

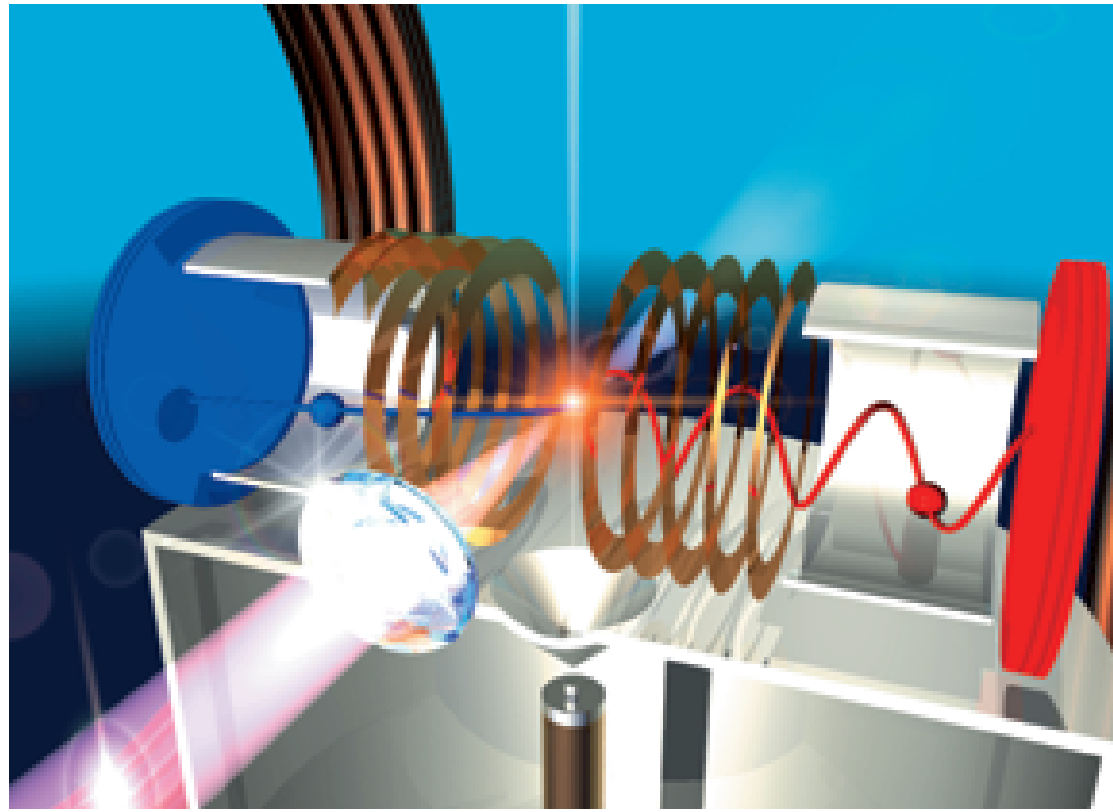
Bewegung in der Welt der Quanten

Was Murmeln und Elektronen miteinander verbindet

Wächst ein Tumor, oder bleibt das Gewebe gesund? Erscheint ein Stoff gelb oder rot? Warum brennt Benzin, Wasser aber nicht? So unterschiedlich diese Fragen auch erscheinen, aus der Perspektive des Physikers finden sich die Antworten alle auf der gleichen Ebene. Sie liegen in der Struktur und Dynamik der Elektronenhüllen der Atome und Moleküle, die die Erbsubstanz der Zellen bilden, aus denen Farbstoffe bestehen und aus denen sich Benzin- und Wassermoleküle zusammensetzen. Das Atom mit seinen Elektronenhüllen ähnelt, wie wir seit Niels Bohr und den Experimenten von Ernest Rutherford wissen, einem Mückenschwarm, in dessen Zentrum ein winziger Kern vibriert, der das vieltausendfache Gewicht der Elektronen hat. Aus der Größe und Struktur der Elektronenhülle resultiert das Periodensystem der Elemente und deren chemische und physikalische Eigenschaften, kurz die Vielfalt des Universums. Die zeitliche Entwicklung der Elektronenhülle, oder – bildlich gesprochen – die Bewegung dieser »Mückenschwärme«, ist es, die alles Werden und Vergehen in unserer Alltagswelt steuert. Diese Bewegung der Elektronen und ihr Wechselspiel untereinander direkt zu beobachten, ist der Traum der modernen Physik. Doch bis zur Erfüllung dieses Traums – einen Film in extremer Zeitlupe und mit extremem Zoom zu drehen, in dem die Bewegung der einzelnen Elektronen verfolgt und das Zusammenwirken beobachtet werden kann – ist noch viel zu tun. Erste vielversprechende Schritte sind in den letzten Jahren jedoch erfolgreich gemacht worden.

