen, auf das sie intensive Pulse aus Laserlicht schießen. So regen sie die Atome im Gas an und erzeugen unsichtbare Röntgenblitze. Diese sind derart kurz, dass die Physiker mit ihnen sogar die Bewegungen von Elektronen in Atomen, Molekülen oder Festkörpern untersuchen können.

schen den Energiezuständen, die Elektronen im Kristall ohne äußere Einwirkung einnehmen («Valenzband») und den Zuständen, in die eine Anregung sie versetzen kann («Leitungsband») ein Energieunterschied besteht. Erst ein Einfluss, der ausreichend Energie auf die Elektronen überträgt, um sie in das Leitungsband zu befördern, macht das Material durchlässig für elektrischen Strom.

Denn: Wie leitfähig das Material ist, hängt von der Anzahl der Elektronen im Leitungsband ab. Beim Feldeffekttransistor regt eine äußerlich angelegte Spannung die Elektronen in dieses Energieband an. Mit ihr lässt sich die Ladungsträgerkonzentration im Leitungsband steuern und damit die Leitfähigkeit des Transistors an- und ausschalten. Verbessern lässt sich die Schaltgeschwindigkeit durch höhere Reinheit des Materials und kleinere Strukturen. Erstere macht den ungehinderten Transport von Elektronen möglich. Letztere verringern die Anzahl der Ladungsträger, die angeregt werden müssen, um die Leitfähigkeit zu verändern. Dank immer besserer Herstellungsverfahren hochreiner Kristalle und immer kleineren Strukturgrößen erreichten Ingenieure im Lauf der Jahrzehnte mit diesen Transistoren bereits enorme Schaltgeschwindigkeiten. In Forschungslaboren ist es heute sogar möglich, Strukturen im Bereich von zehn Nanometern herzustellen. Die schnellsten Rechenfrequenzen in solchen Schaltkreisen erreichen dabei unter Laborbedingungen mehr als 100 Milliarden Schaltungen pro Sekunde – das entspricht einer Schaltzeit von 10 000 Femtosekunden.

### Die Grenzen der herkömmlichen Technologien

Die Schaltgeschwindigkeit auf diesem Weg weiterzuschleunigen, erweist sich aber aus mehreren Gründen als problematisch. Die Schaltkreise fortgesetzt zu verkleinern, bedeutet nicht nur wegen der Komplexität der Herstellung

eine Herausforderung. In Strukturen, die nur noch wenige Nanometer groß sind, wirken sich zunehmend die Quanteneigenschaften der Elektronen aus. Werden die Ladungsträger räumlich stark eingeschränkt, führt das zur Aufspaltung der erlaubten Energiezustände, und die Bewegung der Elektronen hängt fortan wesentlich von diesen neuen Zuständen ab. Ein simples Bändermodell, das die Ladungsträger nur kollektiv berücksichtigt, reicht dann nicht mehr aus, um das elektronische Verhalten der Bauelemente zu beschreiben. Wissenschaftlich ist es zwar interessant, solche Strukturgrößen zu erreichen und die veränderte Energielandschaft der Elektronen zu studieren. Technisch wäre es jedoch sehr schwierig, sie dann auch weiterhin für die Signalverarbeitung einzusetzen. Dies könnte zum Ende der als Mooresches Gesetz bekannt gewordenen Erfahrung führen, nach der sich die Anzahl von Schaltelementen in kommerziellen Chips etwa alle zwei Jahre verdoppelt.

Zudem sind die Elektronen in stets kleiner werdenden Halbleiterstrukturen durch die angelegten Spannungen immer größeren Kräften ausgesetzt. Diese können den Bindungskräften zwischen den Atomen nahe kommen und das Bauteil selbst stark beeinflussen. Ohne das Material dabei zu zerstören, sind solche Bedingungen selbst im Labor nur sehr schwer zu handhaben.

