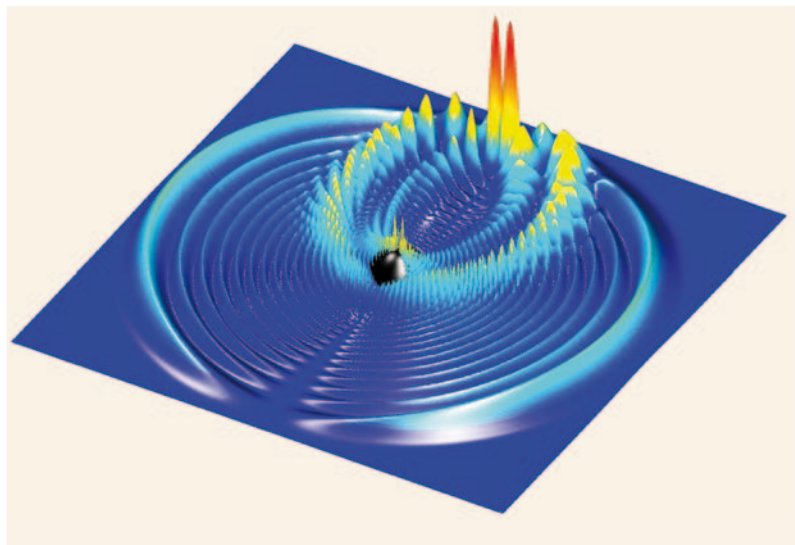


## ■ Symmetrien diktieren nicht alles

Riesige homonukleare Moleküle können ein permanentes elektrisches Dipolmoment tragen.

Symmetrien treten in der Natur in einer Vielzahl von Erscheinungsformen auf. Sie spielen in der Physik eine überaus wichtige Rolle, da sie ein klassifizierendes Ordnungsmerkmal liefern und sich aus ihnen fundamentale Prinzipien wie die Existenz von Erhaltungsgrößen der Bewegung, ableiten lassen. Wichtige physikalische Eigenschaften sind oft ausschließlich durch Symmetrien bestimmt. Tauchen sie in der Beschreibung eines isolierten Systems auf, so respektieren üblicherweise auch die Zustände des Systems diese Symmetrie. Ein Paradebeispiel hierfür ist die Paritätssymmetrie in homonuklearen diatomaren Molekülen, wonach die Eigenzustände entweder durch eine gerade oder ungerade Parität charakterisiert sind. Daraus folgt insbesondere, dass homonukleare Moleküle kein elektrisches Dipolmoment besitzen. In einer richtungsweisenden Arbeit haben eine experimentelle Gruppe an der Universität Stuttgart und Theoriegruppen am MPI für Physik komplexer Systeme in Dresden bzw. Harvard Smithsonian Center for Astrophysics in Boston gezeigt, dass dies nicht immer gelten muss [1]. Demnach können homonukleare Moleküle mit einer asymmetrischen elektronischen Anregung ein erhebliches permanentes elektrisches Dipolmoment ( $\approx 1$  Debye) aufweisen.

Laser- und Verdampfungskühlen ermöglichen es, verdünnte Gase, meist aus Alkaliatomen, nahezu routinemäßig auf Temperaturen von Mikro- oder Nanokelvin abzukühlen. Diese werden in elektromagnetischen Fallen gespeichert und bilden eine Form kohärenter Quantenmaterie. Die Schwerpunktbewegung sowie die elektronischen Freiheitsgrade dieser Atome lassen sich mithilfe von äußeren Feldern präzise kontrollieren. Die mit den ultrakalten Temperaturen verbundenen winzigsten Energieskalen erlauben es, die Stoßphysik zwi-



Markus Kurz, U Hamburg

Abb. 1 In einem Molekül, das aus einem Rubidiumatom im Grundzustand und einem Rydberg-Atom derselben Spezies besteht, hat die Elektronendichte des Rydberg-Elektrons eine typische Aus-

dehnung von tausend Bohr-Radien. Der ionische Atomrumpf ( $Rb^+$ ) ist schwarz markiert. Die Hauptmaxima entsprechen der Position des Grundzustandsatoms im Molekül.

