

# Plasmen, Quantensprünge, Zellen

Highlights aus dem Programm des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen

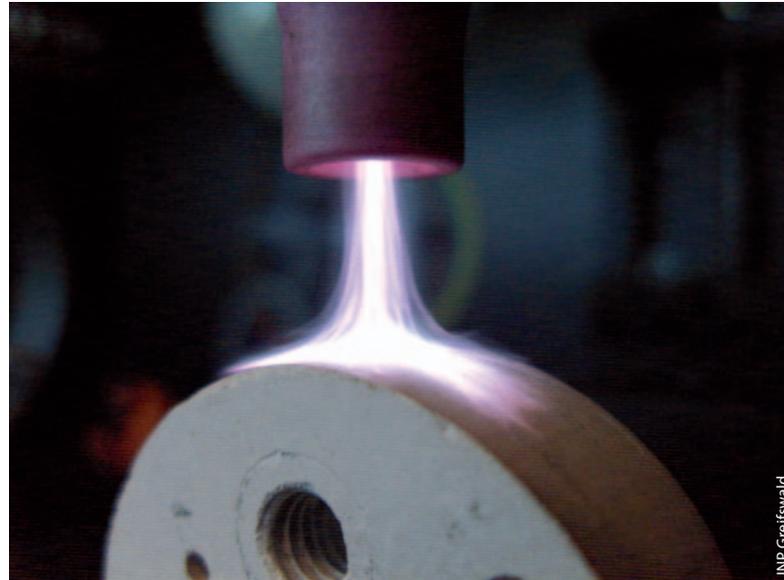
Rainer Scharf

Zu seiner diesjährigen Frühjahrstagung hatte der Arbeitskreis Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP) nach Düsseldorf eingeladen. Mehr als 1600 Teilnehmer reisten an und hielten 750 Vorträge und präsentierten 440 Poster. Von der riesigen Themenvielfalt soll die nachfolgende Auswahl einen kleinen Eindruck geben.

## Desinfektion mit Plasmen

Wenn es bei der Desinfektion besonders materialschonend zugehen muss, bietet sich der Einsatz von Plasmen an. Dadurch können wärmeempfindliche Kunststoffe sowie medizinische oder pharmazeutische Güter ohne große thermische oder chemische Belastung antimikrobiell behandelt werden, wie Jörg Ehlbeck vom Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik e. V. (INP) in Greifswald erläuterte. Unter der Leitung des INP läuft seit 2004 das vom BMBF mit 3,9 Mio. € geförderte Verbundprojekt „Plasmagestützte Oberflächenmodifizierung mittels modularer selektiver Plasmaquelle“ (Plasmo), an dem auch Partner aus der pharmazeutischen Industrie beteiligt sind.

Bei dem von Jörg Ehlbeck vorgestellten Verfahren wurde unter Atmosphärendruck ein bis zu 3 cm langer und 8 mm dicker Plasmastrahl erzeugt, indem strömendes Argongas in einer Düse einem Hochfrequenzfeld ausgesetzt wurde. Die aufgenommene Leistung betrug bis zu 60 W. Das vom Plasmastrahl getroffene Substrat erreichte Temperaturen zwischen 35 °C und 95 °C, je nach Gasfluss und eingesetzter Leistung. Damit eignet sich das Verfahren zur Behandlung von wärmeempfindlichen Materialien wie Polyethylen oder



Mithilfe eines Plasmastrahls lassen sich auch empfindliche Materialien desinfizieren.

Papier. Die sterilisierende Wirkung des Plasmastrahls beruht in erster Linie auf den in ihm enthaltenen Ionen und freien Radikalen und weniger auf der Wärme und der zusätzlich erzeugten UV-Strahlung. So wurde die Zahl der Kolibakterien auf kontaminierten PE-Oberflächen nach zweiminütiger Behandlung mit dem Plasmastrahl um einen Faktor 10 000 reduziert. Nach vier Minuten waren praktisch keine Bakterien mehr vorhanden.

