

# femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 02/20

ZOOM

## Die seltsamste **Flüssigkeit** der Welt

Wasser verblüfft die  
Wissenschaft immer wieder

Coronavirus-Proteine  
im Röntgenblick

Plastik aus Holz

Nanopapier zum  
Sprühen



### Forscher filmen ultraschnelle Molekülrotation

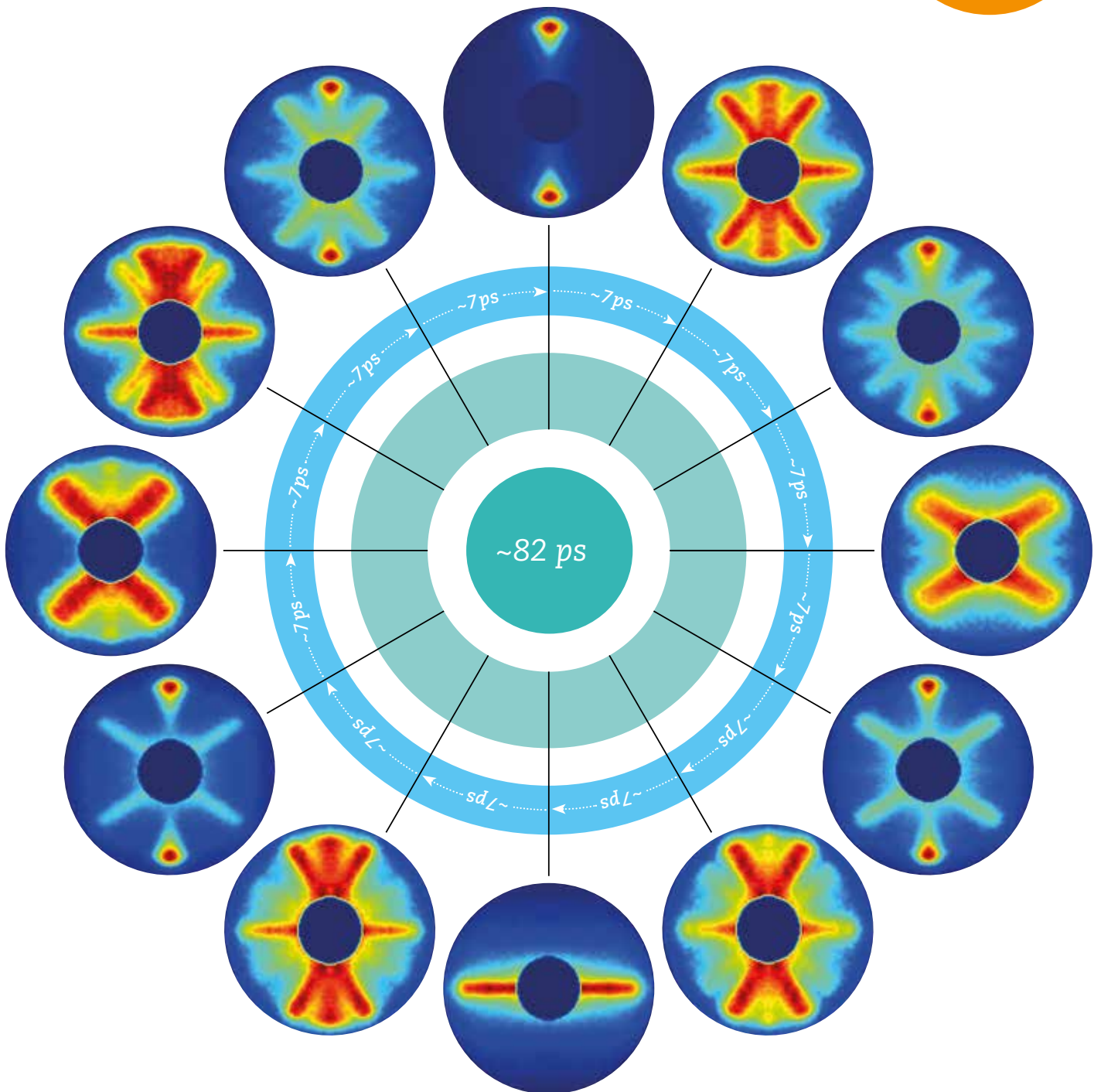
Mit Hilfe präzise abgestimmter Laserblitze haben Forscherinnen und Forscher die ultraschnelle Rotation eines Moleküls gefilmt. Der resultierende „Molekülfilm“ zeigt innerhalb von 125 billionstel Sekunden anderthalb Umdrehungen von Carbonylsulfid, einem stäbchenförmigen Molekül aus je einem Sauerstoff-, Kohlenstoff- und Schwefelatom, in hoher zeitlicher und räumlicher Detailgenauigkeit.

„Es ist ein langgehegter Traum in der Molekülphysik, die ultraschnellen Bewegungen von Atomen in dynamischen Prozessen zu filmen“, erläutert DESY-Forscher Jochen Küpper vom Center for Free-Electron Laser Science (CFEL). Dazu nutzen Küpper und sein Team zwei zeitlich genau aufeinander abgestimmte Infrarotlaserpulse mit einem Abstand von 38 billionstel Sekunden (Pikosekunden), um die Carbonylsulfid-Moleküle in schnelle und gleichzeitige (kohärente) Rotation zu versetzen. Mit einem weiteren, langwelligeren Laserpuls bestimmten die Forscher dann schrittweise die Lage der Moleküle nach jeweils rund 0,2 billionstel Sekunden.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nahmen insgesamt 651 Bilder auf, die anderthalb Rotationsperioden des Moleküls abdecken. Hintereinander montiert ergeben die Aufnahmen einen 125 Pikosekunden langen Film der Molekülrotation.

„Allerdings darf man sich die Rotation nicht wie bei einem drehenden Stock vorstellen“, erläutert Küpper. „Wir betrachten hier Prozesse im Reich der Quantenmechanik. Danach verhalten sich sehr kleine Objekte wie Atome und Moleküle anders als alltägliche Objekte in unserer Umgebung. Die genaue Position und der Impuls eines Moleküls können nicht zugleich mit höchster Präzision bestimmt werden, sondern zu jedem Zeitpunkt nur eine bestimmte Aufenthaltswahrscheinlichkeit, mit der das Molekül an einem Ort anzutreffen ist.“

Die verwendete Untersuchungsmethode lässt sich nach Auskunft der Forscherinnen und Forscher auch bei anderen Molekülen und Prozessen nutzen, um aufschlussreiche Filme ihrer Dynamik anzufertigen.



Schritte der Molekülrotation,  
aufgenommen mit je rund  
sieben Pikosekunden Abstand



# Inhalt



Bild: Victor Serban, Unsplash

## ZOOM

# Die seltsamste Flüssigkeit der Welt

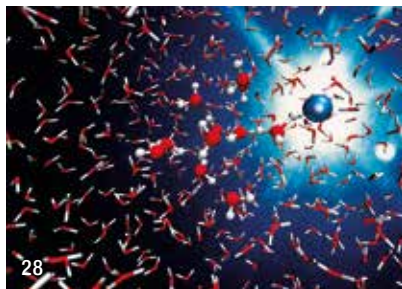
**Wasser ist alltäglich – aber wissenschaftlich  
noch nicht völlig verstanden**

Wasser ist allgegenwärtig – und zugleich eine der verblüffendsten chemischen Verbindungen: Es dehnt sich aus, wenn man es abkühlt, und unter bestimmten Umständen gefriert es, wenn man es erwärmt. Es lässt sich quasi nicht zusammendrücken, hat eine ungewöhnlich hohe Wärmespeicherkapazität und kriecht dank seiner großen Oberflächenspannung die Wände hoch.

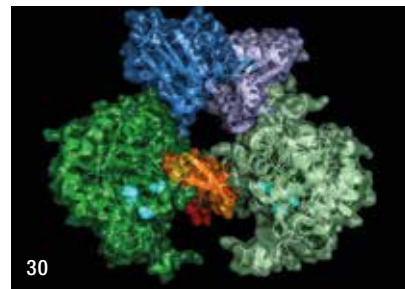
Wasser ist das Element des Lebens – viele seiner überraschenden Eigenschaften sind essenziell für Leben, wie wir es kennen. Das vergleichsweise simple Molekül verblüfft die Wissenschaft trotz jahrhundertelanger Forschung immer wieder. „Von allen bekannten Flüssigkeiten ist Wasser vermutlich die, die am meisten untersucht und am wenigsten verstanden wird“, war der britische Chemiker Felix Franks, ein Pionier der Wasserforschung, überzeugt. Das interdisziplinäre Centre for Molecular Water Science (CMWS) bei DESY soll die Erforschung der ungewöhnlichsten Flüssigkeit der Welt nun vorantreiben.



08



28



30

## CAMPUS

- 06** **Coronavirus-Proteine im Röntgenblick**  
Screening identifiziert mögliche Kandidaten für Medikamente
- 08** **Kosmische Gammastrahlenblitze**  
Erster Nachweis mit erdgebundenen Gammastrahlenteleskopen
- 10** **Plastik aus Holz**  
Maßgeschneiderte Bauteile auf Lignin-Basis
- 11** **Urzeit-Parasit in Bernstein**  
Forschungsteam enträtselt 50 Millionen Jahre alte Parasitenlarve
- 36** **Röntgen-Kombitechnik**  
für Tuberkulose- und Osteoporoseforschung
- 39** **Nanopapier zum Sprühen**  
Dünne Zelluloseschichten im industriellen Maßstab
- 40** **„Trojanisches Pferd“-Trick**  
Plasma-Photokathode für Teilchenbeschleuniger

## ZOOM

- 12** **Die seltsamste Flüssigkeit der Welt**  
Wasser verblüfft die Wissenschaft immer wieder
- 17** **Steckbrief: CMWS**  
Das Centre for Molecular Water Science gründet auf fünf Säulen
- 20** **„Wassermolekülen beim Tanz zusehen“**  
Anders Nilsson forscht an der rasanten inneren Dynamik des Wassers
- 25** **„Wir sind vom europaweiten Interesse überwältigt“**  
Die Zeit ist reif für ein Wasserzentrum, sagt DESY-Direktor Helmut Dosch
- 28** **Die ultraschnelle Geburt Freier Radikale**  
Einblick in die erste chemische Reaktion bei der Radiolyse von Wasser

## SPEKTRUM

- 30** **Forschung kompakt**
- Neuer Ansatz für Mittel gegen Schlafkrankheit
  - Neuartiges Material mit Hightech-Perspektiven
  - European XFEL erzeugt Laserlicht mit Rekordenergie
  - Auf der Suche nach dem Z'-Boson
  - Wie molekulare Fußbälle im Röntgenlaser zerplatzen
  - Meilenstein für Minibeschleuniger
  - Selbstorganisation von Flüssigkristallen
  - Korkenzieher-Laser sortiert Spiegelmoleküle
  - Supernova im Gammalicht
  - Blick in den tiefen Erdmantel

## RUBRIKEN

- 02** **femtoskop**  
Forscher filmen ultraschnelle Molekülrotation
- 23** **femtopolis**  
Leben ohne Wasser?

- 35** **femtomenal**  
Die kleinste Maschine bei DESY
- 42** **femtofinale**  
„Beamline for Schools“

# Coronavirus-Proteine im Röntgenblick

## Screening identifiziert mögliche Kandidaten für Medikamente

**L**ässt sich das neue Coronavirus mit Medikamenten stoppen? Weltweit suchen Forschungsgruppen intensiv nach neuen Ansatzpunkten für einen Wirkstoff gegen SARS-CoV-2, wie das Virus von der Weltgesundheitsorganisation WHO getauft wurde. Wie viele Zentren weltweit beteiligt sich auch DESY am Kampf gegen die Pandemie. Verschiedene Teams fahnden bei DESY nach neuen Wirkstoffen, untersuchen die molekularbiologischen Vorgänge der Infektion oder durchleuchten geschädigtes Gewebe in 3D. Auch mögliche Schnelltests, innovative Wege zur genauen Dosierung möglicher Corona-Medikamente und die Auswertung von Daten einer Corona-App mit Big-Data-Methoden aus der Teilchenphysik gehören zu den Forschungsthemen. Daneben haben die DESY-Werkstätten die Produktion von Gesichtsvisieren aufgenommen, die Ärzten und Pflegeeinrichtungen zur Verfügung gestellt werden.

### Schnellzugang

Für Coronavirus-relevante Forschungsvorhaben bietet DESY unter anderem einen Schnellzugang zu seiner Röntgenlichtquelle PETRA III, die für entsprechende Projekte auch während der Zeit des vorübergehend reduzierten Betriebs weiterlief. So hat ein Forschungsteam mit Hilfe von PETRA III bereits mehrere Kandidaten für mögliche Wirkstoffe gefunden, die an ein wichtiges Protein des Erregers SARS-CoV-2 binden

und daher eine Grundlage für ein Medikament gegen die Infektion sein könnten.

