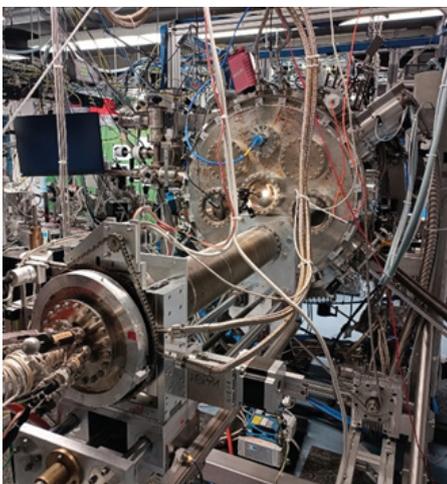


## Attosekundenphysik: Untersuchungen in Zeitlupe

- Der Physiknobelpreis 2023 würdigt die Arbeiten von Anne L’Huillier, Pierre Agostini und Ferenc Krausz auf dem Gebiet der Attosekundenphysik.
- Attosekunden-Lichtpulse werden außerhalb des sichtbaren Spektrums im extrem ultravioletten und im Röntgen-Bereich durch starke Laser erzeugt.
- Ihre Pulsdauer ist so kurz, dass man das Verhalten von Elektronen in Gasen, Molekülen und Festkörpern verfolgen kann.
- Dies erlaubt es, Abläufe in Solarzellen, photokatalytischen Energiegewinnungssystemen oder biologischen Mechanismen besser zu verstehen.

Die Bewegung von Elektronen in Atomen oder Molekülen findet auf der Attosekunden-Zeitskala statt. Eine Attosekunde dauert  $10^{-18}$  Sekunden, verhält sich also zu einer Sekunde etwa wie eine Sekunde zum Alter des Universums. Solche extrem schnellen Prozesse, wie z. B. Übergänge von Elektronen, spielen eine große Rolle in der Energiegewinnung bzw. -umwandlung, beispielsweise in Solarzellen oder bei der Erzeugung von Treibstoff durch Sonnenlicht. Um diese Reaktionen besser zu verstehen, muss man sie zeitlich auflösen, d. h. in Zeitlupe betrachten. Dafür benötigt man Lichtpulse, die ähnlich kurz sind wie die zu messenden Prozesse. Man kann das mit der Belichtungszeit in einem Fotoapparat vergleichen: Um von einem sehr schnell bewegten Objekt ein scharfes Foto zu machen, darf der Verschluss der Kamera nur sehr kurz geöffnet sein.



Attosekunden-Beamline für Festkörper-Experimente am Lehrstuhl für Laser- und Röntgenphysik an der TU München

Kommerzielle Lasersysteme im sichtbaren oder infraroten Spektralbereich liefern hochintensive Lichtpulse, allerdings mit Pulsdauern von noch etlichen Femtosekunden ( $10^{-15}$  Sekunden). In diesem Spektralbereich können die Pulse nicht kürzer werden, da das elektromagnetische Feld mindestens einmal oszillieren muss, damit sich solch ein Lichtpuls ausbreiten kann. Die Periodendauer stellt damit eine Untergrenze für die Dauer von Lichtpulsen dar. Um in den Attosekundenbereich vorzudringen, muss man Lichtpulse mit kürzerer Wellenlänge erzeugen: Im extremen Ultraviolet (XUV) oder Röntgen-Bereich. Dies gelingt durch Frequenzvervielfachung von intensiven Laserpulsen, die High-order Harmonic Generation (HHG). Sie wurde von Anne L’Huillier und Kollegen vor 30 Jahren demonstriert [1] und nun mit dem Physiknobelpreis honoriert. Hochintensive Laserpulse werden auf Gasatome geschossen und setzen dadurch Elektronen frei. Diese werden durch das elektrische Feld des Laserpulses zunächst vom „Mutteratom“ weggetrieben und dann wieder zurückbeschleunigt. Trifft das Elektron wieder auf „sein“ Atom und bleibt daran „haften“, wird die gesamte Bewegungsenergie des Elektrons in Form von Photonen, also Licht, freigesetzt. Es entsteht ein Spektrum von ungeradzahigen Vielfachen der Frequenz des ursprünglichen Laserpulses („Treiberpuls“), sogenannte „Harmonische“, das bis in den XUV-Bereich reicht.

