# Attophysik einfach erklärt: Wie man Elektronen bei der Bewegung zusieht

DIE SCHNELLSTE STOPPUHR DER WELT

Im Herbst 2002 berichteten Physiker aus Bielefeld und Wien in der Zeitschrift Nature von einer Messung, die es vorher nicht gegeben hatte. Sie hatten Kryptonatomen mit einem Lichtblitz von weniger als einer Femtosekunde ein Elektron aus einer inneren Schale geschlagen und dann mit der Stoppuhr verfolgt, wie die Elektronenhülle die Lücke wieder füllt. Ergebnis: Das Loch lebt im Mittel 7,9 Femtosekunden [1]. Zum ersten Mal war damit ein Vorgang in der inneren Elektronenhülle eines Atoms direkt im Zeitverlauf gemessen worden, statt ihn nur aus der Breite von Spektrallinien zu erschließen [1].

Daraus ist ein eigenes Forschungsgebiet geworden, die Attosekundenphysik. Gut zwanzig Jahre später, 2023, erhielten Pierre Agostini, Ferenc Krausz und Anne L’Huillier dafür den Physik-Nobelpreis, „für experimentelle Methoden, die Attosekunden-Lichtpulse zur Untersuchung der Elektronendynamik in Materie erzeugen“ (Übersetzung) [2]. Krausz, damals in Wien, war schon an dem Experiment von 2002 beteiligt.

## Wie kurz ist eine Attosekunde?

Eine Attosekunde ist ein Milliardstel einer Milliardstelsekunde, $10^{-18}$ Sekunden. Das Nobelkomitee hat es so veranschaulicht: In einer Sekunde stecken etwa so viele Attosekunden, wie seit dem Urknall Sekunden vergangen sind [2]. Selbst das Licht, das Schnellste, was es gibt, kommt in einer Attosekunde nur 0,3 Nanometer weit, das ist etwa der Durchmesser eines Atoms. Abbildung 2 weiter unten ordnet diese Zeit zwischen anderen bekannten Zeitspannen ein.

Warum braucht man so kurze Zeiten? Weil Elektronen so schnell sind. In der Quantenmechanik hat ein Elektron im Atom keine Bahn, auf der man es verfolgen könnte. Bewegung entsteht erst, wenn es sich in einer Überlagerung zweier Zustände mit verschiedener Energie befindet. Dann verschiebt sich seine Aufenthaltswahrscheinlichkeit periodisch hin und her, und die Periode hängt nur vom Energieunterschied ab:

$$T = \frac{h}{\Delta E} \approx \frac{4{,}14\,\mathrm{fs\cdot eV}}{10{,}2\,\mathrm{eV}} \approx 400\,\mathrm{as} \tag{1}$$

Für das Wasserstoffatom, dessen zwei tiefste Energiestufen 10,2 Elektronenvolt auseinanderliegen, ergeben sich rund 400 Attosekunden (eigene Rechnung mit dem Planckschen Wirkungsquantum $h$ [3]). Elektronen in Atomen und Molekülen bewegen sich also typischerweise auf der Zeitskala von Attosekunden [4]. Wer eine solche Bewegung sehen will, braucht eine Kamera, deren Belichtungszeit deutlich kürzer ist. Warum Elektronen überhaupt nur bestimmte Energiestufen haben, erklärt die Seite Was sind Quanten?.

## Die Grenze des Laserlichts

Die kürzesten Blitze, die man vor 2001 erzeugen konnte, kamen aus Lasern und dauerten einige Femtosekunden. Mit ihnen ließ sich zum Beispiel verfolgen, wie Atome in Molekülen schwingen oder wie eine chemische Bindung bricht [4]. Für Elektronen reichte das nicht, und es gab einen einfachen Grund dafür. Ein Lichtpuls lässt sich kaum kürzer machen als etwa eine Schwingung seiner Lichtwelle, und die dauert bei sichtbarem und nahem infrarotem Licht etwa so lange:

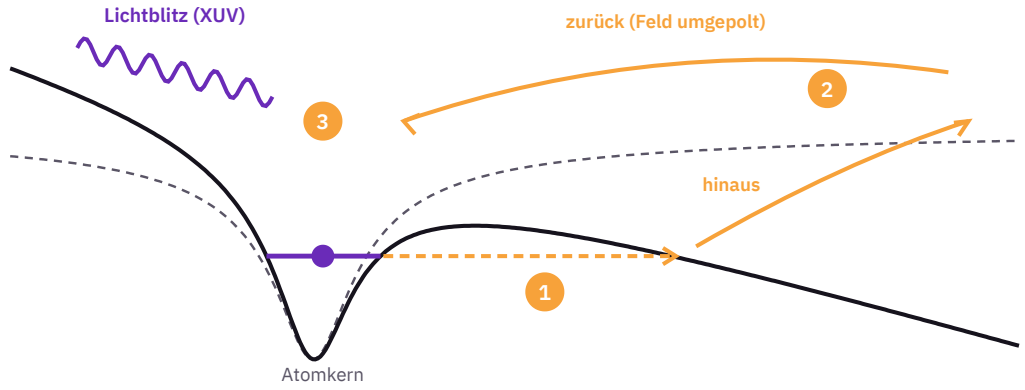
$$T_L = \frac{\lambda}{c} = \frac{800\,\mathrm{nm}}{3 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}} \approx 2{,}7\,\mathrm{fs} \tag{2}$$