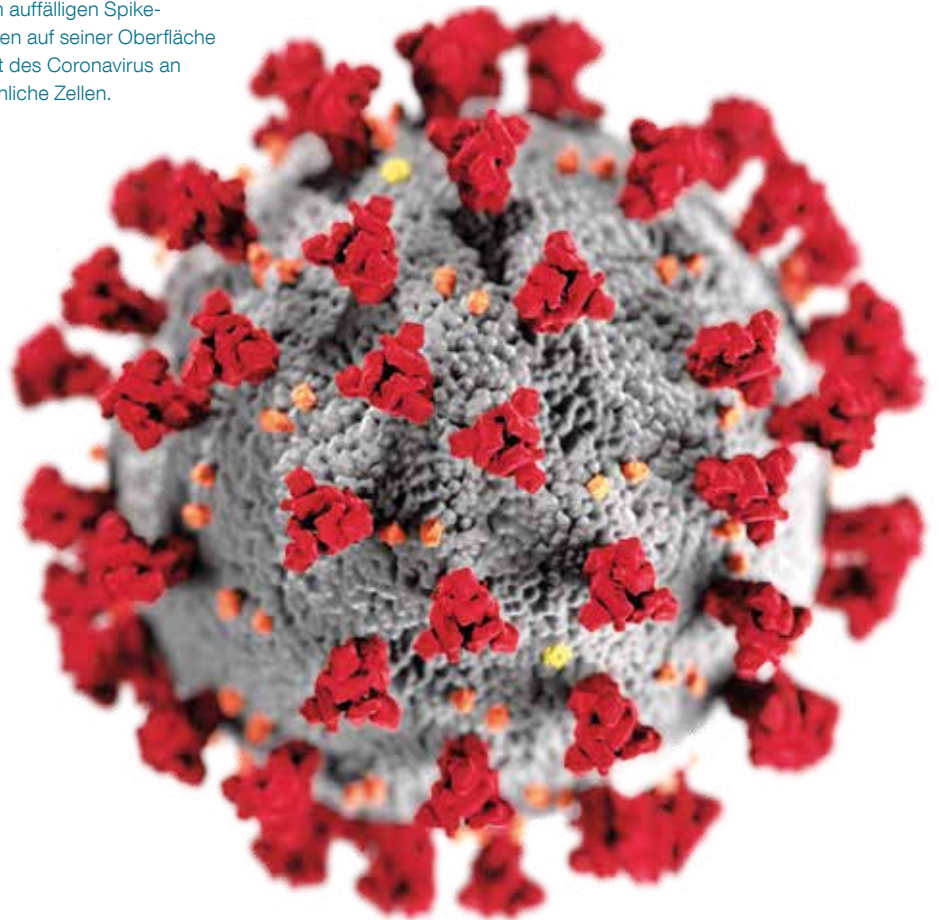
### Hochdurchsatzverfahren

Dazu züchten die Forscherinnen und Forscher zunächst kleine Kristalle aus dem Virusprotein in Kombination mit einem potenziellen Wirkstoff. Diese Kristalle durchleuchten sie dann mit Röntgenlicht, um die atomgenaue Struktur zu bestimmen und so herauszufinden, ob und wo der Wirkstoff an das Virusprotein bindet. In einem Hoch-

durchsatzverfahren testet das Team auf diese Weise fast 6000 bekannte Wirkstoffe aus einer Bibliothek des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie. Durch einen vollautomatischen Probenwechsel mit einem Roboterarm dauerte jede Messung nur drei Minuten.

Nach der Messung von bisher 7697 Proben mit 4035 verschiedenen Wirkstoffen konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bereits 18 Stoffe identifizieren, die an die Hauptprotease (MPro) des Erregers binden. Die Hauptprotease

Mit den auffälligen Spike-Proteinen auf seiner Oberfläche koppelt des Coronavirus an menschliche Zellen.





ist ein Schlüsselprotein für die Vermehrung des Virus im menschlichen Organismus. Ob diese Stoffe die Proteinaktivität hemmen und die Vermehrung des Virus bremsen, muss sich allerdings erst in weiteren Labortests zeigen.

### **Vierversprechende Ansatzpunkte**

Schlüsselproteine für die Vermehrung sind vielversprechende Ansatzpunkte für Antivirumittel: Viren

bereits zur Behandlung von Menschen zugelassen oder zumindest in der Erprobung.

„Mit Hilfe einer automatisierten Datenanalyse haben wir bereits nach zwei Wochen mehr als ein Dutzend Wirkstoffe identifizieren können, die eine Bindung mit den Proteinen eingehen“, sagt DESY-Forscher Alke Meents, Leiter der Untersuchung. „Einer davon bindet kovalent, also mit einer sehr festen

## „Bereits nach zwei Wochen haben wir mehr als ein Dutzend Wirkstoffe identifizieren können, die eine Bindung mit den Proteinen eingehen“

Alke Meents, DESY

können sich allein nicht vermehren. Sie kapern dazu Zellen ihres Wirts, schleusen ihr eigenes Erbgut in die Zellen ein und bringen diese so dazu, neue Viren herzustellen. Bei all diesen Schritten spielen Proteine eine wichtige Rolle. Gelingt es, ein entscheidendes Protein zu blockieren, lässt sich die Vermehrung unter Umständen unterbrechen und die Infektion so besiegen.

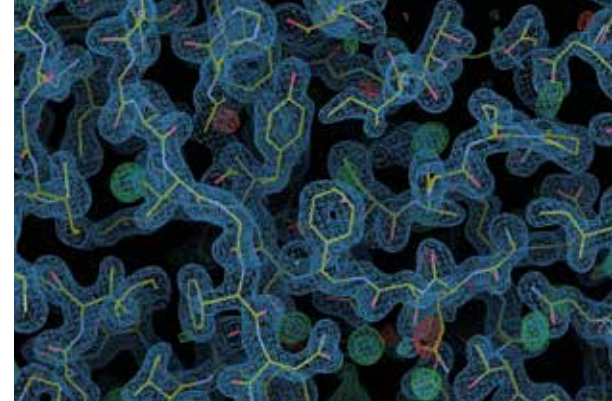
Mehrere Messstationen an DESYs Forschungslichtquelle PETRA III sind auf strukturelle Untersuchungen spezialisiert. Hier lässt sich die dreidimensionale räumliche Struktur von Proteinen atomgenau darstellen. Das nutzte das Forschungsteam, um mehrere tausend bereits für die Behandlung anderer Krankheiten existierende Wirkstoffe darauf zu untersuchen, ob und wie sie an eines der für die Vermehrung des Virus verantwortlichen Schlüsselproteine „andocken“. Mit dieser Untersuchung hofft das Team, den Weg zu einem Medikament abzukürzen: Während die Entwicklung eines zugelassenen Medikaments normalerweise mehrere Jahre dauert, sind ein Teil der in dieser Studie untersuchten Stoffe

chemischen Bindung, an zentraler Stelle an die Hauptprotease des Virus und stellt damit einen besonders vielversprechenden Kandidaten dar.“

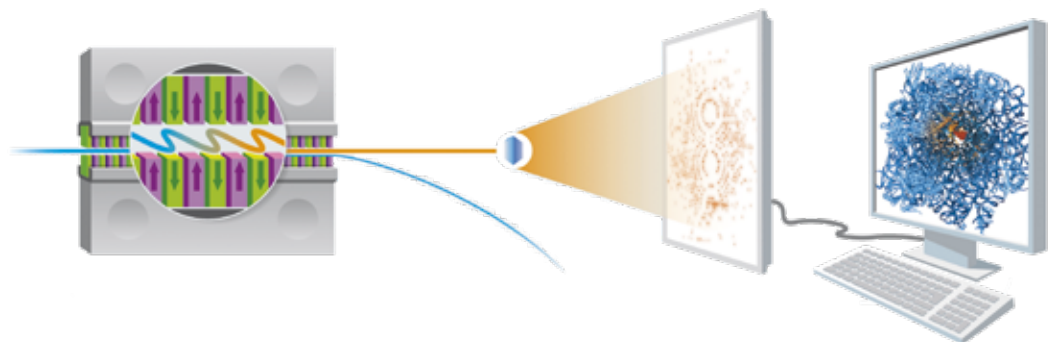
### **Weiter Weg zu einem Medikament**

Die Identifizierung vielversprechender Wirkstoffe ist allerdings nur der erste Schritt auf dem Weg zu einem Medikament. „Forscher an den Universitäten Lübeck und Hamburg und vom Fraunhofer-Institut untersuchen im Labor, ob dieser Wirkstoff auch die Proteinaktivität hemmt“, sagt Virusforscher Rolf Hilgenfeld von der Universität Lübeck, dessen

Arbeitsgruppe an dem Screening beteiligt ist. In einem dritten Schritt testet das Hamburger Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin in Zellkulturen, ob der Stoff die Virusvermehrung hemmt oder gar verhindert. Selbst dann ist der Weg zu einem zugelassenen Medikament allerdings noch weit.



Ausschnitt aus der Elektronendichtekarte der SARS-CoV-2-Hauptprotease



### **Aufklärung der Proteinstruktur mit Röntgenlicht**

Schnelle Elektronen (blau) aus einem Teilchenbeschleuniger werden in einem sogenannten Undulator (links) mit starken Magneten (grün und violett) auf einen rasanten Slalomkurs geschickt. Dadurch senden die Teilchen energiereiches Röntgenlicht (orange) aus, das über eine Röntgenoptik auf einen Kristall (Mitte) aus Biomolekülen gelenkt wird. Der Kristall lenkt das Röntgenlicht ab und erzeugt so ein charakteristisches Beugungsbild auf dem Detektor (rechts). Aus diesem Beugungsbild lässt sich die Struktur der untersuchten Biomoleküle atomgenau errechnen (ganz rechts).

Gamma-Ray Bursts können von der Explosion eines sterbenden Sterns ausgelöst werden, in der sich ein Schwarzes Loch bildet. Aus der Umgebung des Schwarzen Lochs schießen mächtige Materiestrahlen (sogenannte Jets) in entgegengesetzte Richtungen ins All. In diesen Jets werden elektrisch geladene Teilchen beschleunigt, die wiederum in der Wechselwirkung mit Magnet- und Strahlungsfeldern Gammastrahlung erzeugen.

# Kosmische Gammastrahlenblitze mit beispielloser Energie

Erster Nachweis mit erdgebundenen Gammastrahlenteleskopen

**D**ie stärksten Explosionen des Universums strahlen noch energiereicher als bislang bekannt: Zwei internationale Teams haben mit Spezialteleskopen die energiereichsten Gammastrahlen von sogenannten Gamma-Ray Bursts registriert, die jemals gemessen worden sind. Sie besitzen rund 100 Milliarden Mal so viel Energie wie sichtbares Licht. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der H.E.S.S.- und MAGIC-Teleskope stellen ihre Beobachtungen in unabhängigen Veröffentlichungen im Fachjournal „Nature“ vor. Es handelt sich um die ersten Nachweise von Gamma-Ray Bursts mit erdgebundenen Gammastrahlenteleskopen. DESY ist maßgeblich an beiden Observatorien beteiligt, die federführend von der Max-Planck-Gesellschaft betrieben werden.

## Explosion von Riesen Sonnen

Gamma-Ray Bursts (GRBs) sind plötzliche, kurze Ausbrüche von Gammastrahlung im Kosmos, die sich etwa einmal pro Tag irgendwo im sichtbaren Universum ereignen. Die Gammablitze stammen nach aktuellem Wissen von kollidierenden Neutronensternen oder aus Supernova-Explosionen von Riesen Sonnen, die zu einem Schwarzen Loch kollabieren. „Gammablitze sind die stärksten bekannten Explosionen im Universum und setzen typischer-

*„Dies sind bei weitem die höchstenergetischen Photonen, die jemals von einem Gamma-Ray Burst entdeckt worden sind“*

Elisa Bernardini, DESY

weise in wenigen Sekunden mehr Energie frei als unsere Sonne in ihrer gesamten Lebensdauer – sie können durch nahezu das gesamte sichtbare Universum leuchten“, sagt David Berge, Leiter der Gammastrahlen-astronomie bei DESY.

## Zwei internationale Teams

Entdeckt wurde das kosmische Phänomen Ende der 1960er Jahre zufällig von Satelliten zur Überwachung des Atomteststopp-Abkommens auf der Erde. Seitdem untersuchen Astronomen die Gammastrahlenausbrüche mit Satelliten vom Erdborbit aus. Mit erdgebundenen Teleskopen ließen sich die Gammaquanten der Blitze bislang nicht beobachten, weil die Erdatmosphäre diese normalerweise schluckt.

Astronomen haben Spezialteleskope entwickelt, die das schwa-



## „Gammablitz sind die stärksten bekannten Explosionen im Universum und setzen typischerweise in wenigen Sekunden mehr Energie frei als unsere Sonne in ihrer gesamten Lebensdauer“

David Berge, DESY

Palma helle Gammastrahlung aus der frühen Phase von GRB 190114C.