Das Spektrum der Lichtpulse spiegelt auch ihre zeitliche Struktur wider. Im Fall eines Spektrums mit vielen einzelnen Harmonischen ist die zeitliche Struktur der Pulse periodisch, es liegen Pulszüge aus einzelnen Attosekundenpulsen vor. Dies sind XUV-Pulse mit einer Dauer von wenigen Hundert Attosekunden und einem zeitlichen Abstand von etwas mehr als einer Femtosekunde. Diese Messungen führte die Gruppe von Pierre Agostini durch [2] und begründete so seinen Beitrag am Physiknobelpreis.

Für das Ausmessen von schnellen Abläufen ist es vorteilhaft, keinen Pulszug sondern Einzelpulse zur Verfügung zu haben. Mit ihnen kann man eine Reaktion anstoßen (anregen) und zu späteren Zeitpunkten abtasten (abfragen), wie wenn man Bilder zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf-

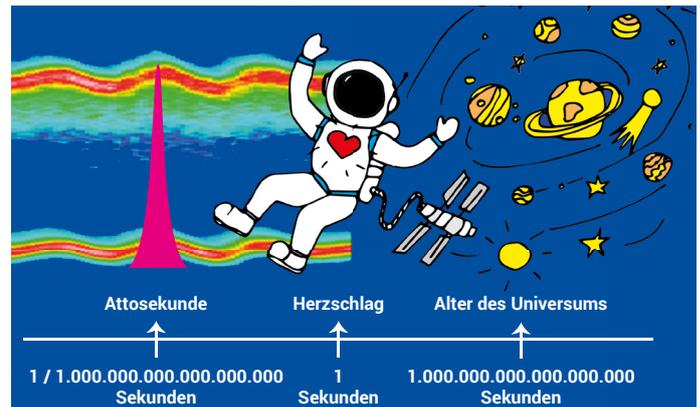


Joachim Ullrich, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

*„Die geheimnisvolle Welt der ultraschnellen Elektronendynamik wird erstmals sichtbar – Überraschungen sind nicht ausgeschlossen!“*

nimmt und zu einem Film zusammenfügt. Attosekunden-Einzelpulse erhält man nur, wenn die Treiberpulse knapp mehr als einen Oszillationszyklus des elektrischen Feldes umfassen und die Wellenform des Feldes genau definiert ist. In diesem Fall erfolgt bei der HHG die Emission der höchstenergetischen Photonen nicht periodisch, sondern nur einmal während der Dauer des Treiberpulses. Filtert man diese höchstenergetischen Photonen heraus, erhält man einen Attosekunden-Einzelpuls. Anfang des Jahrtausends wurden in einem Anrege-/Abfrage-Experiment Elektronen durch Attosekunden-Einzelpulse freigesetzt (Photoelektronen) und durch das elektrische Feld eines Laserpulses energetisch moduliert [3]. Durch diese sogenannte „Streaking-Messung“ konnten Einzelpulse mit einer Dauer von 650 Attosekunden demonstriert werden, wofür Ferenc Krausz den Physiknobelpreis erhielt.

Seit damals sind viele Phänomene auf der Attosekunden-Zeitskala gemessen worden, u. a. die Dauer, die ein Elektron nach Absorption eines Photons benötigt, um das Atom zu verlassen [4]. Für die Erklärung dieses photoelektrischen Effekts hat Einstein vor 100 Jahren den Nobelpreis bekommen. Der Erforschung der Elektronendynamik in Festkörpern wurde vom Nobelpreiskomitee im Jahre 2023 besondere Wichtigkeit zugemessen. Sie wird helfen, im Bereich der Energieumwandlung, der Biophysik oder der Informationsübermittlung Fortschritte zu erzielen.



Eine Attosekunde dauert  $10^{-18}$  Sekunden, verhält sich also zu einer Sekunde etwa wie eine Sekunde zum Alter des Universums.