Mit den verbreiteten Titan-Saphir-Lasern, die bei rund 800 Nanometern arbeiten [4], ist also bei wenigen Femtosekunden praktisch Schluss. Kürzere Pulse brauchen kürzere Wellen, also Licht im extremen Ultraviolett (XUV) oder im weichen Röntgenbereich. Und noch etwas verlangt schon die Wellenphysik: Je kürzer ein Puls, desto breiter muss sein Spektrum sein. Übersetzt in Photonenenergien führt das auf eine Unschärferelation zwischen Zeit und Energie, ähnlich der zwischen Ort und Impuls (mehr dazu bei der Unschärferelation). Ein Attosekundenpuls ist deshalb nie einfarbig, er enthält Photonen, deren Energien sich um mehrere bis viele Elektronenvolt unterscheiden.

## Ein Elektron als Blitzlicht

Den Weg zu solchen Pulsen öffnete eine Entdeckung, die zunächst niemand recht verstand. 1987 schickten Anne L'Huillier und Kollegen in Saclay bei Paris einen starken Infrarotlaser durch ein Edelgas und fanden im austretenden Licht eine ganze Reihe von Obertönen, Licht mit einem ungeraden Vielfachen der eingestrahlten Frequenz [2],[5]. Hohe Harmonische hatte im selben Jahr auch eine Gruppe in Chicago mit ultraviolettem Laserlicht beobachtet [6]. Erstaunlich war an den Messungen aus Saclay, dass diese hohen Harmonischen nicht, wie erwartet, mit steigender Ordnung rasch schwächer wurden, sondern über einen weiten Bereich etwa gleich hell blieben und dann plötzlich abbrachen [5],[4].

Die Erklärung fanden 1993 unabhängig voneinander Paul Corkum sowie Kenneth Kulander und Kollegen, und sie besteht aus drei Schritten (Abb. 1) [7],[8]. Das elektrische Feld des Lasers ist so stark, dass es die Energielandschaft, in der das Elektron an seinen Kern gebunden ist, schräg kippt. Das Elektron kann dann durch die verbleibende Barriere hinaustunneln, ein rein quantenmechanischer Vorgang. Draußen beschleunigt es das Laserfeld erst vom Atom weg und, sobald sich das Feld umpolt, wieder zurück. Trifft es dabei auf das Ion, aus dem es stammt, kann es wieder eingefangen werden und gibt die unterwegs gesammelte Bewegungsenergie samt Bindungsenergie als einzelnes Photon ab, im extremen Ultraviolett.




**1** Tunneln durch die gekippte Barriere **2** Beschleunigung und Umkehr **3** Rückkehr und Aussendung
durchgezogen: Energielandschaft mit Laserfeld, gestrichelt: ohne Laserfeld; waagrecht: Abstand vom Kern; schematisch

**Abb. 1:** Drei-Stufen-Modell der Erzeugung hoher Harmonischer: Tunneln, Beschleunigung im Laserfeld, Rückkehr und Aussendung eines energiereichen Photons. Schematische eigene Darstellung nach [7],[4].

Das Modell erklärt auch, wo das Spektrum abbricht. Kein Photon kann mehr Energie tragen als die Bindungsenergie plus die größte Bewegungsenergie, die ein zurückkehrendes Elektron im Laserfeld aufsammeln kann. Krause, Schafer und Kulander hatten 1992 in Computersimulationen die Faustregel $I_p + 3\,U_p$ gefunden [9], das Rückkehrmodell lieferte die Begründung und den genauen Faktor 3,17 [7]:

$$E_{\max} \approx I_p + 3{,}17 \cdot U_p, \qquad U_p = \frac{e^2 {E_0}^2}{4 m_e \omega^2} \tag{3}$$

$I_p$ ist die Ionisierungsenergie des Atoms, $U_p$ die ponderomotorische Energie, also die mittlere Schwingungsenergie eines freien Elektrons im Laserfeld mit der Feldstärke $E_0$ und der Kreisfrequenz $\omega$. Ein Beispiel: Neon hat eine Ionisierungsenergie von 21,6 eV [10]. Bei 800 Nanometern und einer Intensität von $3 \cdot 10^{14}$ Watt pro Quadratzentimeter beträgt $U_p$ rund 18 eV, und die Photonen reichen bis knapp 80 eV, was einer Wellenlänge von etwa 16 Nanometern entspricht (eigene Rechnung nach [4]). Weil das Zurückkehren nur in einem schmalen Moment jeder halben Laserschwingung geschieht, also zweimal pro Schwingung,

kommt das Licht nicht gleichmäßig, sondern als Folge kurzer Blitze, jeder nur einen Bruchteil einer Femtosekunde lang.

