

QUANTENPHYSIK

Attosekundengenaue Tunnelzeitmessung

Unter dem Einfluss starker Laserfelder kann das Potential eines Atomkerns so stark verformt werden, dass die Elektronen sich durch Tunnelionisation vom Atom lösen. Die Frage nach der Dauer dieses Prozesses ist immer wieder Gegenstand von Diskussionen. Jüngst ist unserer Gruppe an der ETH Zürich eine zeitliche Messung mit Attosekundengenauigkeit gelungen. Das Ergebnis: Null.

Ist ein Teilchen von einer Potentialbarriere eingeschlossen, so besteht nach den Gesetzen der Quantenmechanik die Möglichkeit, dass das Teilchen den energetisch verbotenen Bereich „durchtunnelt“. In einer solchen Situation befinden sich Elektronen eines Atoms, das sich im Fokus eines ultrakurzen Laserpulses mit der Dauer von wenigen Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) befindet. Das elektrische Feld des Laserpulses ist so groß, dass es in derselben Größenordnung liegt wie das inneratomare Coulomb-Feld. Die Überlagerung von Coulomb- und Laserfeld formt eine Potentialbarriere, und Tunneln ist die wahrscheinlichste Art der Ionisation. Die Dauer dieses Prozesses konnte bislang nicht gemessen werden.

Das Elektron hat nach der Ionisation keinen Anfangsimpuls, aber es wird durch den verbleibenden Laserpuls beschleunigt. Falls der Laserpuls zirkular oder elliptisch polarisiert ist, so wird das Elektron auf seiner Flugbahn um etwa 90° von der Richtung des elektrischen Feldes zur Ionisationszeit abgelenkt. Dieses Verhalten lässt sich zur Zeitmessung mit Attosekundengenauigkeit ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) nutzen [1]. Wegen der hohen Nichtlinearität der Tunnelwahrscheinlichkeit kann man davon ausgehen, dass nahezu alle Elektronen im optischen Zyklus des Pulsmaximums tunneln. Misst man den Winkel der Elektronenflugrichtung, so kann man den Winkel des elektrischen Feldes zur Ionisationszeit berechnen, und dieser Winkel dreht sich während eines optischen Zyklus um 360° . Der Winkel des Elektronenimpulses lässt sich also ähnlich interpretieren wie der Zeiger einer Analoguhr.

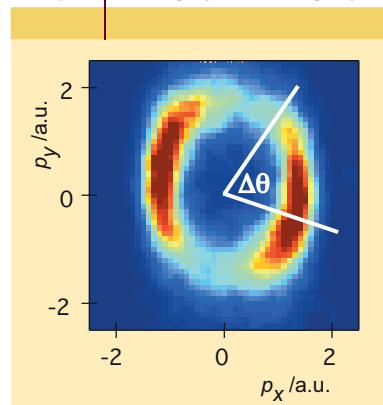
Wir sind der Frage nachgegangen, welche Zeit zwischen dem Maximum des Laserpulses und dem Maximum der Ionisationsrate vergeht, eine Observable, die sich als Tunnelzeit interpretieren lässt [2]. Für eine Messung ist das statistische Mittel über etwa eine Million Laserpulse nötig.

Wir haben zunächst den Laserstrahl leicht elliptisch polarisiert und den Winkel der großen Halbachse der Polarisationsellipse bestimmt (Abbildung 1). Im statistischen Mittel ist dies der Winkel des maximalen elektrischen Feldes eines Laserpulses. Der Impuls der emittierten Elektronen wurde mit einem COLTRIMS (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy) Spektrometer gemessen.

Nach der Ionisation werden Ionen und Elektronen durch das elektrische Feld des Laserpulses beschleunigt, bei zirkularer Polarisation ist die Impulsverteilung torusförmig. Bei elliptischer Polarisation wird das Maximum des elektrischen Feldes im statistischen Mittel dann erreicht, wenn der elektrische Feldvektor in Richtung der großen Halbachse der Polarisationsellipse zeigt. Dadurch bilden sich zwei Maxima in der Impulsverteilung.