Um das Innere von Kunststoffflaschen zu dekontaminieren, setzen die Forscher vom INP Greifswald Mikrowellen-Laufentladungen ein. Dabei wird ein Mikrowellenfeld von 1 kW über eine Lanze, die in einer Zündspitze ausläuft, weit in das Innere einer PET-Flasche geführt. An der Spitze bildet sich eine Plasmaentladung, die wie ein Kugelblitz durch das Flascheninnere wandert. Da das Feld vor dem Plasma größer ist als dahinter, läuft die Entladung dem Mikrowellensender entgegen auf den Flaschenhals zu. Dabei erreicht die Entladung eine Geschwindigkeit von 0,8 m/s. Die Desinfizierung einer Flasche dauert etwa eine Sekunde und lässt

sich unmittelbar vor dem Befüllen durchführen. Der störungsfreie Einsatz des Verfahrens wird zurzeit in der Praxis getestet.

## Zellen in gepulsten Feldern

Elektrische Felder wirken in vielfältiger Weise auf biologische Zellen. Sie können z. B. das Zellwachstum oder den Materialtransport durch die Zellmembran beeinflussen. Befindet sich eine Säugetierzelle in einem elektrischen Feld, so sammeln sich auf der Zellmembran elektrische Ladungen an. Dadurch erhöht sich die Spannungsdifferenz zwischen der Innen- und der Außenseite der Membran. Bei einer Spannungszunahme um 1 V bilden sich wassergefüllte Poren, die die Durchlässigkeit der Membran vergrößern. Diese Elektroporation dient u. a. dazu, DNA ins Zellinnere einzuschleusen. Dabei sind gepulste Felder von Mikro- bis Millisekunden Dauer notwendig. Mit wesentlich kürzeren Pulsen sehr viel höherer Feldstärke lässt sich die Membranpermeabilität ähnlich beeinflussen. Welche Ladungs-

und Transportvorgänge bei dieser „Supra-Elektroporation“ ablaufen, haben Jürgen Kolb von der Old Dominion University in Norfolk, Virginia, und seine Kollegen in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe untersucht.

Die Zellen wurden elektrischen Pulsen von 60 ns Dauer ausgesetzt, wobei Spannungen von etwa 100 V über dem Durchmesser der Zelle auftraten. Die Pulsdauer war kürzer als die Zeit, die die Zellmembran zur Aufladung benötigte. Wie sich die Membran auflud, beobachteten die Forscher mithilfe des spannungsempfindlichen Farbstoffes ANNINE-6, mit dem sie die Zellen gefärbt hatten. Bei diesem Farbstoff verschieben sich die Anregungs- und die Emissionswellenlänge je nachdem, welche Spannung an der Membran anliegt. Da der Farbstoff in weniger als einer Nanosekunde auf Spannungsänderungen reagierte, ließ sich der Verlauf der Membranspannung mit Laserpulsen von 5 ns Dauer verfolgen, die zeitverzögert gegenüber dem gepulsten elektrischen Feld auf die Zellen gestrahlt wurden.

Dabei zeigte sich, dass die zur Elektroporation nötige Spannung z. T. deutlich überschritten wurde. Auf der Zellhemisphäre, die der

Anode zugewandt war, erreichte die Membranspannung 1,6 V, während sie auf der Kathodenseite nur 0,6 V schaffte. Etwa 40 ns nach dem Puls hatte die Membranspannung wieder ihren Ruhewert von 50 mV erreicht. Wenn das gepulste elektrische Feld schneller anstieg, als sich auf der Zellmembran abschirmende Ladungen sammeln konnten, drang das Feld durch die Membran in das Zellinnere ein und beeinflusste auch innere Zellstrukturen. Traten an deren Membranen hinreichend große Spannungen auf, so kam es auch hier zur Elektroporation, die die Apoptose, den programmierten Zelltod, einleiten konnte. Da bei Krebszellen die Apoptose aufgehoben ist, eröffnet sich die Möglichkeit, ultrakurze elektrische Pulse zur Krebsbehandlung einzusetzen. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass sich auf diese Weise Melanome in der Haut dazu bringen lassen, sich selbst aufzulösen, während die darüber liegende gesunde Haut kaum beeinflusst wird.

