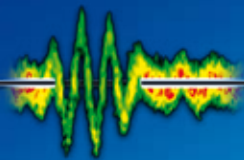




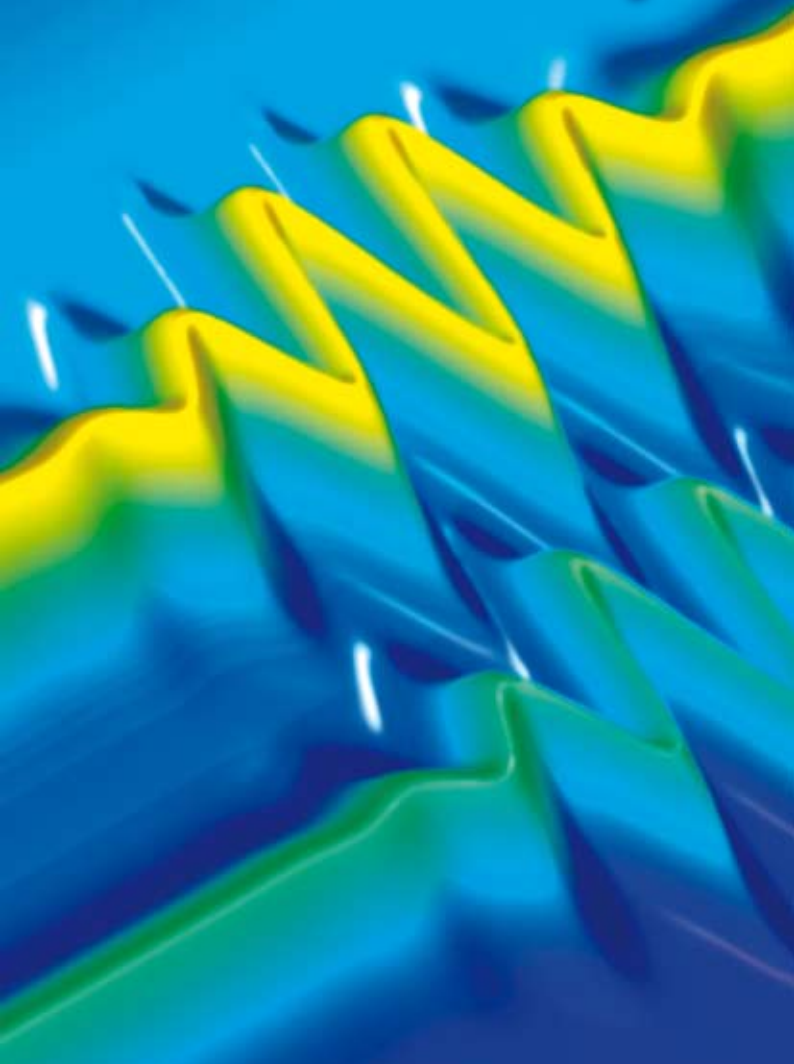
MAX-PLANCK-GESellschaft

**LMU**

[www.attoworld.de](http://www.attoworld.de)



# Das Labor für Attosekunden-Physik



Professor Ferenc Krausz



## Das Labor für Attosekunden-Physik

---

Der Flügelschlag einer Fliege dauert eine Ewigkeit, wenn man ihn mit den Zeitdimensionen vergleicht, mit denen sich die Wissenschaftler im Labor für Attosekunden-Physik (LAP) beschäftigen. LAP ist ein Gemeinschaftsprojekt zwischen dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching und der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU). Hier erkunden die Attosekundenphysiker die schnellsten Vorgänge, die bis heute außerhalb des Atomkerns in der Natur bekannt sind. Diese Prozesse dauern nur wenige Attosekunden. Eine Attosekunde ist ein Milliardstel einer milliardstel Sekunde.

### **In der Welt der Quanten**

Bei ihrer Arbeit tauchen die Wissenschaftler in die Welt der Quanten ein. Hier verlieren die klassischen Gesetze, wie sie Isaac Newton vor mehr als 350 Jahren aufstellte, ihre Gültigkeit. Positionen und Bewegungen von Elementarteilchen sind nicht mehr gleichzeitig exakt bestimmbar. Manchmal sind die Partikel auf geisterhafte Weise miteinander verbunden und haben entweder Wellen- oder Teilcheneigenschaften.

