

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 02/15

IM
LICHT
DER FORSCHUNG

**SCHOKOLADE
IM RÖNTGENLICHT**

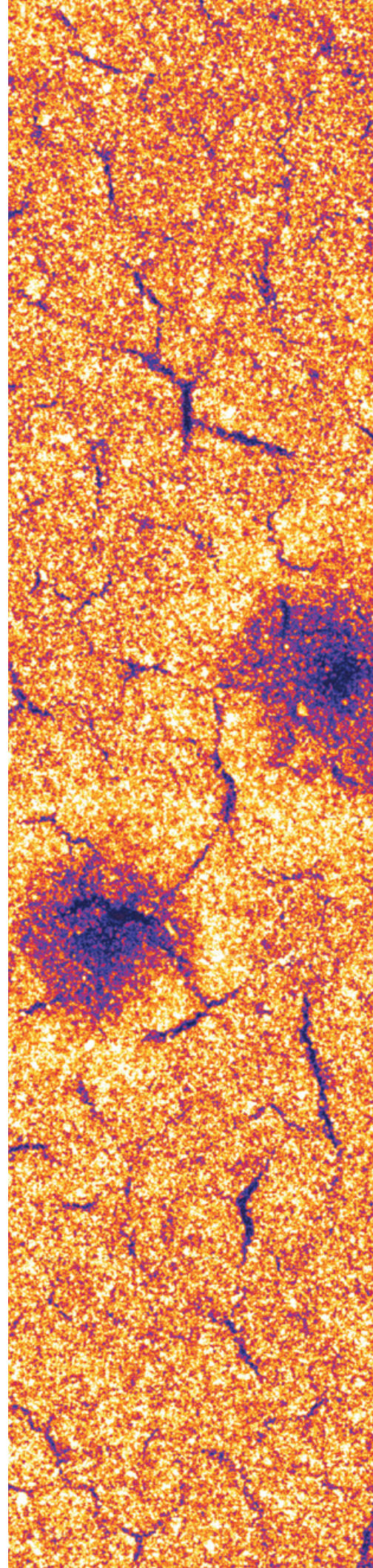
**GESCHOCKTE
DIAMANTEN**

**STERNENSTAUB
IM LABOR**



Alternde Akkus

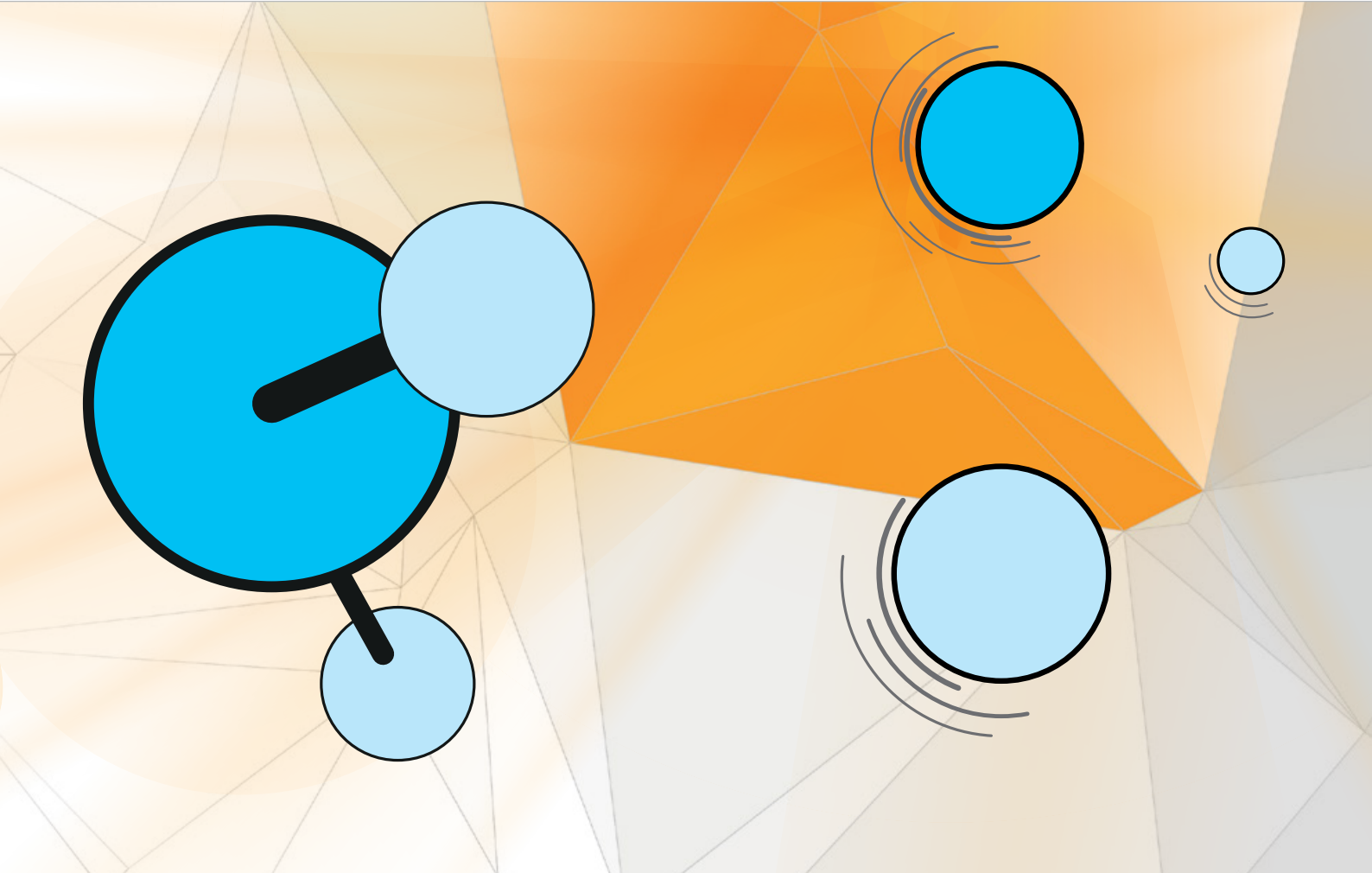
Zu schnelles Laden von Lithium-Ionen-Akkus kann die Akkukapazität dauerhaft herabsetzen. Dabei werden Teile der Struktur des Energiespeichers zerstört und deaktiviert. Derartige Strukturveränderungen hat DESY-Forscherin Ulrike Bösenberg mit ihrem Team an der Röntgenstrahlungsquelle PETRA III erstmals untersucht. Bereits nach wenigen Ladezyklen zeigten sich deutliche Schäden an der inneren Struktur des Akkumaterials, die bei langsamer Ladung nicht auftraten. Die Mangan-Verteilung in der Akkuelektrode zeigt nach 25 Schnellladezyklen deutliche Löcher. Die untersuchten Lithium-Nickel-Manganoxid-Materialien sind vielversprechende Kandidaten für eine neue Generation der leistungsstarken Energiespeicher.



The image shows a highly magnified, textured surface, likely a biological or material structure. The surface is covered in a dense, irregular grid of fine, interconnected lines, creating a complex, porous appearance. The color palette is dominated by warm tones, ranging from bright yellow and orange to deep red and dark brown. Several prominent, dark, circular or oval-shaped features are scattered across the field of view, appearing as deep shadows or voids within the structure. In the upper right corner, there is a white circular graphic containing the word "femtoskop" in a bold, sans-serif font.

femtoskop

Inhalt



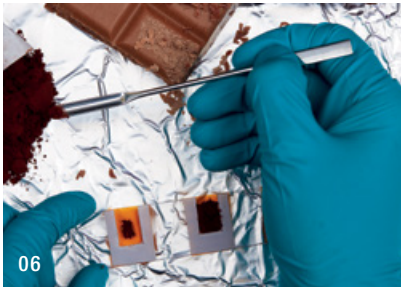
ZOOM

Im Licht der Forschung

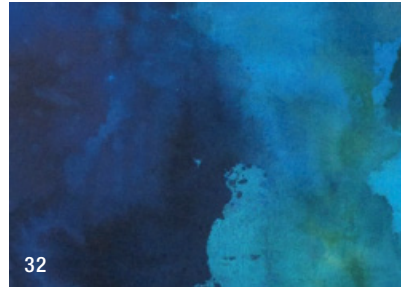
**Atome im Röntgenblick,
ein Kosmos voller Gammastrahlung**

Seite 10–35

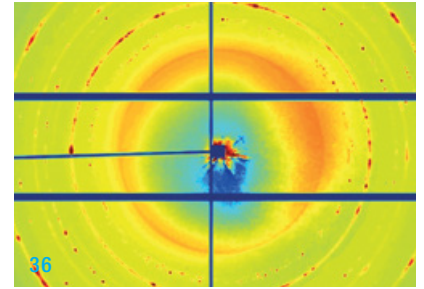
Licht prägt unser Bild von der Welt. Infrarotstrahlung empfinden wir als Wärme, Ultraviolett als schmerzhaften Sonnenbrand. Mit unseren Sinnen nehmen wir jedoch nur einen winzigen Ausschnitt des Lichtspektrums wahr. Die Wissenschaft hat im Laufe der Jahrhunderte gelernt, fast das gesamte elektromagnetische Spektrum zu nutzen. Moderne Supermikroskope bilden mit kurzwelligem Röntgenlicht die Welt des Allerkleinsten ab: Atome und Moleküle, die Grundbausteine der Materie. Astronomen gewinnen neue Einblicke in den Kosmos mit Licht verschiedenster Wellenlängen – von der Kosmischen Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich bis hin zu energiereicher Gammastrahlung.



06



32



36

CAMPUS

- 06 Schokolade im Röntgenlicht**
Wege gegen den weißen Fettreif
- 08 Schockwellen in Diamant**
Neue Möglichkeiten in der Materialforschung
- 40 Vielversprechende Entzündungshemmer**
Forscher bestimmen Struktur von Spiegelmeren
- 42 Sternenstaub im Labor**
Saša Bajt untersucht kosmische Materie
- 45 Das schärfste Bild des Protons**
HERA-Forscher veröffentlichen umfassende Ergebnisse

ZOOM

- 12 Das internationale Jahr des Lichts**
- 14 Moleküle im Röntgenlicht**
- Van Gogh und die Chemie der Farben
 - Zähle Keramik, Glas aus Metall und Viren in 3D
 - Mehr Dynamik
- 22 Verborgene Welten**
Unsichtbares Licht gibt neue Einblicke in den Kosmos
- 26 Die „zweite Revolution“ der Laser**
Franz Kärtner entwickelt Ultrakurzzeit-Laser
- 32 Neues sehen – neues Sehen**
Ein Gespräch über Wissenschaft und Kunst

SPEKTRUM

Forschung kurzgefasst

- 36** Gefilmter Film
- Standardmodell bleibt gültig
- 37** Meilenstein für CSSB
- IceCube erspäht weitere kosmische Neutrinos
- 38** Elektronen-Tümpel
- Hochdruck-Weltrekord
- 39** Neuartige Röntgenlinse

RUBRIKEN

02 femtoskop
Alternde Akkus

39 femtomenal
Machen Positronen dick?

47 femtopolis
Eine Scheune in der Teilchenphysik

48 femtocartoon
Wieviel High-Tech brauchen Katzenvideos?

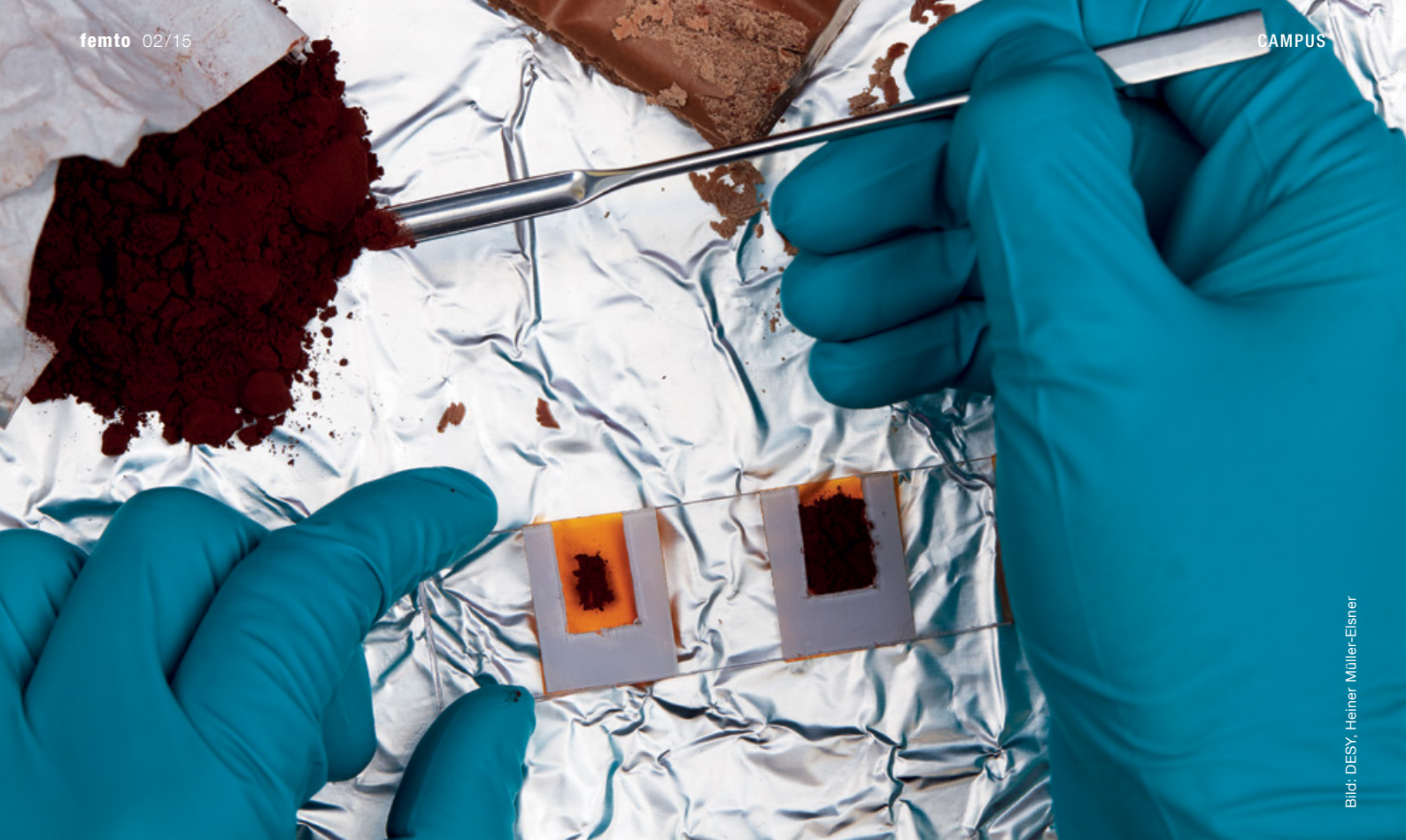


Bild: DESY, Heiner Müller-Elsner

Schokolade im Röntgenlicht

Schokoladenpulver wird in einen Probenträger gefüllt.

Wege gegen den unerwünschten weißen Fettreif

Zartschmelzend soll sie sein, schokoladig und knackig, zum Reinbeißen eben. Gänzlich unerwünscht ist da der weißlich fettige Belag, der sich gelegentlich auf Schokolade ablagert und nicht gerade appetitlich aussieht. Nach den Ursachen dieses sogenannten Fettreifs fahndete ein Team von der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH), DESY und vom Lebensmittelkonzern Nestlé mit dem intensiven Röntgenlicht von DESYs Forschungslichtquelle PETRA III. „Der Fettreif ist zwar völlig harmlos, führt aber durch Ausschuss und Reklamationen zu Millionenschäden in der

Lebensmittelindustrie“, erläutert Svenja Reinke von der TUHH. „Trotzdem weiß man bisher relativ wenig über die Entstehungsprozesse.“

„Fettreif ist einer der wichtigsten Qualitätsdefekte in der Süßwarenindustrie“

Stefan Palzer, Nestlé

Fettreif kann sich bilden, wenn flüssiges Fett, beispielsweise aus

der Kakaobutter, aus dem Inneren der Schokolade an die Oberfläche wandert und dort kristallisiert. „Das kann zum Beispiel geschehen, wenn flüssige Schokolade unkontrolliert abkühlt und sich instabile Kristallformen bilden. Aber auch bei Zimmertemperatur ist ein Viertel der Schokoladenfette bereits flüssig“, erklärt Reinke. Flüssige Füllungen oder Anteile wie beispielsweise Nougat beschleunigen die Entstehung von Fettreif.

Je länger die Schokolade liegt, desto mehr Zeit hat das Fett, durch die Schokolade zu wandern. Daher werden die weißen Flecken oft als Zeichen für alte Schokolade

empfundene. „Obgleich der Fettreif keinen Verderb des Produkts im eigentlichen Sinne darstellt, kann die damit einhergehende optische Beeinträchtigung zu einer großen Anzahl an Konsumentenbeschwerden führen“, betont Stefan Palzer vom Lebensmittelkonzern Nestlé. „Fettreif ist daher nach wie vor einer der wichtigsten Qualitätsdefekte in der Süßwarenindustrie.“

An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III konnten die Forscher nun die zugrundeliegenden Prozesse erstmals live beobachten. Sie untersuchten dafür Proben der einzelnen Schokoladenbestandteile, also beispielsweise eine Mischung aus Zucker und Kakaobutter oder Milchpulver und Kakaobutter oder Kakao und Kakaobutter. Diese Proben wurden zu einem feinen Pulver gemahlen, um die Prozesse zu beschleunigen, und dann mit dem hellen Röntgenlicht durchleuchtet. „Die Untersuchungstechnik zeigt uns sowohl die Fettkristalle als auch die Poren bis hinunter zu einer Größe von einigen Nanometern“, berichtet der Leiter der Untersuchung, Stefan Heinrich von der TUHH.

Um die Fettmigration zu untersuchen, tropften die Forscher jeweils etwas Sonnenblumenöl auf ihre Proben und beobachteten die Folgen. „Zum einen kommt es innerhalb von Sekunden zur Benetzung, das Öl dringt sehr schnell auch in die kleinsten Poren ein, wahrscheinlich durch Kapillarkräfte“, berichtet Reinke über die Beobachtungen. Zum anderen ändert das flüssige Fett die innere Struktur der Schokolade. „Das flüssige Fett löst über einen Zeitraum von Stunden weitere Fettkristalle auf, wodurch die gesamte Struktur der Schokolade weicher wird. Das erhöht wiederum die Fettmigration.“

Der genaue Ablauf dieser Prozesse war bisher noch nicht bekannt, die Studie ergänzt damit frühere Untersuchungen zur Kristallstruktur im Fettreif. „Zum ersten Mal konnten wir die dynamischen Mechanismen, die zur Bildung des Fettreifs

führen, im Detail direkt verfolgen“, erläutert DESY-Forscher Stephan Roth. „Die verwendete Methode, die Röntgenkleinwinkelstreuung, ist genau auf derartige Echtzeituntersuchungen und auf die Beobachtung der Änderungen der Struktur durch das Öl angepasst. Die gemeinsame Studie liefert uns wertvolle Informationen, wie wir Strukturänderungen in derartigen ‚alltäglichen‘ Mehrkomponentensystemen untersuchen können.“

Die Beobachtungen liefern der Lebensmittelindustrie konkrete Ansatzmöglichkeiten, um den Fettreif zu reduzieren. „Eine Konsequenz wäre beispielsweise, die Porosität der Schokolade bei der Herstellung zu begrenzen, damit das Fett langsamer wandert“, erläutert Reinke.

„Zum ersten Mal konnten wir die dynamischen Mechanismen, die zur Bildung des Fettreifs führen, im Detail direkt verfolgen“

Stephan Roth, DESY

„Eine weitere ist die Begrenzung des Flüssigkeitsanteils durch eine kühle, allerdings nicht zu kalte Lagerung. 18 Grad Celsius sind ideal.“ Schokolade reagiert sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen. „Wenige Grade machen einen großen Unterschied“, betont Reinke. „Bei 5 Grad ist im Prinzip die gesamte Kakaobutter fest, ab etwa 36 Grad ist hingegen alles flüssig.“ Darüber hinaus spielt die Kristallform in der Schokolade eine wichtige Rolle. „Kakaobutter kristallisiert in sechs verschiedenen Kristallformen“, erläutert Reinke. „Der Flüssiganteil hängt auch von der Kristallform



Bild: DESY, Heiner Müller-Eisner

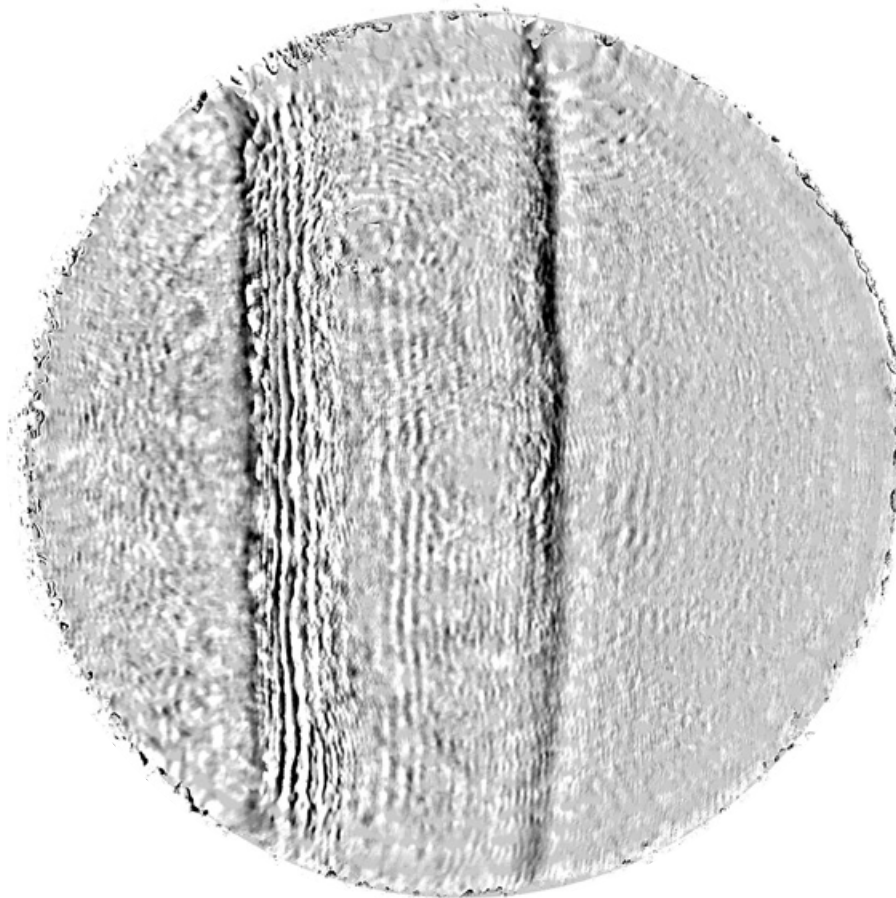
Svenja Reinke von der TUHH tropft Öl auf die Schokoladenproben, um die Fettreibbildung zu verfolgen.

ab.“ Auch über eine Kontrolle der Kristallisation können Hersteller die Fettreibbildung beeinflussen. „Die durchgeführten Untersuchungen erlauben es uns als Hersteller von Qualitätsschokolade erstmals, Rückschlüsse auf die Ursachen der Migration von Kakaobutterfraktionen in Schokolade zu ziehen“, betont Nestlé-Forschungsleiter Palzer. „Die mit modernster analytischer Technologie in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Hamburg Harburg und dem Team des Deutschen Elektronen-Synchrotrons gewonnenen Erkenntnisse bilden somit die Grundlage für die Entwicklung geeigneter Verfahren zum Vermeiden eines der wichtigsten Qualitätsdefekte in der Lebensmittelindustrie.“

ACS Applied Materials and Interfaces, 2015;
DOI: 10.1021/acsami.5b02092

Schockwellen in Diamant

Röntgenlaser eröffnet neue Möglichkeiten
in der Materialforschung



Schnappschuss der Schockwelle (Mitte) in der Diamant-Probe. Die riffelartigen Strukturen im linken Drittel stammen vom Rand der Probe.

Mit ultrakurzen Röntgenblitzen haben Forscher Schockwellen in Diamanten gefilmt. Das Team um DESY-Physiker Christian Schroer konnte die rasante Dynamik der Schockwelle sowohl mit hoher räumlicher als auch mit hoher zeitlicher Genauigkeit verfolgen. „Mit der Untersuchung betreten wir ein neues wissenschaftliches Feld“, betont

Andreas Schropp von DESY. „Erstmals können wir mit Röntgenbildung die lokalen Eigenschaften und die Dynamik von Materie unter extremen Bedingungen quantitativ bestimmen.“ Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Untersuchung von Materialeigenschaften.

Für ihre Pilotstudie hatten die Wissenschaftler Diamanten mit dem derzeit stärksten Röntgenlaser

der Welt durchleuchtet, der Linac Coherent Light Source LCLS am Forschungszentrum SLAC. Dabei spannten sie drei Zentimeter lange und 0,3 Millimeter dünne Diamantstifte in einen Probenhalter ein. Ein Infrarotlaser löste eine Schockwelle aus, indem er einen 0,15 milliardstel Sekunden (150 Pikosekunden) kurzen Blitz auf die Schmalseite des Diamanten schoss und dabei eine

Leistung von bis zu 12 Billionen Watt (12 Terawatt) pro Quadratmeter erreichte. Diese Schockwelle raste mit rund 72000 Kilometern pro Stunde quer durch den Diamanten.