Für den Winkel $\Delta\theta$ zwischen der großen Halbachse der Polarisationsellipse und den Maxima der Impulsverteilung gibt es zwei Ursachen. Zum einen die zeitliche Verspätung des Ionisationsmaximums gegenüber dem Intensitätsmaximum. Das entspricht also genau der Zeitdifferenz, die wir messen wollen. Zum anderen die Beschleunigung im Laserfeld nach der Ionisation, was

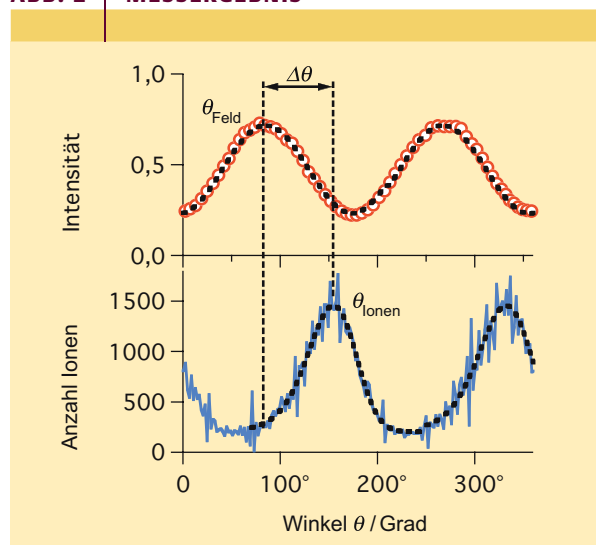
ABB. 1 IMPULSVERTEILUNG



Impulsverteilung der Ionen in atomaren Einheiten. Weil nach der Ionisation die Ionen und Elektronen durch das elektrische Feld des Laserpulses in gegensätzliche Richtungen beschleunigt werden, entspricht die Ionenimpulsverteilung dem Spiegelbild der Elektronenimpulsverteilung. Die Ausbreitungsrichtung des Lasers ist senkrecht zur Blattebene.

einen Winkel von etwa 90° verursacht. Weil sich die Elektronenflugbahn im Laserfeld sehr gut berechnen lässt, kann man aus dem gemessenen Winkel auf die Tunnelzeit schließen.

ABB. 2 MESSERGEBNIS



Oben: Die Intensität des Laserpulses hinter einem auf den Winkel θ eingestellten Polarisator. Das Maximum dieser Kurve gibt den Winkel der großen Halbachse der Polarisationsellipse an. Unten: Impulsverteilung in Abhängigkeit des Winkels θ , entstanden durch radiale Integration der Verteilung aus Abbildung 1.

Wir haben das Experiment mit Heliumatomen für verschiedene Elliptizitäten und Intensitäten des Laserlichts durchgeführt. Alle Messungen ergaben, dass die Zeit zwischen dem Maximum des Laserpulses und dem Maximum der Ionisationsrate innerhalb der Messgenauigkeit null beträgt. Eine numerische Lösung der zeitabhängigen Schrödinger-Gleichung hat dieses Resultat

bestätigt. Die extreme Messgenauigkeit dieses Resultates von 12 as ergibt sich aus der Genauigkeit der Winkelmessung und der Dauer eines optischen Zyklus von 2,4 fs.

[1] P. Eckle et al., *Nature Phys.* **2008**, 4, 7.

[2] P. Eckle et al., *Science* **2008**, 322, 5907.

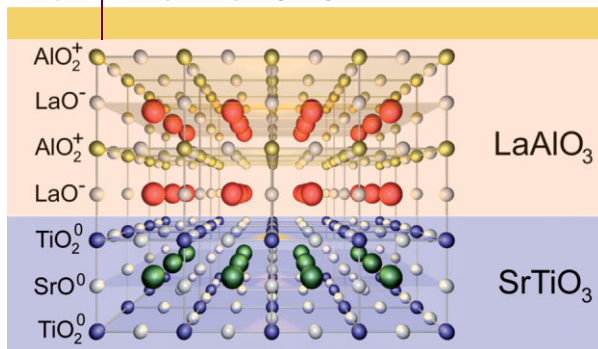
Adrian N. Pfeiffer; Petrisa Eckle, Ursula Keller; ETH Zürich; Reinhard Dörner; Univ. Frankfurt

OXIDFORSCHUNG

Durchstimmbarer, zweidimensionaler Supraleiter

Seit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung im Jahr 1986 werden kristalline Schichten aus komplexen Oxiden intensiv erforscht. Diese Materialien zeigen neuartige und bisweilen unerwartete physikalische Eigenschaften, die zukünftige elektronische Schaltkreise revolutionieren könnten. Ein aktuelles Beispiel ist die Doppelschicht der Isolatoren Lanthanaluminat (LaAlO_3) und Strontiumtitanat (SrTiO_3) (Abbildung 1), an deren Grenzfläche sich erstaunlicherweise ein zweidimensionales Elektronengas bildet, das bei tiefen Temperaturen sogar supraleitend wird.