# Deutsche **Physikalische** Gesellschaft

**Die Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)**, deren Tradition bis in das Jahr 1845 zurückreicht, ist die älteste nationale und mit rund 55.000 Mitgliedern auch die größte physikalische Fachgesellschaft weltweit. Sie versteht sich als Forum und Sprachrohr der Physik und verfolgt als gemeinnütziger Verein keine wirtschaftlichen Interessen. Die DPG unterstützt den Gedankenaustausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft mit Tagungen und Publikationen. Sie engagiert sich in der gesellschaftspolitischen Diskussion zu Themen wie Nachwuchsförderung, Chancengleichheit, Klimaschutz, Energieversorgung und Rüstungskontrolle. Sie fördert den Physikunterricht und möchte darüber hinaus allen Neugierigen ein Fenster zur Physik öffnen.

In der DPG sind Wissenschaftler:innen, Studierende, Lehrkräfte, in der Industrie tätige oder einfach nur an Physik interessierte Personen ebenso vertreten wie Patentanwältinnen oder Wissenschaftsjournalisten. Gegenwärtig hat die DPG sieben Nobelpreisträger in ihren Reihen. Weltberühmte Mitglieder hatte die DPG immer schon. So waren Albert Einstein, Hermann von Helmholtz und Max Planck einst Präsidenten der DPG.

Die DPG finanziert sich im Wesentlichen aus Mitgliedsbeiträgen. Ihre Aktivitäten werden außerdem von Bundes- und Landesseite sowie von gemeinnützigen Organisationen gefördert. Besonders eng kooperiert die DPG mit der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung.

Die DPG-Geschäftsstelle hat ihren Sitz im Physikzentrum Bad Honnef in unmittelbarer Nähe zur Universitäts- und Bundesstadt Bonn. Das Physikzentrum ist nicht nur ein Begegnungs- und Diskussionsforum von herausragender Bedeutung für die Physik in Deutschland, sondern auch Markenzeichen der Physik auf internationalem Niveau. Hier treffen sich Studierende und Spitzenwissenschaftler:innen bis hin zum Nobelpreisträger zum wissenschaftlichen Gedankenaustausch. Auch Lehrkräfte reisen immer wieder gerne nach Bad Honnef, um sich in den Seminaren der DPG fachlich und didaktisch fortzubilden.

In der Bundeshauptstadt Berlin ist die DPG ebenfalls präsent. Denn seit ihrer Vereinigung mit der Physikalischen Gesellschaft der DDR im Jahre 1990 unterhält sie dort das Magnus-Haus. Dieses 1760 vollendete Stadtpalais, das den Namen des Naturforschers Gustav Magnus trägt, ist eng mit der Geschichte der DPG verbunden: Aus einem Gelehrntreffen, das hier regelmäßig stattfand, ging im Jahre 1845 die „Physikalische Gesellschaft zu Berlin“, später die DPG hervor. Heute finden hier Kolloquien und Vorträge zu physikalischen und gesellschaftspolitischen Themen statt. Gleichzeitig befindet sich im Magnus-Haus Berlin auch das historische Archiv der DPG.

## Quellen und Fußnoten

1. L'Huillier & Balcou, *Physical Review Letters* 70, 774 (1993)
2. Paul, al. & Agostini, *Science* 292, 1689 (2001)
3. Hentschel\*, Kienberger\*, et al. & Krausz, *Nature* 414, 509 (2001)
4. Ossiander, al. & Kienberger, *Nature* 561, 374 (2018)

## Bildquellen

Beamline: © Reinhard Kienberger

Attosekunde: © Reinhard Kienberger und Grafik: DPG/Carstensen

## Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.

Geschäftsstelle      Tel.: 02224 / 92 32 - 0  
Hauptstraße 5      Fax: 02224 / 92 32 - 50  
53604 Bad Honnef    E-Mail: [dpg@dpg-physik.de](mailto:dpg@dpg-physik.de)

Die DPG dankt ihrem Autor Reinhard Kienberger, dem Inhaber des Lehrstuhls für Laser- und Röntgenphysik an der TU München.