## Quantensprünge

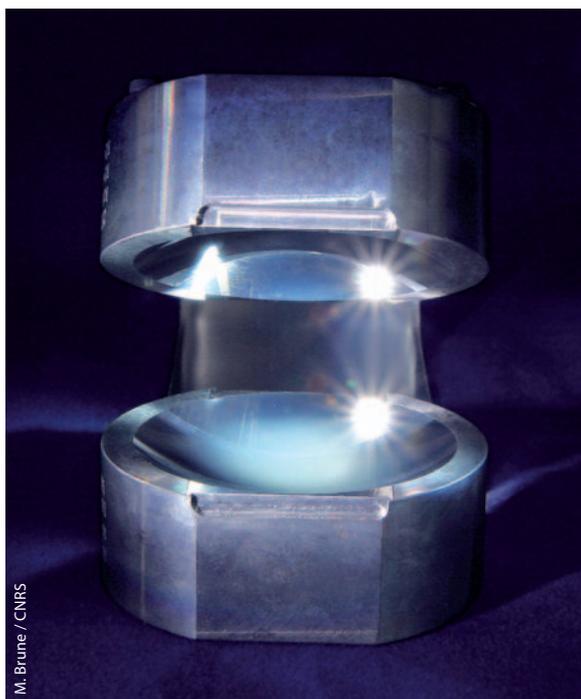
In der Welt der Atome ist sprunghaftes Verhalten die Regel. Bei der genauen Beobachtung eines mikroskopischen Objekts ändert dieses seinen Quantenzustand plötzlich und unvorhersagbar. Einzelne Quantensprünge wurden bisher nur für massive Teilchen wie Elektronen, Ionen oder Moleküle beobachtet, nicht aber für Photonen. Doch wie Stefan Kuhr von der Universität Mainz berichtete, konnten er und die Gruppe von Serge Haroche in Paris erstmals verfolgen, wie die Photonenzahl in einem optischen Hohlraum zwischen 0 und 1 hin und her sprang. Dazu mussten sie die einzelnen Photonen für mehrere Zehntelsekunden im Hohlraum festhalten und ihr Vorhandensein nachweisen, ohne sie dabei zu zerstören.

Der Hohlraum bestand aus zwei Spiegeln im Abstand von 2,7 cm, die mit supraleitendem Niob überzogen waren und auf 0,8 K gekühlt wurden. Diese Cavity hatte eine bisher unerreichte Güte. Für

Mikrowellen von 51,1 GHz betrug die Abklingzeit 0,13 s! In dieser Zeit wird ein Photon eine Milliarde Mal zwischen den beiden Spiegeln reflektiert. Um zu überprüfen, ob in der Cavity ein Photon war oder nicht, schickten die Forscher etwa 900 Rubidiumatome pro Sekunde einzeln durch den Hohlraum. Die Atome „spürten“ die Anwesenheit eines Photons, ohne es zu absorbieren. Dazu wurden sie in einen Überlagerungszustand zweier Rydberg-Zustände  $|g\rangle$  und  $|e\rangle$  gebracht, deren Übergang nahezu in Resonanz mit dem Hohlraum war. Da die Übergangsfrequenz zwischen den beiden Rydberg-Zuständen je nach Stärke des Mikrowellenfelds verstimmt war, entwickelte sich der Zustand eines Atoms beim Durchqueren der Cavity abhängig von der Photonenzahl: Wenn ein Photon vorhanden war, so landete das Atom im Zustand  $|g\rangle$ , andernfalls im Zustand  $|e\rangle$ .

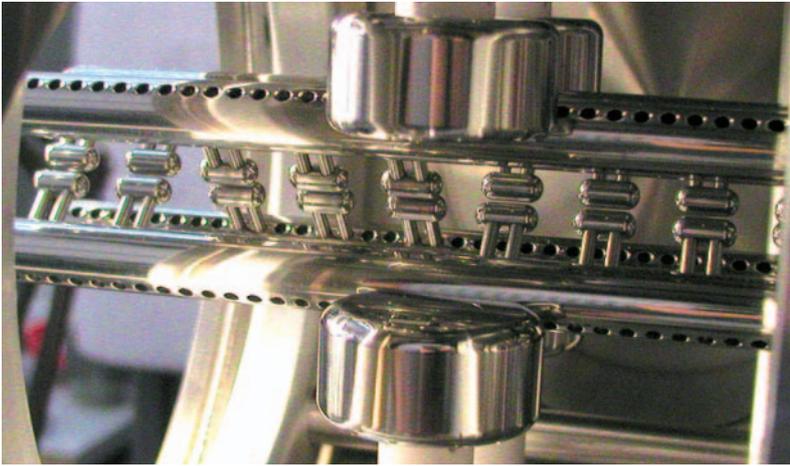
Mit einem Detektor, der den Zustand der Atome nach dem Passieren des Hohlraums anzeigte, ließ sich die aktuelle Zahl der Photonen direkt ablesen. Wie erwartet sprang die Photonenzahl unregelmäßig zwischen 0 und 1 hin und her, je nachdem ob sich ein thermisches Photon in der Cavity befand oder nicht. Nach mehreren Quantensprüngen in dieselbe Richtung konnte der Hohlraum allerdings mehr als ein Photon enthalten, auch wenn die Wahrscheinlichkeit dafür sehr klein war.