schen kalten Atomen hochpräzise aufzuklären und insbesondere neuartige Bindungszustände und molekulare Spezies zu präparieren. Bereits im Jahr 2000 gab es eine bahnbrechende theoretische Arbeit, welche die Existenz von ultralangreichweitigen molekularen Rydberg-Systemen vorhergesagt hat [2]. Diese homonukleare Spezies, die aus einem Atom im Grundzustand und einem hochangeregten Rydberg-Atom besteht, ist tausendfach größer als die uns vertrauten Moleküle [3]. Sie zeichnet sich durch einen neuen elektronischen Bindungsmechanismus aus, der zu einer Vielzahl von molekularen Gleichgewichtskonfigurationen führt.

Die im Stuttgarter Experiment mittels Zweiphotonenprozessen angeregten ultralangreichweitigen  $Rb_2$ -Rydberg-Moleküle weisen unter Anwendung eines schwachen elektrischen Feldes einen linearen Stark-Effekt auf [1]. Dies lässt nur den Schluss zu, dass diese schwach gebundenen Moleküle ein permanentes Dipolmoment besitzen. Das Zustandekommen dieses Dipolmoments erklärt sich folgender-

maßen [1]: Die im Experiment angeregten elektronischen Rydberg-Zustände mit Hauptquantenzahl  $n$  und Drehimpuls  $l = 0$  besitzen eine kleine Beimischung von entarteten Zuständen mit großem Drehimpuls,  $l \gg 1$ . Diese mischen linear mit dem angelegten elektrischen Feld und führen daher zu einem permanenten elektrischen Dipolmoment zunächst im molekülfesten Bezugssystem. Gleichzeitig ist die Rydberg-Elektronendichte am Grundzustandsatom lokalisiert (Abb. 1). Normalerweise mittelt die Rotation des Moleküls im Grundzustand dieses Dipolmoment zu Null, und bei einem angelegten elektrischen Feld tritt aufgrund der Kopplung der Rotationszustände der quadratische Stark-Effekt auf. Da die Rotationskonstanten des Rydberg-Moleküls extrem klein sind, lösen sich die Rotationszustände jedoch prinzipiell nicht auf, und es kommt zu einem linearen Verhalten mit variierender Feldstärke. Die tiefgehenden theoretischen Untersuchungen beschreiben die komplexen Streuprozesse des Rydberg-Elektrons am Grundzustandsatom und können

den daraus resultierenden Bindungsmechanismus bestimmen [1]. Die Beobachtungsdaten und die theoretischen Vorhersagen stimmen hervorragend überein. Im Gegensatz zu einzelnen Rydberg-Atomen, für die das Dipolmoment im elektrischen Feld mit  $n^2$ , d. h. der Größe des Atoms skaliert, skaliert das Dipolmoment des Rydberg-Moleküls gemäß  $1/n^{*2}$ , wobei  $n^*$  eine um den sog. Quantendefekt modifizierte Hauptquantenzahl ist. Dieses ungewöhnliche Verhalten lässt sich auf die oben erwähnte Beimischung von Hochdrehimpulsanteilen in der elektronischen Wellenfunktion zurückführen.

Die Austausch- und damit verbundene Paritätssymmetrie für homonukleare Moleküle bedeuten, dass ein Zustand vorliegt, der eine quantenmechanische Überlagerung aus einem Grundzustandsatom und dem jeweiligen anderen hochangeregten Rydberg-Atom

darstellt. Dieses Symmetrieargument, das permanente elektrische Dipolmomente für homonukleare Moleküle ausschließt, gilt jedoch nicht für ultralangreichweitige Moleküle. Denn hier tritt diese Überlagerung nicht auf. Daher befindet sich für den experimentell realisierten quantenmechanischen Zustand ein bestimmtes Atom im Grundzustand und das andere im Rydberg-Zustand: Die Rydberg-Anregung ist demnach lokalisiert. Der „Partnerzustand“, in dem das jeweils andere Atom im Grund- bzw. Rydberg-Zustand ist, koppelt nur sehr schwach über einen Tunnelprozess von extrem langer Zeitdauer an diesen lokalisierten Zustand. Damit ist es möglich, permanente elektrische Dipolmomente für homonukleare Moleküle zu erzeugen.