Beide Beobachtungen waren durch Gammastrahlensatelliten der US-Raumfahrtbehörde NASA ausgelöst worden, die den Himmel nach Gammablitzern absuchen und automatische Benachrichtigungen an Observatorien wie H.E.S.S. und MAGIC verschicken. „Wir konnten so schnell auf die Herkunftsregion schwenken, dass wir nur 57 Sekunden nach dem ursprünglichen Nachweis der Explosion mit der Beobachtung beginnen konnten“, berichtet DESY-Forscher Cosimo Nigro, der zu dieser Zeit die MAGIC-Beobachtungsschicht leitete. „In den ersten 20 Minuten der Beobachtung haben wir rund tausend Photonen von GRB 190114C registriert.“

### Mehr als vier Lichtjahre entfernt

MAGIC beobachtete Gammaquanten mit Energien zwischen 200 und 1000 Milliarden Elektronenvolt (0,2 bis 1 Tera-Elektronenvolt). „Dies sind bei weitem die höchstenergetischen Photonen, die jemals von einem Gamma-Ray Burst entdeckt worden sind“, sagt die Leiterin der MAGIC-Gruppe bei DESY, Elisa Bernardini. Zum Vergleich: Sichtbares Licht liegt im Energiebereich von etwa 1 bis 3 Elektronenvolt.

Die frühe Entdeckung ermöglichte es, die weltweite Astronomen-gemeinde schnell zu informieren. Daraufhin haben mehr als 20 andere Teleskope in zahlreichen Wellenlängenbereichen einen genaueren Blick auf das Objekt geworfen. So ließen sich Details der physikalischen Mechanismen entschlüsseln, die für die Strahlung bei höchsten Energien verantwortlich sind und von den Forscherinnen und Forschern

des MAGIC-Konsortiums in einem zweiten Fachaufsatz in „Nature“ beschrieben werden. Die Nachbeobachtungen bestimmten auch die Entfernung von GRB 190114C auf mehr als vier Milliarden Lichtjahre. Das Licht war also mehr als vier Milliarden Jahre zu uns unterwegs – das entspricht rund einem Drittel des Alters des Universums.

GRB 180720B war mit einer Distanz von sechs Milliarden Lichtjahren noch weiter entfernt. Dennoch ließ sich seine Gammastrahlung im Bereich von 100 bis 440 Milliarden Elektronenvolt auch lange nach dem ursprünglichen Blitz nachweisen.

Der Nachweis von Gammastrahlenausbrüchen bei sehr hohen Energien liefert wichtige neue Einblicke in die gigantischen Explosionen. „Indem wir festgestellt haben, dass Gamma-Ray Bursts Photonen mit Energien produzieren, die hundertmilliardenfach höher sind als sichtbares Licht, wissen wir jetzt auch, dass sie in der Lage sind, Partikel innerhalb der Explosionswolke hocheffizient zu beschleunigen“, sagt DESY-Forscherin Konstancja Satalecka, eine der MAGIC-Koordinatorinnen für die Suche nach Gammastrahlenausbrüchen. „Außerdem stellt sich heraus, dass uns bisher etwa die Hälfte ihres Energiebudgets entgangen ist. Denn unsere Messungen zeigen, dass die im Bereich der sehr energiereichen Gammastrahlung freigesetzte Energie vergleichbar ist mit der Energie, die bei allen anderen Wellenlängen zusammen abgestrahlt wird. Das ist bemerkenswert!“

*Nature*, 2019; DOI: 10.1038/s41586-019-1743-9  
*Nature*, 2019; DOI: 10.1038/s41586-019-1750-x  
*Nature*, 2019; DOI: 10.1038/s41586-019-1754-6

che, bläuliche Cherenkov-Licht registrieren, das kosmische Gammastrahlung in der Erdatmosphäre erzeugt. Forscher haben seit vielen Jahren versucht, Gammablitz mit Cherenkov-Teleskopen zu erwischen. Zwischen Sommer 2018 und Januar 2019 haben nun gleich zwei internationale Teams, beide mit DESY-Beteiligung, erstmals Gammastrahlung von Gamma-Ray Bursts mit erdgebundenen Teleskopen nachgewiesen. Am 20. Juli 2018 konnte das 28-Meter-Gammastrahlenteleskop des High-Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) in Namibia das schwache Nachleuchten des Gammastrahlenausbruchs mit der Katalognummer GRB 180720B beobachten. Am 14. Januar 2019 registrierten die Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov (MAGIC)-Teleskope auf der Kanareninsel La

# Plastik aus Holz

## Maßgeschneiderte Bauteile auf Lignin-Basis

**A**ls Nebenprodukt der Papierherstellung ist das Biopolymer Lignin ein vielversprechender Rohstoff für eine nachhaltige Kunststoffproduktion. Das Naturprodukt steht jedoch nicht in einer so gleichbleibenden Qualität wie erdölbasiertes Plastik zur Verfügung. Eine Röntgenuntersuchung bei DESY zeigt erstmals, wie die innere

bindungen, die auch in der Kunststoffproduktion eine entscheidende Rolle spielen. „Lignin ist die größte Quelle natürlich vorkommender aromatischer Verbindungen, wird bislang aber vor allem als Nebenprodukt oder Brennstoff in der Papierindustrie angesehen“, erläutert Forschungsleiter Mats Johansson von der Königlichen Technischen Hochschule (KTH) Stockholm. „Jedes

*„Lignin gehört mit Zellulose und Chitin zu den häufigsten organischen Verbindungen der Erde und hat enormes Potenzial, erdölbasierte Plastikrohstoffe zu ersetzen. Zum Verbrennen ist es viel zu wertvoll.“*

Marcus Jawerth, KTH Stockholm

molekulare Struktur verschiedener Lignin-Anteile mit den Materialeigenschaften zusammenhängt. Die Studie liefert damit einen Ansatz für eine Systematik, um Bioplastik aus Lignin mit unterschiedlichen, für die jeweilige Anwendung vorteilhaften Eigenschaften zu produzieren.

Lignine sind für die Festigkeit von Pflanzen und deren Verholzen verantwortlich. Bei der Papierproduktion werden sie von der Zellulose abgetrennt. Lignine zählen zu den sogenannten aromatischen Ver-

Jahr werden Millionen Tonnen davon produziert, die als kontinuierlicher Rohstoffstrom für neue Produkte zur Verfügung stehen könnten.“

### Nanostruktur

Tatsächlich gibt es erste Anwendungen von Hartplastik (Duroplast) auf Lignin-Basis. Die Materialeigenschaften variieren jedoch oft und lassen sich bislang schlecht steuern. An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III hat das schwedische Team nun die Nanostruktur verschiedener Anteile

Lignin bezeichnet eine Gruppe von Makromolekülen, die in die pflanzliche Zellwand eingelagert werden und die Verholzung bewirken.

von kommerziell erhältlichem Lignin durchleuchtet. „Dabei hat sich gezeigt, dass es Lignin-Anteile mit größeren und kleineren Domänen gibt“, berichtet Hauptautor Marcus Jawerth von der KTH Stockholm. „Das hat je nach Anwendung Vorteile: Es macht das Lignin härter oder weicher, indem sich die sogenannte Glasübergangstemperatur ändert, bei der das Biopolymer einen zähflüssigen Zustand annimmt.“

### Zahlreiche Konfigurationen

Die Röntgenanalyse ergab unter anderem, dass solche Lignin-Varianten besonders stabil sind, bei denen die zentralen Benzol-Ringe T-förmig aufeinander stehen. „Die molekulare Struktur beeinflusst die makroskopischen mechanischen Eigenschaften“, erläutert DESY-Forscher Stephan Roth. „Es ist das erste Mal, dass dies charakterisiert wurde.“ Als Naturprodukt besitzt Lignin zahlreiche unterschiedliche Konfigurationen. Weitere Untersuchungen sollen nun einen systematischen Überblick darüber liefern, wie verschiedene Parameter die Lignin-Eigenschaften beeinflussen. „Das ist enorm wichtig, um die Materialien reproduzierbar herzustellen und vor allem die Materialeigenschaften vorherzusagen“, betont Roth, der auch Professor an der KTH Stockholm ist. „Wenn man das Material industriell einsetzen möchte, muss man die molekulare Struktur verstehen und mit den mechanischen Eigenschaften korrelieren.“

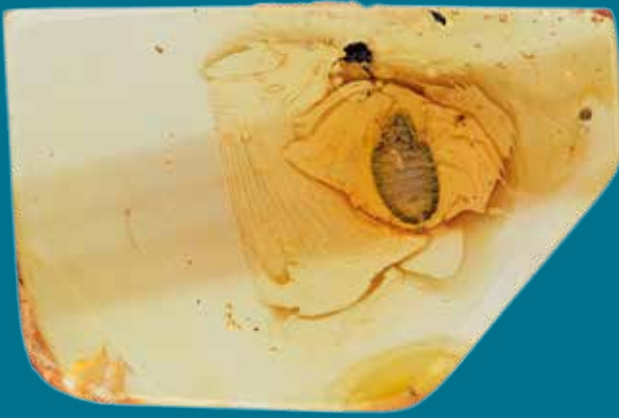
Bis zu zwei Drittel des bei der Papierproduktion anfallenden Lignins können Jawerth zufolge in Polyester umgewandelt werden und damit als Rohstoff für die Kunststoffindustrie dienen. „Lignin gehört mit Zellulose und Chitin zu den häufigsten organischen Verbindungen der Erde und hat enormes Potenzial, erdölbasierte Plastikrohstoffe zu ersetzen“, betont der Forscher. „Zum Verbrennen ist es viel zu wertvoll.“

Applied Polymer Materials, 2020;  
DOI: 10.1021/acsapm.9b01007



Marcus Jawerth hat über Plastik aus Lignin an der KTH Stockholm promoviert.





Das Fossil im Bernstein. Das Alter liegt zwischen 42 und 49, maximal 54 Millionen Jahren. Dieses Fossil wurde am Institut für Zoologie und Evolutionsforschung mit Phyletischem Museum, Ernst-Haeckel-Haus und Biologiedidaktik der Universität Jena wissenschaftlich untersucht.

# Urzeit-Parasit in Bernstein

**Forschungsteam enträtselt 50 Millionen Jahre alte Parasitenlarve**

**M**it dem intensiven Röntgenlicht von DESYs Speicherring PETRA III hat ein Forschungsteam einen nicht alltäglichen Fund untersucht: eine 50 Millionen Jahre alte Insektenlarve aus dem Erdzeitalter des Paläogen. Die Untersuchungsergebnisse bieten einen einzigartigen Einblick in die Entwicklung des ausgestorbenen Insekts.

## Ein Fund auf eBay

Als der Jenaer Biologe Hans Pohl auf eBay ein in Bernstein eingeschlossenes Insektenfossil aufspürte, war die Entdeckerfreude groß: Es handelte sich um ein besonderes Exemplar – die 50 Millionen Jahre alte Larve eines Fächerflüglers. Doch um sie detailliert untersuchen zu können, brauchte er die Schützenhilfe von Materialforschern des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, das an der DESY-Röntgenquelle PETRA III eine Außenstelle unterhält.

Fächerflügler (*Strepsiptera*) sind Parasiten, die andere Insekten befallen, zum Beispiel Bienen und Wespen, aber auch Silberfischchen. „Bei den meisten der ca. 600 bekannten Arten bleiben die Weibchen zeit-

lebens in ihrem Wirt“, sagt Pohl, Biologe an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. „Nur die Männchen verlassen ihn für den Hochzeitsflug, leben dann aber nur noch einige Stunden.“ Doch es gibt Ausnahmen: Bei Arten, die Silberfischchen befallen, entfernen sich auch die flügellosen Weibchen von ihrem Wirt.

## 3D-Röntgenbilder

Das 4,4 Millimeter große Tierchen wurde vor schätzungsweise 50 Millionen Jahren vom Baumharz eingeschlossen und versiegelt. Es ist das erste bekannte Larvenfossil eines Fächerflüglers, das sich in einem späteren als dem ersten Larvenstadium befindet.

Das Problem: „Unterm Lichtmikroskop waren wesentli-



Aus den Röntgenaufnahmen generiertes Modell der Larve aus dem Bernstein

che Details nicht zu erkennen“, sagt Pohl. Also nahm sein Team das Objekt mit einem hochauflösenden Röntgenverfahren ins Visier – der Mikrotomographie mit Synchrotronstrahlung.

