

## **Atome unterm Stroboskop Erzeugung kürzester Laserpulse mit kontrollierter Phase**

**Seit geraumer Zeit arbeiten Physiker daran, Laserpulse zu erzeugen, die kürzer als eine Femtosekunde sind. Einer deutsch-österreichischen Arbeitsgruppe ist es nun erstmals gelungen, die Phase solcher Attosekundenpulse zu kontrollieren. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, scharfe Schnappschüsse von inneratomaren Prozessen zu schiessen.**

Zu den frühen Werkzeugen der Hochgeschwindigkeits-Photographie gehört das Stroboskop. Als es vor 70 Jahren erfunden wurde, photographierte man springende Bälle und schwanzwedelnde Hunde im Blitzlichtgewitter. Die entwickelten Fotos zeigten die Bewegung wie in einer eingefrorenen Zeitlupe. Wenn Physiker heute Atome "filmen", dann machen sie im Prinzip nichts anderes als die Pioniere der Hochgeschwindigkeits-Photographie: Sie beleuchten die Atome mit einer Serie von Laserblitzen und beobachten, was sich von einem Lichtpuls zum nächsten verändert. Dabei gilt: je kürzer die Lichtblitze, umso schärfer die Schnappschüsse. Im vergangenen Jahr haben Wissenschaftler der Universitäten Wien und Bielefeld die Laserpulse auf weniger als eine Femtosekunde (10<sup>-15</sup> Sekunden) reduziert und erstmals einen "Hochgeschwindigkeitsfilm" vom Innern eines Krypton-Atoms gedreht. Doch die Lichtblitze waren nicht ganz identisch und der Film gleichsam verwackelt. Jetzt ist es der Wiener Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit Forschern vom Max-Planck- Institut für Quantenoptik in Garching gelungen, das Laserstroboskop noch einmal wesentlich zu verbessern.

Kurz, kürzer, am kürzesten

Am einfachsten lässt sich ein Laserstroboskop bauen, indem man einen Laser in schneller Folge ein- und ausschaltet. Da sich die Energie im Laser immer wieder neu aufbauen muss, ist das Verfahren allerdings recht träge: Die Lichtblitze sind nicht viel kürzer als eine Millionstelsekunde. Für ambitionierte Photographen ist das kürzer als nötig, für Grundlagenforscher aber noch viel zu lang. So wollen Chemiker verstehen, wie sich die Atome und Moleküle während chemischer Reaktionen bewegen; Physiker interessieren sich für die Bewegung der Elektronen um den Atomkern. Erst mit Lichtblitzen im Femtosekundenbereich lassen sich solche Bewegungen erfassen. Einen ersten Durchbruch erzielten Wissenschaftler 1990 mit der Entwicklung von UltrakurzpulsLasern. In diesen Lasern wird eine Linse verwendet, deren Brechkraft von der Lichtintensität abhängt. Nur ein Lichtwellenpaket mit hoher Intensität, das zwischen den Spiegeln des Laserresonators im Kreis läuft, erfüllt die Resonanzbedingung. Einer der Spiegel lässt einen Teil des Lichts passieren, so dass bei jedem Umlauf ein kurzer Lichtblitz ausgekoppelt wird. Mit derartigen Lasern werden heute routinemässig 5 bis 10 Femtosekunden kurze Lichtpulse im roten Spektralbereich erzeugt. Sie werden in der "Femtochemie" verwendet, um chemische Reaktionen stroboskopisch abzubilden oder auch gezielt anzuregen. Wer aber nicht nur Atome in Molekülen, sondern die flüchtigen Elektronen im Atom beobachten will, für den sind selbst Femtosekundenblitze nicht kurz genug. Ausserdem hat rotes Licht zu wenig Energie, um damit tief ins Innere der Atome schauen zu können. Hierzu ist Röntgenlicht mit seiner kürzeren Wellenlänge erforderlich. Mitte 2001 gelang es schliesslich einer französisch-holländischen Forschergruppe, beide Herausforderungen - kürzere Pulse und kürzere Wellenlängen - auf einen Schlag zu meistern. Dabei nutzten die Forscher aus, dass die Lichtstärke in einem Femtosekundenpuls nur wenige Male auf und ab schwingt - wie in einer abgeschnittenen Sinus- oder Cosinusfunktion. Sie fokussierten die Pulse eines Femtosekundenlasers auf ein Gas aus Argon-Atomen. Jedes Mal, wenn die Lichtstärke eines Pulses ihr Maximum erreichte, war die Intensität hoch genug, die Gasatome zu ionisieren. Daraufhin sendeten die Argon-Atome in kurzen Abständen Röntgenlichtblitze aus, die nur 250 **Attosekunden** (10<sup>-18</sup> Sekunden) lang waren. Zur Veranschaulichung: In einer Attosekunde legt Licht eine Strecke zurück, die dem Durchmesser eines Wasserstoffmoleküls entspricht. Die magische Grenze von einer Femtosekunde war durchbrochen.