Fliegende Elektronen sichtbar machen

Mit einer Technologie, bei deren Entwicklung die Physiker der Universität Frankfurt eine weltweit führende Rolle gespielt haben, kann man seit wenigen Jahren Richtung und Geschwindigkeit praktisch aller atomaren und molekularen Bruchstücke, die beim Aufbruch der Elektronenhülle entstehen, direkt sichtbar machen. Diese Technologie wird

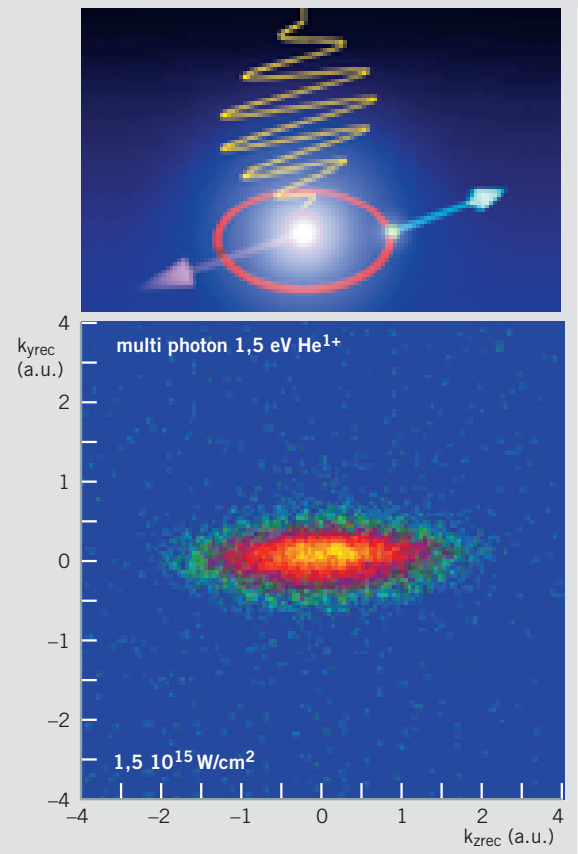


■ Mit Hilfe der COLTRIMS-Technologie dieses »Mikroskops« kann die Bewegung von Elektronen und geladenen Atomen sichtbar gemacht werden. Die Bruchstücke des Atoms oder Moleküls, das hier von einem Laserblitz in der Bildmitte aufgespalten wird (rote Kugel: Elektronen, blaue Kugel: Ionen), werden von elektrischen und magnetischen Feldern auf die hier blau und rot gezeigten Teilchendetektoren geleitet. Diese registrieren den Auftreffort und die Flugzeit auf eine milliardstel Sekunde genau und geben sie an einen Computer weiter, der dann ein vollständiges Bild der Fragmentation liefert.

weltweit mit dem Schlagwort COLTRIMS (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy) bezeichnet ■. Die zugrunde liegende Idee ist einfach: Elektrische und magnetische Felder bewirken für frei fliegende Elektronen und geladene Atome das, was die Erdanziehung mit Steinen macht, die man von einem Turm wirft. Unabhängig von der Richtung, in die ein Stein geworfen wird, fällt er früher oder später auf die Erde zurück. Wenn man wissen will, in welche Richtung und mit welcher Geschwindigkeit der Stein losgeschleudert wurde, genügt es, den Auftreffort und die Zeit, die der Stein vom Abwurf bis zum Aufschlag benötigte, zu registrieren. Aus diesen Daten kann die Abwurfrichtung und -geschwindigkeit eindeutig ermittelt werden. Die Flugbahn selbst muss dafür nicht bekannt sein. In diesem Bild