### Energiepakete aus Licht

Dieser Umstand war ein Ansatzpunkt für unsere Experimente mit KurzpulsLasern, welche die abgestrahlte Energie in enorm kleine Zeitintervalle zwingen. Denn das hat eine wesentliche Konsequenz: Im zeitlichen Mittel ist die abgestrahlte Leistung zwar klein, für die Dauer der Lichtimpulse herrschen aber stärkere elektrische Felder, als mit jeder anderen Methode zur Verfügung stünden. Zudem lässt sich Laserlicht auf kleinste Flächen fokussieren.

## Ein Kristall wird zum Leiter

Auf eine dünne Quarzprobe (Bildmitte, dunkler Rahmen) trifft ein Femtosekundenpuls (rote Kurve). Währenddessen erlaubt eine Serie kurzer Attosekundenblitze (blaue Kurve) Aufschlüsse über die elektronische Struktur des Kristalls.

Um Elektronen in der Quarzprobe vom Valenz- ins Leitungsband zu befördern, sind gleichzeitig mehrere Laserphotonen (siehe Grafik rechts, rote Pfeile) nötig, denn ein einzelnes überträgt nur ungefähr ein Sechstel der Energie zum Überwinden der Bandlücke. Durch die extrem hohe Intensität des Fem-

tosekundenlasers wird ein solcher »Mehrphotonenprozess« aber möglich.

Die Röntgenphotonen des Attosekundenlasers (blauer Pfeil) können Elektronen dagegen aus einer tiefer gelegenen Atom- schale in das Leitungsband befördern. Befinden sich dort bereits Ladungsträger, ist dieser Prozess aber quantenmechanisch unterdrückt. Daher lässt sich anhand der absorbierten Röntgenstrahlung ablesen, ob die Probe durch den Femtosekundenpuls kurzzeitig leitend wird.

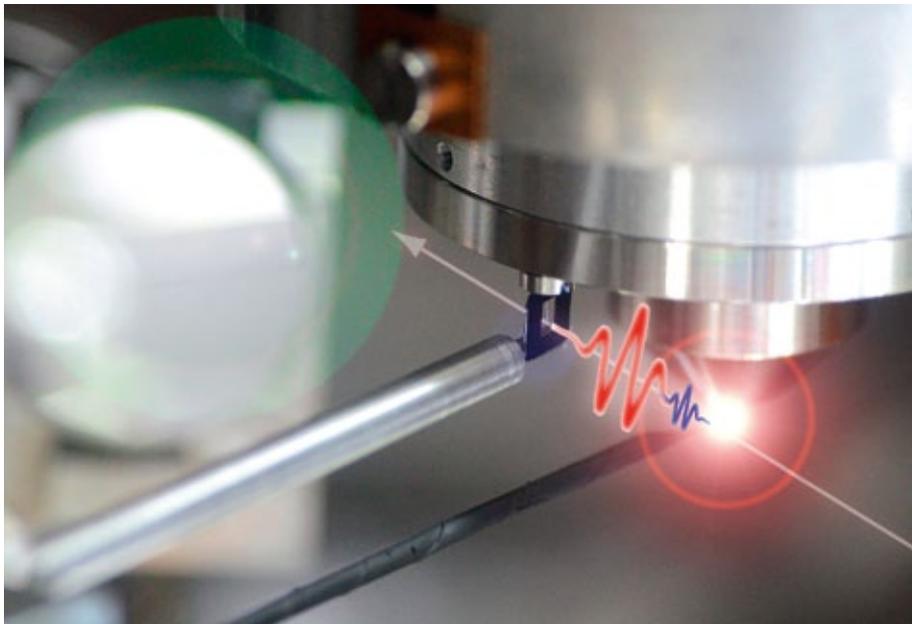
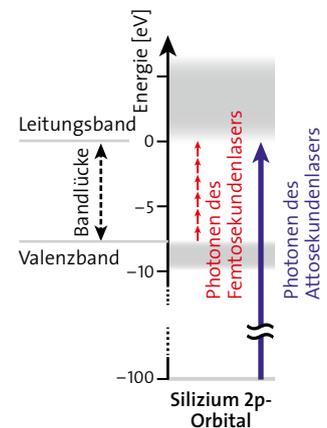