ABB. 1 KRISTALLSTRUKTUR



Kristallstruktur einer Doppellage der Isolatoren LaAlO_3 und SrTiO_3 . Ist die LaAlO_3 -Schicht dicker als drei Einheitszellen (gezeichnet sind zwei Einheitszellen), so bildet sich an der Grenzfläche spontan ein zweidimensionales Elektronengas aus.

LaAlO_3 und SrTiO_3 sind typische Vertreter der perowskitischen Oxide und in ihren Eigenschaften seit vielen Jahren sehr gut verstanden. Beide sind Isolatoren und werden oft als Substrate bei der Herstellung dünner Oxidschichten verwendet.

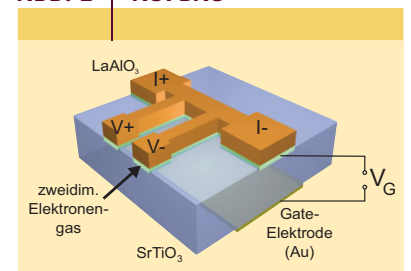
In ihrer Kombination versetzen beide Materialien allerdings die Oxidforschung in Aufregung: Lässt man LaAlO_3 auf SrTiO_3 aufwachsen, so wird die Grenzschicht zwischen den beiden Isolatoren leitfähig [1]. Wie unsere Arbeitsgruppe in Augsburg zudem zeigen konnte, tritt diese Leitfähigkeit nur dann auf, wenn die LaAlO_3 -Schicht mindestens vier Einheitszellen (1,6 nm) dick ist. Andernfalls bleibt die Grenzschicht perfekt isolierend [2].

Zur präzisen Herstellung dieser Schichtstruktur wird ein ausgefeiltes Laserdepositionsverfahren (pulsed laser deposition, PLD) eingesetzt: Mit einem hochenergetischen, gepulsten UV-Laserstrahl wird aus einer Tablette das aufzuwachsende Material explosionsartig als Plasma herausgeschlagen. Die Ionen, Atome und kleinen Moleküle des Plasmas scheiden sich auf dem geheizten Substrat ab und bilden eine kristalline Schicht

des gewünschten Oxids. Während des gesamten Prozesses wird zudem ein gebündelter Elektronenstrahl streifend auf die Oberfläche des wachsenden Films gerichtet. Der Strahl wird von der Oberfläche reflektiert und formt dabei ein Beugungsmuster, dessen Intensität mit atomarer Genauigkeit exakte Aussagen über die wachsende Schicht gestattet.

Ursache für den genannten sprunghaften Anstieg der Leitfähigkeit der Grenzfläche ist eine große elektrische Spannung, die sich während des Filmwachstums über die LaAlO_3 -Schicht aufbaut. Um eine sogenannte elektrische Polarisationskatastrophe zu verhindern, müssen die Proben diese elektrische Spannung vermeiden. Dies geschieht dadurch, dass Elektronen aus dem LaAlO_3 -Film an die Grenzfläche transportiert werden. Diese Elektronen bilden dort ein nur wenige Nanometer dickes, zweidimensionales Elektronengas. Wie in Feldeffekttransistoren lassen sich die Eigenschaften dieses durchsichtigen Elektronengases durch externe angelegte elektrische Felder beeinflussen und durchstimmen [2].

ABB. 2 AUFBAU



Aufbau der Probe.

In Messungen bei sehr tiefen Temperaturen um etwa 0,2 K wurde in einer Zusammenarbeit der Universitäten Genf, Paris, Zürich und Augsburg entdeckt, dass dieses Elektronengas supraleitend ist [3]. Dabei ist der supraleitende Zustand über elektrische Felder durchstimmbare [4]. Grund hierfür ist unter anderem die geringe Elektronendichte in dieser Schicht, die mit elektrischen