## Erste Schnappschüsse eines Atoms

Welche Perspektiven solche ultrakurzen Laserpulse eröffnen, demonstrierten im vergangenen Jahr Forscher um Markus Drescher von der Universität Bielefeld und Ferenc Krausz von der Universität Wien. Mit einer verfeinerten Technik gelang es den Wissenschaftlern erstmals, einen Prozess in der Elektronenhülle eines Krypton-Atoms stroboskopisch abzubilden. Mit einem ersten Röntgenpuls ionisierten die Forscher das Atom. Dabei wird ein Elektron aus einer inneren Schale entfernt. Mit einem zweiten, verzögerten Lichtblitz beobachteten sie, wie die verbleibenden Elektronen im Atom die Lücke füllten. Das Fachblatt "Science" zählte diese Attosekundenphysik zu den zehn wichtigsten wissenschaftlichen Errungenschaften des vergangenen Jahres.

Noch blieb die Filmsequenz vom Atom jedoch etwas unscharf. Denn die Physiker konnten die Phase des Lichtwellenpakets nicht kontrollieren. Es blieb daher dem Zufall überlassen, ob das Lichtfeld im Wellenpaket erst nach oben oder erst nach unten ausschlägt. Bei einer Pulslänge, die nur ein bis zwei Wellenberge und -täler umfasst, macht dies einen erheblichen Unterschied.

Zur Lösung dieses Problems tat sich die Arbeitsgruppe von Krausz mit Theodor Hänsch und seinen Mitarbeitern vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching zusammen. Schon vor einigen Jahren war es den deutschen Forschern in gänzlich anderem Zusammenhang gelungen, die Phase des Lichtfeldes in Femtosekundenlasern zu kontrollieren und identische Pulse herzustellen. Es blieb allerdings die Frage, ob diese Phasenkontrolle auch dann noch funktioniert, wenn man mit den massgeschneiderten Femtosekundenpulsen Röntgenlicht erzeugt.

Gemeinsam haben nun die Forscher um Hänsch und Krausz gezeigt: Es geht. Sie verstärkten die Femtosekundenpulse und fokussierten sie in ein mit Neon gefülltes Röhrchen, so dass die Atome Röntgenlicht abstrahlten. Tatsächlich folgte die Phase des Röntgenlichts mit einer Genauigkeit von 10 Prozent der einstellbaren Phase der roten Femtosekundenpulse. Mit den phasenstabilisierten **Attosekunden**-Röntgenpulsen steht den Atomphysikern nun ein ausgereiftes Stroboskop zur Verfügung, das scharfe Schnappschüsse von inneratomaren Prozessen verspricht. In einem Kommentar für die Zeitschrift "Nature" schwärmt der amerikanische Physiker Philip Bucksbaum denn auch von einem "schwindelerregenden Heldenstück". Das klingt wie die Begeisterung über die ersten Stummfilme.

Quelle: Nature 421, 593-594; 611-615 (2003).

Max Rauner

---

656044, NZZ , 26.02.03; Words: 897 , NO: 8OXWT