FOTO: THORSTEN NAESE, LMU & ELISABETH BOTHSCHAFFER, TUM; GRAFIK RECHTS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MARTIN SCHULTZE UND FERENC KRAUSZ



Um vergleichbare Feldstärken konventionell zu erreichen, müsste man das elektrische Feld einer Überland-Höchstspannungsleitung zwischen zwei Elektroden aufrechterhalten, die nur einige tausendstel Millimeter voneinander entfernt sind. Bisher ist kein Material bekannt, das dieser Belastung standhält.

Im Fall von Femtosekunden-Laserimpulsen liegen die Verhältnisse aber anders. Sie erreichen mit ihrer elektrischen Feldstärke leicht Werte wie in unserem Beispiel. Hier liegen etwa beim Halbleiter Silizium über einen halben Nanometer, dem typischen Abstand zwischen zwei Siliziumatomen im Kristallgitter, ganze fünf Volt Spannung an. Ein statisches Feld dieser Stärke würde das Material sofort zerstören. Im oszillierenden elektrischen Feld unserer Laserpulse erreicht die Feldstärke aber nur wenige Male und immer nur für den Bruchteil einer Femtosekunde ihren Maximalwert. Im Fall solch kurzer Beanspruchungen ertragen Materialien wesentlich stärkere Felder.

Dies trifft besonders für optisch transparente Materialien zu, die Licht im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich nicht absorbieren. In Frage kamen daher Silizium-

dioxid – bekannt als Quarz –, Diamant, Saphir oder andere nichtleitende, durchsichtige Kristalle mit einer großen Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Dann wird die Anregung eines Elektrons aus dem Valenzband ins Leitungsband nur bei sehr hohen Feldstärken möglich, die einer Spannung von mehreren Volt zwischen zwei benachbarten Atomen im Kristallgitter entsprechen. Genau diesen Hochfeldeffekt wollten wir uns zu Nutze machen, um den ursprünglich nichtleitenden Kristall leitend zu machen.

Für unsere Experimente wählten wir einen Quarzkristall. Dabei untersuchten wir, wie sich die elektronische Struktur einer dünnen Probe im elektrischen Feld eines ultrakurzen Laserimpulses ändert. Wir bestrahlten den Kristall im Anrege-Abfrage-Schema: Zeitgleich zum Laserpuls beleuchteten wir ihn mit einem Röntgenblitz von weniger als 100 Attosekunden, etwa einem Fünfzigstel der Laserimpulsdauer. Dabei maßen wir, wie stark das Material den eingestrahlen Röntgenpuls absorbierte, immer zum jeweiligen Zeitpunkt der Einstrahlung. Dieser ließ sich insgesamt auf wenige Attosekunden genau festlegen, das ist nur noch ein Bruchteil der Röntgenpulsdauer. Das gemessene Absorptionssignal reprä-

sentiert dabei den »Schnappschuss«, aus dem wir auf die elektronische Konfiguration des Quarzkristalls zu verschiedenen Zeitpunkten während des Laserimpulses schließen konnten.

Wir begannen mit Laserpulsen niedriger elektrischer Feldstärke. Dabei verhielt sich die Probe zunächst so wie man es für transparente Medien erwartet: Sie reflektierte einen geringen Teil des einfallenden sichtbaren Lichts des Femtosekundenpulses an der Vorderfläche, der Großteil hingegen gelangte ungestört hindurch. Das Röntgenlicht des Attosekundenpulses wurde zu einem gewissen Teil absorbiert. Wir zeichneten dieses Röntgenabsorptionssignal auf und fanden darin erst einmal keine Anzeichen, dass sich durch den Laserstrahl zu irgendeinem Zeitpunkt die elektronischen Eigenschaften der Probe geändert hätten. Wäre dies der Fall gewesen, hätte das sichtbare Laserlicht die Elektronen dazu angeregt, das Leitungsband zu besetzen. Diese besetzten Zustände wären nicht mehr für vom Röntgenstrahl ausgelöste Übergänge (siehe Grafik links) verfügbar gewesen. Dieser Vorgang hätte die Absorption des Röntgenpulses abgeschwächt, was wir aber nicht beobachteten.