Die Forscher arbeiten nun daran, Photonenzahlen von 0 bis 7 experimentell zu unterscheiden. Damit ließen sich Überlagerungszustände von Photonen herstellen, die an Schrödingers Katze erinnern. Auch wäre dann ihr Zerfall zerstörungsfrei zu beobachten. Abschließend wies Stefan Kuhr auf geplante Experimente mit zwei Hohlräumen hin, mit denen sich verschränkte Zustände realisieren lassen. Dabei könnten sich z. B. die beiden Cavities ein Photon teilen, was neue Möglichkeiten für die Quanteninformationsverarbeitung eröffnen würde.



Mithilfe dieses optischen Hohlraums, der von zwei Spiegeln gebildet wird, ließen sich Quantensprünge von Photonen beobachten.

M. Brune / CNRS



Große Moleküle lassen sich mithilfe des Prinzips der alternierenden Gradienten abbremsen. Die Molekülpakete werden in den Elektrodenpaaren fokussiert und zwischen aufeinander folgenden Paaren

abgebremst. Oben und unten im Bild sind die Hochspannungsisolatoren zu sehen, an denen die gesamte Elektrodenanordnung befestigt ist.

## Bremse für Riesenmoleküle

Die Erforschung ultrakalter atomarer Gase hat eine Fülle von weitreichenden physikalischen Erkenntnissen gebracht. Ultrakalte Gase aus polaren Molekülen werden sich vielleicht als ebenso interessant erweisen, da das elektrische Dipolmoment und andere Eigenschaften der Moleküle, wie sie Atome nicht besitzen, zu neuen physikalischen Effekten führen könnten. Um die Moleküle einem kalten, aber schnellen Teilchenstrahl zu entnehmen, müssen sie zunächst einmal abgebremst und eingefangen werden. Dabei lässt sich die Kraft ausnutzen, die die polaren Moleküle in inhomogenen elektrischen Feldern erfahren, wie Jochen Küpper vom Fritz-Haber-Institut in Berlin berichtet.

Aufgrund des Stark-Effekts ändert sich die Energie der Quantenzustände eines Moleküls in einem inhomogenen elektrischen Feld. Je nachdem ob die Energie mit anwachsender Feldstärke zu- oder abnimmt, strebt das Molekül zu Bereichen niedriger bzw. hoher Feldstärke. Kleine polare Moleküle wie  $\text{ND}_3$  und  $\text{OH}$ , die aufgrund ihres jeweiligen Quantenzustandes niedrige Feldstärke suchten, ließen sich mit gepulsten elektrischen Feldern soweit abbremsen, dass sie sich elektrostatisch einfangen ließen. Der Abbremsung diente ein Stark-Abbremsler, der aus einer Reihe von

Kondensatorelektroden besteht. Wenn das polare Molekül in das starke Feld eines der Kondensatoren hinein fliegt, das es meiden möchte, wird es abgebremst. Sobald es das Feld passiert hat, wird dieses abgeschaltet, sodass es das Molekül nicht wieder auf seine ursprüngliche Geschwindigkeit beschleunigt. Nachdem das Molekül etwa 100 Kondensatoren passiert hat, kommt es zur Ruhe.

