

Ferenc Krausz und Thorsten Naeser

Tauchgang tief ins Atom

Wenn alle Vorstellungen von Zeit ihre Gültigkeit verlieren: Mit Laserblitzen von Milliardenstel Sekundenbruchteilen versuchen Physiker, die ultraschnellen Bewegungen von Quantenteilchen in Echtzeit zu verfolgen. Die Experimente im Labor für Attosekundenphysik erlauben schon jetzt immer präzisere Einblicke in die Materie. Und die Lichtpulse werden immer noch kürzer.

Fotografieren ist das Prinzip bekannt und vertraut: Wer schnelle Bewegungen scharf abbilden möchte, muss eine kurze Verschlusszeit bei der Belichtung wählen. Sonst kann es leicht passieren, dass auf einem Foto – zum Beispiel von einer Wettkampfszene im Sport oder vom flinken Nachwuchs auf dem Spielplatz – nur noch Schemen zu erkennen sind.

Als Wissenschaftler Anfang der 1990er-Jahre begannen, die Bewegungen von Atomen und Molekülen während chemischer Reaktionen zu „fotografieren“, hatte dies mit klassischer Fotografie allerdings nur wenig zu tun. Das Prinzip jedoch blieb erhalten: Man benötigt eine kurze Verschlusszeit, um scharfe Bilder zu gewinnen. Atome und Moleküle verändern sich innerhalb von Femtosekunden. Eine Femtosekunde ist ein Millionstel einer milliardstel Sekunde. So war eine Belichtungstechnik zu finden, die ebenfalls nur Femtosekunden andauert. Dafür benutzte man die Lasertechnik und arbeitete mit Lichtblitzen, die nur Femtosekunden lang waren.

Doch trotz bahnbrechender Erfolge und dem Nobelpreis für den Ägypter Ahmed Zewail im Jahr 1999 blieben zentrale Fragen weiterhin

unbeantwortet. Was genau geschieht im Inneren der Elektronenhülle, die jeden Atomkern umgibt? Wie lassen sich die Bewegungen einzelner Elektronen verfolgen? Gibt es vielleicht eine Möglichkeit, unsere Vorstellung vom atomaren Aufbau anhand von „Bildern“ zu überprüfen? Die Vermutung stand im Raum, dass Prozesse auf dieser noch winzigeren Ebene schneller ablaufen als bei den relativ trägen Atomen und Molekülen.