Vor allem interessieren sich die LAP-Laserphysiker für das Verhalten von Elektronen in atomaren Dimensionen in jeder



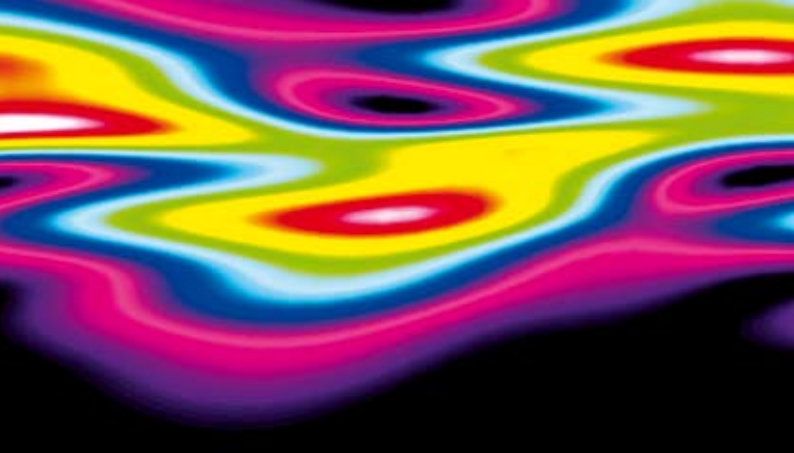
*Zeit ist, was verhindert, dass alles  
auf einmal passiert.*

**John A. Wheeler**, US-Physiker (geb. 1911)

Form der Materie; in Atomen, Molekülen, Festkörpern und auch in Plasmen. Atome bestehen aus einem Kern aus Protonen und Neutronen sowie aus einer Hülle von Elektronen. Elektronen sind Quantenteilchen - sie können nicht mehr geteilt werden. Trifft Licht auf Elektronen in Atomen, dann erhalten diese zusätzliche Energie und vollführen Sprünge zwischen Energiezuständen. Die Bewegungen laufen rasend schnell ab, innerhalb weniger zehn bis tausend Attosekunden.

### **Ultrakurze Lichtblitze**

Um diese Bewegungen zu erkunden, müssen die Physiker ebenso schnell sein wie die Elektronen. Dies bewerkstelligen die Forscher mit Lichtblitzen, die selbst nur wenige zehn Attosekunden dauern. Die Lichtblitze schießen die Forscher auf die Proben. Zwei Lichtblitze werden dabei ausgesandt. Der erste regt die Elektronen in den Atomen an, damit sie sich in Bewegung setzen. Der zweite Blitz beobachtet die Reaktion der Teilchen. So „fotografieren“ die Physiker die Elektronen während ihrer Bewegung innerhalb einzelner Atome. Je kürzer dabei die Lichtpulse sind, ähnlich wie bei der Verschlusszeit einer normalen Kamera, desto schärfer werden die Bilder von den Bewegungen der rasenden Elementarteilchen.



