

**Press release****Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie in  
Alexandra Wettstein**

02/22/2024

<http://idw-online.de/en/news829107>Research results, Scientific Publications  
Physics / astronomy  
transregional, national

Max Born Institute

und Berlin e.

**Ein neues Kapitel für Attosekunden-Pump Attosekunden-Probe Spektroskopie**

**Ein Team von Wissenschaftlern des Max-Born-Institutes in Berlin hat zum ersten Mal Attosekunden-Pump Attosekunden-Probe Spektroskopie (APAPS) bei einer Wiederholrate von 1 Kilohertz demonstriert. Dies wurde durch die Entwicklung einer kompakten intensiven Attosekundenquelle ermöglicht, die darauf basiert, Attosekunden-Pulse außerhalb des Fokus der Treiberpulse zu erzeugen. Der Ansatz ermöglicht neue Pfade für die Untersuchung extrem schneller Elektronendynamiken auf einer Attosekunden-Zeitskala.**

Die erstmalige Erzeugung von Attosekunden-Pulsen (1 Attosekunde entspricht  $10^{-18}$  Sekunden) zu Beginn dieses Jahrhunderts hat es ermöglicht, nicht für möglich gehaltene Einblicke in die Welt der Elektronen zu erlangen. Für ihre Pionierleistungen, die zur ersten Erzeugung und Messung von Attosekunden-Pulsen im Jahr 2001 geführt haben, erhielten Anne L'Huillier, Pierre Agostini und Ferenc Krausz im vergangenen Jahr den Nobelpreis für Physik. Attosekunden-Techniken, die aktuell angewandt werden, haben jedoch einen entscheidenden Nachteil: Um einen Film in einem Pump-Probe Experiment aufnehmen zu können, muss ein Attosekunden-Puls mit einem Femtosekunden-Puls (1 Femtosekunde entspricht  $10^{-15}$  Sekunden) kombiniert werden, dessen optische Zyklen als Uhr mit einer Attosekunden-Auflösung dienen. Dies stellt eine Limitierung für die Untersuchung von Elektronendynamiken auf Attosekunden-Zeitskalen dar.

Schon seit der ersten Erzeugung von Attosekunden-Pulsen hatten viele Wissenschaftler den Traum, Experimente durchzuführen, in denen ein erster Attosekunden-Pump-Puls Elektronendynamiken in einem Atom, Molekül oder Festkörper auslöst, und in denen ein zweiter Attosekunden-Probe-Puls das System bei verschiedenen Zeitverzögerungen abfragt. Dieses Ziel hat sich als sehr herausfordernd herausgestellt, da hierfür intensive Attosekunden-Pulse benötigt werden. Der zugrundeliegende Prozess der Höheren Harmonischen Erzeugung ist jedoch sehr ineffizient. Daher wurden bisher nur wenige Demonstrationsexperimente durchgeführt, die von großen Aufbauten und spezialisierten Lasersystemen bei niedrigen Wiederholungsraten (10-120 Hertz) Gebrauch gemacht haben.

Ein Team aus Wissenschaftlern vom Max-Born-Institut (MBI) in Berlin hat nun einen alternativen Ansatz gefunden, der es ihnen erlaubt, APAPS in einem deutlich kompakteren Aufbau durchzuführen. Zu diesem Zweck haben sie einen schlüsselfertigen Laser genutzt, der bei einer Wiederholungsrate von 1 Kilohertz betrieben wird. Dies hat zu einem deutlich stabileren Betrieb geführt, welches eine Schlüsselanforderung für die Umsetzung von APAPS ist. Wie in Graphik 1 gezeigt wird, haben die Forscher einen Infrarot-Laser für die Erzeugung von Attosekunden-Pulsen in einem Gasstrahl genutzt. Im Gegensatz dazu, wie Attosekunden-Pulse üblicherweise erzeugt werden, hatten sie jedoch die Idee, den Gasstrahl nicht in der Nähe des Laserfokus zu platzieren, sondern in einem Abstand davon. Als Ergebnis konnten Attosekunden-Pulse mit einer recht hohen Pulsenergie und einer kleinen virtuellen Quellengröße erzeugt werden. Dies hat es den Wissenschaftlern erlaubt, die Attosekunden-Pulse zu einer hohen Intensität zu fokussieren.

Die Forscher haben sich die stabilen und intensiven Attosekunden-Pulse zunutze gemacht, um ein APAPS Experiment durchzuführen. In diesem wurden Argon Atome von einem ersten Attosekunden-Puls ionisiert, was zur Erzeugung einfach geladener  $Ar^+$  Ionen geführt hat. Diese wiederum wurden von einem zweiten Attosekunden-Puls bei

unterschiedlichen Zeitverzögerungen abgefragt, was zur Erzeugung von doppelt geladenen  $\text{Ar}^{2+}$  Ionen geführt hat. Die Ergebnisse sind in Graphik 2 gezeigt, wobei der Anstieg der beobachteten  $\text{Ar}^{2+}$  Ionen auf einer extrem schnellen Zeitskala erfolgt. Dies zeigt, dass die Pump- und Probe-Pulse tatsächlich eine Dauer im Attosekunden-Bereich haben, wie im Einsatz von Graphik 2 zu sehen ist.