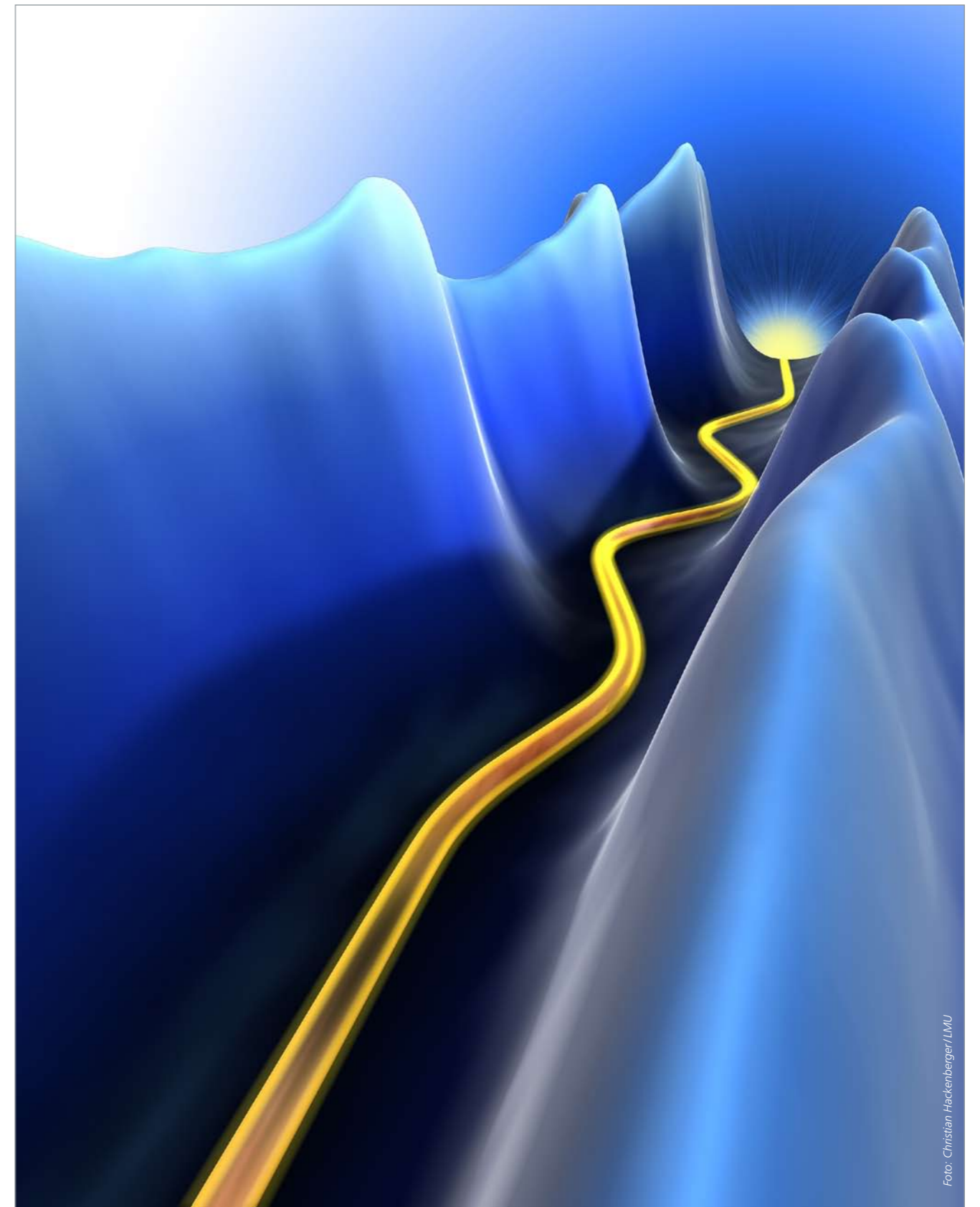
Die Jagd nach weitaus kürzeren Belichtungszeiten und damit noch kleineren Sekundenbruchteilen war eröffnet. 2001 gelang es schließlich an der Technischen Universität Wien, die Femtosekunden noch einmal durch 1000 zu teilen. Erstmals wurden hier Lichtblitze erzeugt, die nur noch 650 Attosekunden dauerten. Eine Attosekunde ist ein Milliardstel einer milliardstel Sekunde.

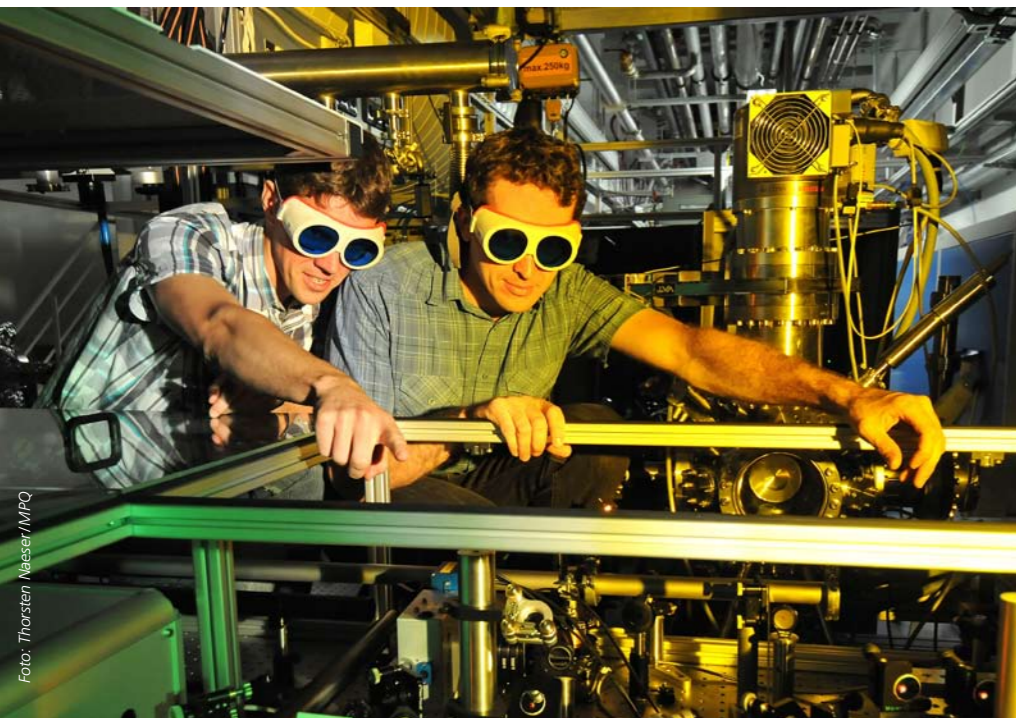
Seit 2003 ist die Forschungsgruppe ans Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) und zugleich an die Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) umgezogen. Dort wird nun die Zeit im Labor für Attosekundenphysik (LAP) immer weiter zerstückelt. Dem Team ist es 2008 gelungen, die Lichtblitze auf 80 Attose-