(500 Nanometer) kleinen Details einer Probe. Zusammen mit der gemessenen Schallgeschwindigkeit lässt sich so der Zustand des Diamanten unter hohen Drücken

„Mit der Untersuchung betreten wir ein neues wissenschaftliches Feld“

Andreas Schropp, DESY

„Um Schnappschüsse von derart schnellen Prozessen zu machen, sind extrem kurze Belichtungszeiten nötig“, erläutert Schropp, der seine Versuche im Rahmen einer Fellowship der Volkswagen Stiftung durchgeführt hat. Die LCLS liefert Röntgenblitze, die nur 50 Millionstel einer milliardstel Sekunde (50 Femtosekunden) dauern und die schnellste Bewegungen in einem Standbild einfrieren können.

Da die Diamantprobe allerdings bei jeder Aufnahme unter den extremen Bedingungen zerstört wird, mussten die Wissenschaftler das Experiment mehrfach mit gleichartigen Proben wiederholen, wobei sie die Schockwelle jeweils zu einem etwas späteren Zeitpunkt ablichteten. Diese Serie von Standbildern montierten sie schließlich wie ein Daumenkino zu einem Film.

Aus diesem Film konnten die Forscher quantitativ die Dichteänderung aufgrund der Schockwelle ermitteln. Das speziell hierfür entwickelte Röntgenmikroskop ermöglicht die Abbildung von bis zu 500 millionstel Millimeter

bestimmen. Das Ergebnis: Die heftige Schockwelle presst den Diamanten – immerhin eines der härtesten Materialien der Welt – lokal um knapp zehn Prozent zusammen.

Die Pilotstudie bietet neue Einblicke in die Beschaffenheit von Diamant. „Durch ihre außergewöhnlichen physikalischen Eigenschaften sind Diamanten ein Material von anhaltender wissenschaftlicher und technologischer Bedeutung“, sagt Jerome Hastings vom Beschleunigerzentrum SLAC. „Zum ersten Mal haben wir auf direktem Weg mit Röntgenstrahlen Schockwellen in Diamanten abgebildet, was neue Perspektiven auf das dynamische Verhalten von Diamant unter Hochdruck eröffnet.“ So ist für Materialforscher insbesondere das bereits in den ersten Aufnahmen sichtbare komplizierte Verhalten hinter der vordersten Schockfront interessant.

Durch die Weiterentwicklung der Röntgenlaser und eine Optimierung des Detektors lässt sich die räumliche Auflösung nach Erwartung der Forscher noch auf feiner als 100 Nanometer steigern, etwa

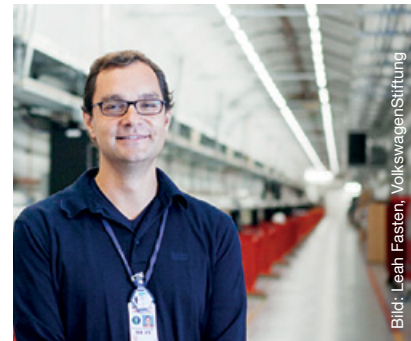


Bild: Leah Fasten, VolkswagenStiftung

DESY-Forscher Andreas Schropp an der LCLS in Kalifornien, wo die Untersuchungen stattfanden

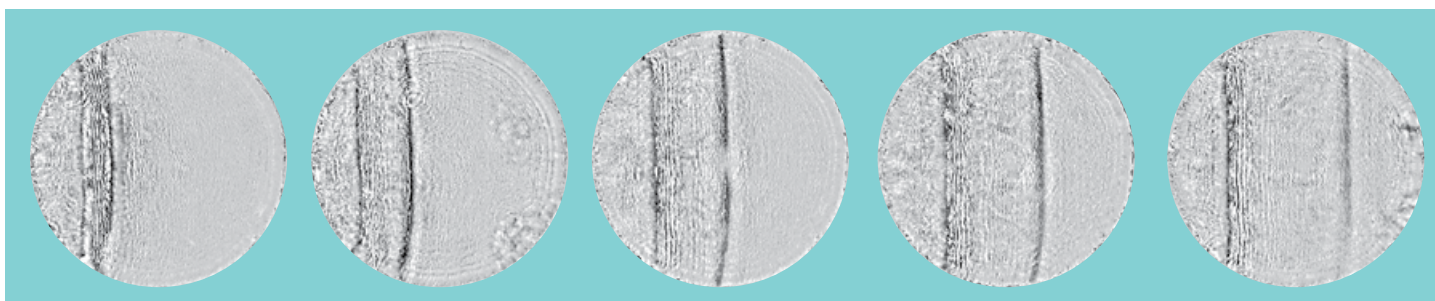
auch am europäischen Röntgenlaser European XFEL, der zurzeit vom DESY-Gelände in Hamburg bis ins benachbarte Schenefeld gebaut wird. Die Technik kann dabei dank der durchdringenden Röntgenstrahlung nahezu auf beliebige feste Stoffe, etwa Eisen oder Aluminium, angewendet werden. „Die Methode ist für eine Reihe von Anwendungen in der Materialwissenschaft und bei der Beschreibung physikalischer Prozesse im Inneren von Planeten wichtig“, fasst Untersuchungsleiter Schroer zusammen.

„Die Methode ist für eine Reihe von Anwendungen in der Materialwissenschaft wichtig“

Christian Schroer, DESY

Scientific Reports, 2015;
DOI: 10.1038/srep11089

Lauf der Schockwelle durch den Diamanten



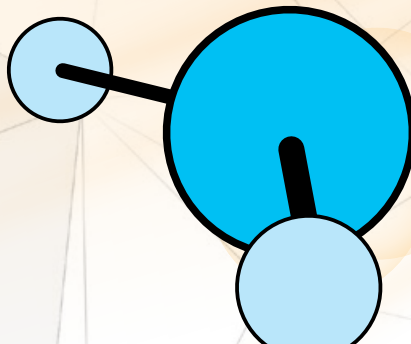
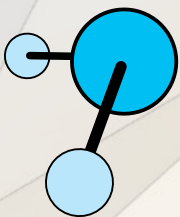
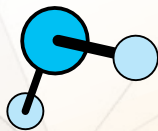
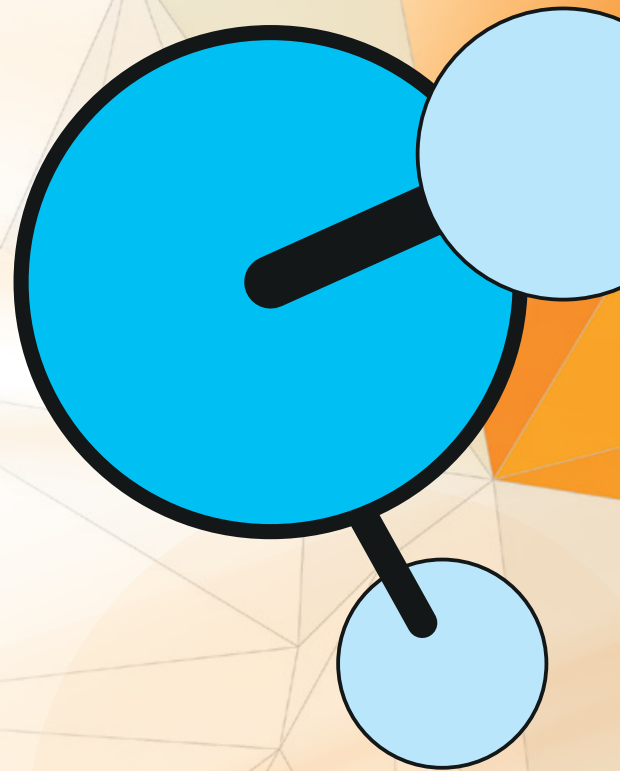
Bilder: Andreas Schropp, DESY

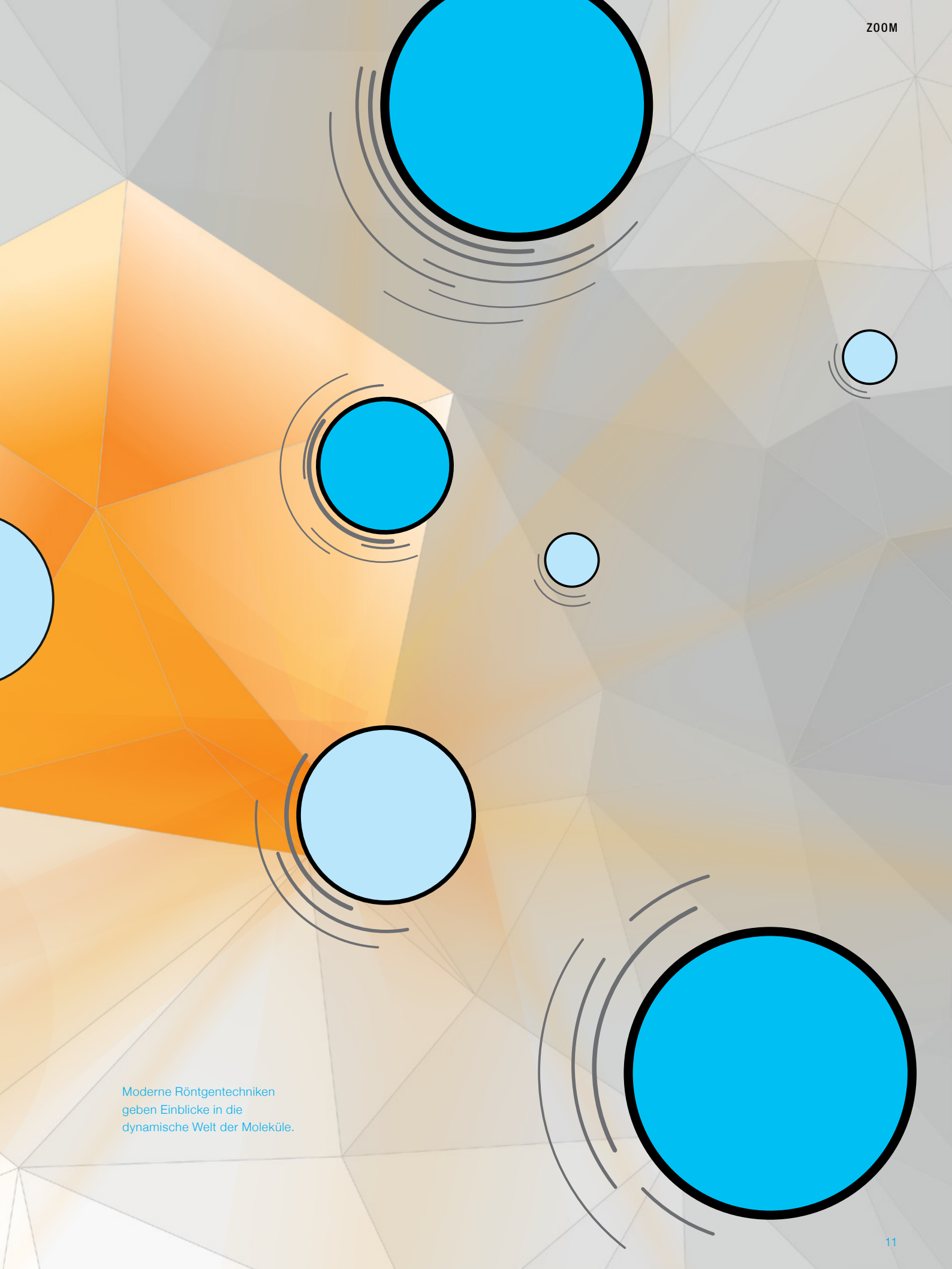
ZOOM

Im Licht der Forschung

Atome im Röntgenblick, ein Kosmos voller Gammastrahlung

Licht – das ist in unserer Alltagswahrnehmung der sichtbare Teil der Sonnenstrahlung. Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett. Die Farben des Regenbogens prägen unser Bild von der Welt. Infrarotstrahlung empfinden wir als Wärme, Ultraviolett als schmerzhaften Sonnenbrand. Mit unseren Sinnen nehmen wir jedoch nur einen winzigen Ausschnitt des Lichtspektrums wahr. Die Wissenschaft hat im Laufe der Jahrhunderte gelernt, fast das gesamte elektromagnetische Spektrum zu nutzen, um ihr Weltbild zu komplettieren und vieles von dem sichtbar zu machen, was dem menschlichen Auge verborgen bleibt. Moderne Supermikroskope beispielsweise nutzen kurzwelliges Röntgenlicht, um die Welt des Allerkleinsten abzubilden: Atome und Moleküle, die Grundbausteine der Materie. Astronomen gewinnen neue Einblicke in den Kosmos, indem sie Licht aller Wellenlängen aus dem elektromagnetischen Spektrum nutzen – von der Kosmischen Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich bis hin zu energiereicher Gammastrahlung.





Moderne Röntgentechniken
geben Einblicke in die
dynamische Welt der Moleküle.



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

Das internationale Jahr des Lichts

Licht ist von zentraler Bedeutung in Wissenschaft und Kultur, und es ist die Grundlage des Lebens. Die Vereinten Nationen haben daher 2015 zum internationalen Jahr des Lichts ausgerufen. Schon früh haben die Menschen begonnen, die Eigenschaften von Licht zu erforschen und damit bis heute fast jedes Wissenschaftsgebiet beeinflusst. Die Menschheit hat gelernt, Licht zu kontrollieren, es zu bündeln, abzulenken, zu fokussieren und in seine Farben zu zerlegen. Licht ist die Grundlage für viele Technologien, auf denen die heutige Informationsgesellschaft fußt. Lichtimpulse bilden das Rückgrat des Internets; präzise optische Instrumente vermessen die Welt. Die Lichttechnologie ermöglicht eine Fülle von Anwendungen: Medizinischer Fortschritt durch Laser, nachhaltige Energienutzung durch Solarzellen, energiesparende Beleuchtung durch Leuchtdioden (LED) sind nur einige Beispiele davon.

Die Photosynthese der grünen Pflanzen ist der zentrale Prozess der Energiegewinnung in der Natur. Die meisten Lebewesen sind mittelbar oder unmittelbar vom Sonnenlicht abhängig. Nur in der lichtlosen Tiefsee gibt es Lebensgemeinschaften, die ausschließlich auf chemischen Energiequellen basieren.

Schatten, Sonnenuntergänge, Regenbögen, Nordlichter ... Licht in der Natur ist faszinierend und macht neugierig auf die wissenschaftliche Erklärung, die hinter den Naturschauspielen steckt. Und seit jeher spielt Licht eine besondere Rolle in der menschlichen Kultur. Besonders augenfällig wird das in der Malerei, doch die kulturelle Bedeutung des Lichts reicht wesentlich weiter. Licht verbindet Natur- und Geisteswissenschaften, Kunst und Religion, fasziniert die Menschen und inspiriert Künstler und Wissenschaftler gleichermaßen.

Welle oder Teilchen?

Über Jahrhunderte sorgte die rätselhafte Doppelnatur des Lichts für Diskussionen in der Wissenschaft. So standen im 17. Jahrhundert zwei Ansichten gegeneinander: Der Astronom Christiaan Huygens vertrat die Vorstellung von Lichtwellen, während für seinen Zeitgenossen Isaac Newton Licht aus einem Strom von Partikeln bestand. Die Wellennatur des Lichts belegte ein heute klassisches Experiment: Lichtstrahlen gleicher Wellenlänge können sich überlagern und dabei gegenseitig verstärken oder auslöschen – sie zeigen sogenannte Interferenz, genau wie aufeinander treffende Wasserwellen.

„Moderne Röntgenlichtquellen ermöglichen uns völlig neue Einblicke in die Nanowelt“

Edgar Weckert, DESY

Albert Einstein hingegen erklärte 1905 den Photoelektrischen Effekt mit Hilfe von Lichtquanten, die Teilcheneigenschaften haben. Bestrahlt man ein Metall beispielsweise mit Röntgenlicht, werden Elektronen herausgeschlagen. Daraus leitete Einstein ab, dass das Licht keine reine Welle sein kann, sondern Wellen- und Teilchennatur in sich vereinen muss. Licht verhält sich unter bestimmten Bedingungen wie ein Teilchenstrahl, gleichzeitig aber breitet es sich aus wie eine Welle und schwingt auch so.

Welle oder Teilchen? Die Wissenschaft macht sich beide Eigenschaften des Lichts zunutze. Auf der Basis von Einsteins Photoelektrischem



Edgar Weckert,
DESY-Direktor für
die Forschung mit
Photonen

Effekt entwickelte etwa der schwedische Physiker Kai Siegbahn eine Methode, um die chemische Zusammensetzung von Materie zu bestimmen. Diese sogenannte Elektronenspektroskopie wird heute in der Materialforschung eingesetzt.

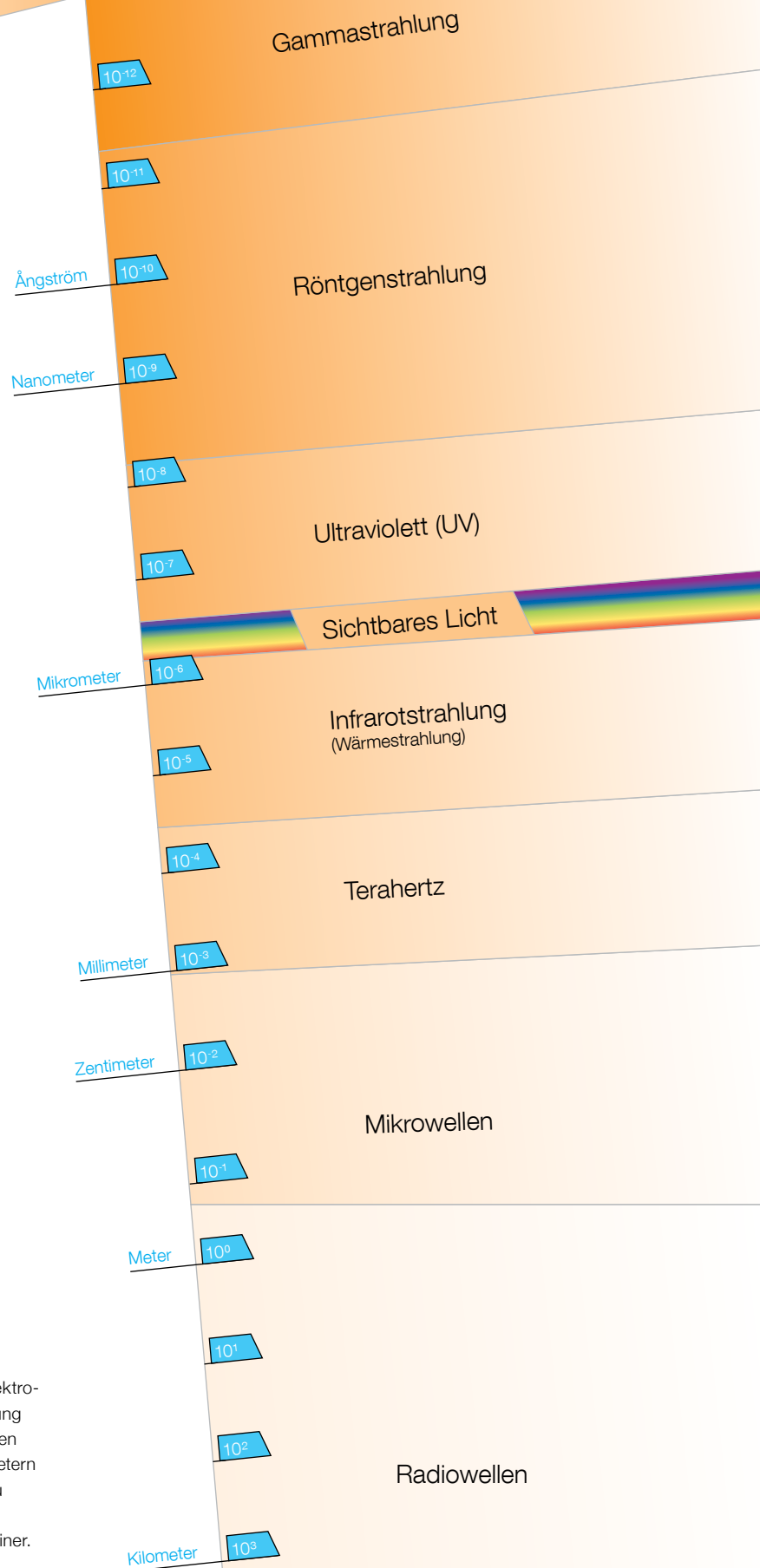
Auf den Welleneigenschaften des Lichts hingegen basieren verschiedene Verfahren zur Beugungsbildgebung. Röntgenstrahlen sind so kurzwellig, dass sie an einzelnen Atomen gebeugt werden. Bestrahlt man daher einen Kristall mit intensivem Röntgenlicht, lässt sich aus diesen Beugungsbildern auf seinen atomaren Aufbau schließen. Und nicht nur das: Mit extrem kurzen, intensiven Röntgenblitzen werden sogar dreidimensionale Darstellungen ganzer biologischer Zellen möglich.

Das Spektrum des Lichts

Während die modernen Supermikroskope mit Röntgenlicht den Blick ins Allerkleinste ermöglichen, nutzen die Astronomen unterschiedliche Spezialinstrumente und Licht aller Wellenlängen, um das Allergrößte zu ergründen: das Universum. Der funkelnde Sternenhimmel ist der für unsere Augen sichtbare Ausschnitt des Weltalls. Die langwellige Kosmische Hintergrundstrahlung ist das älteste Licht der Welt und gibt Aufschluss über die frühe Entstehungsgeschichte des Kosmos. Die extrem energiereiche Gammastrahlung am anderen Ende des elektromagnetischen Spektrums zeigt gewaltige Explosionen und gigantische Teilchenbeschleuniger im Universum.

Lichtspektrum

Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung reicht von Wellenlängen im Bereich von Kilometern (10^3 Metern) bis hin zu milliardstel Metern (Nanometern) und kleiner.



Van Gogh und die Chemie der Farben

Röntgenstrahlen enträtseln die Geheimnisse alter Meisterwerke

Um die meisterlichen Gemälde von Vincent van Gogh ranken sich verschiedene Rätsel. Besonders aufsehenerregend sind die Bilder unter den Bildern: Experten gehen davon aus, dass etwa ein Drittel der Van-Gogh-Gemälde noch ein weiteres Werk verbirgt, das der Künstler übermalt hat. Besorgniserregend hingegen sind Verfärbungen und verblassende Farben, von denen die berühmten leuchtenden Gelb- und Orangetöne einiger Werke betroffen sind. Mit Hilfe von Röntgenlicht können die Forscher die chemische Zusammensetzung der Farbpigmente in den verschiedenen Schichten eines Gemäldes analysieren und den Ursachen von Farbveränderungen auf den Grund gehen.

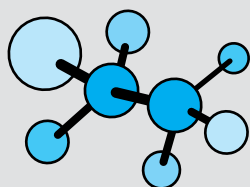
Bei DESY begann die Detektivarbeit an Van-Gogh-Bildern im Juli 2008: Ein internationales Forscherteam bestrahlte das Gemälde „Grasgrund“ mit dem intensiven Röntgenlicht aus dem Teilchenbeschleuniger DORIS und

wendete eine spezielle Technik an, um übermalte Schichten sichtbar zu machen: die Röntgenfluoreszenzspektroskopie. Unter der Graslandschaft, die Vincent van Gogh 1887 in Paris gemalt hatte, zeigten sich die Details eines Frauenkopfes.

„Einmal mehr stellen wir fest, dass Gemälde von Vincent van Gogh nicht unveränderlich sind. Über einen Zeitraum von 100 Jahren sind sie ein ziemlich reaktiver Cocktail von Chemikalien, der sich überraschend verhält“

Koen Janssens, Universität Anwerpen

Die Wissenschaftler unter der Leitung der TU Delft rasterten das Gemälde mit einem feinen und intensiven Röntgenstrahl ab und maßen die Fluoreszenz der einzelnen Farbschichten. Daraus ergibt sich ein „chemischer Fingerabdruck“, der charakteristisch ist für die verschiedenen Atomsorten. Aus der Verteilung der Elemente Quecksilber und Antimon, die in speziellen Farbpigmenten enthalten sind, erstellten die Forscher ein „Farbfoto“ des Portraits, das van Gogh übermalt hatte. Die Rekonstruktion hilft den Kunsthistorikern, die Entwicklung in van Goghs Werken besser zu verstehen. Auch die Echtheit eines Blumenstilllebens konnten Wissenschaftler bei DESY auf diese Weise belegen: Unter Wiesenblumen und Rosen zeigte die Röntgenfluoreszenzanalyse zwei



Chemische Zusammensetzung

Mit unterschiedlichen Methoden untersuchen Forscher im Röntgenlicht, welche chemischen Verbindungen in ihren Proben enthalten sind.

Forscher machten unter van Goghs Graslandschaft ein Frauenportrait sichtbar.

