



PRESSE-INFORMATION

**Max-Planck-Institut für Quantenoptik
und
Munich Centre for Advanced Photonics**



Elektronen auf dem Weg zwischen Atomen erwischt



Nur einige 10 Attosekunden ($1\text{as} = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$ Sekunde) brauchen Elektronen, um in Festkörpern von einem Atom zum nächsten zu gelangen. Diese unvorstellbar kurze Zeitspanne stellt die ultimative Grenze für die Geschwindigkeit der Elektronik dar. Der künftige Vorstoß in diesen Grenzbereich setzt die technische Fähigkeit voraus, Elektronentransport in Festkörpern mit Attosekunden-Auflösung in Echtzeit zu beobachten und schließlich auch zu steuern. Das erste dieser Ziele hat jetzt ein internationales Forscherteam am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München (MPQ) erreicht. Adrian Cavalieri (USA) hat gemeinsam mit Wissenschaftlern aus Österreich, Ungarn, Deutschland und Spanien Unterschiede in den Flugzeiten von Elektronen beim Durchqueren weniger Atomlagen in einem Kristall bestimmt. Dieses Experiment, das die erste Attosekunden-Messung in Festkörpern darstellt, ebnet den Weg zur Einflussnahme auf den Elektronentransport in Festkörpern auf

atomarer Skala – ein Fortschritt, der auf der Titelseite der *Nature*-Ausgabe vom 25. 10. 2007 gefeiert wird.

Moderne Elektronik beruht auf dem kontrollierten Elektronentransport durch Nanometer-Schaltkreise. Sie findet sich z.B. in Computern, Kommunikationsgeräten und Messinstrumenten. Die Motivation, immer schnellere Elektronik zu entwickeln, kommt aus vielen Richtungen. Schnellere Computer und empfindlichere Geräte würden es erlauben, Naturkatastrophen besser vorherzusagen. Leistungsstärkere Rechner führen zu immer ausgefilterten Untersuchungsmethoden und erlauben dadurch immer tiefere Einblicke in die Funktionsweise der Natur. Hochgeschwindigkeits-Kommunikationssysteme werden es vielleicht eines Tages Spezialisten erlauben, ferngesteuert Operationen durchzuführen, und modernste elektronische Geräte in der Medizintechnik werden die Gesundheitsversorgung insgesamt effizienter machen, um nur einige Auswirkungen zu nennen.

In modernen elektronischen Schaltkreisen werden die Elektronen von einer Mikrowellenspannung durch Nanostrukturen gejagt, der elektrische Strom wird dadurch innerhalb von Nanosekunden an- und abschaltet. Die durch den Mikrochip vorgegebene Schaltzeit bestimmt beispielsweise die Zahl der Rechenoperationen, die ein Computer pro Sekunde ausführen kann.

Ultimativ ist die Schaltgeschwindigkeit begrenzt durch die Zeit, die die Elektronen brauchen, um durch die Strukturen zu laufen, in denen deren Strom ein und ausgeschaltet wird. Je kleiner die Struktur, desto höher die erreichbare Schaltgeschwindigkeit und die Dichte des Informationsflusses. Unter anderem aus diesem Grund möchte man Schaltkreise immer kleiner gestalten. Die Entfernung zwischen benachbarten Atomen in einem Kristallgitter oder in einem Molekül ist vermutlich die kürzeste Strecke, über die elektrischer Strom Information übertragen kann. Die Zeit die ein Elektron benötigt, um atomare Abstände zu überwinden, ist naturgemäß in Attosekunden getaktet. Dies impliziert, dass die Richtung des elektrischen Stromes in Schaltkreisen atomarer Dimensionen prinzipiell mehr als eine Billion Mal in der Sekunde gewechselt werden könnte, d. h. mit einer Frequenz von bis zu mehreren Petahertz, das ist hunderttausend mal öfter als es die heutige Elektronik erlaubt!

Der erste Schritt auf dem langen Weg zur ultimativen Petahertz-Elektronik, in der die Schaltfrequenz des elektrischen Stromes allein durch die Zeit begrenzt ist, die ein Elektron für den Weg zwischen benachbarten Atomen in einem Kristall oder Molekül braucht, ist die Entwicklung von Techniken für die Echtzeit-Beobachtung des elektrischen Ladungstransport in atomaren Strukturen. Dieser erste Schritt wurde kürzlich erfolgreich am MPQ demonstriert. Die Forscher konnten die Bewegung von Elektronen durch wenige Atomlagen an die Oberfläche eines Festkörperkristalls in Echtzeit verfolgen.