entspricht die Emission eines Elektrons aus einem neutralen Atom dem Werfen des Steins. Die Erdanziehung beeinflusst Elektronen und geladene Atome zwar kaum, jedoch sorgen relativ schwache elektrische Felder sowie das Feld eines hinreichend großen Elektromagneten dafür, dass diese Teilchen auf einen entsprechenden Detektor »fallen« oder, besser gesagt, gelenkt werden. Diese Nachweisgeräte ermitteln den Auftreffort eines Elektrons mit der Genauigkeit eines zehntel Millimeters und erlauben es, die Auftreffzeit auf eine milliardstel Sekunde genau zu messen. Die Messdaten werden Elektron für Elektron von einem Computer erfasst. Der Rechner ermittelt dann die Flugbahnkoordinaten der Teilchen und rekonstruiert so das komplette Zerplatzen des Atoms. Die Bilder, die diese Technik generiert, erlauben Einblicke in die Bewegungsstruktur subatomarer Teilchen, die bis vor einigen Jah-

Linear polarisierter Laserblitz



Ein linear polarisierter Laserblitz (gelbe Linie) ionisiert ein Elektron aus einem Atom (oben). Das Elektron und der geladene Rest des Atoms fliegen in entgegengesetzte Richtung auseinander. Die Abbildung unten zeigt die gemessene Geschwindigkeitsverteilung der entstehenden Ionen, die in Richtung des Lichtfelds getrieben werden.

ren undenkbar waren. Dementsprechend hat die COLTRIMS-Technik einen Siegeszug in Physiklaboren rund um die Welt angetreten. Dies eröffnet Frankfurter Diplomanden und Doktoranden, die diese komplexe Technologie beherrschen, Auslandsaufenthalte in Labors in aller Welt, derzeit in Japan, USA, Kanada, Brasilien und Australien. Sie tragen dazu bei, die Methode zu verbreiten und das Anwendungs-Know-how zu vermitteln.