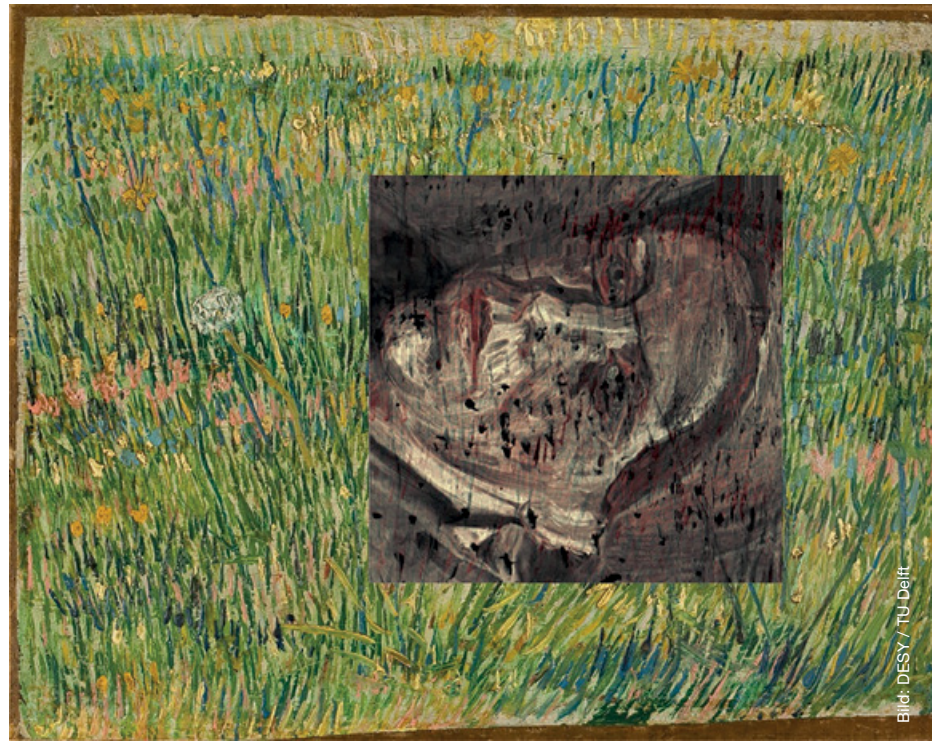


Bild: DESY / TU Delft

Ringer, anhand derer die Fachleute das Gemälde eindeutig van Gogh zuschreiben konnten. Zuvor war es im niederländischen Kröller-Müller-Museum einige Jahre als Werk eines unbekanntenen Künstlers geführt worden.

Warum Blumen verblassen

Im Wettlauf gegen das Altern wertvoller Gemälde werden die chemischen Veränderungen der Farbpigmente, die van Gogh benutzte, genau analysiert. An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III untersuchten die Forscher die chemischen Prozesse, die beispielsweise das satte Orangerot eines bleihaltigen Pigments verblassen lassen oder das leuchtende Cadmiumgelb von „Blumen in blauer Vase“ in ein mattes Orange-Grau umfärben. „Einmal mehr stellen wir fest, dass Gemälde von Vincent van Gogh nicht unveränderlich über die Jahrzehnte und Jahrhunderte sind“, kommentiert Koen Janssens von der Universität Anwerpen, der die Untersuchungen leitete. „Über einen Zeitraum von 100 Jahren sind sie ein ziemlich reaktiver Cocktail von Chemikalien, der sich überraschend verhält.“

Umso wichtiger sind die Ergebnisse für Konservatoren. „Diese Studie zur Zersetzung von Cadmiumgelb ist ein herausragendes Beispiel dafür, wie die Zusammenarbeit von Wissenschaftlern und Konservatoren helfen kann, den Zustand von van Goghs Gemälden besser zu verstehen, und seine Werke besser zu bewahren“, betont Ella Hendriks, Chef-Konservatorin des Van-Gogh-Museums in Amsterdam.

Kunstfälscher und Londoner Luft

Auch andere Kunstschatze geben ihre Geheimnisse preis, wenn Forscher die chemischen Bestandteile im Röntgenlicht genauestens inspizieren. So erwies sich ein Beil, das angeblich in einer bronzezeitlichen Fundstelle in Schleswig-Holstein entdeckt worden war, als geschickte Fälschung, nachdem ein Team um DESY-Physiker Leif Glaser die Klinge näher untersucht hatte. „Als wir mit dem Röntgenstrahl die chemische Zusammensetzung analysierten, kam uns ein Verdacht“, erläutert Mechtild Freudenberg vom Archäologischen Landesmuseum Schloss Gottorf. „Das Beil enthielt deutlich zu viel Eisen und Zinn, stammte also vielleicht gar nicht aus der Bronzezeit.“

Der „chemische Fingerabdruck“ im Röntgenlicht entlarvt aber nicht nur Kunstfälscher, sondern zeigt auch Umweltbelastungen auf. Schadstoffe lassen sich schon in geringen Spuren nachweisen. So landeten beispielsweise Luftproben aus London bei DESY unter der Röntgenlupe. Forscher vom Schweizer Paul Scherrer Institut untersuchten den darin enthaltenen Feinstaub auf bestimmte chemische Elemente. „Wir konnten zum Beispiel Barium und Antimon nachweisen, das typischerweise aus Bremsen stammt“, erläutert die Forscherin Suzanne Visser. Im Feinstaub lassen sich die Luftschadstoffe nur in Spurenkonzentrationen nachweisen, daher nutzten die Wissenschaftler das besonders intensive Röntgenlicht aus einem Teilchenbeschleuniger. Die Daten flossen in eine groß angelegte Studie zur Londoner Luftqualität ein.

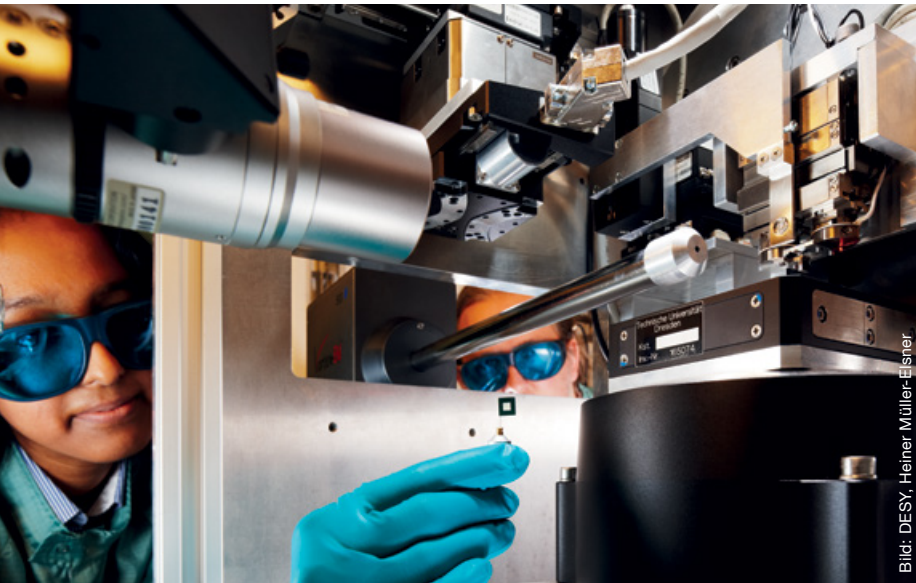


Bild: DESY, Heiner Müller-Eisner

Messplatz an DESYs
Röntgenlichtquelle PETRA III

Zähe Keramik, Glas aus Metall und Viren in 3D

Röntgenstrahlen enthüllen den atomaren Aufbau von
Werkstoffen und Krankheitserregern

Mit immer neuen ausgeklügelten Methoden nutzen Forscher das intensive Röntgenlicht aus Teilchenbeschleunigern, um ins Innerste von Nanomaterialien, Werkstoffen und Krankheitserregern zu blicken. Das Grundprinzip entdeckte der Physiker und spätere Nobelpreisträger Max von Laue mit seinen Forscherkollegen schon vor über 100 Jahren: Röntgenstrahlen werden an den Atomen in Materie gebeugt. Aus den Beugungsbildern lässt sich die räumliche Struktur einer Probe im Detail rekonstruieren. Heutzutage werden an modernen Röntgenlichtquellen wie PETRA III medizinisch relevante Biomoleküle aus Tausenden von Atomen ebenso durchleuchtet wie neue Werkstoffe für die Autos, Flugzeuge, Solarzellen, Katalysatoren und Datenspeicher von morgen.

Ändert sich die Struktur eines Werkstoffs, so ändern sich auch seine Eigenschaften. Materialwissenschaftler wollen diese Veränderungen verstehen, um Werkstoffe für verschiedene Einsatzgebiete quasi maßschneidern zu können. Ein Beispiel ist die Entwicklung von superharten und superzähen Keramiken für industrielle Anwendungen. DESY-Forscher Nori Nishiyama und sein Team untersuchten dazu ein Material namens Stishovit, eine seltene Form von Siliziumdioxid, die nur unter großem Druck entsteht. Stishovit ist ein keramisches Material aus der Gruppe der Oxide. „Es handelt sich um das härteste Oxid, das wir bislang kennen, härter als Rubin und Saphir“, erläutert Nishiyama. Während Keramiken allgemein sehr hart sein können, sind sie zugleich meist auch sehr spröde und brechen leicht. Unter anderem wegen dieser hohen Brüchigkeit wird Stishovit bislang nicht industriell genutzt.

„Möglicherweise lassen sich Verbundkeramiken zur industriellen Anwendung herstellen, die den Zähigkeitsmechanismus von Stishovit ausnutzen“

Nori Nishiyama, DESY

Jedoch konnten Nishiyama und seine Kollegen Stishovit-Nanokristalle künstlich herstellen, die nicht nur hart, sondern auch sehr zäh waren. Um der Ursache für die drastisch erhöhte Zähigkeit auf die Spur zu kommen, nutzten die Forscher

unter anderem das brillante Röntgenlicht von PETRA III und stellten fest, dass Strukturveränderungen im Stishovit die Ursache sind: Zerbricht man eine Probe, sorgt die Energie aus der Rissbildung dafür, dass sich die Kristalle in amorphes (ungeordnetes) Siliziumdioxid umwandeln, ähnlich wie bei dem Schmelzen von Eis. „Dieser Übergang verdoppelt auf einen Schlag das Volumen des Materials, dadurch drückt es gegen den Bruch und hält ihn so an“, erklärt Nishiyama. „Möglicherweise lassen sich damit Verbundkeramiken zur industriellen Anwendung herstellen, die den Zähigkeitsmechanismus von Stishovit ausnutzen.“

Metallische Gläser

Fest wie Stahl und formbar wie Kunststoff: Metallschmelzen, die beim Abkühlen nicht kristallisieren, sondern zu metallischem Glas erstarren, haben faszinierende Eigenschaften als Werkstoffe. Üblicherweise sind die Atome in einem Metall ordentlich in einem Kristallgitter sortiert. Schockt man jedoch geschmolzenes Metall durch ultraschnelles Abkühlen, entstehen amorphe metallische Gläser, in denen die Atome ungeordnet sind. Während sich anfangs nur hauchdünne Schichten dieses ultraharten Glases herstellen ließen, weil größere Metallmengen einfach nicht schnell genug abkühlten, haben die Materialforscher mittlerweile Legierungen aus mehreren Elementen wie Aluminium, Titan, Kupfer oder Nickel entwickelt, die extrem langsam kristallisieren. Aus ihnen lassen sich bis zu mehrere Zentimeter dicke metallische Massivgläser herstellen, die sich als Konstruktionswerkstoffe eignen. Das Material ist so fest wie Stahl und gleichzeitig äußerst elastisch, ein optimaler Federwerkstoff.

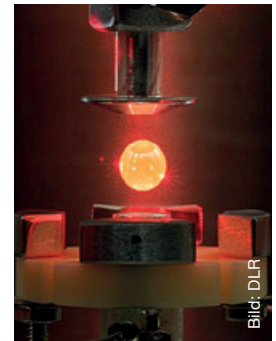
Die metallischen Gläser können im Prinzip genauso verarbeitet werden wie herkömmliches Glas oder Kunststoffe. Erhitzt man sie in einem bestimmten Temperaturbereich, werden sie zähflüssig und lassen sich nahezu beliebig formen oder zu Metallflaschen aufblasen. Eingesetzt werden sie beispielsweise in hochwertigen Golf- und Tennisschlägern, Luxusuhren und Handys. Doch damit sind die Möglichkeiten dieser neuen Generation von Metallen noch längst nicht erschöpft. Materialforscher untersuchen ihre Eigenschaften deshalb genau. Um herauszufinden, was den metallischen Gläsern ihre Viskosität (Zähflüssigkeit) verleiht, nutzten sie unter anderem den besonders fokussierten und intensiven Röntgenstrahl von PETRA III. Damit verfolgten sie, wie die Atome ihre Position verändern, wenn die Probe erhitzt und langsam zähflüssig wird. Solche Ergebnisse bilden die Grundlage dafür, Zusam-

mensetzung und Produktion der Legierungen zu optimieren und metallische Gläser mit maßgeschneiderten Eigenschaften für den Einsatz in der Industrie zu fertigen.

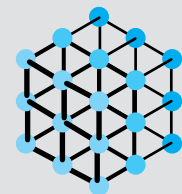
Viren in 3D

Mit Röntgenlicht lassen sich nicht nur die Werkstoffe der Zukunft, sondern auch die Bausteine des Lebens atomgenau durchleuchten. Forscher erkunden die komplexen räumlichen Strukturen von Proteinen, Enzymen oder Hormonen und können daraus die exakten Eigenschaften und Funktionen dieser Biomoleküle bestimmen. Sogar an der dreidimensionalen Abbildung ganzer Viruspartikel arbeiten Forscher an modernen Röntgenlasern.

Doch einfach ist das nicht: Um ein ausreichend starkes Messsignal zu bekommen, müssen die Strukturbiologen ihre Proben zunächst kristallisieren. Der Proteinkristall beugt das Röntgenlicht auf charakteristische Weise, und aus dem Beugungsmuster lässt sich die atomare Struktur berechnen. Biomoleküle bestehen in der Regel aus Tausenden bis Millionen Atomen und erzeugen entsprechend komplexe Muster. Bislang ist so die Struktur von etwa 100 000 Biomolekülen bestimmt worden. An den DESY-Lichtquellen haben Forscher des Europäischen Molekularbiologie-Laboratoriums (EMBL) unter anderem den Angriffsmechanismus eines Herpesvirus und einen molekularen Schalter für Hautkrebs entschlüsselt sowie einen Turboknopf der zelleigenen Kalziumpumpe gefunden – alles Erkenntnisse, die das Potenzial für neue, maßgeschneiderte Wirkstoffe



Ein heißes Metalltröpfchen schwebt im Vakuum zwischen zwei Elektroden, während seine Struktur analysiert wird.



Atomare Struktur

Mit unterschiedlichen Methoden analysieren Forscher im Röntgenlicht die räumliche Struktur ihrer Proben mit atomarer Auflösung.



Matthias Wilmanns leitet die Hamburger Niederlassung des EMBL und ist Gründungsdirektor des neuen Zentrums für Strukturbioogie CSSB.

Kristall unter Umständen schwammig macht und damit die Analyse verschlechtert. An PETRA III haben Forscher um Athina Zouni von der Humboldt-Universität zu Berlin ein spezielles Verfahren entwickelt, das es nun ermöglicht, Membranproteine in einem sehr naturnahen Zustand zu durchleuchten. Den Forschern ist es gelungen, Kristalle zu erzeugen, die gar keine Detergenzien mehr enthalten, so dass darin nahezu der natürliche Zustand der Biomoleküle eingefroren ist und Aufschluss über die genaue Funktionsweise geben kann. „Die Methode kommt potenziell für eine Menge Membranproteine infrage“, betont Zouni. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, diese große und medizinisch relevante Gruppe von Biomolekülen zu enträtseln.

„Bei DESY konnten wir bislang die Strukturen von etwa 50 Proteinen des Tuberkulose-Bakteriums aufklären. Einige davon könnten als mögliche Angriffspunkte für künftige Medikamente dienen“

Matthias Wilmanns, EMBL



bergen. Auch Krankheitserreger wie das Tuberkulose-Bakterium stehen im Fokus der Forscher. „Bei DESY konnten wir bislang die Strukturen von etwa 50 Proteinen dieses Bakteriums aufklären“, erläutert Matthias Wilmanns, der die Hamburger Niederlassung des EMBL leitet und außerdem Gründungsdirektor des neuen Zentrums für Strukturbioogie CSSB auf dem DESY-Campus ist. „Einige davon könnten als mögliche Angriffspunkte für künftige Medikamente dienen, die gezielt den Erreger angreifen und zugleich andere, nützliche Bakterien schonen.“

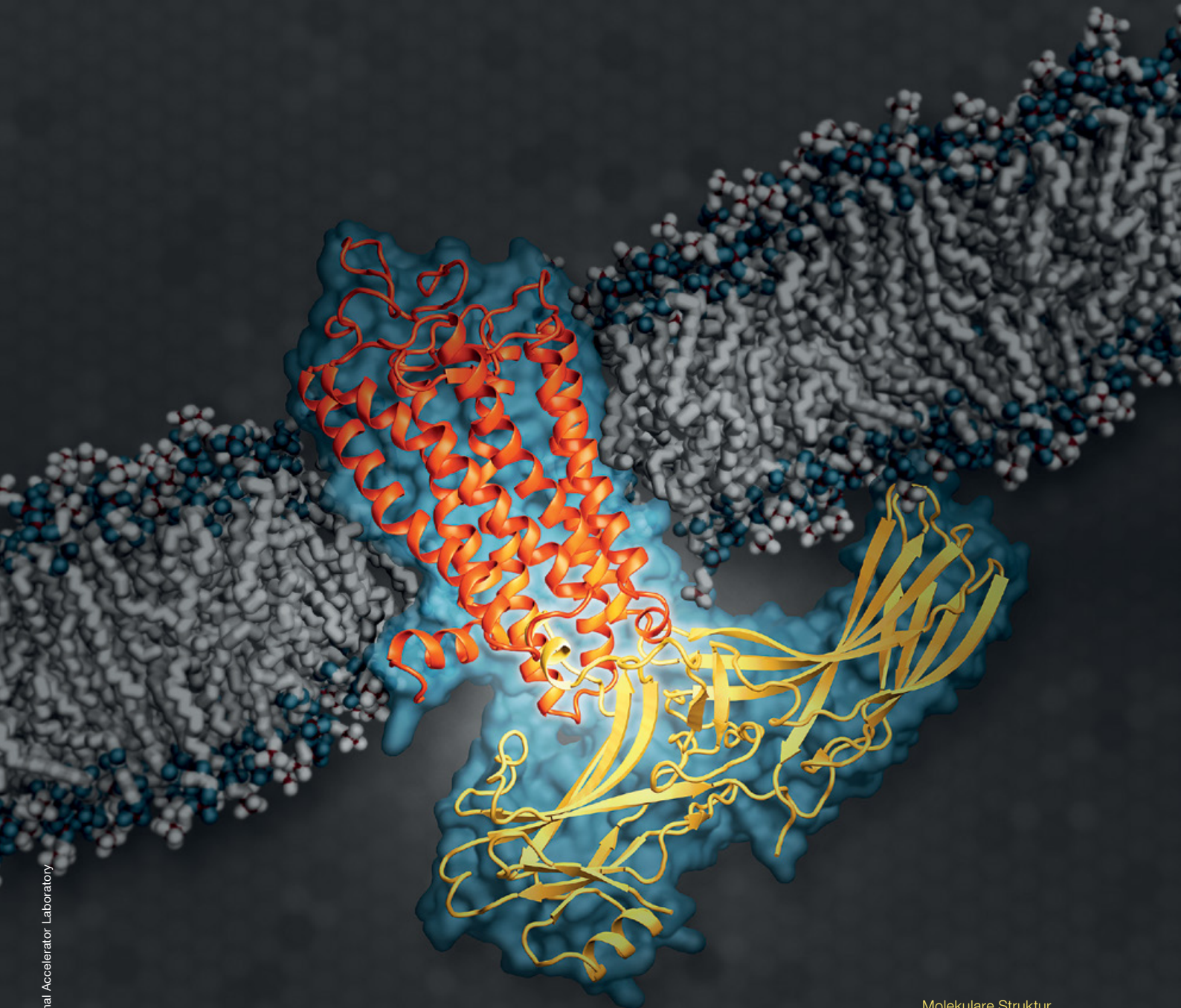
Proteine kriegen ihr Fett weg

Der Haken an der Methode: Viele Proteine lassen sich nur widerwillig in Kristallform zwingen, denn sie sind für flüssiges Medium gemacht, in dem biologische Prozesse ablaufen. Die Forscher können oft schon froh sein, wenn es gelingt, winzig kleine Kristalle zu züchten, die sich nur mit extrem intensivem Röntgenlicht untersuchen lassen. Besonders schwierige Kandidaten sind die sogenannten Membranproteine. Diese in den Zellmembranen von Lebewesen verankerten Proteine sind für viele medizinische Fragestellungen von Bedeutung. Sie müssen aber vor der Analyse erst von den zahlreichen kleinen Fettmolekülen gelöst werden, an die sie gebunden sind. Forscher benutzen dazu spezielle Detergenzien, also eine Art Seife. Allerdings sind die Biomoleküle statt von Fett nun von Seife umgeben, was den

Stoppschalter für Zellsignale

Ein bislang unerreichter Einblick in die Steuerung biologischer Zellen ist Forschern mit dem weltstärksten Röntgenlaser, der Linac Coherent Light Source (LCLS), in Kalifornien gelungen. Mit den extrem intensiven Röntgenlaserblitzen konnten die Wissenschaftler die genaue Funktionsweise eines zentralen Aus-Schalters für Zellsignale entschlüsseln, obwohl sich aus den beteiligten Biomolekülen nur winzige Kriställchen züchten ließen, die lediglich tausendstel Millimeter klein waren. „Solche Mikrokristalle sind normalerweise sehr schwer zu untersuchen, aber mit dem hellen Röntgenlicht der LCLS gelangen von fast 19 000 dieser Mikrokristalle so gute Streubild-Aufnahmen, dass sich aus der Kombination dieser Streubilder die Struktur des Molekülkomplexes berechnen ließ“, berichtet DESY-Forscher Anton Barty vom Center for Free-Electron Laser Science, der an der Datenauswertung intensiv mitgearbeitet hat. Die Erkenntnisse können nicht nur den

Weg zur Entwicklung zielgenauer Medikamente bahnen, sondern zeigen auch das enorme Potenzial der neuen Röntgenlaser für die Struktur- aufklärung. Mit dem European XFEL bauen DESY und zehn internationale Partner gegenwärtig einen Röntgenlaser der nächsten Generation, der voraussichtlich 2017 den Forschungsbetrieb beginnen soll.



Mehr Dynamik

Auf dem Weg zum „Molecular Movie“



Molekulare Dynamik

Mit ultrakurzen, hochintensiven Röntgenlaserblitzen verfolgen Forscher den Ablauf chemischer Reaktionen.

Röntgenlaser sind auch der Schlüssel für eine weitere Revolution in der Strukturforschung: Die bislang statischen Bilder lernen Laufen. Die Bewegungen von Atomen und Molekülen, der Ablauf von chemischen Reaktionen, Veränderungen in Werkstoffen oder der Angriff von Krankheitserregern lassen sich mit atomarer Auflösung „filmen“. Wie ein Daumenkino bestehen diese Filme aus einer Aneinanderreihung von Momentaufnahmen. Röntgenlaser liefern solche Schnappschüsse aus der Nanowelt mit einer Zeitauflösung von Femtosekunden (billiardstel Sekunden). „Wenn wir solche ultraschnellen Schnappschüsse zu einem Film anordnen, können wir die Moleküldynamik in Zeitlupe zeigen“, erläutert DESY-Forscher Henry Chapman vom Center for Free-Electron Laser Science, der gemeinsam mit seinen Forscherkollegen in einer wegweisenden Studie zeigen konnte, dass Röntgenlaser mit ihren extrem kurzen Blitzen die schnelle Dynamik von Biomolekülen in einer Art Ultrazeitlupe festhalten können. Solche Untersuchungen eröffnen völlig neue Einblicke in biochemische Abläufe, beispielsweise medizinisch relevante Prozesse im menschlichen Körper oder technologisch interessante Vorgänge in der Natur.

DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH ist eine solche High-Speed-Kamera für den Nanokosmos. FLASH erzeugt unvorstellbar intensive und kurze Lichtblitze im Bereich von Femtosekunden. „Das ist deshalb so interessant, weil beispielsweise chemische Reaktionen in der Natur in Femtosekunden-Geschwindigkeit ablaufen. Mit FLASH können wir diese Reaktionen quasi filmen“, erläutert DESY-Forscherin Elke Plönjes. „FLASH ist die Pionieranlage, an der wichtige Grundlagen für Filme aus dem Nanokosmos erforscht wur-

den.“ Die Röntgenlasertechnik bahnt den Weg in die dynamische Welt ultraschneller Prozesse in Atomen und Molekülen. Wie können wir die Oberflächen von Katalysatoren oder Solarzellen optimieren? Wie entstehen aus ultradünnen magnetischen Schichten leistungsstarke Datenspeicher? Wie infiziert ein Virus eine Zelle? Und wie lässt sich ein Krankheitserreger wirksam stoppen? Mit Röntgenlasern können Wissenschaftler verfolgen, was wirklich auf der Ebene von Atomen und Molekülen geschieht und diese Erkenntnisse nutzen, um neue Werkstoffe und Medikamente zu entwickeln.

Die Ära der Filme aus dem Nanokosmos hat gerade erst begonnen. So konnte ein internationales Forscherteam beispielsweise erstmals die

Die neuen Röntgenlaser geben Einblicke in die molekulare Dynamik.