Der Speicherring PETRA III ist hierfür besonders geeignet. Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) betreibt hier eine Messstation, die sich für gewöhnlich mit Materialforschung befasst. „Die Methode ähnelt einem CT-Scanner im Krankenhaus“ sagt HZG-Forscher Jörg Hammel. „Das ist ein Röntgenapparat, der dreidimensionale Bilder aus dem Körperinneren liefert.“

Von der Fächerflüglerlarve lieferte die Methode gestochen scharfe Bilder mit einer Auflösung von 1,3 Mikrometern. „Darauf lassen sich alle wichtigen Details sehen“, freut sich Hans Pohl. „Unter anderem konnten wir erkennen, dass sich das Tier vermutlich im dritten Larvenstadium befand und dass es sich sehr wahrscheinlich um eine weibliche Larve von *Mengea* handelt, einer heute ausgestorbenen Gattung.“ Das Besondere: Dieses Weibchen hatte seinen Wirt verlassen – ein für heutige Arten nur von den Parasiten der Silberfischchen bekanntes Verhalten. Und: „Manche Indizien deuten darauf hin, dass der Wirt womöglich eine Schabe war“, vermutet Pohl. „Um Gewissheit zu erhalten, müssten wir allerdings noch weitere Fossilien aufspüren und analysieren.“

Gut möglich, dass diese Analysen dann wieder am Speicherring erfolgen. „In den letzten Jahren scheint sich die HZG-Außenstelle unter Biologen zu einem Geheimtipp entwickelt zu haben“, sagt Jörg Hammel. „Mittlerweile sind wir offenbar so gut im Analysieren von Bernsteinfossilien, dass wir immer mehr Anfragen aus der Fachwelt bekommen.“

.....  
*Arthropod Systematics & Phylogeny*, 2019;  
DOI: 10.26049/ASP77-1-2019-06



ZOOM

# Die seltsamste Flüssigkeit der Welt

**Wasser ist alltäglich – aber wissenschaftlich  
noch nicht völlig verstanden**

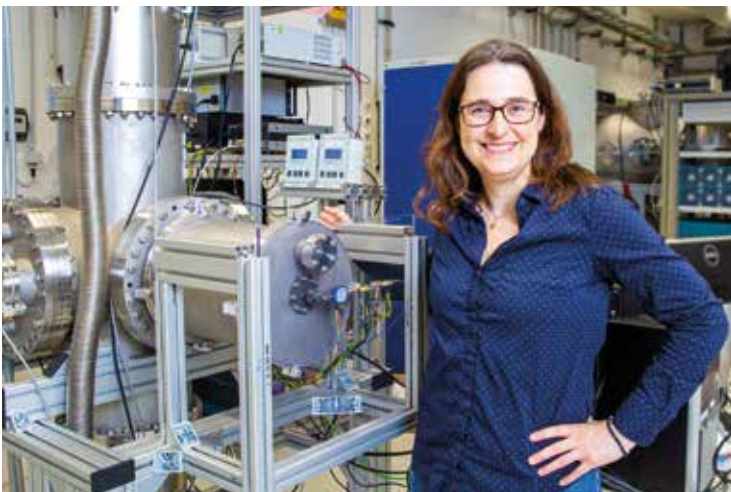
Wasser ist allgegenwärtig – und zugleich eine der verblüffendsten chemischen Verbindungen: Es dehnt sich aus, wenn man es abkühlt, und unter bestimmten Umständen gefriert es, wenn man es erwärmt. Es lässt sich quasi nicht zusammendrücken, hat eine ungewöhnlich hohe Wärmespeicherkapazität und kriecht dank seiner großen Oberflächenspannung die Wände hoch. Wasser ist das Element des Lebens – viele seiner überraschenden Eigenschaften sind essenziell für Leben, wie wir es kennen. Das vergleichsweise simple Molekül verblüfft die Wissenschaft trotz jahrhundertelanger Forschung immer wieder. „Von allen bekannten Flüssigkeiten ist Wasser vermutlich die, die am meisten untersucht und am wenigsten verstanden wird“, war der britische Chemiker Felix Franks, ein Pionier der Wasserforschung, überzeugt. Das interdisziplinäre Centre for Molecular Water Science (CMWS) bei DESY soll die Erforschung der ungewöhnlichsten Flüssigkeit der Welt nun vorantreiben.



Wasser kann ungewöhnlich viele Formen Eis mit teils exotischen Eigenschaften bilden. Es gibt mehr als 20 Arten Wassereis, darunter unter anderem ein schwarzes Hochdruck-Eis, das sogar bei Temperaturen wie an der Sonnenoberfläche noch stabil wäre. Auch der Schmelzpunkt von Wasser liegt unerwartet hoch, etwa 100 Grad über dem ähnlicher Verbindungen.



**B**äche plätschern, Wellen tosen, Regen prasselt, der Hahn im Badezimmer tropft. Wasser ist uns ein treuer Begleiter – als grandioses Naturschauspiel, als Basis allen Lebens oder auch nur als feuchtes Ärgernis. In den Augen der Wissenschaft aber bleibt  $\text{H}_2\text{O}$  ein Mysterium. Es besteht zwar aus nur drei Atomen – zweimal Wasserstoff, einmal Sauerstoff, doch aus dieser simplen Konstellation resultieren ungewöhnliche Eigenschaften: Statt wie andere, vergleichbare Stoffe bei Raumtemperatur gasförmig durchs Zimmer zu schwirren, verhärt Wasser flüssig in Trinkbechern und Blumenvasen. Statt unter Hochdruck immer zäher zu werden, wird Wasser zunehmend dünnflüssig. Und statt in die Tiefe zu sinken, schwimmen Eisberge majestätisch über die Polarmeere.



Die Leitenden DESY-Wissenschaftler Melanie Schnell und Gerhard Grübel koordinieren das Zentrum für Molekulare Wasserforschung CMWS.



Zu den Anomalien von Wasser gehört auch seine außergewöhnlich hohe Oberflächenspannung, die für die Entstehung von Tropfen verantwortlich ist.

Mittlerweile zählt die Wissenschaft mehr als 50 dieser Wasseranomalien, die für unser Dasein von essenzieller Bedeutung sind. „Wäre Wasser nicht so seltsam, würden wir nicht existieren“, sagt Anders Nilsson von der Universität Stockholm, einer der renommiertesten Wasserforscher der Welt. Wäre es eine Flüssigkeit mit Standardeigenschaften, hätte Hamburg ein Klima wie im tiefsten Sibirien. Und ohne die wassereigenen Kapillarkräfte könnten sich Pflanzen nicht mit Nährstoffen versorgen.

Bislang sind die wenigsten dieser Anomalien fundiert verstanden – es ist noch viel Grundlagenforschung nötig, um die Eigenschaften und Interaktionen der allgegenwärtigen Wassermoleküle zu enträtseln. Diese Forschung soll in einem neuen, weltweit einzigartigen Zentrum gebündelt werden: Gemeinsam mit Partnern aus ganz Europa plant DESY den Bau des Centre for

*„Wäre Wasser nicht so seltsam, würden wir nicht existieren“*

Anders Nilsson, Universität Stockholm

Molecular Water Science, kurz CMWS. Durch und durch interdisziplinär angelegt, soll das CMWS das Thema Wasser aus den unterschiedlichsten Fachrichtungen beleuchten.

So wollen Physikerinnen  $\text{H}_2\text{O}$  unter Extrembedingungen studieren und damit den molekularen Ursachen seiner Eigenheiten auf die Schliche kommen. Biophysiker möchten das Nass unter die Lupe nehmen, um seine lange unterschätzte



Rolle im Zellstoffwechsel zu entlarven. Klimafor-  
scherinnen interessiert, wie sich in der Atmo-  
sphäre winzigste Wassertröpfchen bilden und zu  
mächtigen Wolken auftürmen – zentrale Mit-  
spieler bei der globalen Erwärmung. Und Astro-  
chemiker fragen sich, wie Wasser im Weltraum  
als eisige Brutstätte für alle möglichen Verbindun-  
gen fungieren kann – darunter vergleichsweise

## „Unterkühltes Wasser ist also ein realer Teil der Natur“

Austen Angell, Arizona State University

komplexe organische Moleküle wie Vorläufer von  
Aminosäuren, die auch als mögliche Vorstufen  
von Leben in Betracht kommen.

Am stärksten zeigen sich die Anomalien,  
wenn Wasser stark unterkühlt ist. Entgegen  
unserer Alltagserfahrung kristallisiert  $H_2O$  nicht  
zwangsläufig bei null Grad Celsius zu Eis. Gerade  
wenn es hochrein ist, kann es auch bei starken  
Minusgraden flüssig bleiben, denn es mangelt an  
Kondensationskeimen, an denen sich Eiskristalle  
bilden können. „In Wolken können die Tröpfchen  
minus 30 Grad Celsius kalt sein“, sagt Austen An-  
gell, Chemiker an der Arizona State University und  
ebenfalls Wasserspezialist wie Nilsson. „Unter-  
kühltes Wasser ist also ein realer Teil der Natur.“

### Wasser ist ungewöhnlich

Bei Laborexperimenten verhält sich das frostige  
Nass manchmal sehr ungewöhnlich: Anders als  
andere Stoffe lässt es sich besser zusammenpres-  
sen, je kälter es ist. Ähnlich verhält es sich mit der  
Wärmekapazität: Je kälter Wasser ist, umso mehr  
Wärme kann es aufnehmen. Die Fachwelt führt  
diese Anomalien auf den Aufbau des Wassermole-  
küls zurück: Seinen „Rumpf“ bildet das Sauer-  
stoffatom, von dem die beiden Wasserstoffatome  
als „Ärmchen“ abzweigen. Der Rumpf ist eher ne-  
gativ geladen, die Ärmchen dagegen positiv. Das  
bewirkt eine gegenseitige Anziehung von Wasser-  
molekülen: Der negative Rumpf eines Moleküls  
wird zu den positiven Ärmchen eines anderen  
Moleküls hingezogen – und bildet kurzzeitig eine  
Bindung aus, die Wasserstoffbrückenbindung.

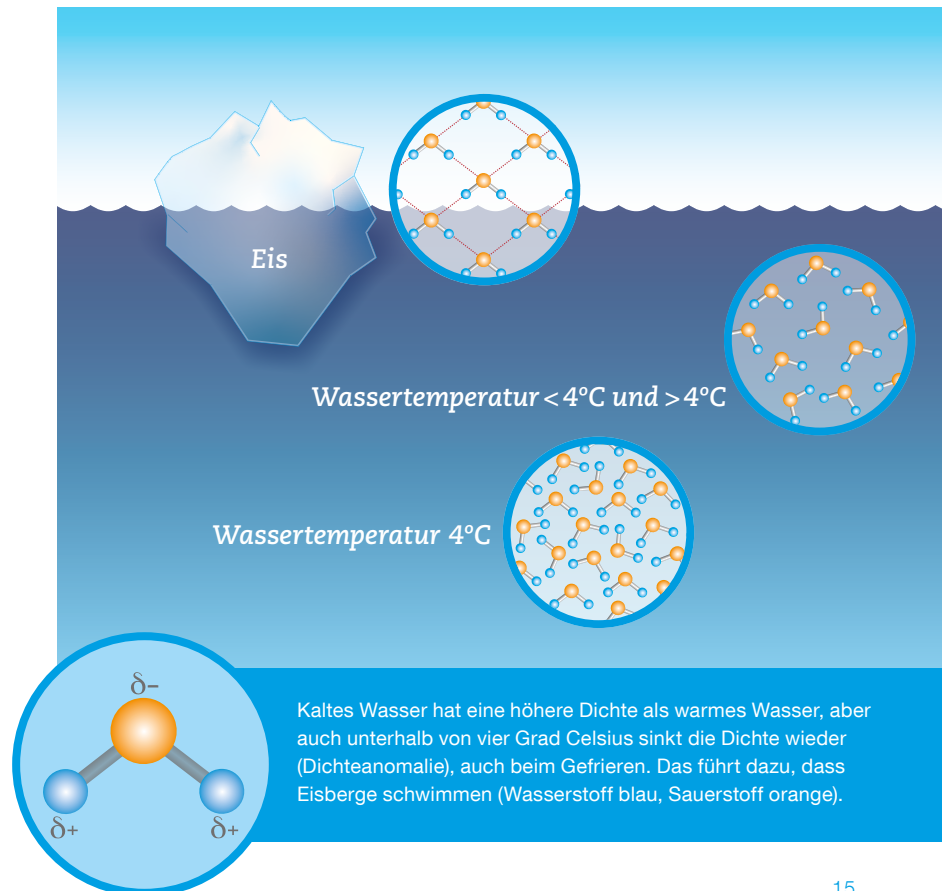
Demnach lässt sich Wasser als ein wabern-  
des Netzwerk aus lauter Molekülen verstehen.

Diese knüpfen andauernd spontane Bindungen  
zu ihren Nachbarn – um diese zarten Bande aber  
gleich wieder zu kappen. Dabei vermutet die  
Fachwelt seit längerem, dass es – je nach Anzahl  
und Orientierung der Brückenbindungen – zwei  
verschiedene Zustände von Wasser gibt: einen  
dichteren (HDL = High-Density Liquid) und einen  
weniger dichten (LDL = Low-Density Liquid). Die  
Dichte von HDL fällt dabei um 10 bis 20 Prozent  
größer aus als die von LDL. „Im Grunde setzt sich  
Wasser also aus zwei verschiedenen Sorten zu-  
sammen“, sagt Anders Nilsson. „Und wir denken,  
dass es das Wechselspiel dieser beiden Sorten ist,  
das hinter den Anomalien von Wasser steckt.“

Ein gewöhnliches Glas Wasser bei Raum-  
temperatur dürfte vor allem aus der HDL-Phase  
bestehen – mit winzigen Einsprengseln aus 20 bis  
30 Molekülen, die sich kurzzeitig zu einer LDL-  
Phase zusammenschließen. „Als würden die Fleisch-  
bällchen in einer Suppe andauernd verschwinden  
und woanders wieder auftauchen“, verdeutlicht  
Nilsson. Das Problem: Diese Bällchen sind so  
kurzlebig, dass es neue Messtechniken braucht,  
um sie aufspüren zu können. Die Hoffnung:  
Damit sollte sich beobachten lassen, ob die >>



Austen Angell ist einer  
der renommiertesten  
Wasserforscher der Welt.