## Von der Pulsfolge zum einzelnen Blitz

Nachgewiesen wurden diese Blitze 2001, gleich zweimal. Die Gruppe um Pierre Agostini in Saclay zeigte, dass die hohen Harmonischen eine Folge von Pulsen bilden, von denen jeder nur 250 Attosekunden dauert [11],[2]. Ferenc Krausz und Kollegen in Wien gelang es im selben Jahr, mit einem Laserpuls von nur wenigen Schwingungen einen einzelnen Blitz von 650 Attosekunden herauszuschneiden und seine Dauer zu messen [12]. Mit solchen Einzelblitzen gelang dann 2002 die Messung am Krypton.

Gemessen wird dabei fast immer nach demselben Prinzip wie in einem Stroboskop. Ein erster Puls stößt einen Vorgang an, ein zweiter fragt nach einer genau eingestellten Verzögerung ab, wie weit er gekommen ist. Verschiebt man die Verzögerung Schritt für Schritt, entsteht so etwas wie ein Film. In der Attosekundenphysik übernimmt oft das Feld des Laserpulses selbst die Rolle des zweiten Pulses. Es versetzt den Elektronen, die der XUV-Blitz herausgeschlagen hat, je nach Ankunftszeit einen unterschiedlich starken Stoß, und aus ihrer Energie lässt sich ablesen, zu welchem Zeitpunkt sie freigesetzt wurden [4], [12].

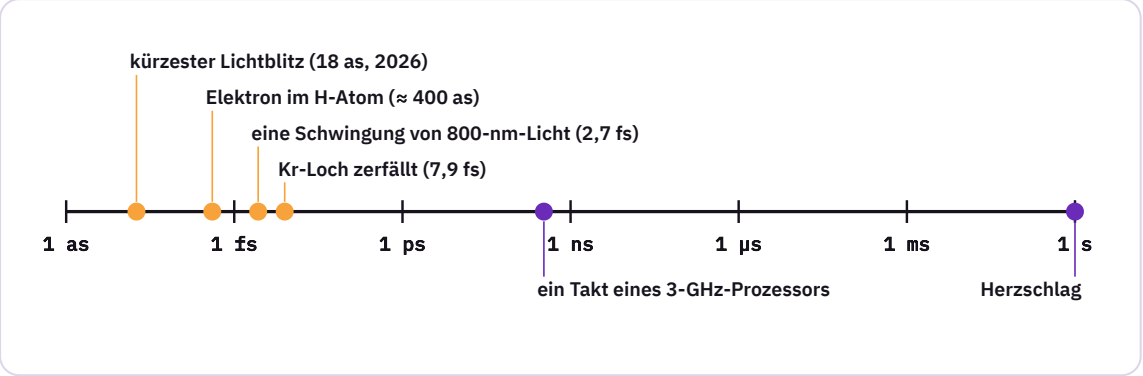



**Abb. 2:** Einige Zeitspannen auf logarithmischer Skala. Werte nach [1],[13] sowie eigene Rechnungen nach den Gleichungen (1) und (2).

## Was man seither gesehen hat

Die Rekorde sind inzwischen weiter gefallen. 2017 erreichte eine Gruppe an der ETH Zürich 43 Attosekunden [14], 2025 eine Gruppe am ICFO in Barcelona 19,2 Attosekunden [15] und 2026 eine Gruppe an der Kansas State University 18 Attosekunden [13]. Wichtiger als die Rekorde sind die Fragen, die man nun stellen kann. Eine der überraschendsten betraf den Fotoeffekt, den Einstein 1905 mit seiner Lichtquantenhypothese erklärte. Man hatte stillschweigend angenommen, dass ein Elektron in dem Moment herausfliegt, in dem das Photon eintrifft. 2010 zeigten Messungen an Neon, dass Elektronen aus der 2p-Schale um rund 21 Attosekunden später austreten

als solche aus der 2s-Schale, wenn derselbe Lichtblitz beide freisetzt [16]. Der Wert passte jahrelang nicht zu den Rechnungen, bis sich zeigte, dass ein Teil der Messung auf Elektronen zurückgeht, die beim Austritt ein zweites Elektron im Atom anregen [17]. Selbst der Fotoeffekt braucht also Zeit, und wie viel, hängt davon ab, wie die Elektronen im Atom miteinander wechselwirken.