Die gefundenen Dipolmomente werden es erlauben, die Bildung und chemischen Reaktionen dieser

hochangeregten Rydberg-Moleküle im ultrakalten Bereich zu steuern, insbesondere im Hinblick auf die entsprechenden polyatomaren Systeme. Darüber hinaus spielen sie eine wichtige Rolle in der Quanteninformationsverarbeitung [4] und der Quantenphysik langreichweitig wechselwirkender ultrakalter Vielteilchensysteme [5].

Peter Schmelcher

Prof. Dr. Peter Schmelcher,  
Zentrum für optische Quantentechnologien, Luruper Chaussee 149,  
22761 Hamburg

- [1] W. Li et al., Science **334**, 1110 (2011)
- [2] C. H. Greene, A. S. Dickinson und H. R. Sadeghpour, Phys. Rev. Lett. **85**, 2458 (2000)
- [3] T. F. Gallagher, Rydberg Atoms, Cambridge University Press, Cambridge, (1994)
- [4] M. Saffman, T. G. Walker und K. Molmer, Rev. Mod. Phys. **82**, 2313 (2010)
- [5] T. Lahaye et al., Rep. Prog. Phys. **72**, 126401 (2009)

# Newsletter des Physik Journal

Online-Meldungen der Redaktion, Neuigkeiten aus der DPG, TV-Tipps und mehr finden Sie jetzt in unserem Newsletter.

Sie möchten ihn erhalten? Hinterlegen Sie Ihre E-Mail-Adresse und bestellen Sie den Newsletter unter:

[www.dpg-physik.de/  
mitgliedschaft/aenderung.html](http://www.dpg-physik.de/mitgliedschaft/aenderung.html)

The image shows a screenshot of the 'Physik Journal Newsletter' website. The header includes the 'Physik Journal' logo and the text 'Physik Journal Newsletter' and 'Newsletter 1/2012'. The main content area is titled 'Sehr geehrter Herr Max Planck, herzlich willkommen zum Newsletter des Physik Journal...' and lists several news items under 'Physik Journal Nachrichten':

- Physik kommt teurer:** Die Einrichtung von Neubauten für Forschung und Lehre wird kostspieliger. [Mehr](#)
- Elektronen unter Kontrolle:** Mithilfe ultrakurzer Lichtimpulse lassen sich Elektronen in Molekülen und Nanostrukturen auf Zeitskalen von Attosekunden steuern und beobachten. [Mehr](#)
- Das Puzzle der Kontinente:** Vor hundert Jahren präsentierte Alfred Wegner seine Theorie der Kontinentalverschiebung. [Mehr](#)
- Präsident der Präzision:** Der Physiker Joachim Ullrich wird neuer Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. [Mehr](#)

On the right side, there is a 'Produkte des Monats' section with images and descriptions of:

- Mobil Nd:YAG-Laser mit über 50 mJ Pulsenergie
- CMOS-Zellenkamera mit 16000 Pixeln
- PHD-Laserstabilisierung

At the bottom, there is a banner for the '13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLASMA SURFACE ENGINEERING' (PSE 2012) held from September 10-14, 2012, in Garmisch-Partenkirchen, Germany, with the website [www.pse-conference.com/pse2012](http://www.pse-conference.com/pse2012).

Below the banner is a 'Buchrezension' section for the book 'CRASH' by Peter Dinklage, with a description: 'Die Geschichte ist nicht unbedingt neu, aber durchaus spannend geschrieben: Böse Fanatiker wollen nicht nur die Welt, nein, gleich das ganze... [Mehr](#)'.

The footer of the newsletter features the 'LASER TECHNIK JOURNAL' logo and the text 'Bestellen Sie Ihre persönliche...'.