Bei der Umwandlung von HDA-Eis in LDA-Eis nimmt das Eisvolumen spontan um rund ein Viertel zu.

Miniblasen bei kühleren Temperaturen wachsen und stabiler werden, damit wäre die HDL/LDL-These bewiesen.

Bei bestimmten glasartigen Varianten von Eis, also der festen Phase von Wasser, wurden bereits zwei Pendanten namens HDA (High-Density Amorphous Ice) und LDA (Low-Density Amorphous Ice) entdeckt – wobei ersteres eine höhere Dichte aufweist als letzteres. 2017 war einem Team um Anders Nilsson, den DESY-Physiker Gerhard Grübel und den Innsbrucker Eisforscher Thomas Lörting in einer wegweisenden Kooperation ein bemerkenswertes Experiment geglückt: Mit Hilfe von DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III konnte die Arbeitsgruppe beobachten, wie HDA-Eis bei minus 150 Grad beim raschen Erhitzen zu HDL-Wasser schmolz. Einen winzigen Augenblick mutierte dieses zu LDL-Wasser, um danach wieder zu Eis zu erstarren, diesmal in der LDA-Form. Für extrem niedrige Temperaturen scheint die Existenz zweier verschiedener Wassersorten bestätigt.

Nun sucht die Fachgemeinde nach dem endgültigen, schlagenden Beleg – dem Nachweis von HDL und LDL in flüssigem Wasser. Mehrere Teams verfolgen dabei unterschiedliche Strategien: In den USA setzt Austen Angell darauf,

hochreines Wasser gezielt mit bestimmten Salzen zu versetzen. „Damit können wir den Gefrierpunkt absenken, ohne den anomalen Charakter des Wassers zu zerstören“, sagt er – und hofft, in den Messdaten stichfeste Indizien für die Existenz der beiden Wasserphasen aufzuspüren.

### Wasser im Röntgenlaser

Andere Teams setzten auf ein noch junges Forschungswerkzeug – auf Röntgenlaser wie den European XFEL. Der nämlich erzeugt ultrakurze Röntgenblitze, die extrem rasante Prozesse analysieren können. „Damit können wir Wasser extrem schnell abkühlen und dennoch beobachten, was mit ihm passiert“, erläutert Anders Nilsson. „Denn unsere Aufnahme ist schon im Kasten, bevor das Wasser zu Eis kristallisieren kann.“

Eines der führenden Teams, die dieses Niemandsland per Röntgenlaser erkundet, scharft sich um DESY-Forscher Gerhard Grübel. In seinem Labor steht das Kernstück seines Experiments – ein Metallgebilde aus zwei sich kreuzenden Vakuumröhren, das an das Modell einer Raumstation denken lässt. „Durch die eine Röhre fliegt ein Strahl aus feinsten Wassertröpfchen“, erklärt Grübel. „Durch das andere schießen die ultrakurzen Röntgenblitze, mit denen wir die Tröpfchen



Der European XFEL liefert extrem helle und ultrakurze Röntgenlaserblitze, die unter anderem Schnappschüsse von rasanten Phänomenen ermöglichen.

Das CMWS ist eine internationale Kooperation von Fachleuten auf dem Gebiet der Wasserforschung.

Mehr als 40 Partner von Universitäten und Forschungseinrichtungen aus dem In- und Ausland haben sich zu einer gemeinsamen Forschungsinitiative zusammengeschlossen, um ein grundlegendes Verständnis der molekularen Prozesse in Wasser und an Wassergrenzflächen zu erlangen. Das Zentrum gliedert sich thematisch in fünf Forschungsbereiche, die eng miteinander verwoben sind und gemeinsam daran arbeiten, die Rolle des Wassers auf molekularer Ebene zu verstehen:



#### Fundamentale Eigenschaften von Wasser:

Inwieweit lassen sich seine zahlreichen Anomalien durch das komplexe Wechselspiel der H<sub>2</sub>O-Moleküle erklären?



#### Wasser in den Klima-, Astro- und Geowissenschaften:

Welche Rolle spielt Wasser für Umwelt und Atmosphäre, wie verhält es sich im Weltraum und auf fernen Planeten?



#### Wasser in Energieforschung und Technologie:

Wie lassen sich Korrosionsschäden minimieren, katalytische Reaktionen beschleunigen und die Energieumwandlungen effizienter machen?



#### Chemische Dynamik in Echtzeit:

Was passiert im Detail, wenn Stoffe in Wasser gelöst werden, Säuren und Basen angreifen und ionisierende Strahlung einwirkt?



#### Wasser in biochemischen und biologischen Prozessen:

Wie beeinflusst H<sub>2</sub>O das Geschehen in den Zellen? Welche Rolle spielt es bei Transportprozessen und Signalgebung?

Seit 2019 werden im Rahmen eines fortlaufenden CMWS-„Early Science“-Programms in Kooperation mit DESY Forschungsprojekte von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gefördert. Für die Koordination der Initiative wurde eine Geschäftsstelle eingerichtet. Die Planungen für ein Forschungs- und Laborgebäude haben begonnen. Weitere Informationen: [www.desy.de/cmws](http://www.desy.de/cmws)

durchleuchten.“ Die Hoffnung: Die Tröpfchen sind so stark unterkühlt, dass sich das Miteinander von HDL und LDL deutlich zeigen müsste.

Dazu braucht es eine raffinierte Erzeugung der Tröpfchen: Wasser wird durch eine mikrometerfeine Quarzdüse ins Vakuumrohr gepresst. Dabei entstehen feinste Tröpfchen, die sich so rasch abkühlen, dass sie nicht genug Zeit zum

*„Werden die Tröpfchen getroffen, explodieren sie regelrecht, was sich auf dem Bild einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachten lässt“*

Gerhard Grübel, DESY

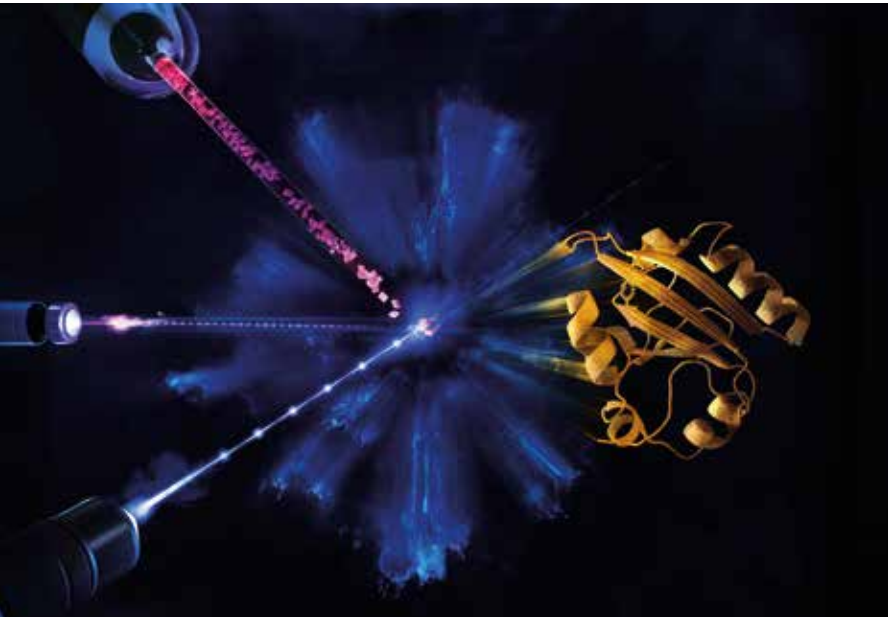
Kristallisieren haben. Im Gänsemarsch schießen sie durchs Rohr in Richtung Kreuzungspunkt. „Dort müssen wir es hinkriegen, dass sich Tropfen und Röntgenblitze treffen,“ erklärt Grübel, der

einer der Leitenden Wissenschaftler bei DESY und einer der Koordinatoren des Wasserzentrums ist. Der Trick: Ein Piezokristall versetzt die Quarzdüse in Vibrationen und kann dadurch die Tröpfchenbildung regulieren, bis Wasser und Blitze aufeinandertreffen. „Ein bisschen Justierarbeit“, beschreibt Grübel. „Werden die Tröpfchen getroffen, explodieren sie regelrecht, was sich auf dem Bild einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachten lässt.“

Für die Experimente wird die Tröpfchenkanone an die stärksten Röntgenlaser der Welt verfrachtet, etwa ins kalifornische Stanford. „Die ersten Experimente dort liefen vielversprechend“, erzählt Grübel. „Es sieht so aus, als zeigten sich tatsächlich Strukturen von dichtem und weniger dichtem Wasser. Allerdings könnten das auch Vorläuferformen von Eis sein.“

Aufschluss sollen Experimente am European XFEL bringen. „Pro Sekunde liefert er deutlich mehr Röntgenblitze als die Maschine in Stanford, wodurch wir mehr Bilder aufnehmen können“, freut sich Grübel. „Zwar deuten viele Indizien darauf hin, dass das Modell mit den zwei Wasserphasen korrekt ist, aber eine direkte Verifikation fehlt noch.“ >>





Bei der seriellen Femtosekunden-Kristallographie wird ein feiner Wasserstrahl voller Protein-Nanokristalle durch die Bahn des Röntgenlasers geschossen. Wird ein Kristall von einem Röntgenblitz getroffen, verdampft er sofort, gibt aber zuvor noch die Informationen zu seiner inneren Struktur preis.

### Wasser ist Leben

Von höchstem Belang aber ist H<sub>2</sub>O vor allem für unser Dasein – ohne Wasser kein Leben. Erwachsene bestehen immerhin zu etwa 50 bis 65 Prozent aus Wasser. Unter anderem bestimmt es den Flüssigkeitshaushalt im Körper, löst feste Nahrung wie Zucker, Salz und Vitamine und bewahrt den Organismus als Kühlmittel vor Überhitzung. Doch auch in den Körperzellen dürfte

tere Variante, sogenanntes schweres Wasser, geht die Proteinfaltung deutlich zäher voran.

Bislang mangelte es allerdings an Methoden, mit denen sich solche Prozesse detailliert untersuchen lassen. Bei der Proteinkristallographie etwa, bei der starkes Röntgenlicht atomgenau die Struktur von Biomolekülen enträtselt, arbeitet die Fachwelt für gewöhnlich mit tiefgefrorenen kristallisierten Proben – sie können der intensiven Strahlung besser widerstehen. Aber: „Das dynamische Netzwerk der Wassermoleküle in den Proteinen lässt sich damit nicht erkennen“, erklärt Müller-Werkmeister. „Die Bewegung der Moleküle ist schlicht erstarrt.“

Nun schafft eine noch junge, maßgeblich in Hamburg entwickelte Methode Abhilfe – die zeitaufgelöste serielle Femtosekunden-Kristallographie. Das Prinzip: Die Röntgenblitze treffen nicht mehr auf einen tiefgefrorenen, relativ großen Proteinkristall, sondern auf einen haarfeinen Strahl aus vielen kleinen Kristallen. Weil jeder Kristall dabei nur einmal von einem Röntgenblitz getroffen wird, kann die Kühlung entfallen. Die Experimente können also bei Raumtemperatur laufen und machen es dadurch möglich, das Wassernetzwerk in den Proteinen in einer realitätsnahen, dynamischen Form zu beobachten.

Erste Erfolge konnte eine Arbeitsgruppe um Müller-Werkmeister bereits verbuchen, als sie ein Enzym aus einem Bakterium untersuchte, das un-

## „Womöglich ist es ein fundamentales Prinzip, dass solche Wassernetzwerke gewisse Reaktionen von Proteinen regulieren“

Henrike Müller-Werkmeister, Universität Potsdam

es eine zentrale Rolle spielen. „Allerdings wissen wir immer noch nur wenig darüber, was dieses Wasser macht und welche Funktionen es besitzt“, sagt Henrike Müller-Werkmeister von der Universität Potsdam. „Erst allmählich fangen wir an, uns damit zu beschäftigen.“

Unter anderem scheint H<sub>2</sub>O wichtig zu sein, um den pH-Wert zu regulieren: Bestimmte Eiweiße pumpen Protonen (Wasserstoffkerne) in die Zelle hinein oder aus ihr heraus. Kurze Ketten aus Wassermolekülen dürften dabei als regelrechte Kletterseile fungieren. Auch wenn sich ein Eiweißmolekül nach seiner Entstehung in seine endgültige Form faltet, scheint Wasser kräftig mitzumischen: Ersetzt man es durch eine gewich-

ter anderem in kontaminierten Böden vorkommt. „Die Rolle des Wassers hat uns dabei überrascht“, sagt sie. Konkret hatte das Team in einer Art molekularem Film beobachten können, wie die Informationsübertragung zwischen zwei Untereinheiten des Enzyms abläuft: nämlich nicht wie ursprünglich vermutet durch eine mechanische, quasi zahnradähnliche Wirkung, sondern über eine „Telefonschnur“ aus vier Wassermolekülen.