## Die Dimension einer Attosekunde

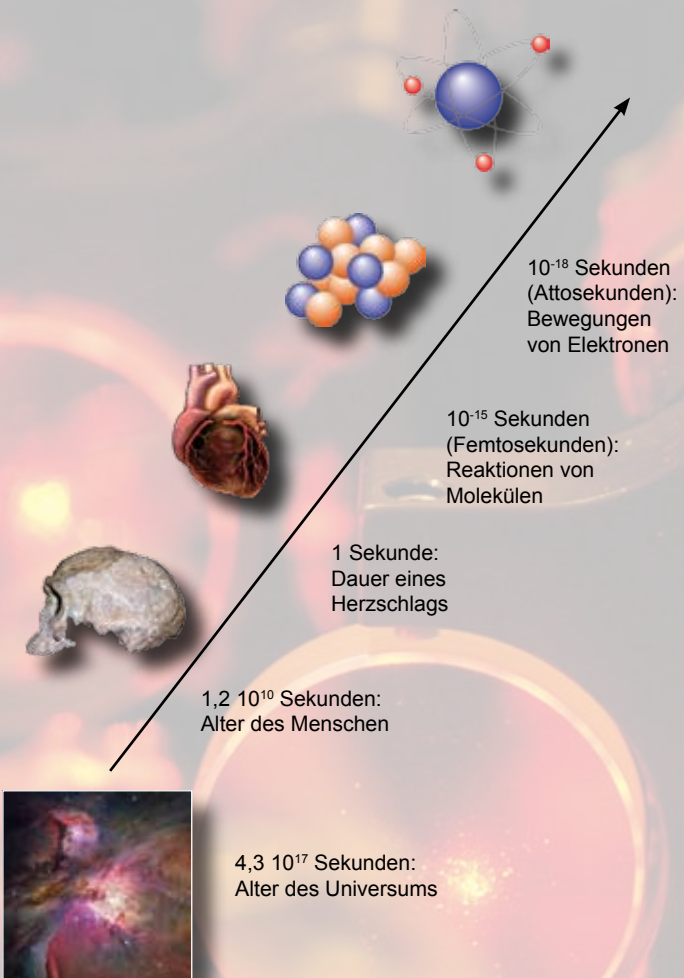
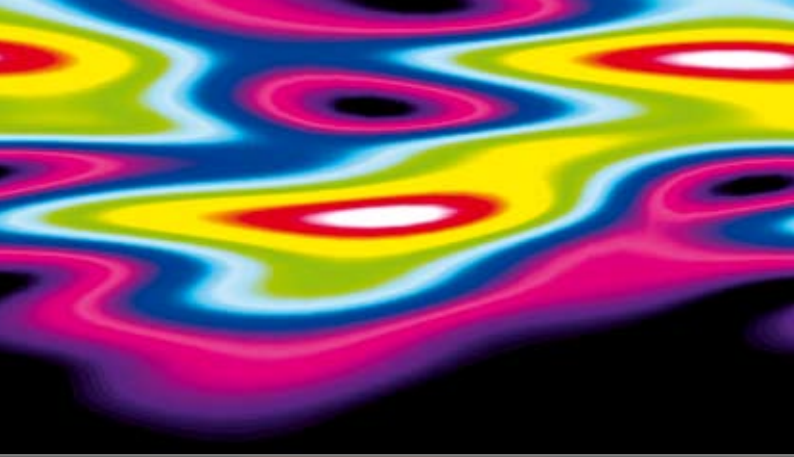
---

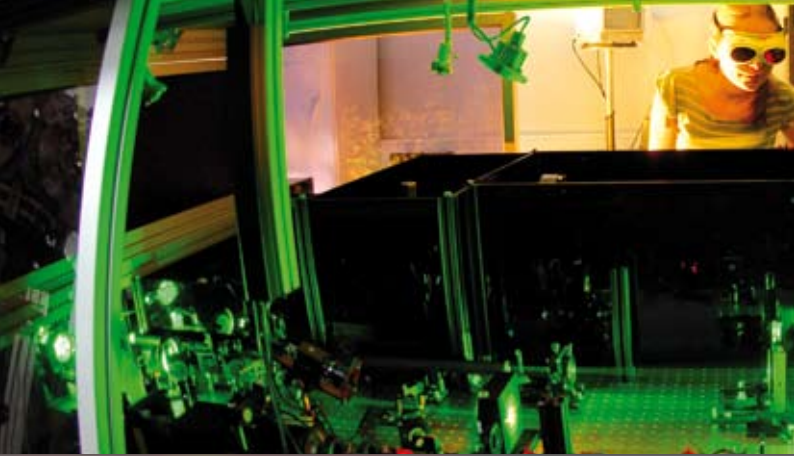
Ausnahmsweise sind es nicht die Griechen, sondern die Skandinavier, die für die Herkunft des Wortes „Atto“ verantwortlich sind. Im Dänischen heißt „atten“ 18. Im Dezimalstellensystem wird das Wort „Atto“ als Vorsilbe für eine Zahl gebraucht, die 17 Nullstellen hinter dem Komma hat; die folgende 18. Stelle ist dann eine Zahl über Null. In der Mathematik spricht man von  $10^{-18}$ . So dauert eine Attosekunde ein Milliardstel einer milliardstel Sekunde oder auch ein Tausendstel einer Femtosekunde ( $10^{-15}$  s). Der Flügelschlag einer Fliege ist rund eine Million Milliarden mal langsamer.