Die moderaten Pulsenergien der Infrarot-Treiberpulse, die in dieser Studie verwendet wurden, ebnet den Weg, APAPS Experimente in der Zukunft bei noch deutlich höheren Wiederholungsraten bis zum Megahertz Bereich durchzuführen. Die dafür notwendigen Lasersysteme sind entweder schon verfügbar oder in der Entwicklung. Infolge dessen könnte das neuartige Konzept Einblicke in die Welt der Elektronen auf extrem kurzen Zeitskalen ermöglichen, die mit derzeitigen Attosekunden-Techniken nicht zugänglich sind.

#### Bildunterschriften:

Graphik 1: Experimenteller Aufbau für Attosekunden-Pump Attosekunden-Probe Spektroskopie. Dazu werden Infrarot-Pulse hinter einen gepulsten Gasstrahl fokussiert, in dem Attosekunden-Pulse erzeugt werden. In einigem Abstand dazu werden Spiegel genutzt, um verschiedene Frequenzbereiche der Attosekunden-Pulse auszuwählen und diese zu fokussieren. Die erzeugten Ionen werden mithilfe eines speziellen Spektrometers detektiert.

Graphik 2: Zwei-Farben APAPS. Die Erzeugung von  $\text{Ar}^{2+}$ , die von einem breitbandigen Attosekunden-Pump-Puls mit einer Photonenergie um die 20 eV initiiert wird, wird von einem zweiten Puls mit einer Photonenergie um die 33,5 eV geprobt. Diese liegt über dem zweiten Ionisationspotenzial von Argon, sodass  $\text{Ar}^{2+}$  entsteht. Die größere Anzahl von  $\text{Ar}^{2+}$  Ionen bei positiven Zeitverzögerungen wird dadurch erklärt, dass deren Erzeugung effizienter ist, wenn der Probe-Puls auf den Pump-Puls folgt. Der Einsatz zeigt die Attosekunden-Puls-Struktur, die durch einen Fit erhalten wurde.

#### contact for scientific information:

Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im Forschungsverbund Berlin e.V.  
[www.mbi-berlin.de](http://www.mbi-berlin.de)

#### Kontakt:

Dr. Bernd Schuette  
+49 30 6392 1295  
[Bernd.Schuette@mbi-berlin.de](mailto:Bernd.Schuette@mbi-berlin.de)

#### Prof. Dr. Marc J.J. Vrakking

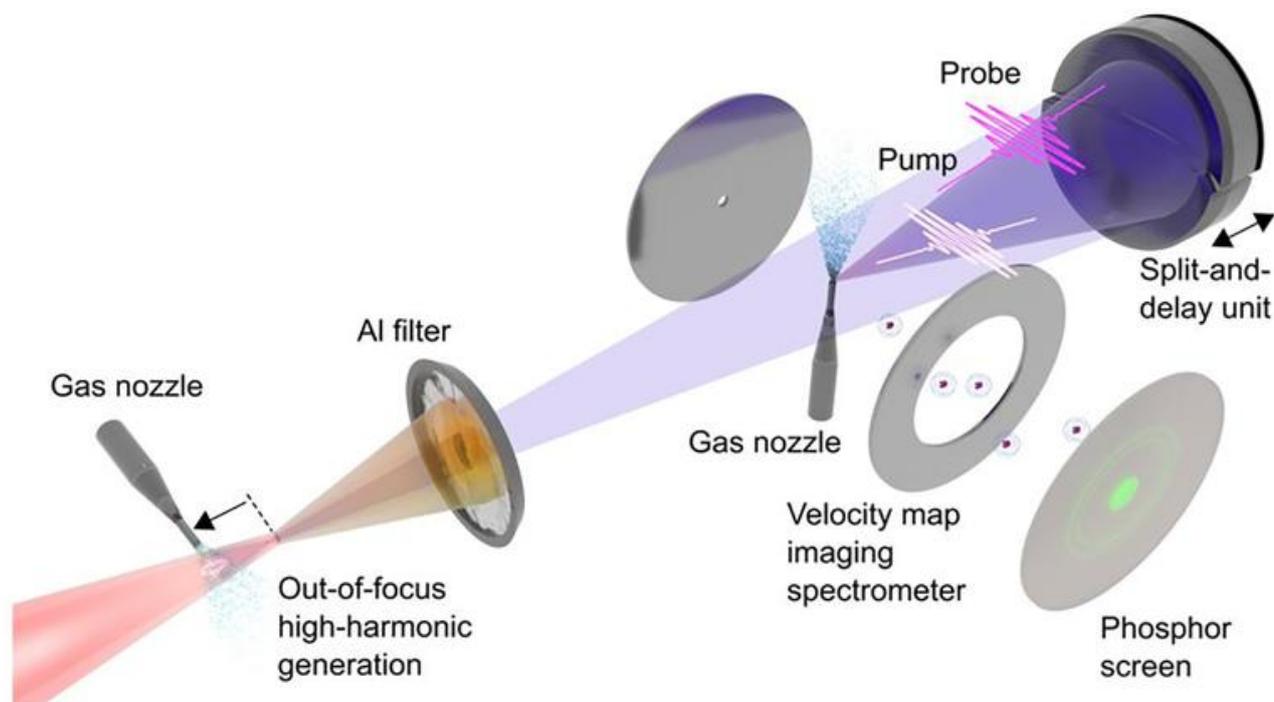
+49 30 6392 1200  
[vrakking@mbi-berlin.de](mailto:vrakking@mbi-berlin.de)