Gemeinsam mit Mitarbeitern der Universitäten Bielefeld und Hamburg, sowie der TU Wien schickten die MPQ-Forscher einen extrem ultravioletten Lichtpuls von 300-Attosekunden Dauer sowie einen Infrarot-Laserpuls aus wenigen, gut kontrollierten Schwingungen des elektrischen Feldes, auf die Oberfläche eines Wolfram-Kristalls. Die sich daraus ergebenden Prozesse sind in Abbildung 1 zu sehen. Der Attosekunden-Puls dringt in den Kristall ein. Dort werden einige der im Puls transportierten Lichtpartikel, sg. Photonen, absorbiert, wodurch sowohl lose gebundene Elektronen, die für die Leitung des elektrischen Stroms verantwortlich sind, als auch fest im Rumpf der Kristallatome gebundenen Elektronen freigesetzt werden. Beide Arten von Elektronen werden gleichzeitig angeregt, und eilen danach mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus einer Tiefe von einigen Atomlagen an die Oberfläche. Die Leitungselektronen bewegen sich schneller fort als die Rumpfelektronen (und werden in Abb. 1 als *schnelle* bzw. *langsame* Elektronen bezeichnet). Sobald die Elektronen an der Oberfläche angekommen sind, wird ihre ursprüngliche Geschwindigkeit durch das elektrische Feld des Laserpulses modifiziert, und diese Änderung kann mit einem Flugzeit-Detektor nachgewiesen werden. Da sich die Feldstärke des Laserpulses extrem schnell mit der Zeit ändert (eine halbe Schwingung des Laserwellen dauert 1250 Attosekunden), hängt die Höhe der Geschwindigkeitsänderung empfindlich vom Zeitpunkt ab, zu dem die Elektronen die Oberfläche erreichen.

Das *ultraschnell oszillierende Laserfeld* dient also – indem es die Elektronengeschwindigkeit kontrolliert verändert – als eine Attosekunden-Stoppuhr, mit der das MPQ-Forscherteam feststellen konnte, dass die Leitungselektronen etwa 110 Attosekunden früher als die Rumpfelektronen die „Ziellinie“ (nämlich die Kristalloberfläche) erreichen. Daraus folgt, dass die freigesetzten Leitungselektronen sich innerhalb des Kristalls doppelt so schnell bewegen wie die aus den Atomrumpfen herausgerissenen Elektronen. Das MPQ Experiment demonstriert die technische Möglichkeit, elektrischen Ladungstransport durch Atomlagen eines Festkörpers in Echtzeit zu beobachten.

Der Einsatz der Attosekundenmesstechnik zur Echtzeitbeobachtung des Elektronentransports durch atomare Strukturen ebnet den Weg zur Entwicklung der ultraschnellen Schaltkreise der Zukunft, in denen die Richtung des elektrischen Stromes Tausend bis Hundert Tausend Mal schneller geändert werden kann, als in den schnellsten Mikrochips der Gegenwart.

Originalveröffentlichung:

A. L. Cavalieri *et al.*

„Attosecond spectroscopy in condensed matter“

Nature, 25. Oktober 2007

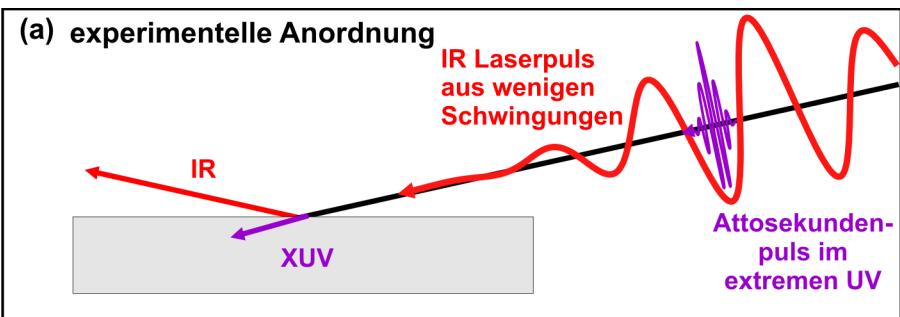
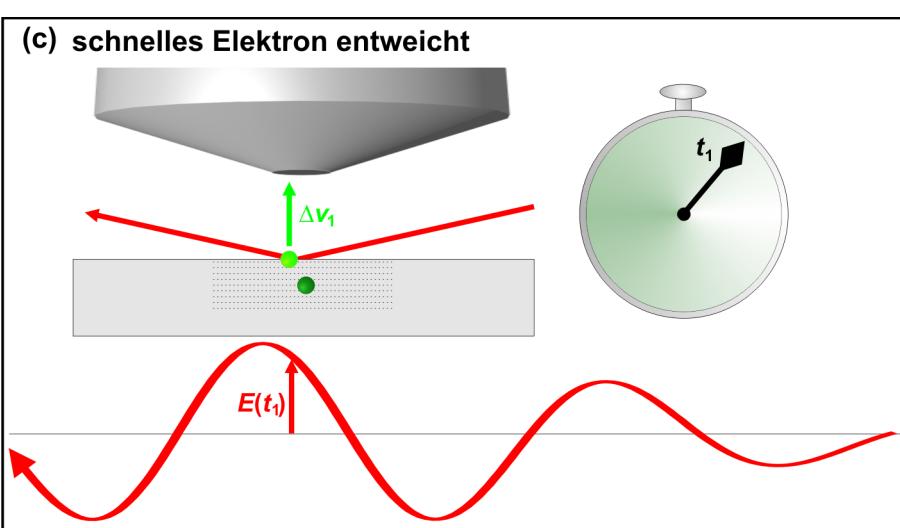
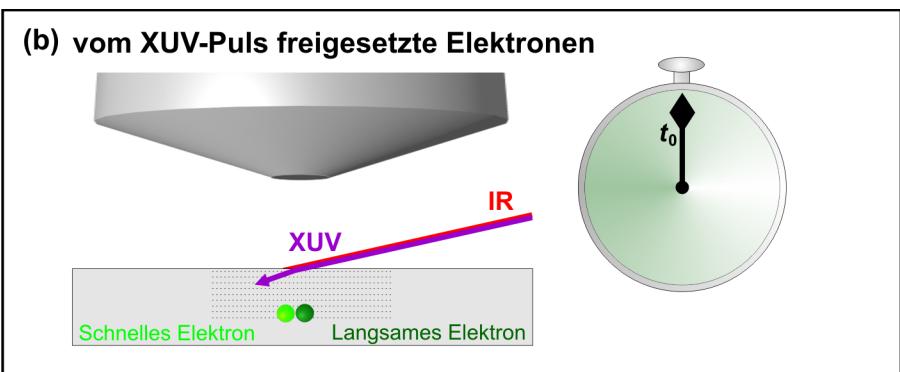
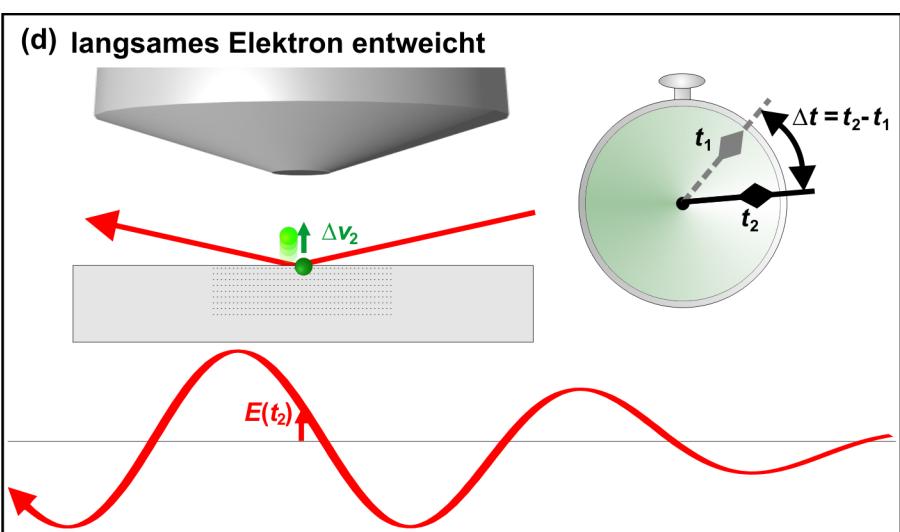


Abbildung 1: Überblick über das MPQ Experiment zur Echtzeitbeobachtung von Elektronentransports in einem Festkörperkristall.



a) Ein infrarot (IR) Laserpuls aus wenigen Schwingungen mit kontrollierter Wellenform und ein extrem ultravioletter (XUV) Attosekunden-Puls fallen auf einen Wolfram-Kristall. Der Laserpuls wird an der Oberfläche reflektiert, während der XUV-Puls in den Kristall eindringt. b) Der Attosekunden-Puls wird im Kristall absorbiert, wodurch zwei verschiedene Sorten von Elektronen freigesetzt werden: schnelle (Leitungs-)Elektronen und langsame (Rumpf-)Elektronen. Elektronen, die einige Atomlagen unterhalb der Kristalloberfläche freigesetzt werden, haben die Chance, diese ohne Energie schluckende Zusammenstöße zu erreichen und dem Kristall zu entweichen. c) und d) halten jeweils den Zeitpunkt fest, zu dem die schnellen und die langen Elektronen die Oberfläche erreichen und anschließend vom infraroten Laserpuls beschleunigt werden. Die durch das Laserfeld E herbeigeführte Änderung ihrer Geschwindigkeit unterscheidet sich erheblich, was auf die zu verschiedenen Zeitpunkten t_1 und t_2 sehr unterschiedliche Stärke des Laserfeldes $E(t_1)$ und $E(t_2)$ zurück zu führen ist. Die dadurch hervorgerufenen Änderungen in der Elektronengeschwindigkeit Δv_1 und Δv_2 können mit einem Flugzeit-Detektor gemessen werden. Daraus lässt sich die Zeit $\Delta t = t_2 - t_1$, die zwischen der Ankunft des schnellen und des langsamen Elektrons vergeht, mit Attosekunden-Genauigkeit bestimmen.



Graphik: Barbara Ferus, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Kontakt:

Prof. Dr. Ferenc Krausz
Geschäftsführender Direktor
Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Professor, Lehrstuhl f. Experimentalphysik
Ludwig-Maximilians-Universität München
Telefon: +49-89-32905612
Fax: +49-89-32905649
E-mail: ferenc.krausz@mpq.mpg.de
www.attoworld.de, www.munich-photonics.de

Dr. Olivia Meyer-Streng
Presse & Kommunikation
Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Telefon: +49 - 89 / 32905 213
Fax: +49 - 89 / 32905 200
E-mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de