Messerscharfes Licht

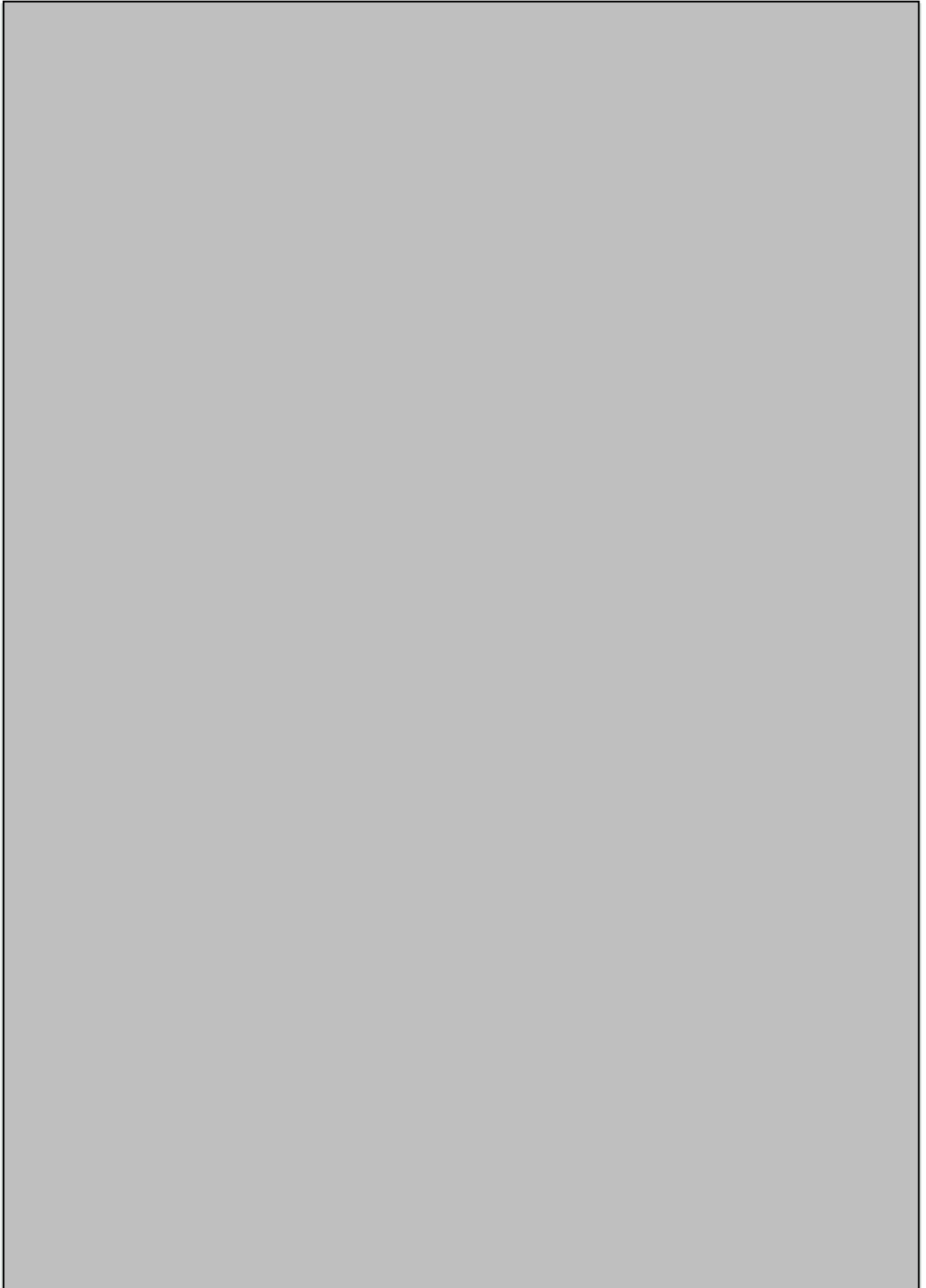
Um einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit dieser Technologie zu gewinnen, hier ein Beispiel: Aus vielen Bereichen der Technik lassen sich heute Laser nicht mehr wegdenken, beispielsweise in der Medizin. Hier erlauben sie Operationen, die viel schonender sind, als es mit einem Messer möglich wäre. Dass man mit Licht überhaupt schneiden

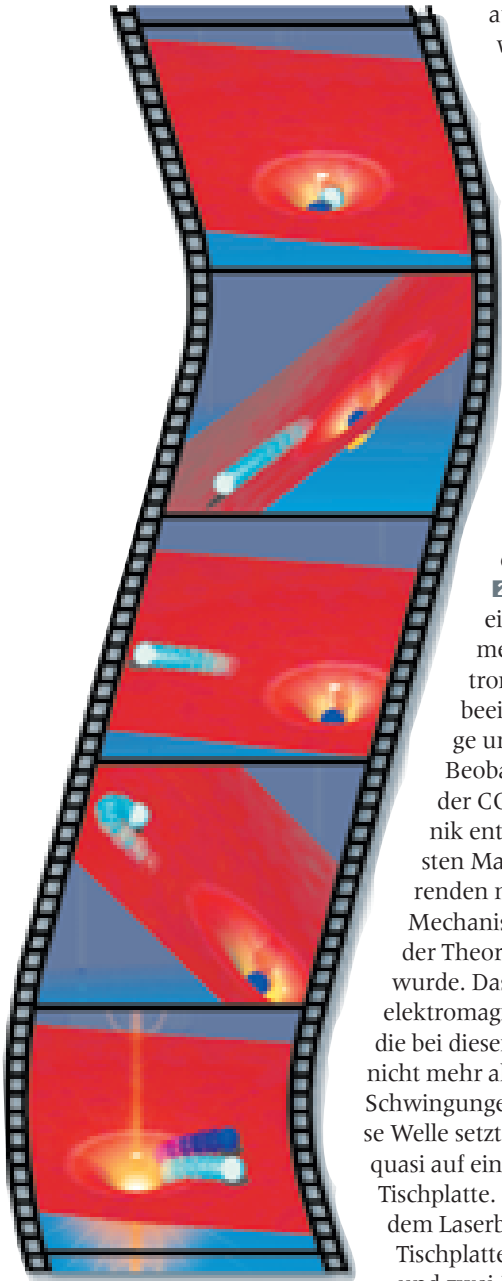
kann, liegt an den besonderen Eigenschaften des Laserlichts, seiner hohen Ordnung und Energiedichte. Mit gepulsten Lasern ist es heute möglich, unvorstellbar kurze Lichtblitze mit maximaler technisch machbarer Helligkeit zu erreichen. Werden diese superkurzen Lichtblitze mit einer Linse auf den Durchmesser eines Haars fokussiert, können für die unvorstellbar kurze Zeit von einer hundertstel millionstel millionstel Sekunde (eine 0,...1 mit 14 Nullen vor der 1) Lichtintensitäten erreicht werden, die der gesamten Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche, auf einen Stecknadelkopf gebündelt, entsprechen. Das Verhalten von Materie unter solchen extremen Bedingungen ist ein hochaktuelles Forschungsgebiet.