Die Lichtgeschwindigkeit beträgt knapp 300 000 Kilometer pro Sekunde. In einer Attosekunde legt das Licht einen Weg zurück, der nicht länger ist als ein paar milliardstel Meter. Dies entspricht der Aneinanderreihung von rund drei Wasserstoffatomen. Die Dauer einer Attosekunde verhält sich zur Dauer einer Sekunde wie eine Sekunde zum Alter des Universums, das rund 13,7 Milliarden Jahre alt ist.

$$1 \text{ as} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 \text{ s}$$





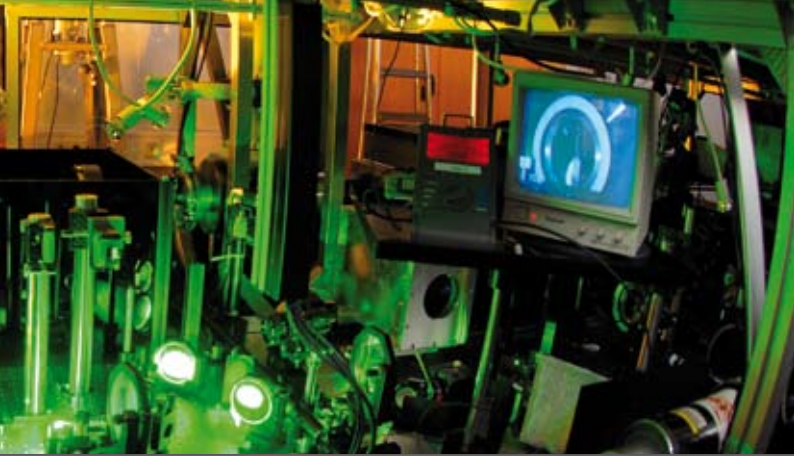
## Die Geburt eines Attosekunden-Lichtblitzes

---

Attosekunden-Lichtblitze werden durch Laser erzeugt, deren Pulse im Femtosekundenbereich liegen. Die Laserphysiker schicken dazu die Femtosekunden-Lichtpulse auf eine kleine Düse in einer Vakuumkammer. Aus dieser Düse strömt ein Edelgas wie etwa Neon (s. Bild S. 12). Die Laserpulse regen die Elektronen in den Edelgasatomen zum Schwingen an. Bei der darauf folgenden Abgabe ihrer Energie senden die Elektronen selbst Lichtblitze im Attosekundenbereich aus. Die Attosekundenpulse sind also keine direkten Laserpulse, sondern Lichtblitze, die über Laser erzeugt werden. Zudem befinden sich die Blitze in dem für Menschen nicht sichtbaren Röntgenlicht (Wellenlänge rund zehn bis 20 Nanometer). Die Erzeugung der weltweit ersten Attosekunden-Lichtblitze gelang den Forschern um Prof. Ferenc Krausz im Jahr 2001. Damals betrug die Dauer noch 650 Attosekunden. Im Jahr 2008 haben die Laserphysiker die Blitze bis auf weniger als 100 Attosekunden verkürzt. Diesen Erfolg haben die Forscher vor allem der immer genaueren Kontrolle der Laserlichtwellen zu verdanken.

*Guinness-Urkunde für  
den kürzesten Lichtblitz*





## Lichtpulse mit hohen Leistungen

Neben der Forschung mit ultrakurzen Lichtblitzen arbeitet das LAP-Team auch an der Erzeugung von Laserpulsen, die über eine enorme Leistung verfügen. Diese Lichtpulse dauern einige Femtosekunden ( $10^{-15}$  Sekunden).

In der kurzen Zeitspanne kann man einen Lichtpuls mit einer Leistung ausstatten, die alle Atomkraftwerke der Erde zusammen erzeugen.