### Wasser in der Medizin

„Womöglich ist es ein fundamentales Prinzip, dass solche Wassernetzwerke gewisse Reaktionen von Proteinen regulieren“, vermutet Müller-Werkmeister. „Das wollen wir in Zukunft unter- >>



### PETRA IV – das ultimative Röntgenmikroskop

Das bei DESY geplante 3D-Röntgenmikroskop PETRA IV wird einzigartige Möglichkeiten bieten, um die Struktur und Dynamik von Wasser im notwendigen Detail zu entschlüsseln. Daraus können wesentliche Erkenntnisse für Natur- und Lebenswissenschaften, Technik und Gesundheit abgeleitet werden.

Für die Medizinforschung lassen sich an PETRA IV beispielsweise die individuellen Bewegungen von nur wenige Nanometer großen Proteinen in lebenden Zellen zukünftig live verfolgen. Dabei lässt sich das Röntgenlicht von PETRA IV so präzise dosieren, dass biologische Proben während der Messung keine Strahlenschäden erleiden. Und die Spaltung von Wassermolekülen zur Gewinnung von Wasserstoff als Energieträger lässt sich mit PETRA IV direkt in der Nähe von dazu eingesetzten Katalysatorpartikeln auf der Nanoskala beobachten. Das kann helfen, maßgeschneiderte Katalysatoren zu entwickeln, um die Wasserspaltung zu optimieren.

An PETRA IV kann Wasser mit beispielloser Auflösung untersucht werden, um biologische und chemische Prozesse zu verstehen.

# „Wassermolekülen beim Tanz zusehen“



Der Physiker Anders Nilsson ist einer der bekanntesten Wasserforscher weltweit.

**A**nders Nilsson von der Universität Stockholm ist einer der renommiertesten Wasserforscher der Welt. Gemeinsam mit DESY-Direktor Helmut Dosch hat er 2015 die Idee eines interdisziplinären Wasserzentrums aus der Taufe gehoben. Nilsson gab dem ersten Gedankenaustausch mit einem zweiseitigen Konzept die erforderliche Kontur. Er selbst hofft, an dem neuen Zentrum die rasante innere Dynamik des Wassers zu erkunden.

**femto:** Welche Mission verfolgt das Centre for Molecular Water Science (CMWS)?

**Anders Nilsson:** Wasser ist allgegenwärtig. Es spielt in den verschiedensten Zusammenhängen eine Rolle – für das Leben, in der Umwelt, beim Klima, in der Energieerzeugung. Deshalb halte ich es für eine ausgezeichnete Idee, Wasser in einem interdisziplinären Zentrum aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu erforschen. Bislang sprechen die verschiedenen Forschungsdisziplinen,

die sich mit Wasser beschäftigen, nur sehr begrenzt miteinander. Mit einem gemeinsamen Wasserzentrum lässt sich das aufbrechen, damit kann ein wertvoller Wissenstransfer in Gang kommen. In Europa herrscht diesbezüglich eine Art Vakuum. Und dieses Vakuum kann das CMWS füllen.

**femto:** Welche Hoffnungen verbinden Sie mit diesem Zentrum?

**Anders Nilsson:** Allgemein gesagt geht es darum, unser Wissen über das Wasser entscheidend zu vertiefen. Schließlich ist Wasser eines der Schlüsselthemen für die Zukunft. Zum Beispiel beim Klimawandel: Der wird sich sehr stark beim Wasser bemerkbar machen, etwa durch einen steigenden Meeresspiegel oder eine Veränderung in der Bewölkung. Gleiches gilt für die Energieversorgung: Bislang gilt das Öl als Grundlage unserer Gesellschaft. In Zukunft dürfte es das Wasser sein, etwa in Brennstoffzellen oder bei der künstlichen Photosynthese.

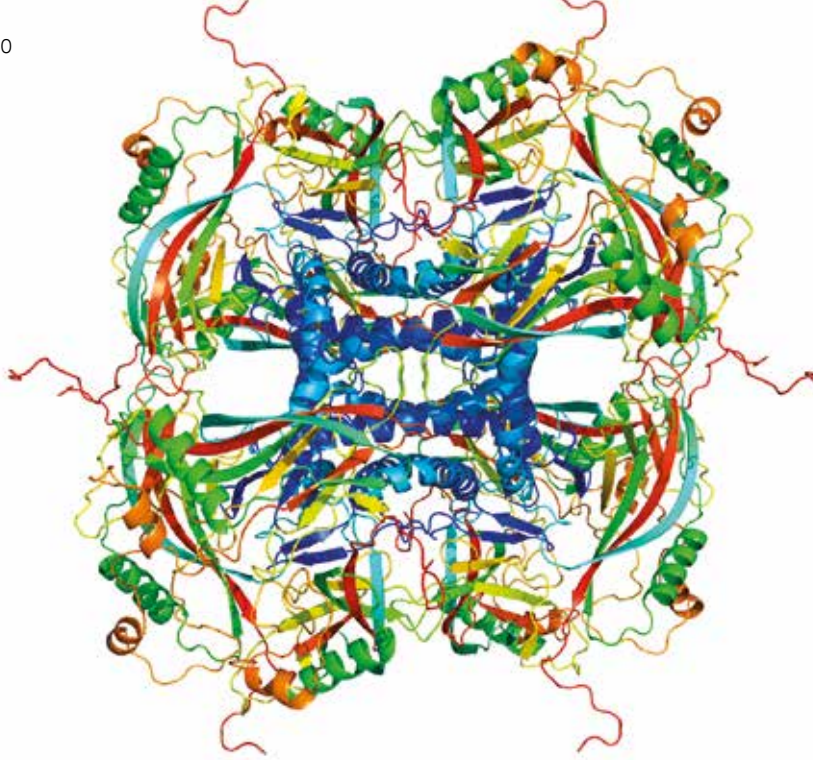
**femto:** Das CMWS soll bei DESY entstehen. Eine sinnvolle Idee?

**Anders Nilsson:** Für mich ist DESY die ideale Heimat für ein solches Zentrum. Denn hier gibt es extrem leistungsfähige Röntgenquellen wie PETRA III und den European XFEL. Und ich glaube, dass Untersuchungen mit hochintensiven Röntgenblitzen viele neue Details über die Natur des Wassers ans Licht bringen können. Diese Infrastruktur macht DESY zu einem hervorragenden Standort für ein Wasserzentrum.

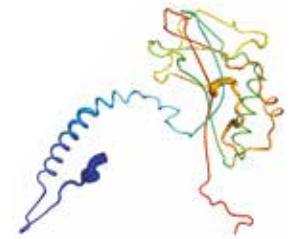
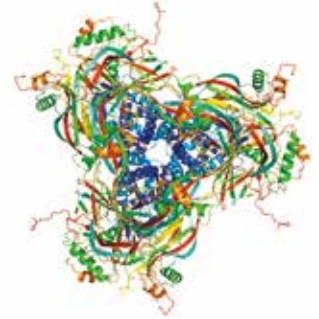
**femto:** Welche Forschung möchten Sie persönlich gerne am CMWS betreiben?

**Anders Nilsson:** Bisher haben wir vor allem die statischen Eigenschaften von Wasser untersucht, haben sozusagen Standbilder aufgenommen und analysiert. Aber natürlich ist Wasser eine höchst dynamische Substanz. Die Moleküle sind ständig in Bewegung, bildlich gesprochen führen sie einen wilden Tanz auf. Mit den bisherigen Methoden können wir im Wesentlichen beobachten, wie sich die Wassermoleküle vor und nach ihrem Tanz verhalten. Doch um Wasser wirklich zu verstehen, müssen wir analysieren, was zwischendrin passiert, müssen den Molekülen beim Tanzen zusehen. Diese Dynamik werden wir mit dem European XFEL und auch mit PETRA III studieren können. Und genau das ist der nächste Schritt zu einem wirklich grundlegenden Verständnis.





Die räumliche Struktur von Proteinen lässt sich aus den charakteristischen Beugungsbildern berechnen, die sie im Röntgenlicht erzeugen.



„Solch ein fundiertes Grundlagenwissen ist nötig, damit die Pharmabranche künftig Fortschritte erzielen kann.“

Arwen Pearson, Universität Hamburg

suchen, insbesondere auch im Rahmen des neuen Wasserzentrums bei DESY.“ Doch auch andere Themen stehen auf der Forschungsagenda: Wie beeinflusst Wasser die Funktionalität sogenannter ungefalteter Proteine? Diese kommen zuhauf in jeder Zelle vor, ihre Analyse könnte neue Wirkmechanismen für die Medizin enträtseln.

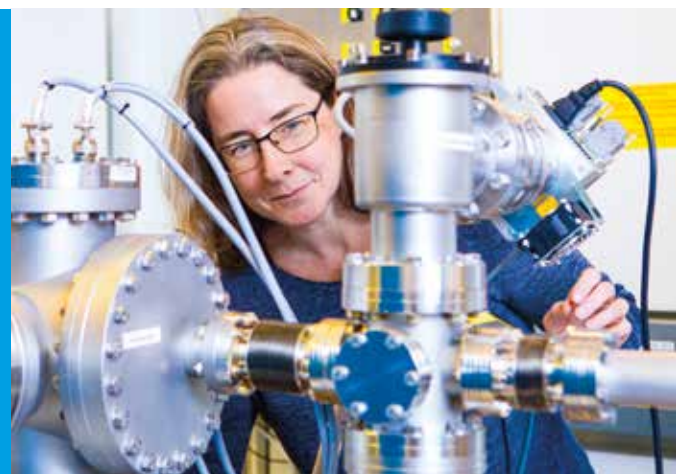
Auch außerhalb des Körpers hat Wasser wichtige Funktionen für die Medizin, etwa als Lösungsmittel für neue medizinische Wirkstoffe auf der Basis von Proteinen oder Peptiden. „Diese Biomoleküle sind nicht sehr stabil und werden unwirksam, wenn sie nicht richtig aufbewahrt werden“, sagt Arwen Pearson, Biophysikerin an der Universität Hamburg. „Das ist gerade für Entwicklungsländer relevant, wo es zum Teil schwierig sein kann, Medikamente durchgängig zu kühlen.“

Unter anderem hängt die Stabilität eines Proteins von seinem Lösemittel ab. Ist nicht genug Wasser da, kann es schlicht austrocknen. Ist nur Wasser vorhanden, kann sich das Protein stärker als gewünscht entfalten und dadurch an Stabilität verlieren. „Geringe Zusätze an Salzen könnten das beispielsweise verhindern“, erläutert Pearson. „Es kommt also sehr auf eine geeignete

Präparation des Lösemittels an.“ Künftige Experimente am CMWS sollen wichtiges Basiswissen liefern, wie Biomoleküle und Wasser miteinander agieren. „Solch ein fundiertes Grundlagenwissen ist nötig, damit die Pharmabranche künftig weitere Fortschritte erzielen kann“, meint Pearson.

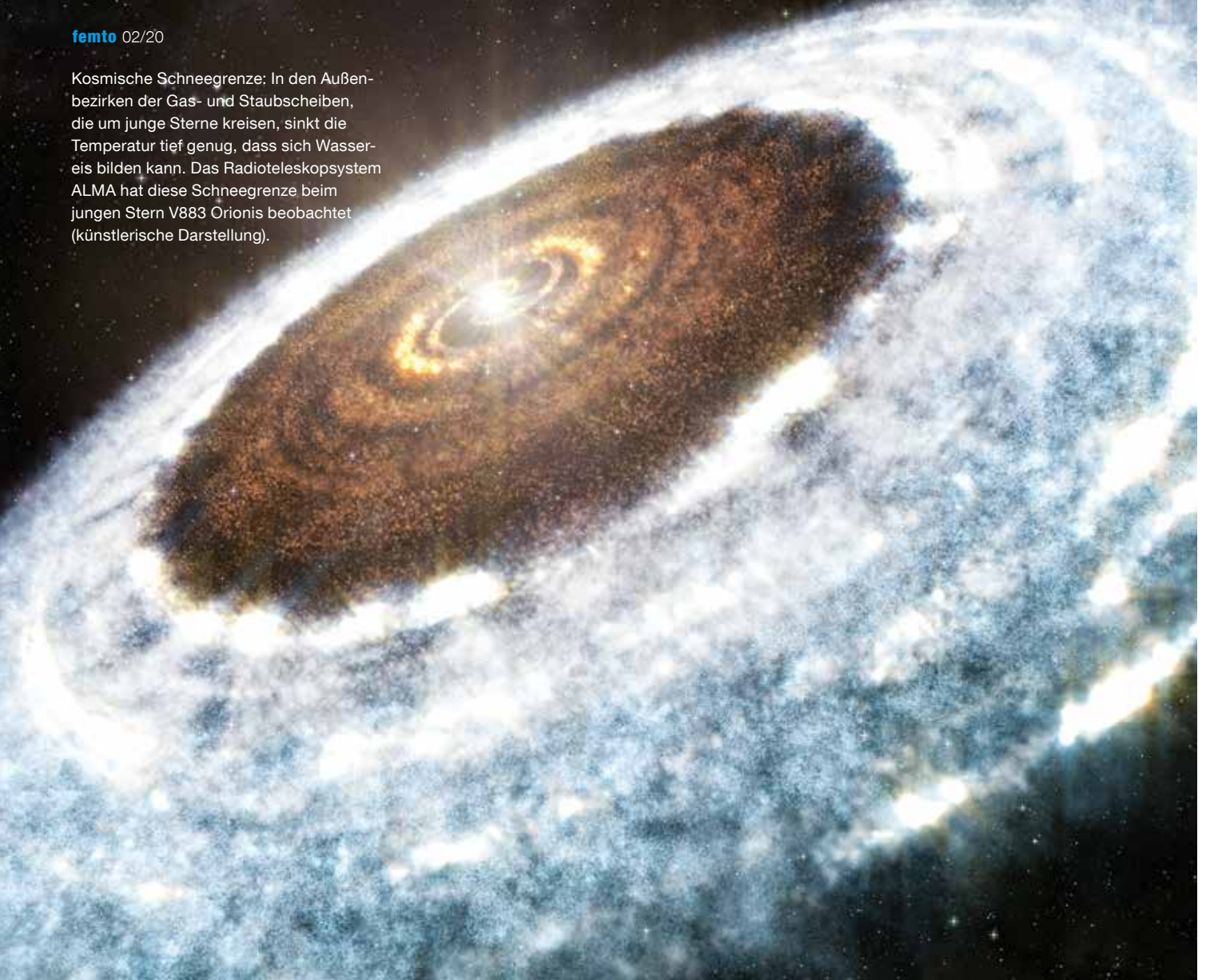
Das CMWS wird sich auch eines hochaktuellen Felds annehmen – der Rolle von Wassermolekülen bei Virusinfektionen wie beispielsweise durch das Coronavirus. Dieses kann nur in Wasser existieren. Trocknet das Virus aus, geht es rasch zugrunde. Das neue Wasserzentrum möchte unter anderem untersuchen, wie die Wassermoleküle mit der Virushülle interagieren oder wie Wasser Eiweißstrukturen während des Infektionsprozesses beeinflusst. Auch bei der Entwicklung neuer Wirkstoffe, sogenannter Virostatika, könnten die Arbeiten am neuen Wasserinstitut helfen – zum Beispiel bei der Einbettung der Medikamente in spezielle wasserbasierte Trägerstoffe. >>