Mit solchen Laserpulsen kann man Gewebe und selbst Metall schneiden, aber was liegt dem mikroskopisch zugrunde? Um dies

Anzeige







■ Wechselwirkung eines Atoms mit einem extrem starken Laserblitz: Die Elektronen sind durch Kugeln symbolisiert, die vom Laserlicht aufgrund des »Rückstreumechanismus« wie auf einer wippenden Tischplatte beschleunigt werden.

aufzuklären, werden einzelne Atome in den Brennpunkt eines solchen Laserblitzes gesetzt. Dabei entreißt der Lichtblitz dem Atom ein oder mehrere Elektronen, und zwar entlang der Richtung, in die das elektrische Feld des Lasers zeigt **■**. Wie jedoch ein Laserpuls mehr als ein Elektron gleichzeitig beeinflusst, war lange umstritten. Die Beobachtungen mit der COLTRIMS-Technik enthüllten zum ersten Mal einen faszinierenden mikroskopischen Mechanismus, der von der Theorie vorhergesagt wurde. Das Licht ist eine elektromagnetische Welle, die bei diesen Pulsdauern nicht mehr als drei bis vier Schwingungen ausführt. Diese Welle setzt die Elektronen quasi auf eine wippende Tischplatte. Zu Beginn – vor dem Laserblitz – ist die Tischplatte horizontal, und zwei Murmeln (die beiden Elektronen) liegen in einer Vertiefung auf dem Tisch. Die Mulde stellt die durch den Atomkern hervorgerufene Anziehungskraft dar. Die Elektronen sind im Atom gebunden, sie können von sich aus nicht aus der Mulde herausrollen. Der Laserblitz entspricht einigen starken Schwingungen der Tischplatte. Sie wippt mehrmals um die Mitte, in der sich die Vertiefung befindet. Die Neigung der Tischplatte entspricht der momentanen Stärke des elektrischen Felds. Wenn sie steil genug ist, kann eine der beiden Kugeln aus dem Loch heraus- und die Platte herunterrollen. Während dies in der makroskopischen Welt erst geschieht, wenn die Tischplatte so weit geneigt ist, dass die Murmel über den Rand der Mulde rollen kann, kommt in der mikroskopi-

schen, quantenmechanischen Welt der Atome ein weiterer Effekt hinzu. Schon bevor das Feld so stark ist, dass die Elektronen frei aus dem Atom herauslaufen können, entsteht quasi ein kleiner Tunnel, durch den die Elektronen vorzeitig entkommen können, das heißt, das Elektron kann sich kurzzeitig Energie borgen und über den Potenzialberg springen. Während die Kugel jetzt langsam auf der Tischplatte nach unten Geschwindigkeit aufnimmt, fängt die Wippe an zurück zu schwingen, bis sie schließlich in die andere Richtung steht. Die Kugel läuft bergauf, wird abgebremst und dreht schließlich wieder um. Jetzt rollt sie mit zunehmender Geschwindigkeit auf die Mulde zurück, in der sich noch eine zweite Murmel befindet. Wenn sie genug Schwung hat, kann sie diese Murmel aus der Vertiefung herausstoßen, wobei sie selbst abgebremst wird. Schließlich liegen beide Murmeln gleichzeitig nebeneinander frei auf der Platte und werden hin- und hergeschaukelt. Sie fallen am Ende auf der gleichen Seite von der Platte herunter.