Große Moleküle, die praktisch für alle Quantenzustände in starke Felder hineingezogen werden, lassen sich auf diese Weise nicht abbremsen, da sie auf die Kondensatorelektroden fliegen würden. Stattdessen wird das Prinzip der alternierenden Gradienten ausgenutzt, das in Teilchenbeschleunigern der Fokussierung geladener Teilchen dient. Eine Alternierende-Gradienten-Anordnung zur Abbremsung von ungeladenen, polaren Molekülen besteht aus hintereinander liegenden elektrischen Linsen: Paare von zylindrischen Elektroden, die parallel zum gepulsten Molekülstrahl ausgerichtet sind. Schaltet man eine solche Linse erst an, wenn die Moleküle eines Pulses sie gerade passieren, und lässt diese dann aus dem Elektrodenpaar herausfliegen, so bremsen die Teilchen ab. Am Fritz-Haber-Institut ist es auf diese Weise gelungen, Kohlenmonoxid,  $\text{OH}$ -Radikale und Benzonnitril ( $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}$ ) mithilfe von 27 Linsen

abzubremsen. In einer Kollaboration mit dem Imperial College in London bremsen die Forscher  $\text{YbF}$ - und  $\text{CaF}$ -Moleküle mit einer AG-Anordnung aus 12 bzw. 21 Linsen ab.

Biomoleküle können in kalten Teilchenstrahlen in unterschiedlichen Konformationen vorliegen, die sich in ihren elektrischen Dipolmomenten unterscheiden. Deshalb lassen sich für die spektroskopische Untersuchung auch Moleküle unterschiedlicher Konformation mit elektrischen Feldern räumlich voneinander trennen und einfangen. Darüber hinaus könnten Präzisionsmessungen an chiralen Molekülen helfen, um nach Auswirkungen der paritätsverletzenden Schwachen Wechselwirkung zu suchen.

## Exzitonen in organischen Halbleitern

Organische Halbleiter haben ein großes Anwendungspotenzial in der molekularen Elektronik und Photonik. Dünne organische Schichten können preiswert hergestellt werden, wobei sich ihre elektrischen und optischen Eigenschaften maßschneidern lassen.

### GEORG-SIMON-OHM-PREIS

Den Georg-Simon-Ohm-Preis 2007 erhielt im Rahmen der AMOP-Tagung in Düsseldorf Frau Dipl.-Ing. (FH) Stephanie Tümmel, HAWK Göttingen (mit DPG-Präsident Eberhard Umbach bei der Preisverleihung). Die DPG würdigt damit die grundlegenden Untersuchungen zur Anwendung eines dielektrisch behinderten Plasmas auf die menschlichen Fingernägel zur Verbesserung der Haftfähigkeit der Nagellacke von Naturkosmetik-Firmen (vgl. S. 110).



Doch noch immer ist der Ladungstransport in diesen Materialien nicht ausreichend verstanden. Ein intensiv studiertes Beispiel sind dünne kristalline Schichten aus Pentacen, in denen die positiv geladenen Löcher eine außergewöhnlich hohe Mobilität haben. Deshalb finden aufgedampfte mikrokristalline Pentacenschichten häufig in organischen Feldeffekttransistoren Einsatz. Die Schichten bestehen aus dicht gepackten Mikrokristallen, die aufgrund von Korngrenzen zahlreiche Störstellen enthalten. Henning Marciniak berichtete über Pump-Probe-Experimente, die die Gruppen von Stefan Lochbrunner und Bert Nickel an der Universität München durchgeführt haben. Dabei wurden die Eigenschaften und die Entwicklung von optisch erzeugten elektronischen Anregungen mit hoher zeitlicher Auflösung untersucht.

Die dünnen Schichten wurden von 30 fs langen Laserpulsen angeregt, deren zentrale Wellenlänge bei 670 nm lag, die die Schichten

besonders stark absorbierten. Mit gepulstem weißem Licht wurde jeweils nach einem Anregungspuls mit variabler zeitlicher Verzögerung gemessen, wie sich die Lichtabsorption der Probe über das gesamte sichtbare Lichtspektrum verändert hatte. Dabei zeigte sich, dass die Laserpulse bei 670 nm die Pentacenschicht ausgebleicht haben. Die Moleküle gelangten aus dem Grundzustand in einen angeregten Zustand. Die Anregungen waren Frenkel-Exzitonen, bei denen jeweils ein Elektron eng an ein positiv geladenes Molekül gebunden war, die sich durch den organischen Kristall bewegen konnten. Die Moleküle kehrten schließlich nach einigen hundert Pikosekunden in den Grundzustand zurück, allerdings nicht auf direktem Weg durch Abgabe eines Photons.