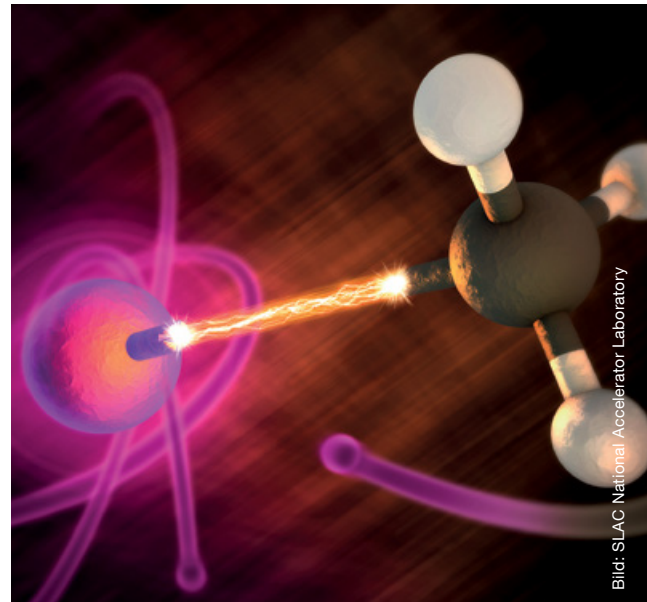


Bild: SLAC National Accelerator Laboratory



Bild: DESY, Heiner Müller-Eisner

Spezielle Magnetanordnungen, sogenannte Undulatoren, erzeugen die Röntgenblitze von FLASH.

„Mit FLASH können wir chemische Reaktionen quasi filmen“

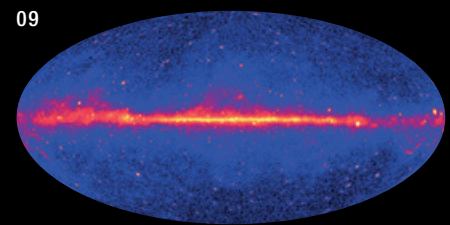
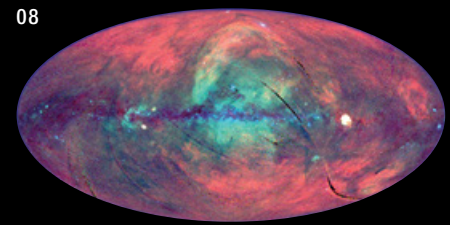
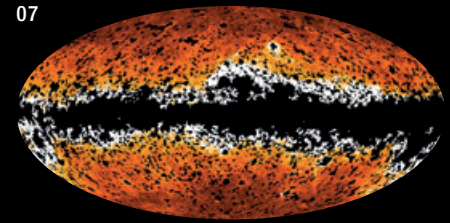
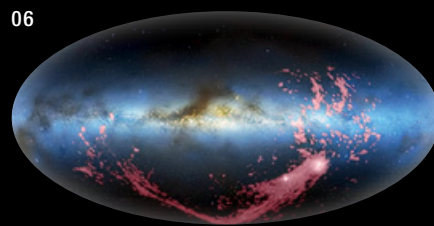
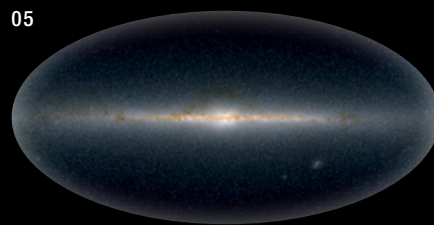
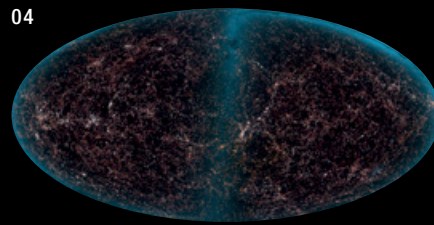
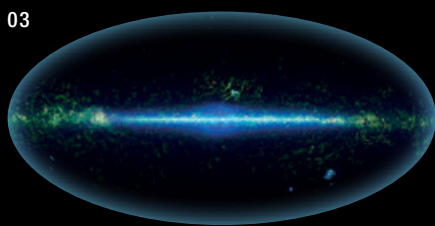
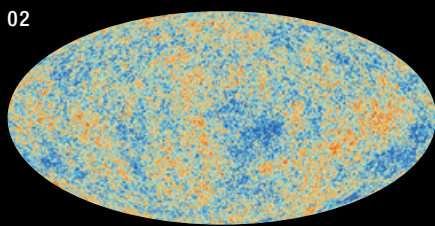
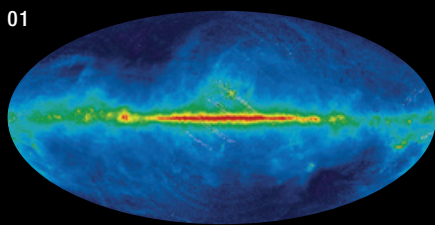
Elke Plönjes, DESY

flüchtigen Zwischenstufen beobachten, die bei einer chemischen Reaktion auf einer Katalysatoroberfläche entstehen. Die Wissenschaftler, unter ihnen Forscher von der Universität Hamburg und DESY, nutzten die ultrakurzen Röntgenblitze des Röntgenlasers LCLS, um im Detail zu verfolgen, wie Kohlenmonoxid auf einer heißen Ruthenium-Oberfläche, einem einfachen Katalysator, oxidiert – ein Vorgang, wie er in ähnlicher Form täglich in jedem Autokatalysator abläuft. Freie-Elektronen-Laser ermöglichen Zeitauf-

lösungen von unter 100 Femtosekunden, die für die direkte Beobachtung von Übergangszuständen bei chemischen Reaktionen notwendig sind. Solche Untersuchungen sind ein zentrales Forschungsthema im Hamburger Exzellenzcluster Center for Ultrafast Imaging (CUI). Die Gruppe von DESY-Forscher Wilfried Wurth ist im Rahmen ihrer CUI-Aktivitäten an diesem Projekt beteiligt. Für Wurth sind diese Experimente „ein erster Schritt auf dem Weg zu einem „Molecular Movie“, bei dem man einem Katalysator unter realistischen Bedingungen bei der Arbeit zuschaut“. Untersuchungen, bei denen nicht nur die Moleküle beobachtet, sondern auch die dynamischen Veränderungen der aktiven Katalysatoroberfläche mit einbezogen werden, sollen in Zukunft mit dem europäischen Röntgenlaser European XFEL möglich werden, der derzeit in Hamburg entsteht.

Verborgene Welten

Unsichtbares Licht gibt Astronomen neue Einblicke in den Kosmos



Der Kosmos strahlt in allen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums.

Himmelspanoramen vom ...

- 01 Radiolicht
- 02 Urknallecho
- 03–05 Infrarotlicht
- 06 sichtbaren Licht und Radiolicht
- 07 UV-Licht
- 08 Röntgenlicht
- 09 Gammalicht

Das vermeintlich finstere Weltall ist voller Licht: Der Kosmos strahlt in allen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums. Mit dem bloßen Auge können wir jedoch nur einen kleinen Ausschnitt davon wahrnehmen. Zudem schirmt die Erdatmosphäre große Bereiche der elektromagnetischen Strahlung ab. Astronomen haben daher unterschiedliche Spezialinstrumente entwickelt, um vom Erdboden oder vom Erdorbit aus die unsichtbaren Wellenlängen zu beobachten. Denn alle Bereiche des Spektrums transportieren wertvolle Informationen über das Universum.

Das älteste Licht der Welt ist die Kosmische Hintergrundstrahlung, die oft Echo des Urknalls genannt wird. Sie ist das Nachglühen des Urknalls und stammt aus der Zeit, als das Universum erstmals durchsichtig wurde. Das war rund 380 000 Jahre nach dem Urknall vor 13,82 Milliarden Jahren. Seitdem ist die Strahlung des Ur-Feuerballs auf frostige minus 270,5 Grad Celsius abgekühlt – das sind nur noch 2,7 Grad über dem absoluten Nullpunkt der Temperatur (-273,15 Grad Celsius).

Die Entstehungsgeschichte des Universums ist eingebrannt ins Urknall-Echo

Die Kosmische Hintergrundstrahlung ist allgegenwärtig, sie kommt gleichmäßig aus allen Richtungen. Fast gleichmäßig. Sieht man genau hin, sind kleine Schwankungen in der Temperatur der Strahlung zu entdecken. Diese Schwankungen stammen von der Entstehung der ersten räumlichen Strukturen im Kosmos. Die Entstehungsgeschichte des Universums ist quasi eingebrannt in das Urknallecho. Wie Archäologen versuchen Astronomen, diese Informationen zu entziffern. Unter anderem haben die Satelliten „COBE“, „WMAP“ und „Planck“ die Hintergrundstrahlung untersucht und damit beispielsweise die Zusammensetzung des Alls und sein Alter bestimmt.

Das aktuelle Rezept für das Universum lautet demnach: 4,9 Prozent normale Materie – daraus bestehen alle Sterne, Planeten, Häuser, Menschen und was wir sonst noch so sehen können; 26,8 Prozent sogenannte Dunkle Materie, die prinzipiell nicht sichtbar ist und sich einzig über ihre Schwerkraft verrät – Physiker rätseln noch, woraus sie besteht; den Löwenanteil macht mit



DESY-Theoretiker Alexander Westphal erforscht die kosmische Inflation.

68,3 Prozent eine bislang vollkommen mysteriöse Dunkle Energie aus, die den Kosmos immer schneller aufbläht.

Die Inflation des Weltalls

Die Kosmische Hintergrundstrahlung bietet sogar eine Chance, noch weiter zum Urknall zurückzublicken. In der Orientierungsrichtung der Strahlung, ihrer Polarisation, suchen Kosmologen wie DESY-Forscher Alexander Westphal nach Spuren der sogenannten Inflation. Sie soll das Weltall in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall um mindestens das Hundertquadrillionenfache aufgebläht haben – das ist eine 1 mit 26 Nullen. Westphal untersucht die Einbettung verschiedener Inflationsmodelle in die Stringtheorie. Die Stringtheorie ist ein Kandidat für eine vollständig vereinheitlichte Beschreibung der physikalischen Gesetze einschließlich einer Theorie der Quantengravitation.

Die Grundbausteine des Universums bestehen in der Stringtheorie aus winzig kleinen schwingenden Fäden. Je nach Schwingungsort dieser Fäden zeigen sie sich als das eine oder andere Elementarteilchen. Ein Hauptproblem für eine experimentelle Überprüfung ist, dass diese Fäden so klein sind, dass sie sich heute möglichen Laborexperimenten bislang entziehen. „Der Zusammenhang zwischen Stringtheorie und Inflation lässt sich aber vielleicht in Zukunft durch Messungen subtiler Polarisationsmuster in der Kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung testen“, erläutert Westphal.

Der Kosmos im Spektrum des Lichts

Das Urknallecho gehört zu den Radiowellen, die im unteren Energiebereich des elektromagnetischen Spektrums liegen. Mit Radioteleskopen untersuchen Astronomen unter anderem Objekte, die im sichtbaren Teil des Spektrums verborgen sind, beispielsweise können sie durch Staub und Gas bis ins Zentrum unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, blicken. Manche astronomischen



Bild: University of Wisconsin-Madison

Markus Ackermann untersucht Superbeschleuniger im Weltall.



Phänomene wie etwa schnell rotierende Pulsare, die wie ein Leuchtturm einen Strahl durchs All kreisen lassen, oder die Synchrotronstrahlung bestimmter Galaxien sind vor allem im Radiobereich zu sehen.

Auch die Infrarotstrahlung, die zwischen Radiowellen und sichtbarem Licht liegt, erlaubt einen Blick durch kosmischen Staub hindurch. So lässt sich im Infrarotbereich beispielsweise beobachten, wie sich in entstehenden Sonnensystemen neue Planeten in den riesigen Staubscheiben um junge Sterne zusammenballen.

Geprägt ist unser Bild vom Kosmos bis heute durch den sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums, etwa über die spektakulären Bilder des Weltraumteleskops „Hubble“ und anderer Observatorien. Im sichtbaren Licht liegt das Maximum der Strahlung unserer Sonne, was eben dazu geführt hat, dass unsere Augen besonders für diesen Spektralbereich empfindlich sind. Jenseits des sichtbaren Lichts liegt die ultraviolette (UV-)Strahlung, die von der Erdatmosphäre zum großen Teil geschluckt wird. Mit UV-Satelliten außerhalb der Erdatmosphäre messen Astronomen beispielsweise die Gas-Temperatur in der Sonnenatmosphäre. Auch junge, heiße Sterne leuchten besonders hell im UV-Licht.

Röntgenstrahlung enthüllt besonders energiereiche Prozesse im Universum, wie etwa die mehrere Millionen Grad heißen Gase aus einer Supernova-Explosion. Mit Röntgenstrahlung lassen sich auch Schwarze Löcher untersuchen: Die kosmischen Massemonster lassen zwar kein Licht aus ihrem Inneren entkommen. Wenn sie jedoch Materie aus ihrer Umgebung verschlucken, heizt diese sich dabei so stark auf, dass sie hell im Röntgenlicht aufflammt, bevor sie im Schwarzen Loch verschwindet.

Der energiereichste Teil des elektromagnetischen Spektrums ist die Gammastrahlung. Der Gamma-Himmel zeigt einen ganz anderen Kosmos als der friedlich funkelnde Sternenhimmel. Hier sind die gewaltigsten Explosionen des Weltalls zu sehen sowie gigantische natürliche Teilchenbeschleuniger, gegen die selbst der stärkste irdische Beschleuniger wie ein Spielzeug wirkt.

Energereicherer Teilchenhagel

Mit Hilfe der kosmischen Gammastrahlung fahnden Forscher unter anderem nach dem Ursprung der sogenannten Kosmischen Strahlung – nicht zu verwechseln mit der Kosmischen Hintergrundstrahlung. Bei der vor rund einem Jahrhundert entdeckten Kosmischen Strahlung handelt es sich

trotz des Namens nicht um Licht, sondern um einen Hagel energiereicher Elementarteilchen, der beständig auf die Erdatmosphäre einprasselt. Diese Kosmische Strahlung besteht hauptsächlich aus Protonen, also elektrisch geladenen Wasserstoff-Atomkernen, sowie einem kleinen Anteil schwerer Atomkerne. Noch ist weitgehend rätselhaft, welche Prozesse genau diese subatomaren Teilchen auf die beobachteten unglaublich hohen Energien beschleunigen – ein einzelnes Proton der Kosmischen Strahlung kann mitunter soviel Energie haben wie ein schnell geschlagener Tennisball. „Die Protonen erreichen Energien, die weit höher sind, als sie in den stärksten Teilchenbeschleunigern der Welt erzeugt werden können“, betont Stefan Funk von der Universität Erlangen.

„Die Protonen erreichen Energien, die weit höher sind als in den stärksten Teilchenbeschleunigern der Welt“

Stefan Funk, Universität Erlangen

Die kosmischen Superbeschleuniger, die das schaffen, sind nicht so leicht zu identifizieren, denn die elektrisch geladenen Teilchen der Kosmischen Strahlung werden auf ihrem Weg durchs All von allerlei Magnetfeldern abgelenkt und prasseln daher aus ganz anderen Richtungen auf die Erde, als sie ursprünglich losgeflogen sind. Bei diesem Rätsel kommt Forschern die kosmische **Gammastrahlung** zu Hilfe, die ebenso energiereich ist, aber aus Licht besteht. Sie wird nicht abgelenkt und weist daher direkt zu ihrem Ursprung zurück. Physiker gehen davon aus, dass Teilchen- und Gammastrahlung von denselben energiereichen kosmischen Objekten erzeugt werden. Wer die Quellen der Gammastrahlung findet, kennt auch die Quellen der Teilchenstrahlung, lautet die Hoffnung. Das Problem: Je höher die Energie der Gammastrahlung, desto spärlicher leuchtet sie. Außerdem ist die Ortsgenauigkeit der Gammateleskope längst noch nicht so hoch wie etwa im sichtbaren Bereich des Lichts.

Die Welt im Gammalicht

Dennoch kommen die Forscher den kosmischen Superbeschleunigern immer besser auf die Schliche. Beobachtungen mit dem Gammateleskopen „Fermi“ haben beispielsweise bestätigt, was Wissenschaftler schon lange vermutet hatten: Ein Großteil der Kosmischen Strahlung entsteht demnach in den gewaltigen Trümmerwolken explodierender Sterne, sogenannten Supernova-

Überresten. „Es ist der erste Beweis, der rein auf fundamentalen Teilcheneigenschaften beruht, dass Supernova-Überreste eine wichtige Quelle der Protonen und der schweren Kerne in der Kosmischen Strahlung sind“, betont DESY-Wissenschaftler Markus Ackermann aus dem Team.

Wissenschaftler nehmen an, dass hauptsächlich zwei Quellen für die Kosmische Strahlung infrage kommen: Supernova-Explosionen und gigantische Materiestrahlen, sogenannte Jets, die aus aktiven Schwarzen Löchern außerhalb unserer Galaxie herausschießen. Mit einem ganzen Netz von erdgebundenen Gamma-Observatorien versuchen Forscher, die Himmelsobjekte des Hochenergie-Kosmos besser zu verstehen. Dort finden sich Gammastrahlenblitze, aktive Galaxien mit monströsen Schwarzen Löchern im Zentrum, Supernova-Überreste und pulsierende Sternleichen, sogenannte Pulsare. Mit dem Gammastrahlen-Observatorium H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) in Namibia beispielsweise haben Wissenschaftler kürzlich in der Großen Magellanschen Wolke, einer Nachbargalaxie der Milchstraße, drei verschiedenartige, extrem leuchtstarke Gammastrahlenquellen nachgewiesen.

Dabei handelt sich um den Pulsarwindnebel des stärksten je beobachteten Pulsars, einen extrem intensiv strahlenden Supernova-Überrest und eine sogenannte Superschale – ein 270 Lichtjahre großes schalenförmiges Gebilde, aufgeblasen von mehreren Supernovae und Sternen. Damit ist es zum ersten Mal gelungen, in einer anderen Galaxie gleich mehrere sternähnliche Gammastrahlenquellen bei höchsten Energien zu beobachten. Zugleich ist die Superschale der erste nachgewiesene Vertreter einer neuen Klasse von Höchstenergie-Gammastrahlenquellen.



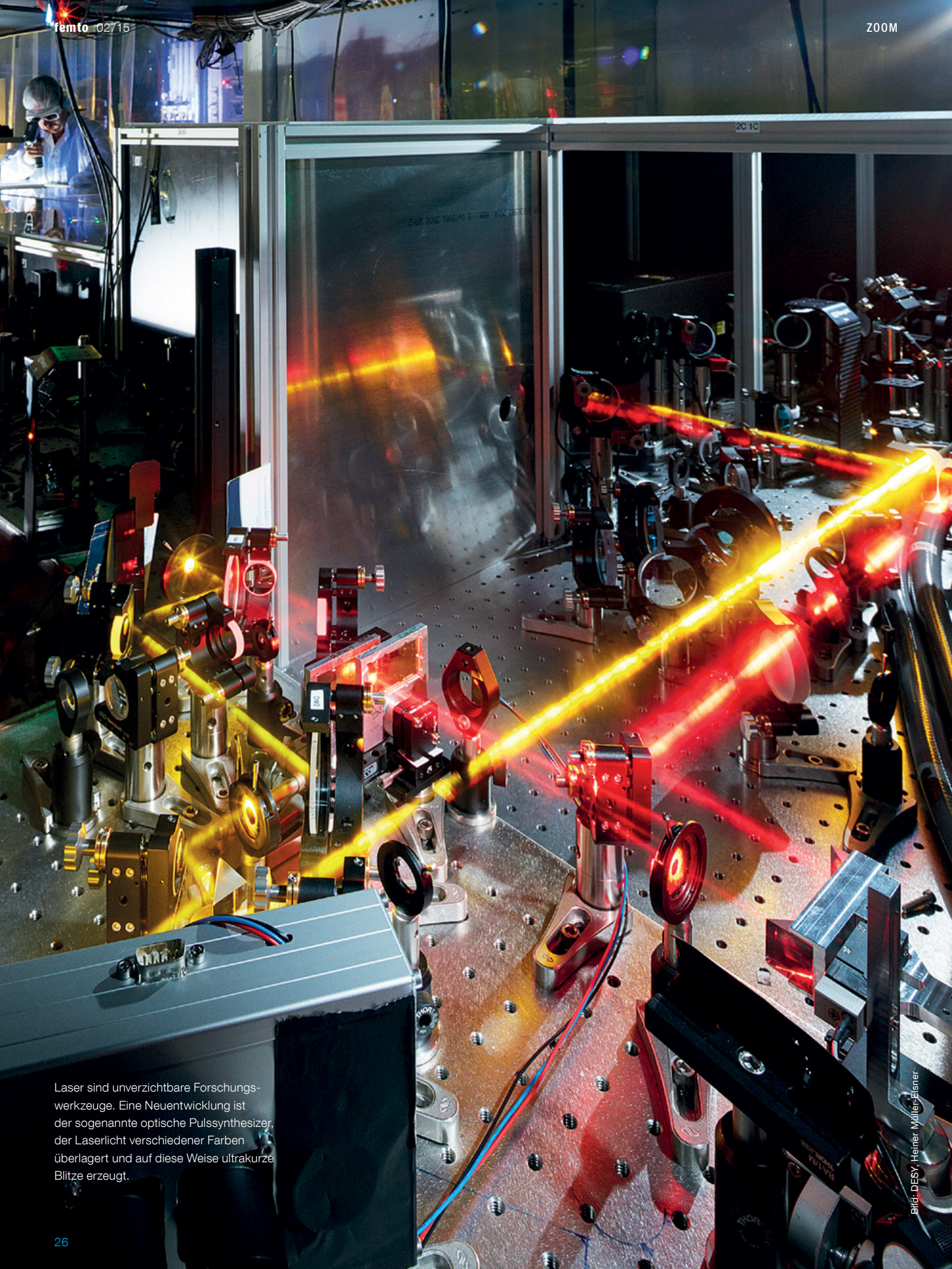
Christian Stegmann leitet den DESY-Standort in Zeuthen.

„Das Cherenkov Telescope Array wird das Observatorium der Zukunft in der Gamma-Astronomie sein“

Christian Stegmann, DESY

Mit dem geplanten Cherenkov Telescope Array CTA wollen Forscher in Zukunft noch genauer in den Hochenergie-Kosmos blicken. Mehr als tausend Wissenschaftler aus 28 Ländern sind an dem Projekt beteiligt, bei dem DESY ein wichtiger Partner ist. „Das Universum ist voller natürlicher Teilchenbeschleuniger, etwa in Supernova-Explosionen, Doppelsternsystemen oder Aktiven Galaktischen Kernen“, betont der Leiter des DESY-Standorts Zeuthen, Christian Stegmann. „Bisher kennen wir nur etwa 150 dieser Objekte und haben ein erstes physikalisches Verständnis dieser faszinierenden Systeme. Das Cherenkov Telescope Array wird Tausende dieser Beschleuniger mit bisher nicht erreichter Sensitivität beobachten können. Es wird damit das Observatorium der Zukunft in der Gamma-Astronomie sein.“

Künstlerische Darstellung einer aktiven Galaxie, die als kosmischer Superbeschleuniger schnelle Teilchen ins Weltall schleudert.



Laser sind unverzichtbare Forschungswerkzeuge. Eine Neuentwicklung ist der sogenannte optische Pulssynthesizer, der Laserlicht verschiedener Farben überlagert und auf diese Weise ultrakurze Blitze erzeugt.

Bild: DESY, Heiner Müller-Lasner

Die „zweite Revolution“ der Laser

DESY-Forscher Franz Kärtner entwickelt Ultrakurzzeit-Laser und jongliert mit Photonen und Elektronen auf der Skala von trillionstel Sekunden

Laser erzeugen ein ganz besonderes Licht, das sogar Stahl durchtrennen kann. Laserlicht sorgt für exakte Schnitte bei Operationen, scannt unsere Einkäufe an der Supermarktkasse, liest Informationen von CDs und DVDs, erzeugt Hologramme auf Geldkarten und schneidet technische Präzisionsbauteile. Laser haben längst unseren Alltag erobert. Auch aus der Forschung ist „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, kurz Laser, nicht mehr wegzudenken. Dahinter steckt eine spezielle Methode, mit der Licht erzeugt und gebündelt wird. Laserlicht ist fokussiert, intensiv, und alle Lichtwellen schwingen im Gleichtakt, sind also kohärent. Laserlicht ermöglicht eine Fülle von wissenschaftlichen Anwendungen und Untersuchungsmethoden. Es lässt sich in verschiedenen Wellenlängen erzeugen, von Infrarot über sichtbares Licht bis hin zu ultraviolett Licht. Eine besondere Herausforderung ist das Röntgenlaserlicht. Diese kurzwellige Strahlung wird in speziellen Freie-Elektronen-Lasern erzeugt und ermöglicht den Forschern Einblicke in die dynamische Welt der Atome und Moleküle.