### Ultraschnelles Schalten – bis hin zu Lichtfrequenzen?

Danach brachten wir die Stärke des elektrischen Felds des Laserimpulses bis in unmittelbare Nähe der Schwelle für den so genannten dielektrischen Durchbruch, der die Probe zerstört hätte. Denn die Anregungsprozesse, auf deren Spur wir waren, hängen sehr empfindlich von der Intensität des Laserlichts ab. Und tatsächlich: Jetzt maßen wir im Röntgenabsorptionssignal den erhofften Effekt – während das elektrische Feld des Lasersignals sein Maximum erreichte, ließ der Kristall mehr Röntgenstrahlung passieren. Als wir das Signal analysierten und mit quantenmechanischen Rechnungen verglichen, bestätigte das unsere Interpretation. Vorübergehend waren die Energiezustände der Elektronen anders verteilt.

Die Modellrechnungen unserer Kooperationspartner von der Georgia State University in Atlanta lassen den Schluss zu, dass das starke elektrische Feld des Laserimpulses die Probe für den Bruchteil einer Femtosekunde in einen Zustand versetzt, bei dem sich Elektronen übergangsweise im Leitungsband befinden. Eine Situation, die man sonst nur bei Metallen und Halbleitern beobachtet und bei der das Material leitfähig für elektrischen Strom wird. Das konnte unsere Gruppe dann in einem weiteren Experiment auch direkt nachweisen.

Als zusätzliches bemerkenswertes Ergebnis unserer Messung konnten wir beobachten, dass die Probe nach dem Ende des Laserimpulses unmittelbar wieder in den nichtleitenden Ausgangszustand zurückkehrt. Die vom Licht ausgelöste Änderung kann also in weniger als einer Femtosekunde an- und ausgeschaltet werden. Dieser Effekt im Dielektrikum unterscheidet sich fundamental davon, wie sich angeregte Elek-

tronen in Halbleitern verhalten. Dort verbleiben die Elektronen für ein Vielfaches der Dauer des Anregungspulses im Leitungsband, bevor sie spontan wieder ins Valenzband zurückfallen. Währenddessen bleibt das Material leitend. In Halbleitern liegen diese Lebensdauern der angeregten Elektronen typischerweise im Nanosekundenbereich. Solch ein Vorgang ist als schneller Schalter also ungeeignet. Zwar ließe sich mit einem Laserpuls ebenfalls ein Halbleiterbauelement femtosekundenschnell anschalten, aber man müsste zu lange warten, bis das System von selbst in den nichtleitenden Zustand zurückkehrt.

Mit der Attosekundentechnologie können Wissenschaftler beobachten, wie sich Elektronen in Atomen, Molekülen und Festkörpern bewegen. Diese Bewegungen lassen sich mit der elektrischen Kraft präzise kontrollierter Lichtwellen, die nur noch aus wenigen Schwingungen bestehen, auch gezielt beeinflussen, gewissermaßen steuern. Der Umstand, dass solche Lichtpulse die elektrischen und optischen Eigenschaften von Nichtleitern in wenigen Femtosekunden grundlegend verändern können, ebnet vielleicht den Weg zu einer hochgradig beschleunigten Signalverarbeitung.