Die Experimente ergaben, dass sich die Frenkel-Exzitonen nach etwa 70 fs strahlungslos in Charge-Transfer- oder CT-Exzitonen umwandelten. Dabei wechselte jeweils ein Elektron auf ein benach-

bartes Pentacemolekül über, blieb aber locker an das geladene Ausgangsmolekül gebunden. Die CT-Exzitonen hatten nur einen sehr schwachen Dipolübergang in den Grundzustand und konnten kaum eine stimulierte Emission verursachen. Stattdessen diffundierten sie solange durch den Kristall, bis sie an Störstellen hängen blieben oder auf ein anderes Exziton trafen. Bei diesem Zusammentreffen wurde ein Exziton annihilert und das dazugehörige angeregte Molekül kehrte in seinen Grundzustand zurück. Diese Erklärung konnten Rangleichungen für die Dichten der CT-Exzitonen und der unbesetzten Störstellen bestätigen. Während die Störstellen zu berücksichtigen waren, spielte die intrinsische Lebensdauer der Exzitonen keine Rolle. Den Münchner Forschern ist ein direkter Blick auf elementare Prozesse des Ladungstransports gelungen. Dabei wurden zwar keine freien Ladungsträger betrachtet sondern neutrale Exzitonen, doch die untersuchten Prozesse sind den-

#### AMOP-DISSERTATIONSPREIS

In diesem Jahr haben die in der AMOP zusammengeschlossenen Fachverbände der DPG erstmals einen Dissertationspreis vergeben. Der Preis soll Aufsehen erregende Ergebnisse würdigen, die im Rahmen einer Dissertation erzielt wurden, erklärte der AMOP-Sprecher und Vorsitzende des Preis-Komitees Wolfgang Schleich vor der Preisvergabe. Nach dem Aufruf für Nominierungen im vergangenen Herbst waren 13 herausragende Bewerbungen eingegangen. Daraus wurden vier (d. h. eigentlich fünf) Kandidaten ausgewählt, die sich in Düsseldorf auf einem eigenen Symposium vorgestellt haben, wobei die Publikumsresonanz überwältigend war. Der anwesende Roy Glauber verglich das Symposium mit dem Tschaikowsky-Wettbewerb für Pianisten. Auch dort sei es eine große Ehre, zu den Finalisten zu gehören. Allerdings sei der Wettbewerb um den AMOP-Dissertationspreis viel schwieriger, denn hier müssten die Kandidaten die von ihnen komponierte „Musik“ auf einem selbstgebauten Flügel spielen.

Die Finalisten waren Axel Griesmeier, Stuttgart („A quantum gas of magnets“), Yevhen Miroshnychenko, früher Bonn, jetzt Palaiseau, Frankreich („Atom-sorting machine“), Philip Walter,



Christian Ospelkaus und Silke Ospelkaus-Schwarzer

früher Wien, jetzt Harvard („From entangled photons to quantum computation“) und das Ehepaar Silke Ospelkaus-Schwarzer und Christian Ospelkaus, früher Hamburg, jetzt Boulder („Fermi-Bose mixtures with tunable interactions in 3D optical lattices“).

Der AMOP-Dissertationspreis 2007 wurde an das Ehepaar Ospelkaus-Schwarzer für ihre Arbeiten zu mehrkomponentigen Quantengasen verliehen. Mit einer von ihnen gemeinsam entwickelten Apparatur haben sie Ge-

mische der Quantengase  $^{40}\text{K}$  und  $^{87}\text{Rb}$  mit bisher unerreichter Teilchenzahl hergestellt. Dadurch konnten sie den Fermi-Bose-Kollaps aufklären sowie den Einfluss von Fermionen auf den bosonischen Kohärenzverlust beim Übergang zum Mott-Isolator studieren. Darüber hinaus gelang es ihnen erstmals, langlebige ultrakalte heteronukleare Moleküle herzustellen. Wolfgang Schleich war zuversichtlich, dass der AMOP und die DPG diesen Preis fortführen werden.

noch wichtig, z. B. für den Einsatz von Pentacen in optoelektronischen Bauelementen.