Den Transport einzelner Elektronen im molekularen Geschehen der Photosynthese „live“ zu verfolgen, ist eines der Forschungsziele von Franz Kärtner. Der leitende Wissenschaftler bei

DESY und Professor an der Universität Hamburg und am Massachusetts Institute of Technology (MIT) erforscht und entwickelt Ultrakurzzeit-Lasersysteme, die auf der Skala von trillionstel Sekunden (Attosekunden) arbeiten. Damit lassen sich die Bewegungen von Elektronen verfolgen und Schlüsselprozesse wie die Photosynthese aufklären und möglicherweise technisch nutzbar machen. Außerdem werden auf dieser Basis neuartige ultraschnelle Photonen- und Elektronenquellen möglich, ebenso hochpräzise Synchronisations- und Analysesysteme für kilometergroße Anlagen wie den Freie-Elektronen-Röntgenlaser European XFEL in Hamburg. „Mit den Ultrakurzzeit-Lasern dringen wir in neue Dimensionen der Zeitauflösung vor“, betont Kärtner. „Ihre immensen Möglichkeiten kommen einer ‚zweiten Revolution‘ in der Lasertechnologie gleich.“

„Mit den Ultrakurzzeit-Lasern dringen wir in neue Dimensionen der Zeitauflösung vor“



Superzeitlupe für den Nanokosmos

Chemische und biologische Prozesse, die in trillionstel Sekunden ablaufen, in atomarer Auflösung zu verfolgen und zu verstehen: Das ist das Ziel eines Forschungsprojekts, für das Kärntner gemeinsam mit Petra Fromme von der Arizona State University und den DESY-Forschern Henry Chapman und Ralph Aßmann insgesamt 14 Millionen Euro vom Europäischen Forschungsrat erhält. Unter anderem soll eine neue Forschungsanlage bei DESY entstehen, die es ermöglicht, ultraschnelle Prozesse wie in Zeitlupe zu filmen. Dazu sollen Röntgenblitze im Attosekundenbereich erzeugt werden. Eine Attosekunde ist unvorstellbar kurz: eine trillionstel Sekunde, 18 Stellen hinter dem Komma – in dieser Zeit fliegt Licht gerade einmal 0,3 millionstel Millimeter weit. Eine neuartige, lasergestützte Teilchenbeschleunigertechnik soll ermöglichen, die Röntgenstrahlung in noch sehr viel kürzeren Pulsen auszusenden als bisher. Bereits heute liefern moderne Röntgenlaser Lichtpulse im Bereich von Femtosekunden, also milliardstel Sekunden. Attosekunden sind noch tausend Mal kürzer.



Franz Kärtner leitet bei DESY die Abteilung für Ultrakurzzeit-Laser- und Röntgenphysik. Außerdem ist er Professor an der Universität Hamburg und am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA.

„Die Attosekunden-Technik wird das Verständnis von Struktur und Funktion auf der molekularen und atomaren Ebene revolutionieren“

„Für unsere Ultrakurzzeit-Messungen arbeiten wir an einem neuartigen, kompakten Freie-Elektronen-Laser, der helle, kurzweilige Röntgenstrahlung erzeugt“, erläutert Kärtner. „Für die Beschleunigung der Elektronen kommt dabei Terahertz-Strahlung statt der üblichen Radiofrequenzen zum Einsatz. Dadurch werden alle Komponenten um den Faktor 100 bis 1000 kleiner.“ Terahertz-Beschleuniger sind daher eine Option für kompakte und kostengünstige Teilchenbeschleuniger. Auf dieser Basis könnten Röntgenlaser womöglich einmal im Laborformat gebaut werden. Allerdings ist die Terahertz-Strahlung, der Frequenzbereich zwischen Infrarot- und Mikrowellenstrahlung, ein noch vergleichsweise

wenig erschlossenes Gebiet im elektromagnetischen Spektrum. „Erst in den letzten Jahren hat sich einiges getan“, sagt Kärtner. „Die erforderlichen leistungsstarken Terahertz-Quellen werden gerade entwickelt. Das sind Schlüsseltechnologien für die Zukunft.“

Doch die Beschleunigung der Elektronen in einem Freie-Elektronen-Laser ist nur der erste Schritt: Anschließend müssen die fast lichtschnellen Teilchen zur Abgabe von Röntgenlicht gebracht und dieses auch noch so verstärkt werden, dass alle Wellen im Gleichtakt schwingen. Dazu nutzen die heutigen Freie-Elektronen-Laser meterlange Magnetstrukturen, sogenannte Undulatoren, die Elektronen auf einen Slalomkurs schicken. Das Ziel der Laserspezialisten um Kärtner ist es, auch diesen Prozess mit Licht zu steuern, also einen Laserpuls als Undulator zu nutzen. Für solche optischen Undulatoren sind spezielle hochenergetische Pikosekundenlaser erforderlich, die ebenfalls erst entwickelt werden müssen.

Doch diese Pionierarbeit lohnt sich: Die neuartigen Lasersysteme bieten die Möglichkeit, Röntgenblitze zu erzeugen, die nur 100 Attosekunden kurz, aber trotzdem intensiv genug für die Bildgebung sind. „Die Attosekunden-Technik wird das Verständnis von Struktur und Funktion auf der molekularen und atomaren Ebene revolutionieren und fundamentale Prozesse in Chemie und Biologie enträtseln“, erwartet Kärtner. „Ultraschnelle Prozesse wie Lichtabsorption und Elektronentransport während der Photosynthese

Terahertz-Beschleunigermodule passen problemlos in eine Hand.

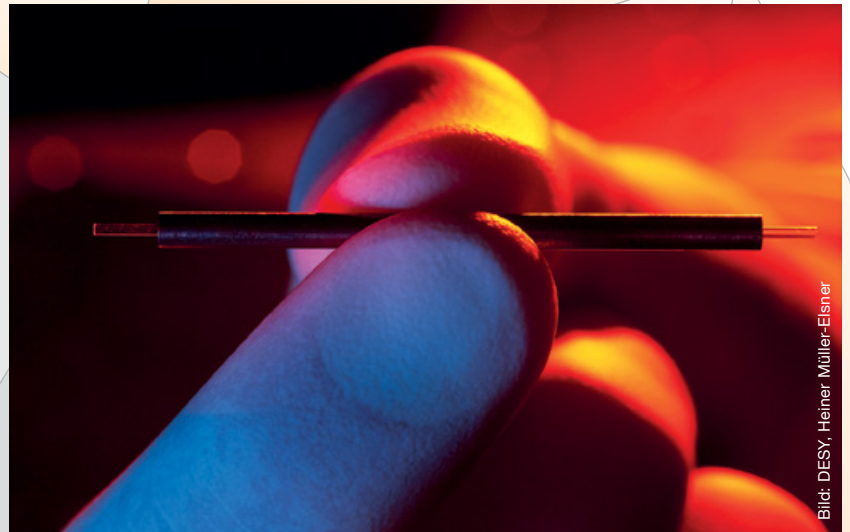


Bild: DESY, Heiner Müller-Elsner

Physiker schrumpfen Teilchenbeschleuniger

Ein interdisziplinäres Forscherteam um Franz Kärtner hat den ersten Prototyp eines Miniatur-Teilchenbeschleunigers gebaut, der mit Terahertz- anstelle von Hochfrequenz-Strahlung funktioniert. Ein einzelnes Beschleunigungsmodul ist dabei nur 1,5 Zentimeter lang und einen Millimeter dünn.

Für ihren Prototyp, der in Kärtners Labor am MIT in Boston aufgebaut wurde, verwendeten die Forscher ein spezielles, mikrostrukturiertes Beschleunigermodul, das für Terahertz-Strahlung maßgeschneidert ist. Aus einer Art Elektronenkanone schossen die Physiker schnelle Elektronen in das Miniatur-Beschleunigermodul, die dort von der eingespeisten Terahertz-Strahlung weiter beschleunigt wurden. Die Energie der Teilchen erhöhte sich in diesem ersten Prototyp eines Terahertz-Beschleunigers um sieben Kiloelektronenvolt (keV).

„Diese Beschleunigung ist noch nicht sehr stark, aber der Versuch belegt, dass dieses Prinzip in der Praxis funktioniert“, erläutert Arya Fallahi vom Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY, der für die theoretischen Berechnungen zuständig war. „Die Theorie zeigt, dass ein Beschleunigungsgradient von bis zu einem Gigavolt pro Meter möglich ist.“ Das liegt mehr als zehn Mal über dem Wert, den die besten konventionellen Beschleunigermodule heute erreichen. Eine noch stärkere Beschleunigung verspricht die ebenfalls experimentelle Plasmabeschleuniger-Technik, die allerdings auch deutlich stärkere Laser zum Betrieb erfordert als Terahertz-Beschleuniger.

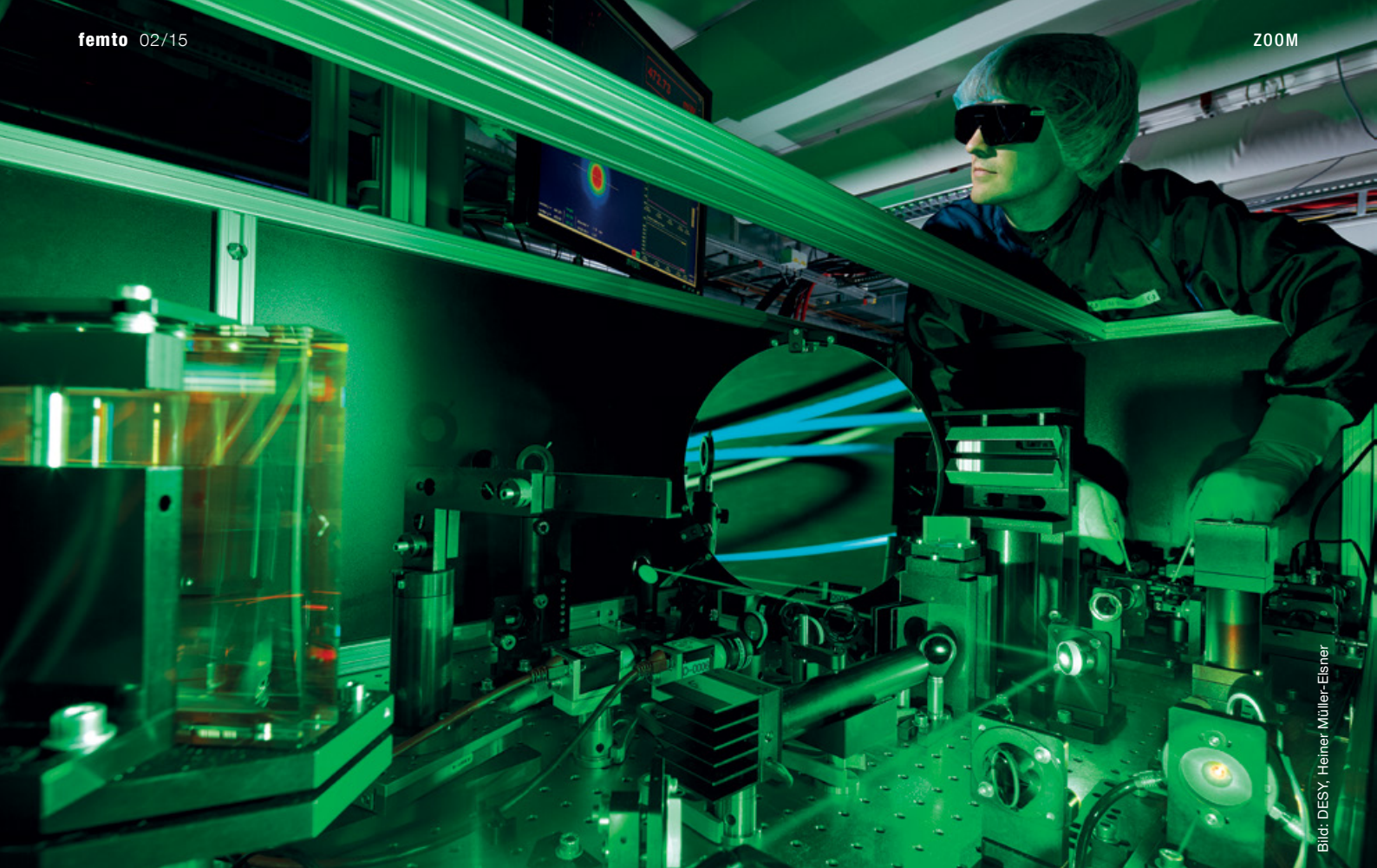


Bild: DESY, Heiner Müller-Elsner

lassen sich auf der Zeitskala von Attosekunden aufklären und damit eines der wichtigsten Probleme der Strukturbiologie lösen.“

Photosynthese: Brennstoff aus Licht

Mit Hilfe der Photosynthese nutzen Pflanzen und einige Bakterienarten die Energie des Sonnenlichts, um energiereiche Substanzen aufzubauen. Forscher wollen diesen Prozess technisch nachahmen, also ein Verfahren entwickeln, das Licht der Sonne ohne großen Aufwand direkt in chemische Energie umwandelt. In ihrem Fokus steht die Spaltung von Wasser mit Hilfe der Sonnenenergie. In der Natur katalysieren spezielle metallhaltige Enzyme diesen Prozess. In der künstlichen Photosynthese versucht man, solche Katalysatoren nachzubauen, die bei Lichteinfall Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufspalten. Anschließend wird der Wasserstoff als Energieträger gespeichert. Mit solchen bioinspirierten Katalysatoren könnte sich Wasserstoff oder ein anderer solarer Brennstoff in großem Stil umweltfreundlich und kostengünstig erzeugen lassen, so die Hoffnung der Forscher.

„Der Transport und Austausch von Elektronen sind von zentraler Bedeutung für die Energieumwandlung in der Photosynthese“, erläutert Kärtner. „Wenn wir solche ultraschnellen Pro-

zesse verfolgen und verstehen, dann können wir sie auch nutzen. Das gilt für ganz verschiedene katalytische Reaktionen mit enormem Anwendungspotenzial.“

Und noch eine grundlegende Fragestellung lässt sich nur auf der Zeitskala von Attosekunden klären: Was passiert in einer Probe, wenn man sie mit hochintensivem Röntgenlaserlicht bestrahlt? Biologische Proben werden auf jeden Fall von der intensiven Strahlung zerstört, doch moderne Röntgenlaser schießen das Bild vom Biomolekül blitzschnell vor dessen Zerstörung. Aber verändert der Röntgenblitz schon vorher die Chemie in der Probe so stark, dass sich biochemische Reaktionen gar nicht mehr verfolgen lassen? Die Antwort liegt auf der Skala von Attosekunden. „Die Ultrakurzzeit-Technik kann die Frage beantworten, wie schnell sich die Chemie in einer Probe ändert, wenn der Röntgenlaserblitz sie trifft“, sagt Kärtner. „Die Antwort ist fundamental wichtig, wenn wir den Ablauf chemischer Reaktionen mit Röntgenlasern analysieren wollen.“

Die Entwicklung wird da allerdings noch nicht zu Ende sein. „Wenn die Zeitauflösung der Röntgenlaser irgendwann von Atto- zu Zeptosekunden geht, kann man damit sogar in Kernprozesse hineinschauen“, erläutert Kärtner. Eine Zeptosekunde ist eine tausendstel Attosekunde:

Im ANGUS-Laserlabor, das DESY und die Universität Hamburg gemeinsam betreiben, werden neuartige lasergetriebene Plasma-beschleuniger erforscht und entwickelt.

0,000 000 000 000 000 001 Sekunden. „Auch das wird sicherlich irgendwann kommen – und revolutionäre Einblicke geben.“

„Wenn wir ultraschnelle Prozesse verstehen, dann können wir sie auch nutzen“

Zukunftstechnologie: Laser plus Beschleuniger

Die Einsatzmöglichkeiten der Ultrakurzzeit-Lasersysteme sind sehr breit gefächert. „Eine wichtige Entwicklung, die wir hier anstreben, sind die kompakten Freie-Elektronen-Laser, die auf Beschleunigung mit Terahertz und optischen Undulatoren basieren und das Potenzial haben, Attosekundenpulse im harten Röntgenbereich zu erzeugen“, sagt Kärtner. „Insgesamt bietet die Verschmelzung von Laser- und Beschleunigertechnologien ein immenses Potenzial für Forschung und Entwicklung. Bei DESY arbeiten international führende Beschleunigerexperten mit Laserspezialisten von der Universität Hamburg und anderen Institutionen auf einem Campus zusammen. Das eröffnet einmalige Möglichkeiten.“

Kärtner selbst arbeitet mit seinem Team im Center for Free-Electron Laser Science CFEL, einem europaweit einmaligen Kompetenzzentrum, das DESY, die Universität Hamburg und die Max-Planck-Gesellschaft gemeinsam gegründet haben. In diesem interdisziplinären Umfeld entwickeln die Experten neue Lasersysteme für den Einsatz in der Beschleunigertechnologie und in Röntgenexperimenten. „Ein moderner Röntgenlaser ist zur Hälfte ein Beschleuniger und zur Hälfte eine optische Laseranlage“, sagt Kärtner. „Durch das Verschmelzen von Beschleuniger- und Lasertechnologie werden ganz neue Anlagen möglich. Die Röntgenlaserentwicklung ist überhaupt noch nicht abgeschlossen – sowohl was die Technik als auch was die Anwendungen angeht.“

Neuartige Laser werden auch für die großen Freie-Elektronen-Röntgenlaser wie FLASH und den im Bau befindlichen European XFEL entwickelt. Diese Zukunftsmaschinen ermöglichen ganz neue Einblicke in die Dynamik der Atome und Moleküle – allerdings nur, wenn nicht nur die extrem intensiven Röntgenlaserpulse im Bereich

von Femtosekunden genau getaktet sind, sondern alle Komponenten ebenso präzise aufeinander abgestimmt sind – eine Aufgabe für Ultrakurzzeit-Laser.

„Für die Synchronisation des European XFEL setzen wir Femtosekundenlaser ein. Wie ein Dirigent sorgt der Laser dafür, dass das ganze Orchester in dieser kilometergroßen Anlage im Gleichtakt zusammenspielt“, sagt Kärtner. Und auch für die Experimente selbst werden beispielsweise Lasersysteme entwickelt, die mit einem ultrakurzen Lichtpuls eine Reaktion in Gang setzen, die anschließend vom Röntgenlaserblitz abgebildet wird. „Das genaue Timing ist entscheidend, wenn wir die verschiedenen Stadien einer Reaktion mit einem Röntgenlaser abbilden wollen“ betont Kärtner. „Timing, Kontrolle und Synchronisation im Bereich von wenigen Femto- und eventuell sogar Attosekunden – so schnell sind nur optische Systeme. Für diese Einsätze müssen wir die passenden Ultrakurzzeit-Laser neu entwickeln.“ Erst dann können die hochintensiven Röntgenlaserblitze tatsächlich neue Einblicke in die Dynamik im Nanokosmos eröffnen.

„Bei DESY arbeiten international führende Beschleunigerexperten mit Laserspezialisten auf einem Campus zusammen. Das eröffnet einmalige Möglichkeiten“

Wie zukunftssträftig dieses Forschungsgebiet ist, zeigt auch die Cycle GmbH, eine Ausgründung der Ultrafast Optics and X-rays-Gruppe von Kärtner. Die 2015 gegründete Firma wird von DESY und dem Gründungsprogramm Helmholtz-Enterprise unterstützt und stellt innovative Produkte der Ultrakurzzeit-Lasertechnologie her, etwa femtosekundengenaue Synchronisationssysteme für Großanlagen. Ein Ultrakurzpulslaser ist bereits patentiert und soll in Serie gehen. „Der Laser liefert exzellente Strahlqualität, ist stabil und langlebig“, hebt Kärtner hervor. „Sowohl für wissenschaftliche als auch für industrielle Anwendungen bieten die Ultrakurzzeit-Laser herausragende Einsatzmöglichkeiten.“

Neues sehen neues Sehen

Ein Gespräch über Wissenschaft und Kunst, Wahrnehmung und Weltbilder

Das menschliche Auge nimmt nur den sichtbaren Teil des Lichtspektrums wahr. Das Gehirn erzeugt daraus ein Abbild unserer Umwelt. Wissenschaft und Kunst erweitern unsere Sicht auf die Welt gleichermaßen, wenn auch mit unterschiedlichen Mitteln. DESY-Forscher Christian Schroer nutzt modernste Röntgenlichtquellen, um Strukturen im Maßstab von milliardstel Metern zu analysieren. Die Künstlerin und Synästhetikerin Anna Mandel nutzt ihre Intuition, um Bestehendes auf neue Weise darzustellen und neue Zugänge und Perspektiven zu schaffen. Ihre Farbwelten erzeugen Emotionen, während der Wissenschaftler unter anderem den Ursachen der Farbigkeit auf den Grund geht. Beide erweitern unseren Horizont über das sinnlich Wahrnehmbare hinaus und nutzen Licht als Werkzeug, um Altbekanntes infrage zu stellen und neue Sichtweisen zu entwickeln. Ein Gespräch über Licht in Wissenschaft und Kunst, Wahrnehmung und Weltbilder.

femto: Christian Schroer, Sie sind Physiker und leiten mit PETRA III eine der besten Röntgenlichtquellen der Welt. Was tun Sie mit diesem Licht?

Christian Schroer: Ich beschäftige mich mit Mikroskopie, also damit Dinge mit Licht anzuschauen. Licht-

mikroskope arbeiten mit sichtbarem Licht und vergrößern Dinge so, dass man sie noch mit dem eigenen Auge sieht. Wir gehen ein Stück weiter: Wir benutzen Röntgenlicht, das eine viel kürzere Wellenlänge als das sichtbare Licht hat.

femto: Und was ist der Vorteil?

Christian Schroer: Die Auflösung in der Mikroskopie, also wie klein man gucken kann, ist durch die Wellenlänge begrenzt. Im sichtbaren Bereich geht es bis zu einem halben Mikrometer, das entspricht einem Hundertstel einer Haaresbreite. Bei der Röntgenstrahlung ist die Wellenlänge zehntausendmal kleiner und liegt im Bereich einzelner atomarer Abstände. Damit sind wir im Prinzip in der Lage, einzelne Atome zu sehen.

„Wir sind im
Prinzip in der Lage,
einzelne Atome zu
sehen“

femto: Das „Sehen“ ist in diesem Fall ein hochkomplizierter und indirekter Vorgang. Was „sieht“ man denn da eigentlich?

Christian Schroer: Wir sehen quasi die räumliche Anordnung von

Atomen in der Materie. Dies zum Beispiel ist ein Stück aus der weiß schimmernden Flügeldecke eines Käfers im Maßstab eins zu zehntausend. (Hält ein 3D-Modell aus weißem Kunststoff hoch.)

femto: Sieht aus wie ein vergrößertes Stück aus einem Schwamm mit lauter Fasern und Hohlräumen.

Christian Schroer: Genau dieser labyrinthartige innere Aufbau der Flügeldecke bewirkt, dass der Käfer im sichtbaren Bereich des Lichtspektrums weiß aussieht. Die Strukturen sind ungefähr 200 Nanometer groß, das entspricht etwa der halben Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Das Licht, das auf den Käfer strahlt, verfängt sich in diesem Labyrinth und wird ungeachtet der Lichtfarbe zurückgeworfen. Und genau dadurch wirkt der Käfer weiß.

femto: Weil sich alle Lichtfarben zu weißem Licht überlagern. Man braucht also Röntgenlicht, um herauszufinden, warum der Käferflügel weiß schimmert.

Christian Schroer: Mit Röntgenlicht können wir uns diese Strukturen genau ansehen, während man im sichtbaren Licht nur ein weiß reflektierendes Objekt sieht. Allerdings sieht man mit Röntgenlicht nicht direkt, sondern quasi übersetzt. Das Objekt ist winzig und wird mit einem extrem feinen Röntgenstrahl abgerastert. Das kurzwellige Licht wird an den Atomen gestreut. Aus Hunderttausenden solcher Streubilder berechnet ein Computer genau das Objekt, das zu all diesen Bildern gleichzeitig passt. Und aus der Struktur ergibt sich dann die Funktion – in diesem Fall die Ursache der Flügelfarbe.

Anna Mandel: Statt um die Ursachen der Farben geht es in der Kunst um ihre Wirkungen. Mit Farben rufen wir beispielsweise bestimmte Emotionen hervor und arbeiten damit. Jeder weiß, dass Blau eher beruhigt,

„Sehen“ mit Röntgenlicht: Streubild von sogenanntem kolloidalem Glas, das aus unzähligen, 50 Nanometer kleinen Siliziumdioxid-Kügelchen besteht, aufgenommen an DESYs Forschungslichtquelle PETRA III.



Christian Schroer ist wissenschaftlicher Leiter der Röntgenlichtquelle PETRA III bei DESY und Professor an der Universität Hamburg. Der ursprünglich in der theoretischen Physik tätige Forscher hat sich nach seiner Promotion auf die Röntgen-Nanoforschung und Entwicklung von Röntgenoptiken spezialisiert. Er will die Experimentiermöglichkeiten mit dem brillanten Röntgenlicht von PETRA III noch weiter ausbauen, um Strukturen und Prozesse in der molekularen Welt zu erforschen.

Rot aber nicht. Wenn ich ein Bild male und Farben einsetze, löse ich bei dem Betrachter etwas aus.

femto: Kunst erweitert also die Wahrnehmung, indem sie zusätzlich zu unserer visuellen Welt eine emotionale Welt erschließt?

Anna Mandel: Das kann eine starke Wirkung sein. Ich habe in einem Projekt einen ganzen Raum mit Blautönen gestaltet. Viele Leute haben mich auf das Blau angesprochen. Das hat etwas in ihnen ausgelöst. Durch die Erfahrung mit Kunst kann sich der Betrachter selbst neu wahrnehmen und neu einordnen. Eine 14-jährige Schülerin, die sich eine Installation von mir ansah, kam

zu mir und bedankte sich für die Arbeit, sie habe dadurch einen neuen Zugang zu den psychischen Problemen eines Verwandten bekommen – nie wäre ich selber auf so eine Idee gekommen.