Elektronische Logikschaltungen, die mit Lichtfeldern gesteuert werden, könnten eine Revolution für die möglichen Rechengeschwindigkeiten bedeuten. Dieser Entwicklung würde zwar kein fundamental neues Konzept zu Grunde liegen wie etwa beim viel diskutierten Quantencomputer. Dafür könnte sie auf erprobte Protokolle und Technologien aufbauen. Der Attosekundenphysik verdanken wir die Erkenntnis, dass die Grenze elektronischer Schaltgeschwindigkeiten und Messtechnik im Bereich der Lichtfrequenzen liegt – zigtausendfach schneller als die beste heutige Mikroprozessortechnologie. ~

#### DIE AUTOREN



**Martin Schultze** (links) promovierte 2008 im Team von Ferenc Krausz am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) und verwendete erstmals die Attosekundenmesstechnik zur Echtzeitbeobachtung von Elektronenbewegungen innerhalb

eines Festkörpers. **Ferenc Krausz** ist Direktor am MPQ in Garching und Lehrstuhlinhaber an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Seine Gruppe demonstrierte 2001 zum ersten Mal Attosekundenpulse – die Geburtsstunde der experimentellen Attosekundenphysik.

#### QUELLEN

**Krausz, F., Stockman, M.:** Attosecond Metrology: From Electron Capture to Future Signal Processing. In: Nature Photonics 8, S. 205–213, 2014

**Schiffrin, A. et al.:** Optical-Field-Induced Current in Dielectrics. In: Nature 493, S. 70–74, 2013

**Schultze, M. et al.:** Controlling Dielectrics with the Electric Field of Light. In: Nature 493, S. 75–78, 2013

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1298017](http://www.spektrum.de/artikel/1298017)

## JAHRES- ODER GESCHENKABO

- + **ERSPARNIS:**  
12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10 % günstiger.
- + **WUNSCHGESCHENK:**  
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten dennoch Sie das Präsent.
- + **PÜNKTLICHE LIEFERUNG:**  
Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.
- + **KEINE MINDESTLAUFZEIT:**  
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen



## MINIABO

- + **ERSPARNIS:**  
3 aktuelle Ausgaben von **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 16,-, das entspricht 35 % Rabatt.
- + **WUNSCH-GESCHENK:**  
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten.
- + **PORTOFREI:**  
Die Lieferung erfolgt frei Haus.



# SICHERN SIE SICH ALLE VORTEILE IM ABO



SCHREIBSET VON LAMY  
Druckbleistift und Kugelschreiber  
mit Etui



## »MEINE KURZE GESCHICHTE« VON STEPHEN HAWKING

Zum ersten Mal lässt der Physiker sein ganzes privates und wissenschaftliches Leben Revue passieren – in einem Buch voller Weisheit und Humor.

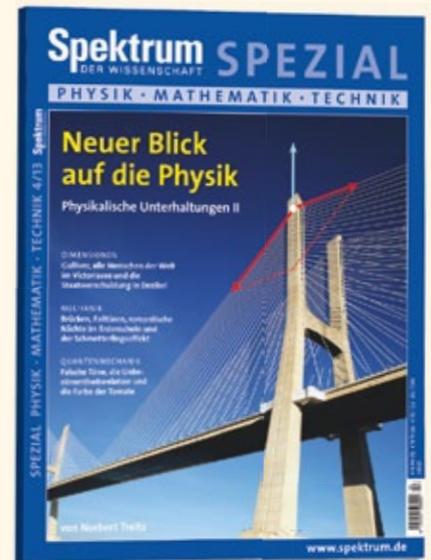
WÄHLEN  
SIE IHR  
GESCHENK!



## T-SHIRT »WISSENSHUNGRIG«

Für alle, die Lust auf mehr Wissen haben: Das Spektrum-T-Shirt »wissenshungrig« aus 100 % Baumwolle; Größe L.

SPEKTRUM-SPEZIAL –  
PHYSIK · MATHEMATIK · TECHNIK  
»Neuer Blick auf die Physik« zeigt vertraute Schulphysik aus völlig ungewohnten Blickwinkeln.



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743  
[www.spektrum.de/abo](http://www.spektrum.de/abo)

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

Hier QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!