Die Biophysikerin Arwen Pearson von der Universität Hamburg leitet das Hamburg Advanced Research Centre for Bioorganic Chemistry (HARBOR).





Kosmische Schneegrenze: In den Außenbezirken der Gas- und Staubscheiben, die um junge Sterne kreisen, sinkt die Temperatur tief genug, dass sich Wasseris bilden kann. Das Radioteleskopsystem ALMA hat diese Schneegrenze beim jungen Stern V883 Orionis beobachtet (künstlerische Darstellung).



### Wasser im All

Andere Wasserfachleute wenden ihre Blicke in deutlich weitere Ferne – ins All. Der Weltraum offenbart nämlich eine verblüffende chemische Vielfalt. Bis heute konnten spezielle Teleskop-techniken mehr als 200 verschiedene Molekülsorten identifizieren, die im Weltraum herum-schwirren – darunter auch durchaus komplexe, etwa Vorläufer von Aminosäuren. Nur: Wie konnten diese Verbindungen überhaupt entstehen? Das ist allein deshalb schon ein Rätsel, weil im Kosmos vielerorts überaus tiefe und damit reaktionsunfreundliche Temperaturen vorherrschen. Zudem ist der Kosmos ziemlich leer: Im nahezu endlosen Raum zwischen den Sternen geistern nur sehr wenige potenzielle Reaktionspartner durch die Gegend. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie aufeinandertreffen und sich verbinden, ist gering.

Des Rätsels Lösung dürfte mit Wasser zu tun haben. „Wir gehen heute davon aus, dass ein

*„Wir gehen heute davon aus, dass ein Großteil der Reaktionen im interstellaren Raum auf den Oberflächen von Eispartikeln stattfindet“*

Melanie Schnell, DESY

Großteil der Reaktionen im interstellaren Raum auf den Oberflächen von Eispartikeln stattfindet“, sagt DESY-Chemikerin Melanie Schnell. Die Idee: Im Laufe der Zeit treffen die Moleküle auf herum-vagabundierende Eiskörnchen und bleiben daran kleben. Dort können sie, angeregt zum Beispiel von UV-Strahlung, mit anderen Molekülen reagieren, die ebenfalls vom Eiskrümel eingefangen wurden. Die Produkte, die dabei entstehen, können dann irgendwann wieder abdampfen. Einige Fachleute spekulieren gar, ob manche

Urbausteine des Lebens auf diese Weise entstanden sind.

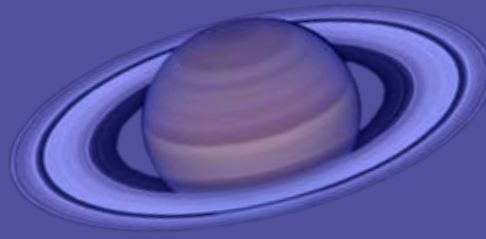
„Mit speziellen Experimenten versuchen wir herauszufinden, wie Moleküle auf solchen Eisteilchen gebildet werden können“, berichtet Schnell, Leitende Wissenschaftlerin bei DESY und ebenfalls Koordinatorin des CMWS. Einer dieser Versuchsaufbauten – eine Vakuumkammer, in der extrem frostige Temperaturen herrschen – simuliert die Weltraumbedingungen im Labor. In dieser Kammer dampfen die Fachleute Wasser auf ein Substrat auf, es entsteht eine dünne Eisschicht. Hinzu kommt eine Prise von anderen Molekülen, beispielsweise Formaldehyd.

Um eine chemische Reaktion auszulösen, bestrahlt das Team die mit Formaldehyd gespickte Eisoberfläche mit energiereicher UV-Strahlung. Danach lässt sich das Geschehen beispielsweise mit Infrarotstrahlung oder, wie künftig geplant, mit Mikrowellenstrahlung beobachten. Deren Spektralanalyse verrät, welche Moleküle sich im Weltraumsimulator gebildet haben. „Unter anderem schauen wir, ob irgendwelche biologisch relevanten Stoffe entstehen,“ sagt Melanie Schnell. „Werden wir fündig, wäre das ein weiteres wichtiges Indiz dafür, dass Eis im Weltall als eine Art interstellarer Katalysator fungiert.“

### Ortho- und para-Wasser

Wichtig für die Astrochemie könnte auch eine weitere Merkwürdigkeit sein, die in den Atomkernen des Wassermoleküls steckt, speziell in den beiden Wasserstoffkernen. Wie andere Atomkerne auch besitzen sie eine Art quantenmechanischen Eigendrehmoment, den „Spin“: Bildlich gesprochen richten sich die Kerne wie winzige Kreisel aus, die entweder nach oben oder nach unten zeigen. Das Entscheidende dabei: Je nachdem, wie die beiden Kernspins relativ zueinander orientiert sind, beeinflussen sie sich unterschiedlich. „Das führt dazu, dass Wasser bezüglich dieser Kernspins verschiedene Quantenzustände annehmen kann“, erläutert DESY-Physiker Jochen Küpper. „Wir nennen sie ortho- und para-Wasser.“

Beide unterscheiden sich vereinfacht gesagt durch ihren inneren Energiegehalt: para-Wasser besitzt einen Quantenhauch weniger Energie als ortho-Wasser und ist deshalb der Grundzustand. Die Folge: Würde man ein Glas Wasser, das bei Raumtemperatur zu drei Teilen aus ortho- und zu einem Teil aus para-Wasser besteht, auf weit unter minus 200 Grad Celsius abkühlen, nähme >>



femtopolis

## Leben ohne Wasser?

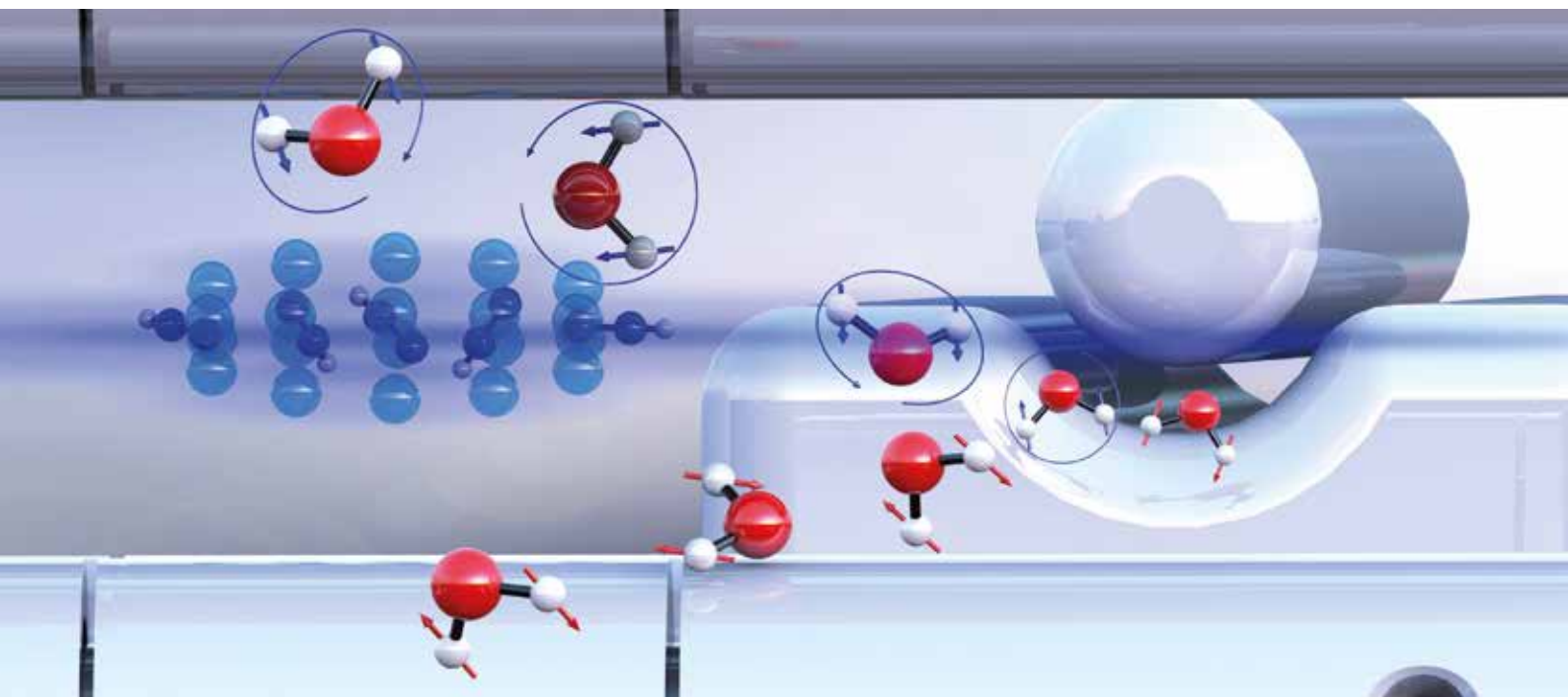
Leben ist ohne Wasser nicht möglich. Alle Lebensvorgänge, so wie wir sie kennen, beruhen auf dem Vorhandensein des Lebenselixiers Wasser. Einige Lebewesen können zwar extreme Trockenzeiten überstehen, erwachen aber erst dann zum Leben, wenn das Wasser wieder fließt. Und anderswo im Universum? Bei der Suche nach exotischen alternativen Formen des Lebens haben Astrobiologen zum Beispiel den Saturnmond Titan im Blick: Titan besitzt eine dichte Stickstoffatmosphäre und einen Flüssigkeitskreislauf mit Wolken, Regen, Verdunstung und Seen auf der Oberfläche. Statt Wasser fließt auf dem Saturnmond jedoch flüssiges Methan und Ethan. Im Prinzip kann es biologische Funktionen von Wasser übernehmen, ähnliche Bedingungen sind auch auf anderen Himmelskörpern denkbar.

Bei einer mittleren Temperatur von minus 180 Grad Celsius haben allerdings biologische Zellen, wie wir sie von der Erde kennen, auf Titan keine Chance mehr. Insbesondere können sich keine Lipidmembranen bilden, also schützende Hüllen aus Fettmolekülen, die lebende Zellen auf der Erde zusammenhalten und verhindern, dass deren Inhalt sich im Wasser verteilt und einfach davonschwimmt. Doch die Astrobiologen haben eine Alternative erdacht, das sogenannte Azotosom, das ist eine Zellmembran auf Basis von Stickstoffverbindungen. Das Azotosom funktioniert wie irdische Lipidmembranen und könnte insbesondere aus der Verbindung Acrylnitril aufgebaut sein. Nur rund zwei Jahre nach der Idee vom Azotosom haben Forscher mit der Radioteleskopanlage ALMA in den chilenischen Anden 2017 tatsächlich Acrylnitril auf Titan entdeckt. Hinweise auf exotische Einzeller auf dem Tiefkühlmond gibt es aber bislang nicht.