kunden zu verkürzen. Damit erhalten wir immer genauere Einblicke in die in vielen Bereichen noch fremdartige Welt der Quantenteilchen.

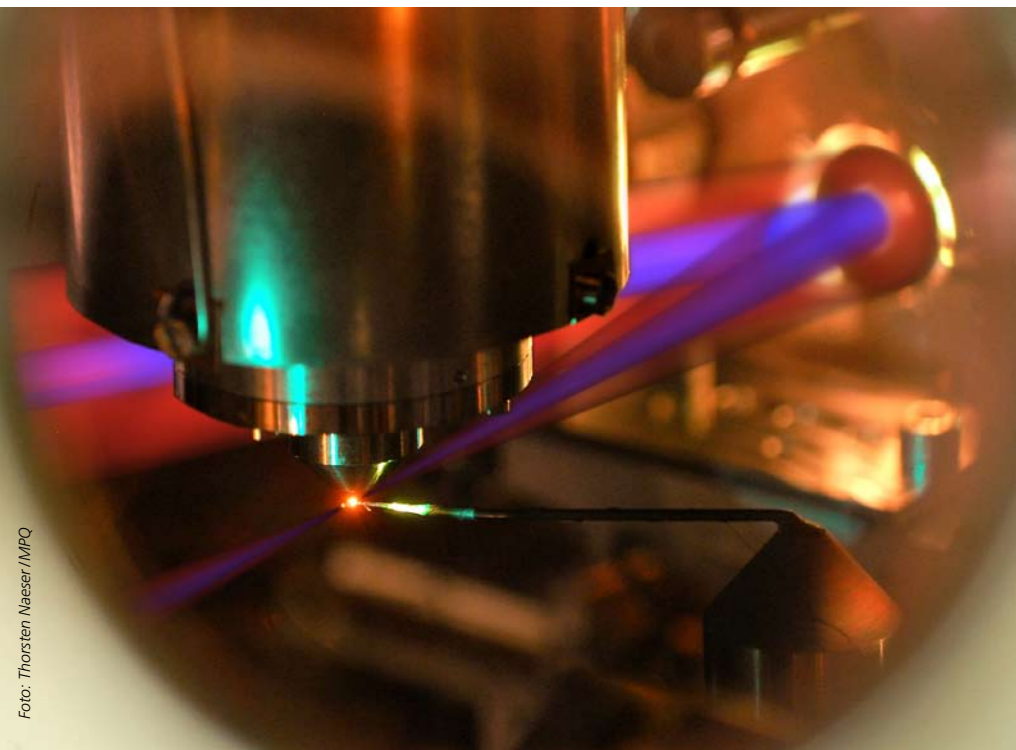
In dieser Welt pulsieren sogar Löcher. Dass das „absolute Leere“ ein Eigenleben entwickelt, haben wir 2010 zeigen können. In den Experimenten schickte ein Team um Forschungsgruppenleiter Dr. Eleftherios Goulielmakis Laserpulse aus dem sichtbaren Bereich des Spektrums auf Kryptonatome. Die Lichtpulse mit einer Dauer von weniger als vier Femtosekunden schlugen aus den äußeren Schalen der Atome jeweils ein Elektron heraus. Nachdem ein Laserpuls aus einem Atom ein Elektron herausgeschlagen hatte, wurde das Atom zum positiv geladenen Ion. An der Stelle, an der das Elektron das Atom verließ, entstand ein positiv geladenes Loch. Quanten-