„Durch die Erfahrung mit Kunst kann sich der Betrachter selbst neu wahrnehmen“

femto: Kunst kann mir neue Perspektiven öffnen?

Anna Mandel: Ganz plakativ zeigt dies die sogenannte „Flachware“ – also Bilder. Vor 40 Jahren hat man Bilder als moderner Künstler aus dem Fenster geworfen und gesagt, so einen bürgerlichen Quatsch wollen wir nicht mehr. Heute kommt man zu den Bildern zurück. Die Idee dabei hat schon die Renaissance formuliert: Ein Bild ist ein Fenster. Es öffnet den Zugang zu einer Welt, die dort gar nicht ist. Da sitzt eine Madonna im Rosengarten – die Wand hat plötzlich eine Öffnung. Wenn ich mit Farbe arbeite, dann

ist diese Öffnung für den Betrachter sehr weit, der Raum dahinter ist nicht festgelegt. Was dann passiert, ist sehr individuell.

femto: Und wie schaffen Sie diese Räume?

Anna Mandel: Es heißt immer, dass der Künstler die Aufgabe hat, Dinge herzustellen, die es nicht gibt. Aber ich kann immer nur etwas nehmen, das es schon gibt und es modifizieren. Ich habe eine bestimmte intuitive Idee, die dient mir als Leitbild. Dann benutze ich die Materialien und Techniken, die ich habe, um diese Idee für andere sichtbar zu machen. In der Wissenschaft ist es ähnlich: Dieser Käferflügel existiert schon lange, nur haben wir neue Techniken, ihn uns zu erschließen.

femto: Verfolgen Sie dabei ein bestimmtes Ziel?

Anna Mandel: Ich frage mich nicht, was will ich erreichen? In der freien Kunst habe ich ein inneres Bild, mein ganz eigenes Bild, und ich bemühe mich, dafür eine Form zu finden. Wenn dies gelingt, wird das Ergebnis sinnvoll für andere. Man kann vieles machen, aber nicht alles ist interessant.

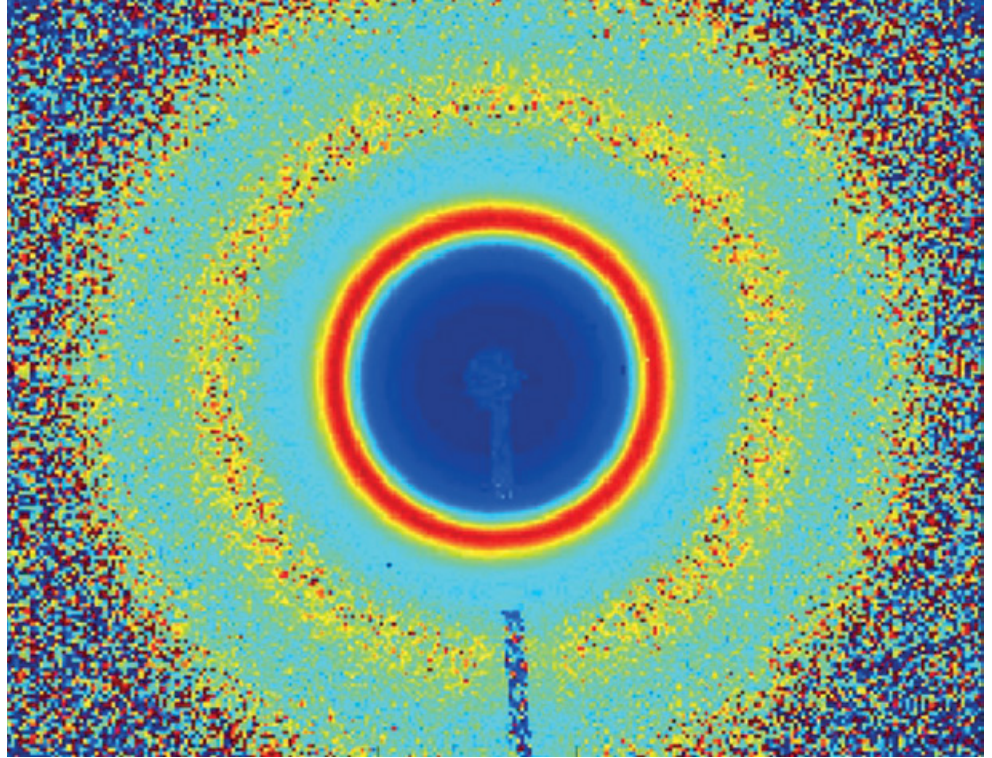


Bild: Dmitry Denisov, Universität Amsterdam



Christian Schroer: Das gilt in der Wissenschaft genauso. Man kann im Prinzip jedes Experiment machen, es kann völlig langweilige Ergebnisse liefern, die alle richtig sind. Das interessiert dann aber niemanden. Die Kunst besteht darin, ein Experiment zu finden, das eine interessante Frage beantwortet.

„Man kann vieles machen, aber nicht alles ist interessant“

femto: Kunst und Wissenschaft erweitern also gleichermaßen unser Weltbild über das sinnlich Wahrnehmbare hinaus. Wissenschaft kann Strukturen und Vorgänge analysieren, die beispielsweise zu klein, zu schnell oder zu fern für unsere Wahrnehmung sind. Kunst kann neue emotionale und rationale Zugänge zu Bestehendem schaffen. Einem Künstler gesteht man sofort zu, dass er dafür Intuition und Kreativität braucht. Wie ist das in der Wissenschaft?

Christian Schroer: Nach meiner Erfahrung kommt die Kreativität auch in der Wissenschaft eher zufällig, also genauso wie in der Kunst. Man fragt sich eines Tages: Warum mache ich das eigentlich immer so? Vielleicht ist das gar nicht der richtige Weg, wie kann ich da anders rangehen? Damit kann man Grenzen durchbrechen. Ein Beispiel ist die Fokussierbarkeit von Röntgenstrahlen. Vor ein paar Jahren gab es ein Dogma, das besagte, Röntgenstrahlen könnten nicht besser als bis zu einem gewissen Punkt fokussiert werden. Das gehe prinzipiell

nicht. Aber glaube ich das? Meine Intuition sagt, das kann eigentlich nicht stimmen. Dann versucht man ein Gegenbeispiel zu konstruieren. Heute, nach vielen Diskussionen und Entwicklungen, gibt es tatsächlich Röntgenoptiken, die besser sind. Trotzdem wurde kein physikalisches Gesetz ausgehebelt. Wir haben die Optiken nur so gebaut, dass sie diesem speziellen Gesetz gar nicht unterliegen.

femto: Also funktioniert auch Wissenschaft nicht ohne Intuition?

Christian Schroer: Gerade am Anfang einer Entwicklung hat man vielleicht wirklich zunächst eine Art Bauchgefühl, eine vage Idee, einen möglichen Hinweis auf ein Phänomen. Dann beginnt man auszuprobieren.

femto: Kann die Wissenschaft bei solchen Prozessen von der Kunst profitieren?

Anna Mandel: Zumindest kann Kunst irritieren, Denkanstöße geben und zu neuen Wahrnehmungsweisen anregen. Etwas zu hinterfragen, ist ja auch in der Kunst ein wichtiges Leitmotiv. Ein „blaues Ding“ beispielsweise gibt es als solches nicht. Es gibt nur das Licht, das auf etwas trifft, und meinen Wahrnehmungsapparat, der daraus den Sinneseindruck „blau“ macht. Am Theater habe ich mit jemandem gearbeitet, der auf ein Bild eine farbige Projektion legte, die sich ganz langsam veränderte. Entsprechend veränderte das Bild seine Farbigkeit und seinen ganzen Charakter. Das Phänomen ist altbekannt, aber die Projektion hat die Zuschauer aus ihrer vertrauten Sichtweise rausgeholt. Das Bild an sich gibt es nicht, sondern es kann nur in dem Licht, in dem es sich zeigt, wahrgenommen werden.

femto: Die eigene Wahrnehmung infrage stellen und dadurch neue Zugänge zu vermeintlich Altbekanntem schaffen?

Anna Mandel: Für mich als Synästhetikerin ist das ein vertrauter Gedanke. Für mich haben Buchstaben und Töne auch Farben. Für mich ist es Alltag, dass alles miteinander verknüpft ist.

femto: Synästhesie bezeichnet eine angeborene Besonderheit in der Wahrnehmung mancher Menschen: Ein Sinnesreiz ruft neben der „normalen“ Wahrnehmung zusätzliche Sinneempfindungen hervor.

Anna Mandel: Alles, was ich höre, denke, wahrnehme, ist farbig. Ich habe zum Beispiel mit einem Cellisten zusammengearbeitet, der auf der Bühne Bach-Suiten gespielt hat, während ich auf dazu vorbereiteten Leinwänden gemalt habe, was ich zu der Musik sehe. Ähnlich wie ein Notat auf einer Leinwand. Die Zuschauer konnten diesen Prozess verfolgen. Es waren auch Kinder dabei – die fanden es völlig normal, dass die Sonate auf einmal diese Farbkomposition ist.

femto: Für die meisten Erwachsenen ist das schwerer nachvollziehbar. Und doch entspricht es eigentlich nur der Tatsache, dass unsere Sinneseindrücke immer auch subjektiv sind.

Anna Mandel: Die Vorstellung der modernen Physik, dass sich die gewohnten Grenzen aufheben – wie in der Welle/Teilchen-Diskussion –, gehört zu meiner alltäglichen Wahrnehmung. Die Grenzen zwischen Hörbarem, Sichtbarem und Gefühlichem sind fließend. Etwas nur zu hören, ist für mich eine unvorstellbare Vorstellung, weil ich ja das Gehörte auch sehe. Alles ist durch Licht, reales und imaginäres, geprägt.



Musik ist farbig. „Der Wassermann“ von Anna Mandel ist die farbige Interpretation des gleichnamigen Liedes von Robert Schumann. Es gehört zu einem Zyklus von 16 Bildern zu 16 Liedern für das Konzert „FarbTöne“.



Bild: Jochen Ouast

Anna Mandel hat Philosophie und Bildhauerei studiert und arbeitet als freie Künstlerin und Illustratorin in Hamburg. Als Synästhetikerin hat sie ein ganz besonderes Empfinden dafür, wie subjektiv Sinneseindrücke sind. In ihren Werken schafft sie neue Verknüpfungen und Zugänge zu Bestehendem. Bilder von Anna Mandel sind in ihrem Showroom zu sehen:

<http://showroom.annamandel.de>

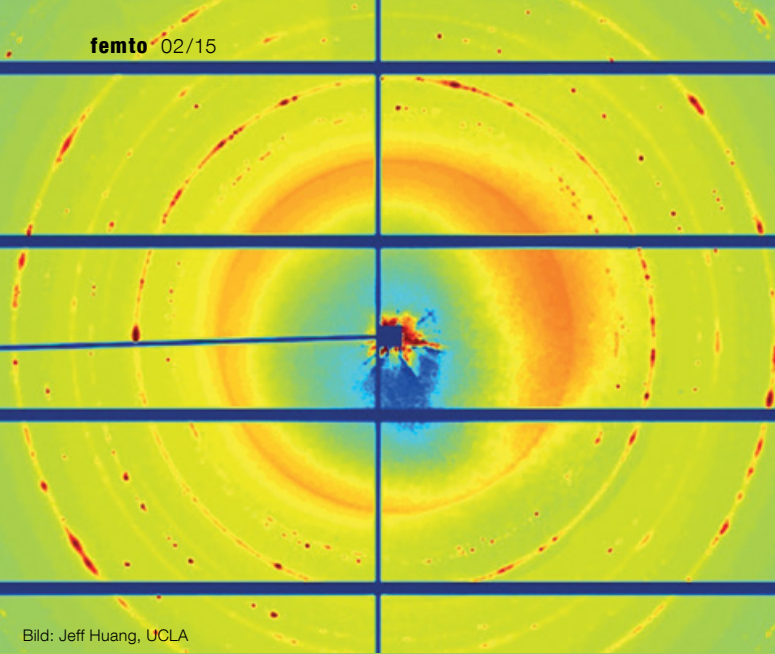


Bild: Jeff Huang, UCLA

Gefilmter Film

Forscher beobachten Fotobelichtung auf der Nano-Ebene

Ein internationales Forscherteam hat an DESYs heller Röntgenquelle PETRA III die Belichtung eines Fotopapiers auf der Ebene einzelner Nanokristalle beobachtet. Die Messungen zeigen, wie sich die lichtempfindlichen Körnchen in der fotografischen Emulsion verformen, drehen und schließlich zerfallen. Die ausgefeilte Untersuchungstechnik ermöglicht die Millisekundengenaue Untersuchung eines breiten Spektrums chemischer und physikalischer Prozesse in Materialien.

Fotoinduzierte chemische Reaktionen spielen in zahlreichen grundlegenden Prozessen und Technologien eine Rolle, von der Energieumwandlung in der Natur bis zur Mikrofertigung mit Hilfe der Fotolithografie. Ein Beispiel, das sich sogar mit bloßem Auge verfolgen lässt, ist die Belichtung fotografischer Filme. Die Forscher untersuchten die Vorgänge während der Belichtung auf der Ebene der sogenannten Nanokristallite, der lichtempfindlichen Körnchen in der Emulsion.

Der außergewöhnlich helle Strahl von PETRA III zusammen mit einem Hochgeschwindigkeits-Röntgendetektor erlaubte es, diese Prozesse mit einer Zeitauflösung von bis zu fünf Millisekunden (tausendstel Sekunden) zu „filmen“. „Erstmals haben wir die Korndrehung und Gitterdeformation während einer fotoinduzierten chemischen Reaktion beobachtet“, betont Jianwei Miao von der Universität von Kalifornien in Los Angeles. „Wir waren überrascht, wie schnell einige dieser einzelnen Körner rotieren“, ergänzt DESY-Forscher Michael Sprung. „Manche drehen sich fast einmal in zwei Sekunden.“

Nature Materials, 2015; DOI: 10.1038/NMAT4311

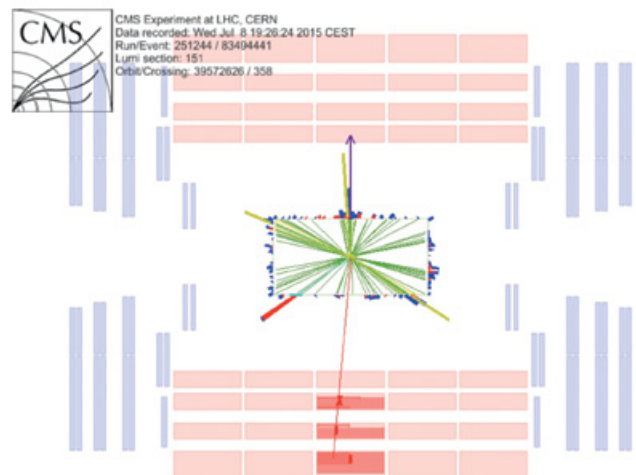
Das Röntgenstreubild enthält detaillierte Informationen über die Nanostruktur des fotosensitiven Films.

Das Standardmodell bleibt gültig

Erste Tests bei neuer LHC-Kollisionsenergie

Kurz nach dem Beginn der zweiten Laufzeit des Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf haben DESY-Wissenschaftler in Zusammenarbeit mit ihren Kollegen der Experimente CMS und ATLAS einen ersten wichtigen Test des Standardmodells der Teilchenphysik bei der neuen Kollisionsenergie von 13 Tera-Elektronenvolt bekanntgegeben. Sie haben dazu Daten von Proton-Proton-Kollisionen bei bisher unerreichten Strahlenergien verwendet und darin die Produktionsrate eines bekannten Teilchens analysiert, des Top-Quarks, um zu sehen, ob es sich bei höheren Energien vielleicht anders verhält. Ihr Ergebnis: Bisher verhält es sich wie vorhergesagt.

Das Top-Quark ist das schwerste bekannte Elementarteilchen. Es wiegt sogar mehr als das 2012 entdeckte Higgs-Teilchen und könnte deshalb eine besondere Beziehung zu ihm haben. Um dies zu verstehen und herauszufinden, ob sich das Top-Quark tatsächlich so verhält, wie von der Theorie vorhergesagt, untersuchen es Teilchenphysiker am LHC sehr genau. Eine dieser Studien konzentriert sich auf die Produktionsrate von Top-Quark-Paaren im neuen Energiebereich. „Die Resultate stimmen gut mit unseren Erwartungen überein. Dies ist ein weiterer riesiger Erfolg des Standardmodells“, betont DESY-Forscher Alexander Grohsjean.



Blick auf einen Kandidaten für Top-Quark-Produktion im CMS-Detektor

Meilenstein für das CSSB

Interdisziplinäres Zentrum für Strukturelle Systembiologie feiert Richtfest

Am 9. September wurde bei DESY das Richtfest für das Forschungsgebäude des Centre for Structural Systems Biology (CSSB) gefeiert. Hamburgs Wissenschaftssenatorin Katharina Fegebank, Karl Eugen Huthmacher vom Bundesforschungsministerium, Schleswig-Holsteins Forschungsministerin Kristin Alheit und DESY-Direktor Helmut Dosch feierten diesen wichtigen Meilenstein zusammen mit Gründungsdirektor Matthias Wilmanns und Vertretern der neun am CSSB beteiligten Forschungseinrichtungen. Ab 2017 soll das CSSB

in einem einzigartigen interdisziplinären Ansatz bakterielle und virale Infektionen erforschen. Dafür werden die neuartigen Lichtquellen bei DESY und die sogenannte Kryo-Elektronenmikroskopie im zukünftigen CSSB-Gebäude eingesetzt.

„Das CSSB ist schon jetzt eine exzellente Forschungseinrichtung. Durch den Neubau werden die Rahmenbedingungen noch besser. Enger Austausch zwischen den vielen Disziplinen, kurze Wege und die Teilchenbeschleuniger von DESY direkt vor der Tür. Das sind alles Dinge, die die Infektions- und Immunitätsforschung weiter nach vorne bringen und zum weltweiten wissenschaftlichen Renommee der Metropolregion beitragen“, sagte Senatorin Fegebank.

„Mit dem CSSB ist ein Magnet für innovative Forscherinnen und Forscher der Struktur- und Systembiologie entstanden“, erklärte Ministerin Alheit. „Damit sind die besten Voraussetzungen dafür geschaffen, um norddeutsche Exzellenz insbesondere in der Infektionsforschung gemeinsam weiterzuentwickeln.“



Feierten die Fertigstellung des Rohbaus (v. l.): Matthias Wilmanns, Karl Eugen Huthmacher, Kristin Alheit, Helmut Dosch und Katharina Fegebank.

IceCube erspäht weitere kosmische Neutrinos

Südpol-Detektor bestätigt Ursprung energiereicher Neutrinos außerhalb des Sonnensystems

Das Südpol-Observatorium IceCube hat weitere Neutrinos aus den Tiefen des Weltalls registriert und bestätigt damit den kosmischen Ursprung der energiereichsten dieser geisterhaften Elementarteilchen. „Dank der Kombination mehrerer unabhängiger Datensätze können wir jetzt nicht nur sagen 'Hurra, wir haben Neutrinos gesehen!', sondern auch mit hoher Genauigkeit vermessen, wie das Energiespektrum dieser Teilchen aussieht und wie hoch der relative Anteil verschiedener Arten von Neutrinos ist, die aus dem Weltraum zu uns kommen“, erläutert Markus Ackermann, einer der an der Studie beteiligten DESY-Wissenschaftler. „Dies gibt uns Hinweise auf ihren Ursprung und die physikalischen Prozesse, welche die Neutrinos im Universum erzeugen“, ergänzt Lars Mohrmann, der die Kombination der Datensätze im Rahmen seiner Doktorarbeit bearbeitet hat.

Neutrinos sind subatomare Teilchen, die sich quasi ungehindert von Materie durch das Universum bewegen. Ihre Spuren zeigen dadurch direkt auf ihre Quellen. Für extrem hoch-energetische Neutrinos wird erwartet, dass diese Quellen die extremsten Bedingungen im Universum besitzen: riesige Schwarze Löcher oder gewaltige Sternexplosionen.

Physical Review Letters, 2015; DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.081102
The Astrophysical Journal, 2015; <http://arxiv.org/abs/1507.03991>

Spur eines kosmischen Neutrinos im IceCube-Detektor

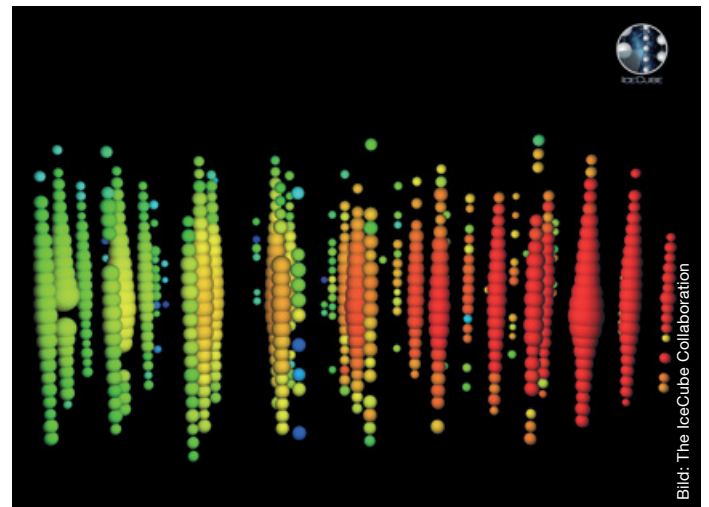
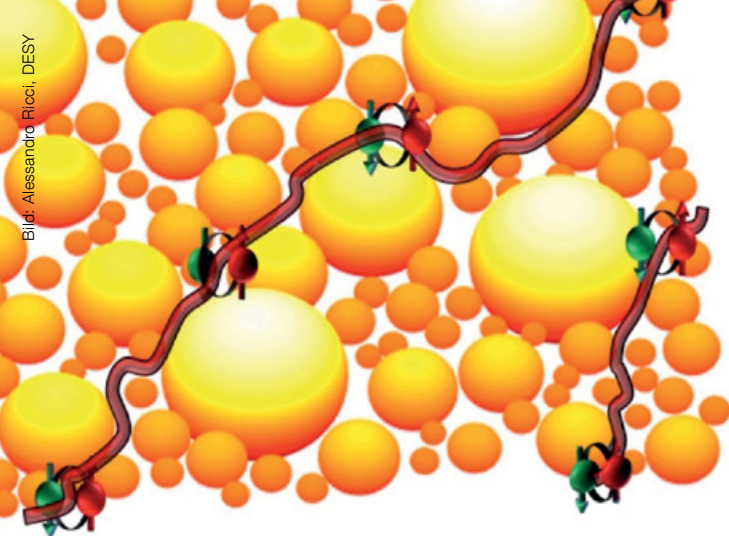


Bild: The IceCube Collaboration



Der supraleitende Strom (rot) läuft durch den Raum zwischen den Elektronen-Tümpeln im elektronischen Kristall.

Elektronen-Tümpel

Röntgenuntersuchung verbessert Verständnis von Hochtemperatur-Supraleitern

Keramische Supraleiter besitzen eine überraschende Struktur. Das hat ein internationales Forscherteam mit Hilfe energiereicher Röntgenstrahlung entdeckt. In diesen sogenannten Hochtemperatur-Supraleitern sammeln sich Elektronen in Tümpeln unterschiedlicher Größe, die quer durch das gesamte Material vorkommen. Mit dieser Beobachtung hoffen die Wissenschaftler, dem mikroskopischen Ursprung der Hochtemperatur-Supraleitung auf die Spur zu kommen, der bislang nicht genau verstanden ist.

Supraleiter sind Materialien, die elektrischen Strom völlig verlustfrei leiten können. Diese Eigenschaft macht sie grundsätzlich für ein breites Spektrum von Anwendungen interessant. Bestimmte keramische Materialien müssen weniger stark tiefgekühlt werden als die klassischen Supraleiter. Einen solchen Hochtemperatur-Kuprat-Supraleiter analysierten die Forscher und entdeckten, dass die Elektronen bei minus 20 Grad Celsius beginnen, winzige Tümpel zu formen. „Wir haben entdeckt, dass die Größe dieser Tümpel stark variiert, wie die Bruchstücke eines geschmolzenen Eisbergs oder wie die Dampfblasen in einem kochenden Wassertopf“, erläutert DESY-Forscher Alessandro Ricci. „Die Ergebnisse eröffnen neue Wege für das gezielte Design von supraleitenden Materialien und könnten auf diese Weise die Suche nach einem Zimmertemperatur-Supraleiter voranbringen.“

Nature, 2015; DOI: 10.1038/nature14987

Hochdruck-Weltrekord

Forscher quetschen Osmium aus

Ein internationales Forscherteam unter Leitung der Universität Bayreuth und mit Beteiligung von DESY-Wissenschaftlern hat den höchsten statischen Druck erzeugt, der jemals in einem Labor erreicht worden ist. Mit einer speziellen Diamantstempelzelle untersuchten die Forscher das Verhalten des Metalls Osmium bei Drücken von bis zu 770 Gigapascal (GPa) – das entspricht dem 7,7-milliardenfachen Druck der Atmosphäre und mehr als dem doppelten Druck im Erdkern. Der neue Rekorddruck liegt 130 GPa höher als der vorige Weltrekord, der ebenfalls von Mitgliedern dieses Teams aufgestellt worden war. Überraschenderweise

ändert Osmium im Gegensatz zu anderen Materialien seine Kristallstruktur nicht einmal unter solchen Rekorddrücken, allerdings zwingt der Hochdruck die inneren Elektronen zur Wechselwirkung.