#### Original publication:

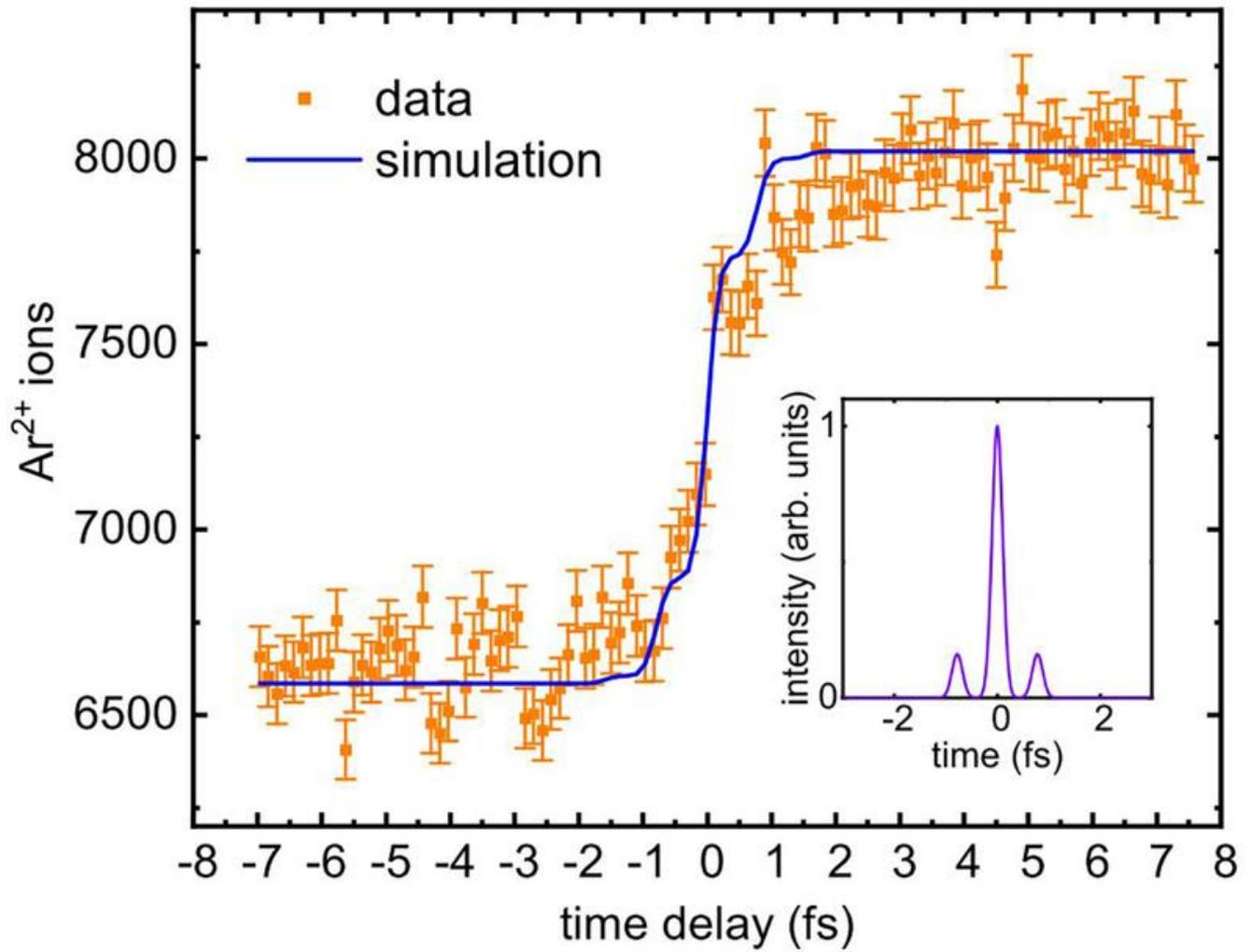
Compact realization of all-attosecond pump-probe spectroscopy  
Martin Kretschmar, Evaldas Svirplys, Mikhail Volkov, Tobias Witting, Tamás Nagy, Marc J. J. Vrakking, Bernd Schütte

Science Advances - 21 Feb 2024 -Vol 10, Issue 8  
DOI: [10.1126/sciadv.adk9605](https://doi.org/10.1126/sciadv.adk9605)  
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adk9605>

<https://mbi-berlin.de/de/forschung/highlights/details/a-new-chapter-for-all-attosecond-spectroscopy>



Experimenteller Aufbau für Attosekunden-Pump Attosekunden-Probe Spektroskopie.  
MBI / Mikhail Volkov



Zwei-Farben APAPS  
MBI / Bernd Schütte