Zusammengeballt in einem einzigen Lichtblitz erzeugt diese Leistung extrem starke elektrische und magnetische Felder. Die gigantischen Kräfte lösen zum Beispiel Elektronen aus Atomen heraus und beschleunigen sie bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit. Damit können die Elementarteilchen wiederum als Strahlungsquelle dienen und etwa dabei helfen, leistungsfähige, lasergetriebene Röntgenstrahlung zu produzieren. Diese Strahlung würde eine völlig neue Bildqualität für biologische oder medizinische Anwendungen erreichen und helfen, kleinste Strukturen sichtbar zu machen.

*Blick ins  
Hochfeld-  
Laserlabor*



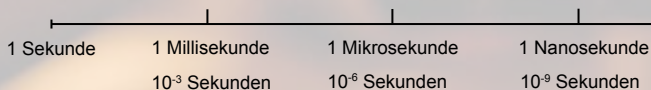
## Kleine Geschichte der Zeitmessung

---

Wer Intervalle von kurzer Dauer bestimmen will, muss in der Lage sein, Zeit zu messen. Die Priester in Mesopotamien und Ägypten gehörten mit zu den ersten Menschen, die vor rund 4000 Jahren kürzere Zeitintervalle bestimmen konnten. Schon damals nahmen die Gelehrten das Licht zur Hilfe. Sie entwickelten das Gnomon. Mit dem stabförmigen Körper, dessen Sonnenschatten beobachtet wird, wurden astronomische Größen bestimmt und so die ersten Jahreskalender niedergeschrieben. In ägyptischen Städten waren zudem Obelisken aufgestellt, die als Sonnenuhren dienten.

Nachdem im Jahr 1946 die erste Atomuhr vorgestellt worden war, war man schnell in der Lage, eine Sekunde mit einer Genauigkeit von einem Millionstel einer milliardstel Sekunde zu messen. Die Erfindung des Lasers im Jahr 1960 läutete eine völlig neue Ära der Kurzzeitmesstechnik ein.

Zunächst konnte man mit Piko- und später mit Femtosekunden-Laserpulsen Bewegungen von ganzen Atomen in Molekülen und Festkörpern in Echtzeit beobachten.



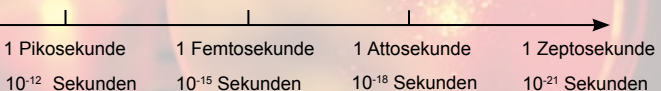


*Es ist nicht wenig Zeit, die wir haben,  
sondern es ist viel, die wir nicht nutzen.*  
**Seneca, römischer Philosoph (1. Jhd. n. Chr.)**

Professor Ahmed Zewail vom California Institute of Technology (CALTECH) wurde dafür 1999 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet. Die Attosekundenpulse der LAP-Forscher eröffneten dann den Weg zur direkten Beobachtung der tausend mal schnelleren Elektronenbewegungen.

### **Kontrolle über das Licht**

Der Weg in den Attosekundenbereich führt über die Kontrolle der Schwingungen von Laserlicht. Die LAP-Forscher um Prof. Ferenc Krausz machten sich die Nobelpreis gekrönte Frequenzkammtechnik von Prof. Theodor Hänsch zunutze, um Lichtwellen erstmals zu „bändigen“. Damit schafften sie die Voraussetzungen für die kontrollierte Erzeugung von Attosekunden-Blitzen sowie deren präzise Messung. Die Attosekunden-Messtechnik verdankt ihre Existenz damit einer früheren technischen Entwicklung. Sie zeigt beispielhaft, wie Forscher mit Hilfe der Erkenntnisse von Kollegen den wissenschaftlichen Fortschritt vorantreiben.