Dieses grundlegende Ergebnis hat große Bedeutung für das Verständnis der Physik und Chemie in extrem komprimierter Materie, für das Design von Materialien für Extrembedingungen sowie für mathematische Modelle des Inneren von großen Planeten und Sternen. „Unsere Arbeit zeigt, dass ultrahoher statischer Druck die inneren Elektronen zu einem Wechselspiel zwingen kann“, erläutert Natalia Dubrovinskaia von der Universität Bayreuth. „Die Möglichkeit, die inneren Elektronen selbst in solch inkompressiblen Metallen wie Osmium in Experimenten mit statischem Hochdruck zu beeinflussen, bietet spannende Perspektiven für die Suche nach neuen Zuständen der Materie.“

Nature, 2015; DOI: 10.1038/nature14681

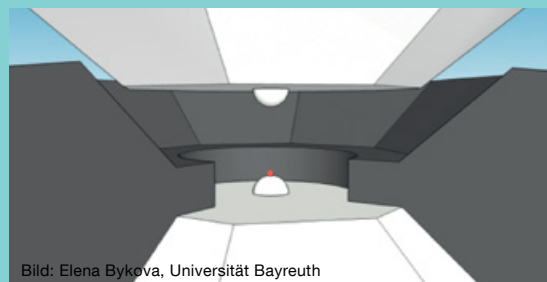


Bild: Elena Bykova, Universität Bayreuth

Schemazeichnung der Stempelzelle: Die Osmium-Probe (roter Punkt) misst nur drei Mikrometer und sitzt zwischen zwei Halbkugeln aus nanokristallinem Diamant.



Natalia Dubrovinskaia und Leonid Dubrovinsky an einem Mikromanipulator, mit dem die Proben für die Untersuchung vorbereitet werden.

Rekonstruktion des Röntgenfokus der Linse.
An der Taille erreicht der Fokus eine Größe
von nur noch acht Nanometern.

Neuartige Röntgenlinse

Innovatives Konzept ermöglicht starke
Bündelung von Röntgenstrahlung

Eine neuartige Röntgenlinse liefert schärfere und hellere Bilder aus dem Nanokosmos. Die Linse kann dank eines innovativen Konzepts besonders viel Röntgenstrahlung scharf bündeln und erreicht auf diesem Weg eine hohe räumliche Auflösung und eine hohe Lichtstärke. Die Linse besitzt eine spezielle Nanostruktur, für deren Herstellung die Wissenschaftler unter Leitung von DESY-Forscherin Saša Bajt einen neuen Produktionsprozess mit atomgenauer Präzision entwickelt haben.

„Für die Untersuchung des Nanokosmos verwendet man Röntgenstrahlung, weil sie viel feinere Details zeigen kann als sichtbares Licht, und weil sich mit ihr ins Innere von Objekten hineinschauen lässt“, erläutert Bajt. Die Feinheit der Details, die sich erkennen lassen, hängt grundsätzlich von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung ab. Röntgenstrahlung hat sehr kurze Wellenlängen zwischen 0,01 und 1 Nanometer (millionstel Millimeter). Die hohe Eindringtiefe von Röntgenstrahlung ermöglicht die dreidimensionale Tomographie von Objekten wie biologischen Zellen, Computerchips oder Nanomaterialien. Die hohe Eindringtiefe bedeutet allerdings auch, dass Röntgenstrahlung durch konventionelle Linsen einfach hindurchfliegt, ohne gebeugt oder fokussiert zu werden.

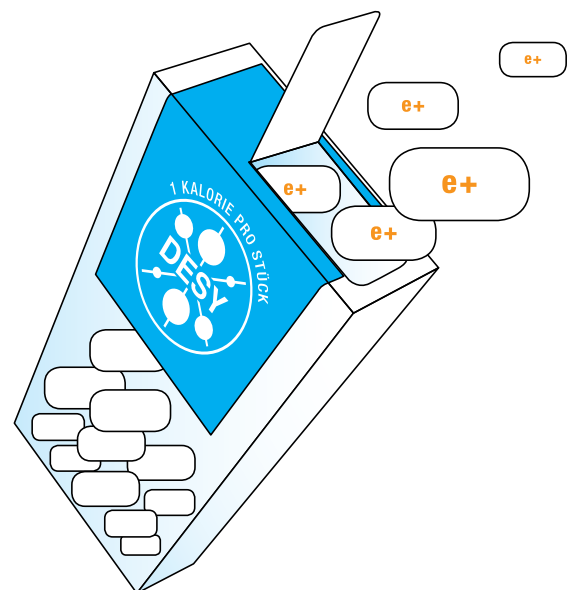
Bajts Team hat einen neuen Produktionsprozess für sogenannte Multischicht-Linsen entwickelt. „Die Ergebnisse belegen, dass unsere Fabrikationstechnik Linsen mit hoher Fokussierungskraft liefern kann. Wir sind überzeugt, dass wir mit unserer Methode sogar noch bessere Linsen erreichen können“, sagt Bajt. „Das seit langem verfolgte Ziel, Röntgenstrahlung auf einen Nanometer zu fokussieren, scheint nun erreichbar.“

femtomenal

Machen Positronen dick?

Eine ganze Kilokalorie – so viel Energie steckt nicht nur in einem zuckerfreien tic tac-Pfefferminzdragee, sondern auch in der Menge Positronen, die DESYs Teilchenbeschleuniger pro Jahr erzeugt haben. Das entspricht einer jährlichen Menge von 46 Pikogramm Positronen. Ein Pikogramm ist ein Billionstel Gramm und damit ein unvorstellbar winziger Bruchteil von einem tic tac, das ein halbes Gramm Gewicht auf die Waage bringt.

In den vergangenen 40 Jahren hat DESY dementsprechend Positronen mit einem Energiegehalt von insgesamt 40 Kilokalorien und einem Gewicht von 1,8 Nanogramm (milliardstel Gramm) erzeugt. Als Nährwert ist dies zu vernachlässigen, aber für die Forschung äußerst ertragreich. Positronen sind die Anti-Teilchen der Elektronen, und beide Teilchensorten eignen sich hervorragend, um den Geheimnissen der Materie auf den Grund zu gehen. Hier gilt ganz klar: Klasse statt Masse!



Vielversprechende Entzündungshemmer

Forscher bestimmen erstmals molekulare Struktur sogenannter Spiegelmerer



Christian Betzel ist Professor an der Universität Hamburg und forscht in der Infektionsbiologie.

Spiegelmerer sind eine neue Gruppe von medizinisch vielversprechenden Wirkstoffen. Als Entzündungshemmer befinden sie sich bereits in der klinischen Erprobung. Doch um einen solchen Wirkstoff gezielt zu optimieren, muss zunächst der genaue Wirkmechanismus aufgeklärt werden. An DESYs Röntgenquelle PETRA III haben Forscher erstmals die räumliche Struktur von zwei Molekülen aus der Gruppe der Spiegelmerer entschlüsselt, um ihre Funktion besser zu verstehen. Wissenschaftler der Universitäten Hamburg und Aarhus (Dänemark) haben dazu mit der Berliner Biotech-Firma NOXXON zusammengearbeitet.

Spiegelmerer beruhen auf Bausteinen der Nukleinsäuren (RNA oder DNA), die im Organismus verschiedene Aufgaben erfüllen, etwa die Speicherung und Übertragung von Erbinformationen oder die Regulierung von Genen. Künstlich hergestellte RNA- oder auch DNA-Moleküle, sogenannte Aptamere, können sehr spezifisch an bestimmte Eiweißmoleküle (Proteine) binden und damit deren Funktion blockieren. Gleichzeitig werden sie vom Organismus toleriert, da sie aus natürlichen Bausteinen aufgebaut sind. Aptamere gelten daher als Erfolg versprechende medizinische Wirkstoffkandidaten. Seit 2006 ist bereits ein Aptamer zur Behandlung der altersbedingten Makula-Degeneration (AMD) zugelassen, einer Augenkrankheit, die zu Blindheit führen kann.

RNA- und DNA-Moleküle werden im Körper in der Regel sehr schnell abgebaut, was den Einsatz als medizinische Wirkstoffe stark einschränkt. Allerdings existieren von den meisten Biomolekülen zwei spiegelbildliche Varianten, eine L-Form und eine D-Form. RNA kommt im Organismus stets nur in der D-Form vor, Proteine dagegen nur in der L-Form. Erzeugt man im Labor Aptamere in der L-Form, werden diese vom Organismus nicht abgebaut. Diese spiegelbildli-

chen L-Aptamere heißen Spiegelmerer. „Ein Vorteil ist, dass Spiegelmerer nicht von körpereigenen Enzymen angegriffen werden“, erläutert Christian Betzel von der Universität Hamburg.

„Ein Vorteil ist, dass Spiegelmerer nicht von körpereigenen Enzymen angegriffen werden“

Christian Betzel, Universität Hamburg

„Spiegelmerer werden im Labor über ein ausgeklügeltes evolutives Verfahren identifiziert und optimiert. Allerdings gab es bislang keinerlei Strukturinformationen von Spiegelmerern“, betont Dominik Oberthür vom Center for Free-Electron Laser Science CFEL. Wäre die räumliche Struktur eines Spiegelmerers zusammen mit der Bindungsstelle an seinem Zielprotein bekannt, ließe sich der genaue Wirkmechanismus aufklären und bei Bedarf die Form des Wirkstoffs optimieren.

Das Team um Betzel hat mit dem hellen Röntgenlicht von PETRA III nun ein Spiegelmerer der Firma NOXXON mit der Bezeichnung NOX-E36 analysiert. Es hemmt ein Protein namens CCL2, das an zahlreichen Entzündungsprozessen im Körper beteiligt ist. „Wenn man so ein Entzündungsprotein gezielt mit einem Spiegelmerer blockiert, hat man gute Chancen, die Entzündung im Körper herunterzufahren“, erläutert Betzel. NOX-E36 ist bereits erfolgreich in einer sogenannten Phase-IIa-Studie mit Patienten getestet worden.

Für die Strukturanalyse des neuartigen Wirkstoffs züchteten die Wissenschaftler zunächst Kristalle aus dem Spiegelmerer und dem daran

gebundenen Protein CCL2. „Die Kristallisation war eine Herausforderung“, berichtet Betzel. Denn die meisten Biomoleküle lassen sich nur schwer kristallisieren, weil das ihrer natürlichen Funktion widerspricht.

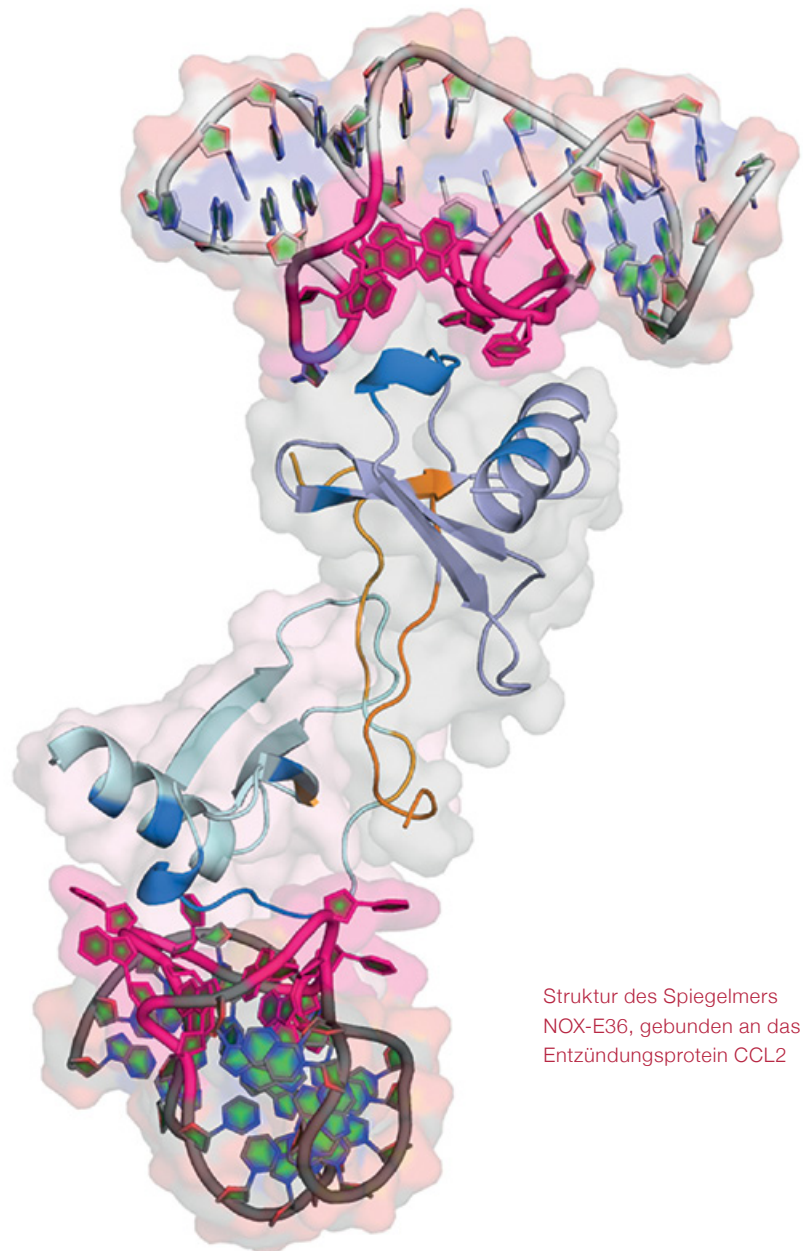
Wird so ein Kristall mit Röntgenlicht beleuchtet, entsteht ein charakteristisches Beugungsmuster, aus dem sich die Struktur der Biomoleküle errechnen lässt – in diesem Fall also die Form des Spiegelmers, gebunden an sein Zielmolekül. Auf dieselbe Weise analysierte eine Gruppe um Laure Yatime von der Universität Aarhus ein zweites Spiegelmer: NOX-D20 koppelt an das Protein C5a, das ebenfalls an zahlreichen Entzündungsprozessen beteiligt ist.

„Die Strukturdaten liefern uns ein tieferes Verständnis der Funktionsweise beider Moleküle“

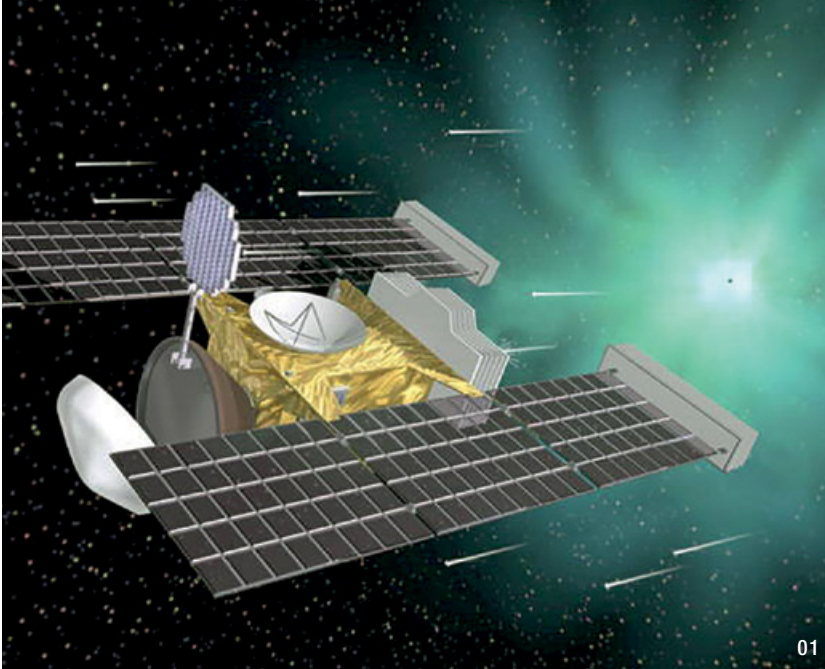
Sven Klussmann, NOXXON

Die Analysen zeigen die räumliche Struktur der beiden Spiegelmer mit einer Detailgenauigkeit von 0,2 Nanometern (millionstel Millimetern), das ist in der Größenordnung einzelner Atome. „Ich bin begeistert, endlich eine hochauflösende Visualisierung der bemerkenswerten Formen von zwei Spiegelmer-Wirkstoffkandidaten zu haben“, betont der Gründer und wissenschaftliche Leiter von NOXXON, Sven Klussmann. „Die Strukturdaten liefern uns nicht nur einen ersten Einblick in die ungewöhnliche Wechselwirkung zwischen einem Spiegel-Oligonukleotid und einem natürlichen Protein, sondern auch ein tieferes Verständnis der Funktionsweise beider Moleküle.“

Nature Communications, 2015; DOI: 10.1038/ncomms7923
Nature Communications, 2015; DOI: 10.1038/ncomms7481



Struktur des Spiegelmers NOX-E36, gebunden an das Entzündungsprotein CCL2



Sternenstaub im Labor

DESY-Physikerin Saša Bajt untersucht kosmische Materieproben

Normalerweise entwickelt die DESY-Physikerin Saša Bajt Röntgenoptiken und erfindet intelligente Lösungen, um biologische Proben im Strahl von Röntgenlasern zu platzieren. Nebenbei erkundet Bajt aber auch das Weltall: als Expertin für die Untersuchung von kosmischem Staub. Sie gehört einem Team an, das winzige Fragmente des Asteroiden Itokawa analysiert, die im Rahmen der japanischen Hayabusa-Mission zur Erde geholt wurden. Zuvor hatte Bajt an der Analyse der ersten Kometen- und interstellaren Staubproben mitgewirkt, die jemals auf die Erde geholt wurden.

femto: Wie fängt man Sternenstaub?

Saša Bajt: Interstellarer Staub ist per Definition Staub, der außerhalb unseres Sonnensystems entstanden ist,

wahrscheinlich durch die Explosion eines sterbenden Sternes bei einer Supernova. Er ist nicht besonders häufig in unserem Sonnensystem anzutreffen. 1999 hat die US-Raumfahrtbehörde NASA die Sonde „Stardust“ auf die Reise geschickt, um den Schweif des Kometen Wild-2 zu durchfliegen und Kometenstaub einzusammeln. Auf dem Weg zum Kometen hat die Sonde außerdem fast 200 Tage lang einen Kollektor mit sogenanntem Aerogel – einem extrem leichten Stoff auf Silikatbasis, der oft als gefrorener Rauch bezeichnet wird – in den freien Raum gehalten, in der Hoffnung, interstellaren Staub einzufangen.

femto: Und das hat funktioniert?

Bajt: Ja. Der tennisschlägerartige, auf beiden Seiten mit Aerogel gefüllte Kollektor diente dazu, die Partikel

abzubremsen und einzufangen. Auf dem Hinweg zum Kometen wurde die eine Seite des Kollektors hinausgehalten, um interstellaren Staub einzufangen. Als die Sonde dann den Kometenschweif durchflog, wurde der Kollektor umgedreht und sammelte Kometenstaub ein. Bei der Mission wurden ziemlich viele Kometenteilchen eingesammelt, einige davon so groß, dass man sie mit bloßem Auge sehen kann. Auf der Seite mit dem interstellaren Staub war es ganz anders. Nach intensiver, jahrelanger Fahndung haben wir bislang sieben Teilchen gefunden, die interstellaren Ursprungs sein könnten. Diese Teilchen wären damit die erste interstellare Materie, die im Weltraum gesammelt und zur Laboranalyse auf die Erde geholt wurde.

femto: Wie groß sind diese Sternenstaubkörnchen?

Bajt: Seit dem „Apollo“-Programm war dies die erste Mission, die Proben sammelt und zur Erde zurückbringt. „Apollo“ brachte Material vom Mond, aber wir reden hier über hunderte Kilo Material. „Stardust“ war im Vergleich dazu eine kostengünstige Mission, und es war von Anfang an klar, dass die zurückgebrachten Mengen äußerst gering sein würden. Die Sonde hat über eintausend Kometenteilchen eingefangen, die vollständige Anzahl der interstellaren Staubpartikel ist noch nicht bekannt. Von Kometen stammende Teilchen haben normalerweise ein Durchmesser von einigen Tausendstel bis einigen hundertstel Millimetern, wogegen interstellarer Staub nur einen Bruchteil eines Mikrometers groß ist.

femto: Wie geht man mit etwas so Empfindlichem um?

Bajt: Das ist eine gute Frage. Erst nachdem die Rakete gestartet war, fingen die Leute ernsthaft an, darüber nachzudenken, wie man die im Aerogel gefangenen Partikel

handhaben, aufspüren und analysieren könnte. Niemand wusste, ob das Aerogel überhaupt durchsichtig bleiben würde, nachdem es dem Weltall ausgesetzt gewesen war, und ob wir die Teilchen und ihre Spuren würden sehen können. Am Weltraumlabor der Universität von Kalifornien in Berkeley entwickelte Andrew Westphal mit seinem Team ein Verfahren, mit dem man winzige Stückchen Aerogel herauszuschneiden kann, die Einschlagspuren und Partikel enthalten. Diese sogenannten Piko-Keystones werden von einer winzigen Gabel gehalten. Die Handhabung des Aerogels ist ziemlich schwierig – man muss die Luft anhalten, während man den Stoff bewegt. Später hat die NASA eigens ein spezielles Labor in Houston eingerichtet, in dem mithilfe dieses Verfahrens Proben hergestellt und auf verschiedene Labore verteilt wurden.

femto: Und was ergab die Analyse?

Bajt: Ich habe bei diesen Proben ein mikroskopisches Verfahren eingesetzt, das auf Synchrotronstrahlung im Infrarotbereich beruht und sich hervorragend dazu eignet, organische Moleküle aufzuspüren. Wir gingen davon aus, dass die Kometenteilchen aus amorphen Silikaten bestehen, die in Eis und organischem Material eingehüllt sind. Doch obwohl die Teilchen reich an Sauerstoff und Stickstoff waren, enthielten sie nur relativ einfache organische Moleküle. Überraschenderweise besaßen viele der Körnchen kristallines Material, mit einer sehr vielfältigen Mischung von Mineralien, von denen einige nur bei hohen Temperaturen entstehen können. Dadurch hat sich unser Bild davon, wie Kometen und wie unser Sonnensystem entstanden sind, tatsächlich verändert.

femto: Inwiefern?

Bajt: Die Standardtheorie geht davon aus, dass sich der solare Urnebel



02

langsam zusammengeballt hat, um Planeten zu bilden, und dass aus dem restlichen Material am eisigen Rand des Sonnensystems Kometen entstanden. Aber nun scheint es, dass unser Sonnensystem viel turbulenter gewesen ist und schon im Frühstadium eine Durchmischung stattgefunden hat. Selbst Material, von dem wir dachten, es wäre gefroren und unberührt, muss irgendwo einem Prozess unterworfen gewesen sein, in dem hohe Temperaturen herrschten und sich entsprechende Mineralien bilden konnten. Allerdings wissen wir nicht, ob das, was wir bei diesem Kometen festgestellt haben, auch für andere Kometen gilt, oder ob dieser Komet etwas Besonderes ist. Es ist eben schwierig, allgemeine Schlussfolgerungen zu ziehen, wenn man nur das Material aus einem einzelnen Kometen hat.

femto: Wie sieht es mit den Kandidaten für interstellaren Staub aus?

Bajt: Nachdem die vorläufigen Untersuchungen der Kometenteilchen beendet waren, beschloss ein Teil des Teams, am interstellaren Staub weiterzuarbeiten. Es gab keine speziellen Forschungsmittel für dieses Projekt, und die Forscher haben die meiste Arbeit dafür freiwillig und ehrenamtlich geleistet. Aber um überhaupt anfangen zu können, mussten wir zunächst interstellaren Staub finden, und das erschien nahezu unmöglich. Da hatte Andrew die geniale Idee, die Öffentlichkeit einzuspannen, um uns dabei zu helfen.



03



04

01 Künstlerische Darstellung von „Stardust“ beim Flug durch den Kometenschweif

02 NASA-Forscher Peter Tsou mit einem Block Aerogel

03 Partikelspur im Aerogel

04 Die „Stardust“ – Kapsel nach der Landung auf der Erde

femto: Also ein Bürgerwissenschaftler-Projekt?

Bajt: Ja, es wurde ein „Citizen Science“-Projekt daraus. Millionen von Mikroskopaufnahmen der Aerogelmatrix wurden auf der Internetseite Stardust@home veröffentlicht, dazu Anweisungen, wonach wir suchen. Die Reaktion war überwältigend! Mehr als 30 000 Freiwillige durchkämmten die Bilder und markierten Merkmale, bei denen es sich um Einschlagspuren handeln könnte. Wir hätten unvorstellbar lange gebraucht, um das alleine zu bewältigen. Als wir unsere ersten Auswertungen veröffentlichten, wurden alle 30 000 Bürgerwissenschaftler als Koautoren genannt. Das Projekt läuft übrigens immer noch, und jeder, der uns helfen möchte, die



Saša Bajt ist Leiterin der Multilayer X-ray Optics Group bei DESY, in der neuartige Optiken für moderne Röntgenquellen entwickelt werden. Außerdem leitet sie die Entwicklung von neuen Methoden, um Protein-Nanokristalle und andere biologische Proben im Strahl von Röntgenlasern und Synchrotronquellen zu platzieren. Promoviert hat Bajt an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg und am Max-Planck-Institut für Kernphysik, danach arbeitete sie an der Universität Chicago und am Lawrence Livermore National Laboratory, bevor sie zu DESY kam. Seit langem interessiert sie sich auch für die Untersuchung von extraterrestrischem Material.

winzigen Einschlagsspuren interstellarer Staubpartikel aufzuspüren, ist herzlich dazu eingeladen.