Heute untersuchen Forschungsgruppen mit Attosekundenpulsen, wie Ladung in Molekülen wandert, bevor sich die Atome überhaupt bewegen [18], und wie schnell sich Elektronen in Festkörpern durch Licht steuern lassen [19]. Das Nobelkomitee nennt als mögliche Anwendungen unter anderem die Elektronik und die medizinische Diagnostik [2]. Wie die Quantenmechanik vor rund hundert Jahren entstand, aus der all das folgt, erzählt die Seite 100 Jahre Quantenmechanik.

## Quellen


1. M. Drescher, M. Hentschel, R. Kienberger, M. Uiberacker, V. Yakovlev, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, F. Krausz: *Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy.* In: Nature 419 (2002), S. 803–807, doi:10.1038/nature01143.
2. Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften: *The Nobel Prize in Physics 2023.* Pressemitteilung, 3. Oktober 2023, nobelprize.org/prizes/physics/2023.
3. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
4. F. Krausz, M. Ivanov: *Attosecond physics.* In: Reviews of Modern Physics 81 (2009), S. 163–234, doi:10.1103/RevModPhys.81.163.
5. M. Ferray, A. L'Huillier, X. F. Li, L. A. Lompré, G. Mainfray, C. Manus: *Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases.* In: Journal of Physics B 21 (1988), S. L31–L35, doi:10.1088/0953-4075/21/3/001.
6. A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I. A. McIntyre, K. Boyer, C. K. Rhodes: *Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases.* In: Journal of the Optical Society of America B 4 (1987), S. 595–601, doi:10.1364/JOSAB.4.000595.
7. P. B. Corkum: *Plasma perspective on strong field multiphoton ionization.* In: Physical Review Letters 71 (1993), S. 1994–1997, doi:10.1103/PhysRevLett.71.1994.
8. K. J. Schafer, B. Yang, L. F. DiMauro, K. C. Kulander: *Above threshold ionization beyond the high harmonic cutoff.* In: Physical Review Letters 70 (1993), S. 1599–1602, doi:10.1103/PhysRevLett.70.1599.

9. J. L. Krause, K. J. Schafer, K. C. Kulander: *High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime.* In: Physical Review Letters 68 (1992), S. 3535–3538, doi:10.1103/PhysRevLett.68.3535.
10. A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, NIST ASD Team: *NIST Atomic Spectra Database* (Version 5.12), Ionisierungsenergien, abgerufen im Oktober 2026, physics.nist.gov/asd.
11. P. M. Paul u. a.: *Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation.* In: Science 292 (2001), S. 1689–1692, doi:10.1126/science.1059413.
12. M. Hentschel u. a.: *Attosecond metrology.* In: Nature 414 (2001), S. 509–513, doi:10.1038/35107000.
13. J. Gao u. a.: *Bright isolated light pulses reaching 18 attoseconds from high-order harmonic generation by post-compressed Yb lasers.* In: Nature Communications 17 (2026), 8810, doi:10.1038/s41467-026-76827-3.
14. T. Gaumnitz u. a.: *Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver.* In: Optics Express 25 (2017), S. 27506, doi:10.1364/OE.25.027506.
15. F. Ardana-Lamas, S. L. Cousin, J. Lignieres, J. Biegert: *Brilliant Source of 19.2-Attosecond Soft X-ray Pulses below the Atomic Unit of Time.* In: Ultrafast Science 5 (2025), 0128, doi:10.34133/ultrafastscience.0128.
16. M. Schultze u. a.: *Delay in Photoemission.* In: Science 328 (2010), S. 1658–1662, doi:10.1126/science.1189401.
17. M. Isinger u. a.: *Photoionization in the time and frequency domain.* In: Science 358 (2017), S. 893–896, doi:10.1126/science.aao7043.
18. F. Calegari u. a.: *Ultrafast electron dynamics in phenylalanine initiated by attosecond pulses.* In: Science 346 (2014), S. 336–339, doi:10.1126/science.1254061.
19. A. Schiffrin u. a.: *Optical-field-induced current in dielectrics.* In: Nature 493 (2013), S. 70–74, doi:10.1038/nature11567.

## Zitiervorschlag

**quanten.de: *Attophysik einfach erklärt: Wie man Elektronen bei der Bewegung zusieht.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/attophysik.html (PDF: https://quanten.de/pdf/attophysik.pdf)**

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

**Weiterlesen:** Unschärferelation · Was sind Quanten? · 100 Jahre Quantenmechanik

---

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/attophysik.html