## Werkzeug für das 21. Jahrhundert

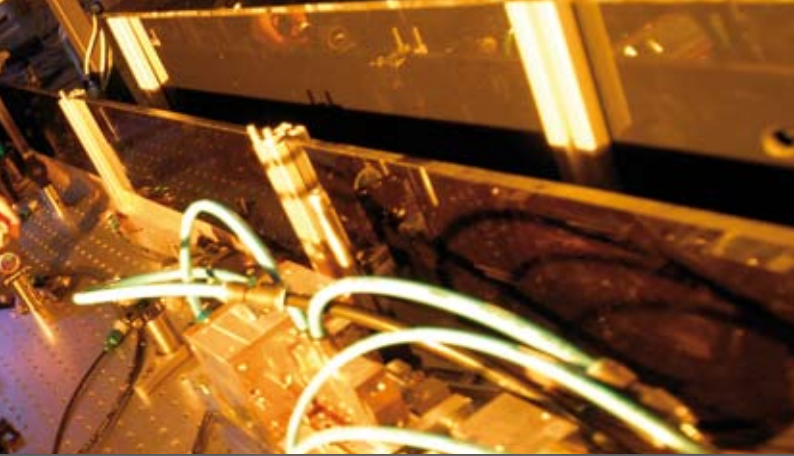
---

Nur mit Hilfe von Licht ist man in der Lage, die schnellsten Vorgänge in der Natur zu erkunden und zu kontrollieren. Denn Licht ist die einzige Kraft, die ihre Stärke und Richtung ebenso schnell variieren kann wie die Elektronen ihre Positionen ändern. Damit wird Licht zum Werkzeug des 21. Jahrhunderts für die Medizin, die Biologie und die Informationstechnologie.

Sowohl in der Natur als auch in der Technik spielen vor allem die Bewegungen von Elektronen eine fundamentale Rolle. Sie läuten chemische Reaktionen ein; sie binden Atome zu Molekülen oder helfen bei der Informations- und Reizübertragung in Organismen. In Metallen bewegen sich Elektronen im Kristallgitter. Dadurch werden die Metalle elektrisch leitfähig und transportieren außerdem Wärme. Die Informationstechnologie nutzt die Elektronen als Überträger von Daten. Kein Computerchip wird jemals schneller rechnen, als sich Elektronen bewegen.

*Quantenmechanischer Blick auf ein Molekül, das aus Atomen besteht: Rund um die Atomkerne (blau) befinden sich die Elektronen. Sie haben keine klassischen Flugbahnen. Die Teilchen werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (grün dargestellt) angetroffen.*





## Technologien für die Zukunft

Bis heute sind die meisten Phänomene in der Welt der Elektronen unbekannt. Die Frage, wie sich Elektronen in Atomen verhalten und interagieren stellt die Laserphysik vor große Herausforderungen. Ebenso ein Schwerpunkt des Interesses ist die Entwicklung von Technologien, mit denen man Elektronenbewegungen durch Licht kontrollieren und steuern kann. Neben der Erforschung der grundlegenden Prozesse des Lebens wird das neue Wissen um die Elektronen-Phänomene in der Medizin dazu beitragen, innovative Technologien wie etwa zur Diagnostik und Therapie von teilweise heute noch unheilbaren Krankheiten, zu entwickeln. Die Attosekundentechnik schafft auch die Möglichkeit, die Informationsverarbeitung bis zu ihrer ultimativen Grenze zu beschleunigen. Rechenoperationen könnten schließlich mit der enormen Frequenz von Lichtschwingungen durchgeführt werden.

### Bildlegenden für Titel und Umschlagbild:

**Titel:** Spektrum der Energieverteilung von durch Attosekunden-Lichtblitzen beschleunigten Elektronen. Beide Kurven sind zeitlich um 110 Attosekunden versetzt und geben damit Auskunft über die Laufzeit der Elementarteilchen.

**Hinteres Umschlagbild:** Aus einer Düse strömt Edelgas und wandelt von links kommende Laserpulse in Attosekunden-Lichtblitze um (s. Seite 6).

*Die Zeit verweilt lange genug für  
denjenigen, der sie nutzen will.*

**Leonardo da Vinci** (1452 bis 1519)

**Kontakt und Impressum:**

Labor für Attosekunden-Physik  
Professor Dr. Ferenc Krausz  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Hans-Kopfermann-Str. 1  
85748 Garching

Tel.: +49 32905 612  
Fax: +49 32905 649  
ferenc.krausz@mpq.mpg.de  
www.attoworld.de

© LAP; 1. Auflage 2009

Gestaltung und Text:  
Fotos:

Thorsten Naeser  
Thorsten Naeser, Markus Drescher,  
Adrian Cavalieri, NASA

Illustration und Bildbearbeitung:  
Christian Hackenberger,  
Barbara Ferus