## Materie in extremen Feldern

Wenn Atome oder Moleküle für sehr kurze Zeit extrem starken elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind, können unerwartete Dinge passieren. Das zeigte Joachim Ullrich vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg am Beispiel von drei Strahlungsquellen, mit denen Feldintensitäten von  $10^{14}$  bis  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> bei Pulslängen von Femto- bis Attosekunden zu erreichen sind. Das erste Beispiel waren hochgeladene schwere Ionen wie U<sup>92+</sup>, die beim Vorbeiflug mit relativistischer Geschwindigkeit Attosekundenpulse mit Intensitäten von  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> erzeugen und auf Atome wie virtuelle Photonenfelder wirken. Während dieser kurzen Zeit sind in den Atomen die Bewegungen der Elektronen auf den äußeren Schalen praktisch eingefroren. Durch Absorption virtueller Photonen fragmentiert das Atom explosionsartig. Bei Experimenten am Speicherring ESR der GSI wurden die Impulse aller Fragmente mithilfe eines „Reaktionsmikroskops“ analysiert. Demnach nimmt ein Atom bei dieser „Coulomb-Explosion“ viel Energie aber kaum Impuls auf. Somit lässt sich erstmals direkte Information über die korrelierten Bewegungen der Elektronen im Grundzustand von Atomen und Molekülen im Bereich von Attosekunden gewinnen. Die geplante Anlage FAIR der GSI in Darmstadt wird sogar die Wirkung von Zeptosekundenpulsen auf Atome und Moleküle untersuchen können.

Mit gepulsten optischen Lasern lassen sich heute ebenfalls Intensitäten von maximal  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> erreichen, allerdings bei Pulslängen von einigen Femtosekunden. Die Wirkung solcher Pulse auf ein Atom ist daher „adiabatisch“, d. h. die Elektronen umrunden den Kern während einer Periodendauer des Laserlichts viele Male. Durch das oszillierende Laserfeld wird das atomare Coulomb-Potential hin

und hergekippt. Ist das Feld stark genug, können ein oder mehrere Elektronen unabhängig voneinander über die Potentialbarriere entkommen oder sie durchtunneln. Bei kleineren Intensitäten dominiert ein korrelierter Elektronenprozess, die Mehrfach-Fragmentation: Ein durch Tunneln freigesetztes Elektron wird im Laserfeld zunächst vom Atom weg, dann jedoch wieder zum Atom zurück beschleunigt, sodass es mehrere weitere Elektronen nahezu gleichzeitig aus dem Atom heraus stoßen kann. Dieser Prozess, der durch Messung der Ionenimpulse mithilfe des Reaktionsmikroskops eindeutig nachgewiesen werden konnte, dauert selbst bei Emission von vier Elektronen weniger als 500 Attosekunden.

Der Freie-Elektronen-Laser FLASH am DESY in Hamburg, der im UV-Bereich strahlt, liefert zurzeit Intensitäten von  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> bei Pulslängen zwischen 7 und 25 fs. Die Photonenenergie ist mit 100 eV etwa hundertmal größer als bei optischen Lasern. FLASH ionisiert die Atome nicht dadurch, dass er ihre Elektronen tunneln lässt. Dazu ist die Frequenz der UV-Strahlung zu hoch. Stattdessen absorbieren die Atome mehrere Laserphotonen. Neon wurde z. B. zweifach ionisiert, indem es zwei oder drei Laserphotonen desselben Pulses gleichzeitig oder nacheinander absorbierte. Doch selbst dieser vergleichsweise einfache Zwei-Photonen-Zwei-Elektronen-Prozess, der typisch ist für die Wechselwirkung von UV- oder Röntgenlaserstrahlung mit Materie, ist noch nicht gut verstanden. Das Reaktionsmikroskop liefert jedoch auch hier die Schlüsseldaten, um die Theorie zu überprüfen. Der Europäische Röntgenlaser XFEL, der am DESY gebaut wird, soll 10 fs lange Pulse mit Intensitäten von maximal  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> erzeugen. Somit besteht die begründete Hoffnung, dass es mit ihm möglich sein wird, das Beugungsbild eines komplexen organischen Moleküls als „Schnappschuss“ aufzunehmen, bevor das Molekül und seine Atome restlos fragmentiert werden.