In künstlerischer Darstellung: Eine nur Attosekunden lang dauernde Photoemission zweier Teilchen aus verschiedenen Orbitalen wird aufgezeichnet von einer Lichtwelle (gelbe Linie). Die dadurch gewonnenen Bilder (blaue Oberflächen) zeigen die Verzögerung in der Anfangsbewegung der Teilchen.





Im Attosekundenlabor (oben): Die beiden Physiker Matthias Kling (links) und Sergey Zharebtsov besprechen den Aufbau der „Attosekunden-Beamline“. Ihr Ziel: die Elektronenbewegungen von einem Quantenzustand zum nächsten in Echtzeit zu verfolgen. Unten: Messungen mithilfe innovativer Technologie in einer Vakuumkammer.



mechanisch gesehen pulsierte dieser freie Platz im Atom weiter – als sogenannte Quantenschwebung.

Das Pulsieren konnte mit einem zweiten Lichtpuls aufgezeichnet, also quasi fotografiert werden. Dieser Puls dauerte nur 150 Attosekunden und befand sich im extremen ultravioletten Licht. Es stellte sich heraus, dass die Position des Lochs im Ion, also die positiv geladene Stelle, sich innerhalb von rund sechs Femtosekunden zyklisch zwischen einer langgestreckten keulenartigen und einer kompakten zusammengezogenen Form hin und her bewegt. Damit ist es uns zum ersten Mal gelungen – das Magazin „Nature“ berichtete im August 2010 darüber –, die Veränderung einer Ladungsverteilung in einem Atom direkt aufzuzeichnen.

Auf die Spuren Albert Einsteins haben wir uns bei einem weiteren Forschungsprojekt begeben. Vor mehr als 100 Jahren entdeckte der geniale Physiker die Fotoemission. Trifft Licht auf Atome, werden deren Elektronen angeregt. Bei ausreichender Energiezufuhr verlassen die Teilchen das Atom. Die Entdeckung des Fotoelektrischen Effekts sollte die Physik revolutionieren: Die Quantenmechanik war geboren. Die Anregung und Fotoemission von Elektronen in Atomen durch Licht ist heute noch immer eines der interessantesten und bedeutendsten Phänomene der Quantenphysik. Man geht davon aus, dass sofort nach dem Auftreffen des Lichtstrahls die Bewegung der Elektronen im Atom beginnt. Diesen Zeitpunkt definiert man als Nullpunkt bei der Anregung von Elektronen.

Mit einer Ultrakurzzeit-Messtechnik hat ein Team diese Annahme überprüft. Dazu schickten die Forscher Lichtpulse auf Neonatome. Es

stellte sich heraus, dass die gleichzeitig durch Lichtpulse angeregten Elektronen, die sich auf unterschiedlichen Umlaufbahnen, den „Orbitalen“ der Atome befinden, erst mit einer Zeitverzögerung von einigen zehn Attosekunden das Atom verlassen.

Die neuen Erkenntnisse stehen damit im Gegensatz zu der bisherigen Annahme, dass die Elektronen das Atom sofort nach Auftreffen des Lichtpulses verlassen. „Eines der Elektronen verlässt das Atom also früher als das andere“, resümiert Dr. Martin Schultze. Damit konnte gezeigt und nachvollzogen werden, dass Elektronen nach Anregung durch Licht kurz zögern, bevor sie das Atom verlassen.

Was dieses Zögern bewirkt, galt es für die theoretischen Physiker um Vladislav Yakovlev herauszufinden. Die Forscher konnten schließlich mit ihren Berechnungen den Effekt bestätigen. Sie kamen allerdings auf eine Verzögerung von nur fünf Attosekunden. Die Ursache dieser Diskrepanz dürfte in der Komplexität des Neonatoms liegen, das neben dem Kern aus zehn Elektronen besteht. „Der Rechenaufwand für das gesamte Atommodell unter Einbezug aller Wechselwirkungen zwischen allen Elektronen, übersteigt die Kapazität von heutigen Supercomputern“, unterstreicht Yakovlev.