Beschreibt dieses Szenario wirklich das, was in einem starken Laserfeld mit dem Atom geschieht? Zerschlägt das am Anfang freigesetzte Elektron sein eigenes Mutteratom? Die Antwort, die die COLTRIMS-Technik liefert, ist ein eindeutiges Ja. In den meisten Fällen rollen beide Elektronen mit etwa gleicher Geschwindigkeit in die gleiche Richtung, wie die beiden gelben Punkte zeigen **■**. Sie fallen also am Ende von der Platte, genau wie es aufgrund des Rückstreuzenarios zu erwarten ist. Doch leider ist es bis heute selbst mit den schnellsten Supercomputern nicht möglich, die quantenmechanische Bewegung dieser beiden Elektronen im Laserfeld zu berechnen. Die theoretischen Arbeiten, die dies näherungsweise versucht haben, bestätigen zwar die Richtigkeit des beschriebenen Rückstreumechanismus, ihnen gelingt es jedoch nicht, die experimentellen Ergebnisse im Detail zu

reproduzieren; denn im Gegensatz zu Murmeln bewegen sich in der Quantenwelt der Elektronen keine einfachen Kugeln, sondern Wellenpakete, die eher treibenden Wolkenfetzen als Murmeln gleichen.

Die COLTRIMS-Technik belegt zum einen, dass sich Bewegungen von Elektronen und Kernen mit Laserlicht gezielt auf mikroskopischem Niveau steuern lassen. Damit kommen Naturwissenschaftler ihrem Traum näher, nicht nur stille Beobachter der atomaren und molekularen Welt zu sein, sondern deren Ingenieure, indem sie mit Licht steuernd in Prozesse auf atomarem Niveau eingreifen können. Dies wäre ein erster Schritt auf dem Weg zur Kontrolle von chemischen Reaktionen mit Laserlicht. Zum anderen demonstrieren diese Experimente, dass man mit modernen bildgebenden Techniken und Lasern in einen neuen Bereich der Ultrakurzzeitphysik, den Attosekundenbereich, vorstoßen kann. In einer Attosekunde (10^{-18}) kommt Licht nur den millionsten Teil eines Haardurchmessers weit. Dies sind Zeiten, die kurz genug sind, um die Bewegung von Elektronen in Atomen und Molekülen zu studieren. Bis zu einem endgültigen Zeitlupenfilm muss jedoch noch viel Forschungsarbeit geleistet werden.

Das neue Stern-Gerlach-Zentrum bietet hierfür hervorragende Voraussetzungen (siehe Beitrag Seite 48). Mit dem modernen Kurzzeitlaserlabor, das dort eingerichtet wird, wird man zu noch kürzeren Zeiten vorstoßen können. Schritt für Schritt sollen dann elektronische Prozesse in größeren Strukturen wie Molekülen, Clustern und Oberflächen betrachtet werden. Das Kurzzeitlaserlabor ergänzt den zweiten Schwerpunkt des Stern-Gerlach-Zentrums, die Ionenstrahlanlagen. Durch die Vielfalt der wissenschaftlichen Möglichkeiten, die sich aus dem Zusammenspiel von Kurzzeitlaser, Ionenbeschleunigern und COLTRIMS-Technik ergeben, spielt das Stern-Gerlach-Zentrum auf dem Gebiet der Quantendynamik weltweit in der Spitzenliga. ◆

Der Autor

Prof. Dr. Reinhard Dörner studierte Physik und Philosophie in Aachen und Frankfurt. Seit 2002 ist er Professor für Experimentalphysik am Institut für Kernphysik der Universität Frankfurt. Seine Arbeitgebiete sind die Atom- und Moleküldynamik, die er mit Hilfe von Schwerionen, Synchrotronstrahlung und ultrakurzen Laserpulsen untersucht.