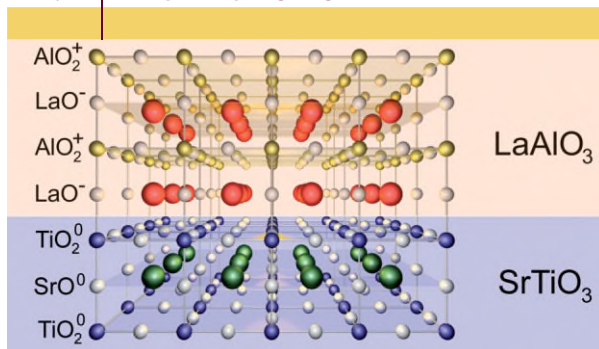


Durchstimmbarer, zweidimensionaler Supraleiter

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.

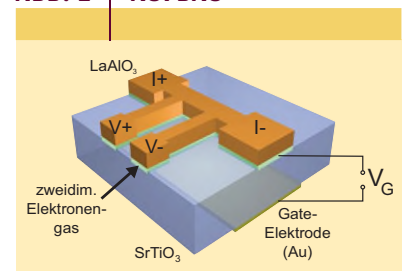
In ihrer Kombination versetzen beide Materialien allerdings die Oxidforschung in Aufregung: Lässt man LaAlO_3 auf SrTiO_3 aufwachsen, so wird die Grenzschicht zwischen den beiden Isolatoren leitfähig [1]. Wie unsere Arbeitsgruppe in Augsburg zudem zeigen konnte, tritt diese Leitfähigkeit nur dann auf, 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].

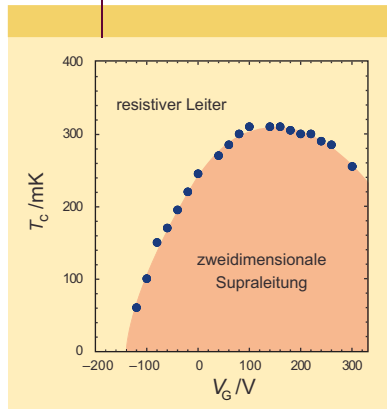
ABB. 2 AUFBAU



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

ABB. 3 PHASENDIAGRAMM



Elektronisches Phasendiagramm der Grenzfläche zwischen LaAlO_3 und SrTiO_3 (links). Aufgetragen ist die kritische Temperatur T_c des zweidimensionalen Elektronengases als Funktion der über das Substrat (Substratdicke 0,5 mm) anliegenden Spannung V_G (siehe Abbildung 2). Bei einer negativen Spannung von etwa -140 V wurde die Supraleitung völlig unterdrückt (quantenkritischer Punkt).

Feldern stark beeinflussbar ist (Abbildung 2).

Mit diesen Experimenten ist es erstmals gelungen, elektronisch das Phasendiagramm eines Supraleiters durchzufahren und hierbei die Supraleitung nach Belieben an- und auszuschalten (Abbildung 3).

Da solche Elektronengase sogar auf der Nanometerskala strukturierbar sind [5], besteht die Chance, dass derartige Grenzflächenphänomene in komplexen Oxiden zukünftig in neuartigen Bauelementen die normale Halbleiterelektronik ergänzen können.

- [1] A. Ohtomo, H. Y. Hwang, *Nature* **2004**, 427, 423.
- [2] S. Thiel, et al., *Science* **2006**, 313, 1942.
- [3] N. Reyren, et al., *Science* **2007**, 317, 1196.
- [4] A. D. Caviglia, et al., *Nature* **2008**, 456, 624.
- [5] C. Cen, et al., *Nature Materials* **2008**, 7, 298.

German Hammerl, Stefan Thiel, Jochen Mannhart, Univ. Augsburg

Solare Wasserstofferzeugung

Wasserstoff könnte als Energieträger in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zu Energiewirtschaft leisten. Da er sich aus Wasser produzieren lässt, ist er nahezu unerschöpflich, und bei seiner Verbrennung entsteht lediglich Wasser. Eine der Hürden für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft ist jedoch eine umweltfreundliche Erzeugung. Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und vom Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung haben hier mit zwei unterschiedlichen Verfahren Fortschritte erzielt.

Im Rahmen der Projekte HYDROSOL I und II ist es DLR-Forschern auf der spanischen Plataforma Solar de Almería gelungen, Wasser durch Sonnenenergie direkt in Wasserstoff und Sauerstoff auf folgende Weise zu spalten. In einem Reaktor befindet sich ein Metalloxidgitter, an dem 600 bis 800 °C heißer Wasserdampf vorbeiströmt. Hierbei wird Sauerstoff an das angeregte Metalloxidgitter gebunden und Wasserstoff freigesetzt. In einem zweiten Schritt gibt das Metalloxid bei Temperaturen von 1200 bis 1300 °C den Sauerstoff wieder ab und regeneriert sich dadurch [1].

Die Heizung des Wassers erfolgt mit Spiegeln, die Sonnenlicht auf den Ofen konzentrieren (Abbildung 1). Die jüngsten Erfolge gelangen mit einer 100-kW-Pilotanlage. Eine Hochskalierung bis in den Megawattbereich erscheint ohne weiteres möglich. Dies kann durch Hinzufügen weiterer Reaktoreinheiten und durch Anbindung an Brennspiegelfelder geeigneter Größe, wie sie bereits jetzt unter anderem in Spanien zur Stromerzeugung kommerziell genutzt werden, geschehen. HYDROSOL wird von einem internationalen Konsortium mit Teilnehmern aus Deutschland, Spanien, Griechenland, Dänemark und Großbritannien durchgeführt [1].

Einen ganz anderen Weg gingen Xinchun Wang vom MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung und Kollegen von der Universität Tokio und der Fuzhou Universität in China. Sie gewinnen den Energieträger, indem sie Wasser mit Sonnenlicht



bestrahlen und dabei einen Kohlenstoffnitrid (Melon) als Photokatalysator einsetzen. Melon ist in Wasser selbst bei extrem sauren und basischen Bedingungen stabil und kann sehr einfach und kostengünstig hergestellt werden [2].

Das Kohlenstoffnitrid nutzt das Sonnenlicht, um Wasserstoff aus dem Wasser herauszulösen. Eine Substanz, die Chemiker als Opferreagenz bezeichnen, nimmt dabei den Sauerstoff des Wassers auf. Wang und Kollegen können auf Edelmetalle wie etwa Platin verzichten. In herkömmlichen Prozessen sind diese – neben einem Halbleiter als Antenne für das Sonnenlicht – nötig, um die Wasserstoffproduktion zu katalysieren. Das Kohlenstoffnitrid erledigt nun beide Aufgaben zugleich.

Allerdings konnte Wangs Gruppe pro Stunde nur vier Mikromol Wasserstoff erzeugen, was wesentlich unter den Werten etablierter Verfahren liegt, die allerdings teures Platin als Katalysator benötigen. Die Forscher versuchen nun, die Effizienz des Kohlenstoffnitrids zu steigern, indem sie dessen aktive Oberfläche vergrößern.

- [1] www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-667/7411_read-14380
- [2] X. Wang et al., *Nature Materials* **2009**, 8, 76.

Abb. 1 Drehbare Spiegel der Plataforma Solar de Almería lenken das Sonnenlicht auf einen zentralen Solarreceiver an der Spitze eines Turmes. (Foto: DLR)