Die markierten Bilder werden dann von Wissenschaftlern überprüft, und vielversprechende Spuren werden entnommen und analysiert. Bislang haben wir auf diese Weise drei Kandidaten im Aerogel gefunden, bei denen es sich um interstellaren Staub handeln könnte. Außerdem sucht ein Team um Rhonda Stroud vom Naval Research Lab nach Einschlagsspuren im Aluminiumrahmen des Kollektors. Wenn sie einen Kandidaten entdecken, analysieren sie die Rückstände auf dem Boden des Minikraters nach

deren chemischer und isotopischer Zusammensetzung.

femto: Gab es bei den interstellaren Kandidaten auch organische Stoffe?

Bajt: Wir haben versucht, organische Stoffe in den Einschlagsspuren zu messen, aber das Aerogel selbst enthielt organische Verunreinigungen. Selbst wenn sich organische Moleküle aus dem interstellaren Staub im Aerogel befinden, können wir diese also nicht von der Verunreinigung unterscheiden. Bei anderen Analysen haben wir allerdings jede Menge überraschende Ergebnisse gefunden. Die Partikel haben eine sehr unterschiedliche Struktur und chemische Zusammensetzung. Es handelt sich um lockere Agglomerate von noch kleineren Teilchen, was nicht mit den einfachen Modellvorhersagen übereinstimmt. Bei zwei der vier interstellaren Kandidaten aus dem Aluminiumrahmen wurden außerdem die Sauerstoffisotope analysiert, und dabei stellte sich heraus, dass sie der Zusammensetzung der Sauerstoffisotope im Sonnensystem sehr nahe kommen. Das schließt einen interstellaren Ursprung natürlich nicht aus.

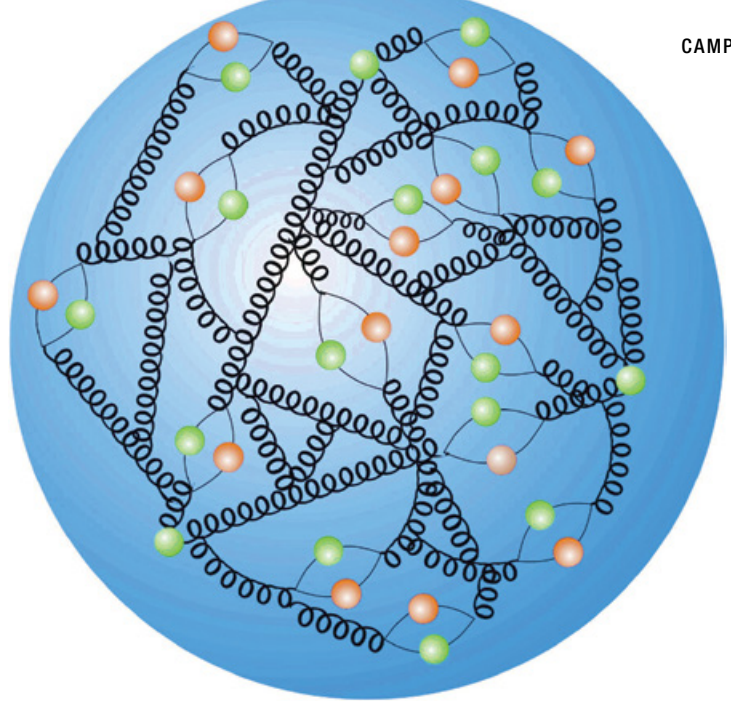
femto: Stammen die sieben Körnchen also aus dem interstellaren Raum?

Bajt: Wir haben keinen hundertprozentigen Beweis dafür, dass sie aus dem interstellaren Raum stammen, aber wir wissen auf jeden Fall, dass diese Teilchen außerirdischen Ursprungs sind. Wir müssen weitere Tests durchführen. Geplant ist, dass zwei der drei Kandidaten, die wir in Aerogel-Spuren gefunden haben, auf die Häufigkeit von Sauerstoffisotopen untersucht werden. Das dritte Teilchen ist leider beim Aufschlag verdampft, so dass es dort nichts zu analysieren gibt. Generell sind die zur Verfügung stehenden Materialmengen so gering, dass es weiterer Verbesserungen der Analyseverfahren bedarf.

femto: Was kommt als Nächstes?

Bajt: Ich habe gerade angefangen, eine neue Art extraterrestrischer Proben zu untersuchen. Diesmal handelt es sich um größere Teilchen mit einem Durchmesser von etwa fünfzig bis einhundert Mikrometern, die die japanische Sonde Hayabusa vom Asteroiden Itokawa mitgebracht hat. Das Team, das von Henner Busemann von der ETH Zürich zusammengestellt wurde, ist viel kleiner und komplett europäisch. Ich verwende erneut meine Mikroskopieverfahren mit Synchrotronlicht im Infrarotbereich, und diese Arbeit findet bei BESSY II in Berlin statt. Die meisten Partikel, die wir uns angeschaut haben, bestehen aus Silikatmineralien, mit kleinen metallischen Einschlüssen. Es wird aber eine Weile dauern, bis wir handfeste Ergebnisse haben.

Das Proton besteht nicht nur aus drei einzelnen Quarks (grün), die von Gluonen (Federn) zusammengehalten werden, sondern es enthält eine „brodelnde Suppe“ aus Gluonen und kurzlebigen Paaren aus Quarks und Antiquarks (orange).



Das schärfste Bild des Protons

HERA-Forscher veröffentlichen umfassende Auswertung ihrer Messergebnisse

Er ist der größte Teilchenbeschleuniger, der in Deutschland je gebaut wurde: In einem unterirdischen, gut sechs Kilometer langen Ringtunnel brachte HERA Elektronen sowie Protonen (Wasserstoffkerne) bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit, um sie mit enormer Wucht aufeinanderprallen zu lassen. Zwar lief das Experimentierprogramm 2007 aus, doch erst jetzt sind die Analysen der umfangreichen Datensätze zu einem vorläufigen Ende gekommen: Die beiden HERA-Teams der Detektoren H1 und ZEUS haben eine gemeinsame, umfassende Auswertung ihrer Messwerte präsentiert. Das Ergebnis: das bislang schärfste Bild des Protons, dem zentralen Baustein des Atomkerns.

Ende der 1970er Jahre hatten DESY-Physiker einen verwegenen Plan geschmiedet – den Bau eines Beschleunigers, der Elektronen und Protonen aufeinander feuert. Ein Novum in der Teilchenforschung – bis dato hatte man nur Ringanlagen gekannt, die Elektronen und Elektronen oder Protonen und Protonen frontal zusammenprallen ließen. „Ein gemischter Betrieb mit Kollisionen zwischen Protonen- und Elektronenstrahlen war absolutes Neuland“, sagt Reinhard

Brinkmann, bei DESY Direktor des Beschleunigerbereichs. „Beispielsweise war unklar, wie sich die beiden Strahlen in jenen Bereichen, in denen sie sich nahekomen, beeinflussen.“

Die zweite Hürde war die Beschleunigung der Protonen. Um sie auf einer Kreisbahn zu halten, bedurfte es starker Magnetkräfte. Diese Kräfte waren einzig durch supraleitende Magnete zu bewerkstelligen, die nur bei Temperaturen nahe des absoluten Temperaturnullpunkts funktionieren – ein technisches Wagnis. „Um HERA konzipieren und bauen zu können, musste fast ganz DESY einbezogen werden“, betont Brinkmann.

1991 war die Maschine fertig – fast pünktlich nach sechseinhalb Jahren Bauzeit. Allerdings dauerte es einige Zeit, bis die Physiker das Zusammenspiel von Elektronen- und Protonenring beherrschten. Anfangs ging es langsamer voran als erhofft, doch allmählich gelang es den Experten, die Zahl der Teilchen in beiden Ringen kontinuierlich zu steigern – und damit die Kollisionsrate und die Ausbeute an Messdaten. 1997 war die angestrebte Zielmarke erreicht. Nach einem Umbau in den Jahren 2000 und 2001 wurde sie deutlich übertroffen.



„Absolutes Neuland“:
Reinhard Brinkmann,
DESY-Direktor des
Beschleunigerbereichs,
blickt auf den Bau von
HERA zurück.



„Überraschend komplex“:
Joachim Mnich, DESY-
Direktor für Teilchen-
und Astroteilchenphysik
kommentiert die
HERA-Ergebnisse.



Bild: David Parker / Science Photo Library, London

Der Teilchenbeschleuniger HERA besteht aus einem Protonenring (oben) und einem Elektronenring (unten).

Ein See aus Gluonen

Vermessen haben die Teilchenkollisionen vor allem zwei haushohe Detektoren – H1 und ZEUS. Im Laufe von 15 Jahren haben sie mehr als zwei Milliarden Teilchenkollisionen erfasst und dadurch ein neues Bild des Protons gezeichnet: „Vor HERA hatte man ein relativ simples Bild des Protons: Es besteht aus drei Quarks sowie einigen Gluonen, die diese Quarks zusammenhalten“, erläutert Joachim Mnich, DESY-Direktor für Teilchen- und Astroteilchenphysik. „HERA hat gezeigt, dass das Proton in Wirklichkeit überraschend komplex ist.“ Bei genauerem Hinschauen zeigten sich weitere Quarks, die für winzige Augenblicke entstanden und wieder vergingen – und zwar in einem regelrechten See aus ebenfalls flüchtigen Gluonen.

Ferner konnte HERA zwei Kapitel des Standardmodells, der heute gängigen Theorie der Teilchenphysik, eindrucksvoll bestätigen. Zum einen wurde die Quantenchromodynamik (QCD) getestet und für richtig befunden. Unter anderem beschreibt sie, wie die Quarks in einem Proton zusammenhalten, mit Gluonen als Klebeteilchen. „Ein sehr wichtiges Ergebnis ist die Messung der QCD-Kopplungskonstante“, erklärt Mnich. „Diese fundamentale Naturkonstante gibt an, wie stark die Kräfte zwischen Quarks wirken, und HERA lieferte einen der genauesten experimentellen Werte.“ Zum anderen hat der Beschleuniger festgestellt, dass sich zwei andere Naturkräfte – die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung – bei hohen Kollisionsenergien tatsächlich zu einer einzigen Kraft zu vereinen scheinen. „Auch hier hat HERA Ergebnisse fürs Lehrbuch geliefert“, sagt Mnich.

HERA und das Higgs-Teilchen

HERAs Resultate sind auch relevant für die aktuellen Experimente am weltweit größten Beschleuniger, dem LHC in Genf. Dieser schießt mit Rekordenergien Protonen aufeinander. Um genau zu verstehen, was bei diesen Zusammen-

stößen passiert, sollte man das Innenleben der Kollisionspartner – also der Protonen – möglichst präzise kennen. „Ohne die Daten von HERA wäre es fast unmöglich, die LHC-Daten im Detail zu verstehen und zum Beispiel die Signale des Higgs-Teilchens aus dem Datenwust herauszufischen“, betont Mnich.

Dagegen blieb eine andere Hoffnung unerfüllt – dass HERA ganz neue, bis dato unbekanntete Teilchen aufspürt, etwa das hypothetische „Leptoquark“. Zwar gab es 1997 einige Aufregung, als die Detektoren Messdaten lieferten, die durch das Standardmodell scheinbar nicht zu erklären waren. „Doch weitere Messungen haben gezeigt, dass es sich nur um statistische Ausreißer handelte“, erzählt Mnich. Die physikalische Revolution war ausgeblieben.

Abgeschlossen aber scheint die Arbeit noch nicht: „Viele Experten aus aller Welt sind noch daran interessiert, die Daten von HERA weiterhin zu analysieren“, sagt Mnich. „Sie glauben, dass man noch mehr aus ihnen herausholen kann.“ Die Voraussetzung ist geschaffen: Mindestens für die nächsten zehn Jahre wird das DESY-Rechenzentrum die Daten in geeigneter Form bereithalten, so dass Physiker aus aller Welt sie für neue Analysen nutzen können.

Auch für Beschleunigerphysiker wie Reinhard Brinkmann brachte HERA wichtige Erkenntnisse: „Die Expertise, die wir für die Supraleitung erworben haben, war für die weitere Entwicklung der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen enorm wichtig.“ Auf dieser Technik basieren heute Anlagen wie FLASH und der europäische Röntgenlaser European XFEL. „Auf diesem Gebiet sind wir mittlerweile weltweit führend“, betont Brinkmann. „Ich bin nicht sicher, ob wir das ohne die Erfahrungen mit HERA geschafft hätten.“

Zwar ist der Beschleuniger seit 2007 eingemottet, die Detektoren sind demontiert. Dennoch könnten Teile des Rings künftig wiederaufstehen – für ein Experiment namens ALPS. Der Plan: In einem der geraden Tunnelsegmente sollen 20 HERA-Magnete nach bislang hypothetischen Teilchen fahnden, sogenannten Axionen. „Dieses Experiment wäre tausendmal empfindlicher als bisherige Versuche“, betont Joachim Mnich. Und das CERN in Genf läugelt sogar mit dem Bau eines HERA-Nachfolger, der deutlich größer wäre als das Hamburger Original: Unter dem Projektnamen LHeC tüfteln einige Experten an Plänen, den bestehenden, 27 Kilometer großen LHC-Ring mit einem Elektronenbeschleuniger zu koppeln. Damit ließe sich das Innere des Protons noch viel genauer erforschen – und womöglich dann doch das ominöse Leptoquark aufstöbern.

femtopolis

Was macht eine Scheune in der Teilchenphysik?

Das „Barn“ und was es mit femto zu tun hat

Für Teilchenphysiker Thomas Schörner-Sadenius ist die Einheit „Barn“ fast so alltäglich wie „Gramm“. Und er jongliert mit Größenordnungen im Femto-Bereich – ein Femto ist ein Tausendstel eines Millionstels eines Millionstels – genauso geübt wie andere mit 250 Gramm Mehl in einem Backrezept.

Für alle Nicht-Physiker ist „barn“ zunächst der englische Begriff für Scheune und hat mit Wissenschaft nicht viel zu tun. Was also macht die Scheune in der Physik? „Als Maßeinheit gibt das Barn den sogenannten Wirkungsquerschnitt an“, erläutert DESY-Forscher Schörner-Sadenius. „In der Teilchenphysik ist der zum Beispiel von Bedeutung, wenn wir Protonen fast bei Lichtgeschwindigkeit kollidieren lassen, um in den Reaktionsprodukten nach spannender neuer Physik zu suchen.“

Ein Proton hat einen Radius von nur 0,000 000 000 001 Metern, das entspricht einem Femtometer.

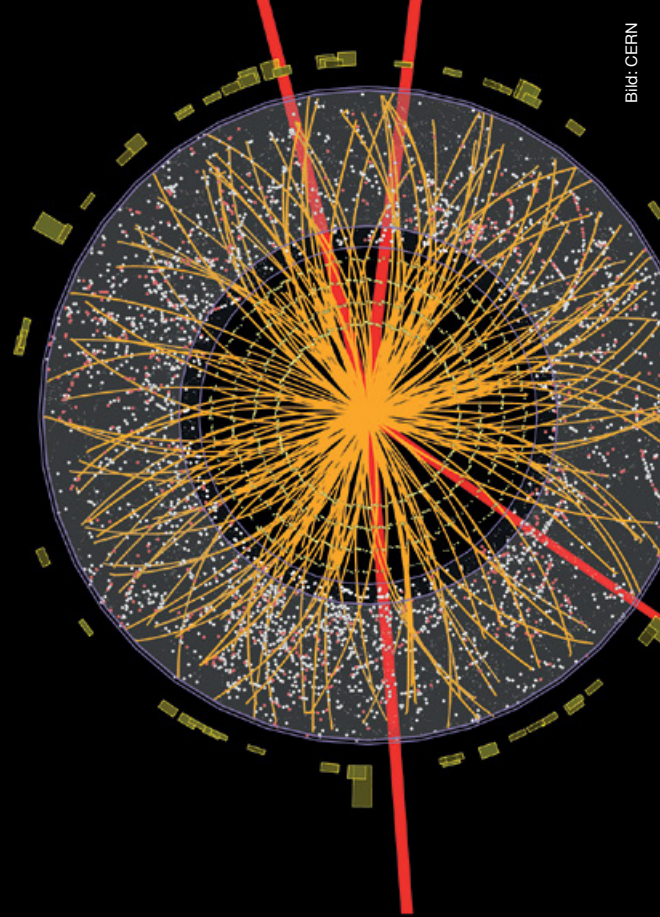
Wie wahrscheinlich ist eine Kollision zwischen so winzigen Teilchen – selbst wenn normalerweise nicht einzelne Protonen, sondern ganze Wolken aus Milliarden Teilchen aufeinander geschossen werden? Entscheidend dafür ist der besagte Wirkungsquerschnitt. „Vereinfacht gesprochen ist es ein Maß für die effektive Fläche, die ein Ziel einem Projektil bietet – also in diesem Fall ein Proton dem anderen Proton,“ sagt Schörner-Sadenius. „Ist diese Fläche groß, dann ist die Wahrscheinlichkeit einer Kollision hoch.“

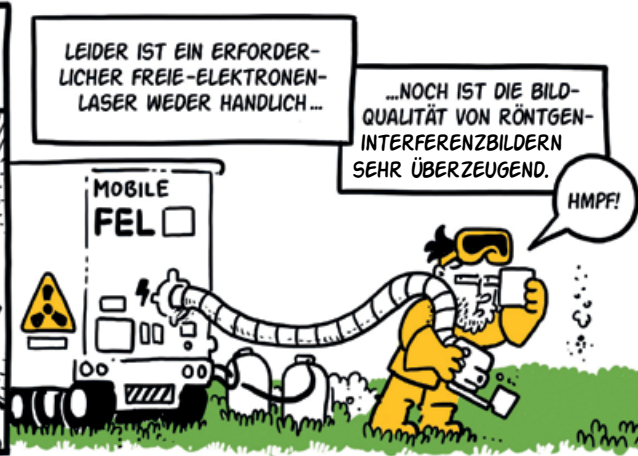
Doch warum Scheune? Wie kommen die Wissenschaftler dazu, eine physikalische Einheit im komplexen Kollisionsgeschehen kleinster Materiebausteine nach Gebäuden im ländlichen Raum zu benennen? Seinen Ursprung hat das Barn in den 1940er Jahren. Damals suchten zwei US-Physiker, die im sogenannten Manhattan-Projekt an der Kernwaffenentwicklung beteiligt waren, nach einem Begriff, um die

Kollisionsspuren im ATLAS-Detektor am LHC

unerwartet hohe Reaktionsrate von Neutronen mit Uran-Atomen zu beschreiben. „Den beiden erschien das Uran-Atom mit seiner im Vergleich zu anderen Teilchen geradezu immensen effektiven Fläche als 'so groß wie eine Scheune',“ sagt Schörner-Sadenius. Der Name etablierte sich, und seitdem ist das Barn das Maß, in dem Wirkungsquerschnitte angegeben werden. Noch bis 1948 unterlagen Begriff und Definition des Barn der Geheimhaltung – es sollte jeder Hinweis auf Studien zur Kernstruktur vermieden werden.

Für Teilchenphysiker Schörner-Sadenius ist die Größenordnung des Neutron-Uran-Wirkungsquerschnitts von 1 Barn weit weg: „Die Wirkungsquerschnitte für interessante Prozesse, wie beispielsweise die Erzeugung von Higgs-Teilchen am LHC, liegen eher im Bereich von Femtobarn – also milliardstel Barn. Wir Teilchenphysiker leben also wirklich in einer Femto-Welt!“





Impressum

femto wird herausgegeben vom
Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY,
einem Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Redaktionsanschrift

Notkestraße 85, D-22607 Hamburg
Tel.: +49 40 8998-3613, Fax: +49 40 8998-4307
E-Mail: femto@desy.de
Internet: www.desy.de/femto
ISSN 2199-5184

Redaktion

Ute Wilhelmsen (v.i.S.d.P.), Till Mundzeck

An dieser Ausgabe hat mitgewirkt

Frank Grotelüschen

Gestaltung und Produktion

Diana von Ilseemann

Titelbild

Heiner Müller-Elsner, Hamburg

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

Oktober 2015

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

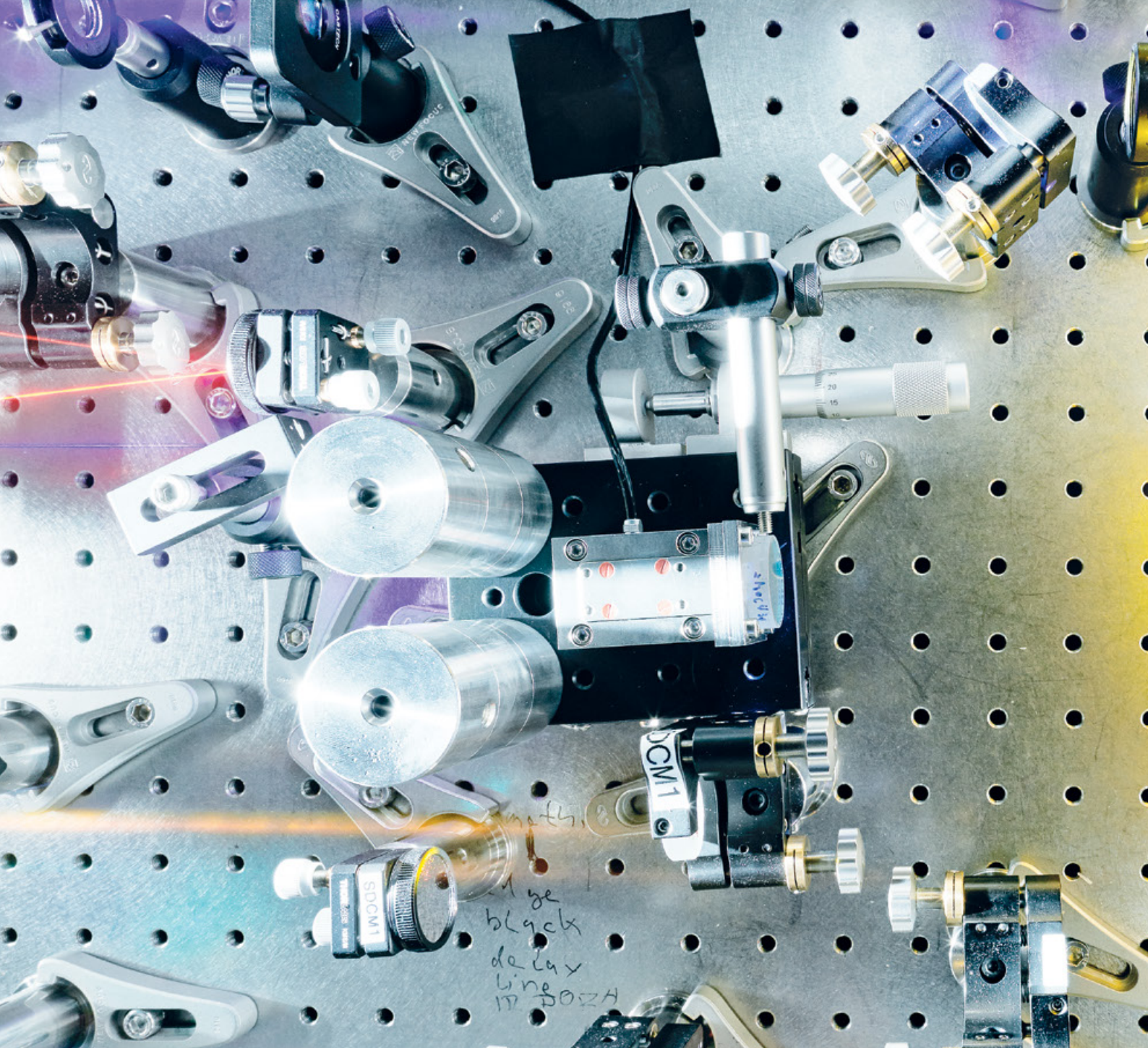
Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto oder 040 8998-3613



Titelbild

Laser erzeugen ein ganz besonderes Licht, das eine Fülle von wissenschaftlichen Anwendungen und Untersuchungsmethoden ermöglicht. Dieser neuartige optische Pulssynthesizer überlagert Laserlicht verschiedener Farben und erzeugt auf diese Weise ultrakurze Blitze. Bei DESY arbeiten Experten mit den verschiedensten Lasersystemen – vom Tischgerät bis hin zu kilometerlangen Röntgenlasern.



Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Mit den DESY-Großgeräten erkunden Forscher den Mikrokosmos in seiner ganzen Vielfalt – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen über das Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe bis hin zu jenen lebenswichtigen Prozessen, die zwischen Biomolekülen ablaufen. Die Beschleuniger und die Nachweisinstrumente, die DESY an seinen Standorten in Hamburg und Zeuthen entwickelt und baut, sind einzigartige Werkzeuge für die Forschung: Sie erzeugen das stärkste Röntgenlicht der Welt, bringen Teilchen auf Rekordenergien und öffnen völlig neue Fenster ins Universum.