Immerhin förderten die Untersuchungen die vermutliche Ursache für das „Zögern“ der Elektronen zutage. Wir gehen davon aus, dass die Elektronen nicht nur mit ihrem Atomkern interagieren, sondern dass sie sich auch wechselseitig beeinflussen. Die Elektron-Elektron-Wechselwirkung kann dazu führen, dass es ein Weilchen dauert, bevor das von der einfallenden Lichtwelle geschüttelte Elektron von seinen Artgenossen losgelassen wird und das Atom

verlassen darf. Mit den neuen Einblicken in den Mikrokosmos haben die Teams um Schultze und Yakovlev dem Mikrokosmos weitere Geheimnisse entlockt. Die Erkenntnisse bedeuten einen wichtigen Einblick in die Wechselwirkungen von Elektronen in Atomen – und damit in eine Welt, die bis heute noch weitgehend unverstanden ist.

Rasende Elektronen erforscht auch Dr. Matthias Kling im LAP-Team. Der junge Forscher und Emmy Noether-Nachwuchsgruppenleiter der DFG konzentriert sich in seinen Forschungsvorhaben aber nicht auf das Verhalten einzelner Teilchen. Er erkundet ihre kollektiven Bewegungen. Solche „schwarmartigen“ Bewegungen werden von Fachleuten auch „Plasmonen“ genannt. „Mit Attosekunden-Techniken lassen sich Plasmonen direkt beobachten. Ihre Dynamik spielt sich meist auf Zeitskalen von bis zu 100 Attosekunden ab“, erläutert Kling. Er und seine Gruppe haben sich auf Plasmonen in Nanoteilchen aus Gold und Silber spezialisiert. Die Physiker erkunden nun, wie diese Teilchen mit Licht wechselwirken. Dazu schicken sie Femtosekunden-Laserpulse auf die Goldpartikel. So regen sie die Elektronen im Material zum Schwingen an. Anschließend wird mit einem Attosekunden-Lichtblitz das Verhalten der negativ geladenen Teilchen aufgezeichnet und analysiert. So können Echtzeitfilme von ultrakurzen Vorgängen im Mikrokosmos erstellt werden. „Gold-Nanoteilchen werden zum Beispiel in Solarzellen eingebaut zur Steigerung des Wirkungsgrades“, erklärt Matthias Kling. „Wir wollen exakt verstehen, wie das Licht auf die Elektronen wirkt. Im Ergebnis könnten wir die Nanoteilchen

weitaus effizienter und vielfältiger verwenden.“

Ein Einsatz von Plasmonen bietet sich vor allem in der sogenannten Lichtwellenelektronik an. Hier könnte man über plasmonische Felder die Datenverarbeitung und -übermittlung drastisch beschleunigen. Das System könnte letztendlich mit der Frequenz von Lichtwellen arbeiten, was eine Steigerung zur heutigen Technik etwa um den Faktor eine Million wäre.

Die Attosekunden-Technologie ist noch lange nicht an ihrem Limit angelangt. Wir werden in den nächsten Jahren die Lichtblitze weiter verkürzen. Und: Das Licht wird immer präzisere Einblicke in den facettenreichen Mikrokosmos ermöglichen. Bereits heute steht fest: Es ist ein tiefer und spannender Tauchgang in das Innenleben von Atomen.



Prof. Dr. Ferenc Krausz ist Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und dort Leiter der Abteilung Attosekunden- und Hochfeldphysik; zugleich ist er Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik an der LMU München.

Dipl.-Geogr. Thorsten Naeser Naeser ist Referent für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit in der Arbeitsgruppe von Professor Ferenc Krausz.

Adresse: Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Straße 1, 85748 Garching

DFG-Förderung u.a. durch den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis für Ferenc Krausz und im Rahmen des Exzellenzclusters „Munich Center for Advanced Photonics (MAP)“.

www.attoworld.de