Tatsächlich könnten es biologische Zellen auf Titan trotz Azotosom schwer haben: Eine theoretische Betrachtung zeigte, dass die alternative Zellmembran unter Titanbedingungen zwar stabil wäre, sich allerdings gar nicht erst bilden dürfte, jedenfalls nicht von selbst. Acrylnitril gefriert demnach ohne äußere Einflüsse schlicht zu Eis. Allerdings bedeutet das nicht unbedingt das Ende hypothetischer Aliens auf Titan: Bei den tiefen Temperaturen auf dem Saturnmond wären Zellen möglicherweise ohnehin eher zusammenhängende Festkörper als eine lose Ansammlung von Organellen in einer Flüssigkeit, vermuten Forscher. Solche Zellen wären darauf angewiesen, dass sie von kleinen Molekülen wie Acetylen aus der flüssigen Kohlenwasserstoffsuppe versorgt werden, die in sie hineindiffundieren können – dabei wäre eine Zellmembran möglicherweise sogar hinderlich.

Die Idee ist jedenfalls inspirierend und führt womöglich zu neuen Modellen und vielleicht sogar zur Entdeckung extraterrestrischer Lebensformen, die ganz ohne Wasser auskommen und faszinierende Wege gefunden haben, andere Moleküle für ihre Lebensvorgänge zu nutzen.





Ortho- und para-Wassermoleküle mit unterschiedlich orientierten Kernspins (blaue bzw. rote Pfeile) reagieren unterschiedlich schnell mit anderen Stoffen wie Diazenylumionen (Mitte links).

die para-Phase stetig zu – die Natur drängt es energetisch gesehen stets in den niedrigsten Zustand.

Nur: Inwiefern unterscheiden sich beide Varianten in ihrem Verhalten gegenüber anderen Stoffen? Um das herauszufinden, hatten Küpper und sein Team zunächst eine diffizile Hürde zu nehmen – sie mussten ortho- und para-Wasser voneinander trennen. „Dazu erzeugen wir einen Strahl aus einzelnen Wassermolekülen“, beschreibt Küpper. „Wir schicken sie durch ein spezielles elektrisches Feld, das die Moleküle nach oben lenkt.“ Der Clou: ortho- und para-Moleküle werden unterschiedlich stark abgelenkt und sind damit voneinander getrennt. „Wir spalten den Molekülstrahl in mehrere Teilstrahlen auf, ähnlich wie ein Prisma das Sonnenlicht in seine Regenbogenfarben“, sagt Küpper. „Deshalb bezeichnen wir unser Gerät als elektrisches Prisma.“

Dann schickten die Forscher sowohl ortho- als auch para-Moleküle in elektrische Fallen, in denen ein Reaktionspartner lauerte – das stickstoffhaltige Molekül  $N_2H^+$ . Bei Kontakt mit Wasser übertrug es einen Wasserstoffkern aufs Wassermolekül. Als Produkte entstanden molekularer Stickstoff sowie das „Säuremolekül“  $H_3O^+$ . Das Resultat: „Wir haben gemessen, dass para-Wasser 25 Prozent schneller reagiert als ortho-Wasser“, erläutert Jochen Küpper. „Das heißt: para- und ortho-Wasser sind eigentlich zwei verschiedene Moleküle, was für die Chemiker ziemlich überraschend war.“

Das Ergebnis ist relevant für die Astrochemie. Im Weltraum finden sich winzige Eiskristalle,

von denen immer mal wieder Wassermoleküle abdampfen. Die Vermutung: Im Laufe der Zeit erwärmen sich diese abgedampften Moleküle allmählich – mit Ausnahme der Wasserstoff-Kernspins, die ihre ursprüngliche Eistemperatur sehr lange behalten. „Das könnte erklären, dass im Weltraum bei höheren Temperaturen immer wieder mehr para-Wasser als erwartet existiert“, sagt Küpper. „Und das kann dann mit anderen Molekülen zum Teil schneller reagieren als das ortho-Wasser.“ Dies kann beispielsweise Auswirkungen auf Modelle in der Astrochemie haben.

*„Das heißt: para- und ortho-Wasser sind eigentlich zwei verschiedene Moleküle, was für die Chemiker ziemlich überraschend war“*

Jochen Küpper, DESY

#### Wasser für die Energieversorgung

Eine zentrale Rolle dürfte Wasser in der Energieversorgung der Zukunft spielen, vor allem als Ausgangsstoff für die Gewinnung von grünem Wasserstoff. Dazu muss das Wassermolekül mit Hilfe von regenerativen Energien gespalten werden. Heute geschieht das vor allem durch die Elektrolyse, ein mehrstufiges Verfahren: Zunächst erzeugen Windräder oder Solarzellen >>



Jochen Küpper leitet die „Controlled Molecule Imaging“-Gruppe am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY.

# „Wir sind vom europaweiten Interesse überwältigt“

Die Zeit ist reif für ein Wasserzentrum, sagt DESY-Direktor Helmut Dosch

**femto:** DESY plant ein Zentrum, das sich auf die Erforschung von Wasser konzentriert. Was sind die Beweggründe?

**Helmut Dosch:** Wasser ist für das Leben auf unserer Erde unverzichtbar. In Umwelt, Biologie und Medizin spielt es eine wesentliche Rolle. Aber auch für die Technologie ist es essenziell: Viele katalytische Prozesse laufen in wässriger Umgebung ab, und die Schäden, die Korrosion jährlich anrichtet, sind enorm. Wir tun also gut daran, Wasser so genau wie möglich zu verstehen. Dafür müssen wir sein Verhalten auf der molekularen Ebene untersuchen. Nur so lassen sich seine Besonderheiten ergründen, etwa jene Anomalie, dass es seine größte Dichte bei vier Grad Celsius besitzt. Für solche Studien betreiben wir bei DESY die geeigneten Forschungswerkzeuge – hochmoderne Röntgenquellen, die beispielsweise die extrem schnellen Bewegungen der Wassermoleküle als Momentaufnahme sichtbar machen können. Deshalb nehmen wir uns das Thema jetzt vor.

**femto:** Wie hat sich die Idee überhaupt entwickelt?

**Helmut Dosch:** Bei DESY haben wir Expertinnen und Experten, die sich schon länger mit dem Thema beschäftigen. Aber auch andere Fachleute waren von Anfang an engagiert, allen voran der Physiker Anders Nilsson aus Stockholm. Dann starteten wir einen Testballon: Wir schrieben die unterschiedlichsten Leute in Europa an und luden

Helmut Dosch ist seit 2009 Vorsitzender des DESY-Direktoriums.



sie zu einem Brainstorming-Workshop nach Hamburg ein, um zu sehen, wie groß das Interesse der Wissenschaft ist. Die Reaktion war enorm, wir waren überwältigt. Mittlerweile hat sich das zu einer beeindruckenden europäischen Initiative entwickelt: Bis heute haben mehr als 40 Institutionen ihre Absicht erklärt, sich beim Centre for Molecular Water Science (CMWS) zu engagieren, auch finanziell. Also: Die Zeit scheint reif für ein Wasserzentrum.

**femto:** Welche Relevanz hat das CMWS für Wirtschaft und Gesellschaft?

**Helmut Dosch:** Es geht vor allem um Grundlagenforschung, um Antworten auf fundamentale Fragen. Doch wenn wir diese Antworten finden, könnte das für viele anwendungsorientierte Bereiche wichtig sein. Denken Sie an die Bekämpfung der Korrosion oder an Katalysereaktionen in wässriger Umgebung. Wenn man die besser in den Griff kriegt, bedeutet das enorme wirtschaftliche Vorteile. Auch Umweltaspekte sind

wichtig, etwa beim Trinkwasser. Um Rückstände von Medikamenten und Hormonen aus dem Wasser zu entfernen, braucht man spezifische molekulare Filter. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der jetzt enorm an Bedeutung gewonnen hat, ist das detaillierte molekulare Verständnis des viralen und bakteriellen Geschehens in wässrigen Umgebungen – das betrifft Mensch und Umwelt. Auch dafür könnte das CMWS wichtige Grundlagen schaffen.

**femto:** Wie geht es weiter mit dem Wasserzentrum?

**Helmut Dosch:** Es gibt ein Grundsatzpapier, das beschreibt, wie genau wir die molekulare Wasserforschung vorantreiben wollen, und es gibt enormes Interesse auf nationaler und internationaler Ebene. Erste Pilotprojekte haben bereits begonnen. Wir sind absolut optimistisch, dass das Zentrum in naher Zukunft kommen wird.





Simone Techert ist  
Leitende Wissenschaft-  
lerin bei DESY.

## „Um zu versuchen, die Sache in die Praxis umzusetzen, arbeiten wir unter anderem mit der Forschungsabteilung eines großen Automobilkonzerns zusammen“

Simone Techert, DESY

klimateutralen Strom. Dieser wird dann in eine Anlage gespeist, die das Wasser elektrisch in seine Bestandteile trennt. Deutlich effektiver dürfte ein einstufiger Prozess sein – die photokatalytische Wasserspaltung. Bei ihr wird  $H_2O$  direkt und ohne Umwege durch Lichtprozesse gespalten.

Damit das funktioniert, braucht es ein molekulares Helferlein – einen Katalysator, der die Spaltungsreaktion entscheidend beschleunigt und dadurch erst möglich macht. „Geeignet scheinen zum Beispiel sogenannte Perowskite“, sagt DESY-Forscherin Simone Techert. „Das ist eine Materialklasse, die auch für künftige Solarzellen interessant ist.“ Vor einem technischen Einsatz stehen jedoch noch diverse Forschungsfragen: Welche Materialzusammensetzung eignet sich für die Wasserspaltung am besten, gerade wenn Wasser in Kontakt mit dem Katalysator kommt? Wie lassen sich die Materialien günstig und umweltfreundlich fertigen, am besten in wässriger Lösung? Wie ist es um ihre Haltbarkeit bestellt, und lassen sie sich einfach recyceln?

Um Antworten zu finden, plant Techerts Team Experimente unter anderem am European XFEL. Dort wollen die Fachleute wasserbenetzte Katalysatorkristalle mit Laserpulsen beleuchten, um die Wasserspaltung auszulösen. Dann werden

sie mit ultrastarken Röntgenblitzen analysieren, was im Detail bei der Spaltung der Wassermoleküle passiert und wie sie sich optimieren lässt. „Dabei geht es uns nicht allein um Grundlagenforschung“, betont Simone Techert. „Um zu versuchen, die Sache irgendwann in die Praxis umzusetzen, arbeiten wir unter anderem mit der Forschungsabteilung eines großen Automobilkonzerns zusammen.“

### Wasser als Klimaregulator

Auch für einen anderen Bereich ist Wasser von höchst prominenter Bedeutung – für das Klima. So ist der Ozean ein aktiver Mitspieler im Klimageschehen: Er speichert in großen Mengen Wärme und  $CO_2$ . Die Erdatmosphäre enthält ebenfalls jede Menge Wasser, je nach Breitengrad und Wetterlage können es bis zu vier Prozent sein. Besonders klimarelevant sind dabei die Wolken – gewaltige Ansammlungen von Wassertröpfchen und winzigen Eiskristallen. Doch wie groß ihr Einfluss auf die globale Erwärmung genau ist, zählt zu den größten Unwägbarkeiten in den derzeitigen Klimamodellen: Werden Wolken bei steigenden Temperaturen den Klimawandel zusätzlich anheizen? Oder können sie ihn mildern und damit ein wenig entschärfen?

Um diese Frage besser beantworten zu können, versucht die Fachwelt akribisch zu analysieren, wie sich Wolken bilden. „In der Luft schweben winzige Partikel, die kleinsten messen einige Nanometer, die größten bis zu 100 Mikrometer“, erklärt Nønne Prisle, Atmosphärenforscherin an der Universität Oulu in Finnland. „An diesen Schwebeteilchen kann Wasserdampf zu Tropfen kondensieren.“ Für die Wolkenentstehung sind diese Teilchen essenziell: Wäre die Luft klinisch rein, bräuchte es eine ungleich feuchtere Atmosphäre, damit Cumulus und Cirrus entstehen können.

Rund 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 40 Ländern kamen zur „Water Week“ bei DESY, um das interdisziplinär angelegte CMWS zu diskutieren und voranzutreiben.



Bilder: Gesine Born, DESY (Porträt); Marta Mayer, DESY





Vorbereitung der Untersuchung von Details der Wolkenbildung mit Röntgenstrahlung

„Sobald ein Wassertropfen an einem Partikel kondensiert ist, kann er bestimmte Bestandteile aus diesem Partikel herauslösen, zum Beispiel seifenartige organische Moleküle“, beschreibt Prisle. „Das Tröpfchen besteht also nicht aus reinem Wasser, sondern stellt eine hochkomplexe Lösung dar.“ Das Entscheidende: Die gelösten Moleküle können das Verhalten des Tropfens drastisch verändern. Sie drängen an seine Oberfläche, verändern die Oberflächenspannung und können das Tröpfchen dadurch stabilisieren – was im Endeffekt die Wolkenbildung verstärkt.

*„Bislang fühle ich mich oft ein wenig isoliert, wie eine Art Wasser-Nerd. Beim CMWS dagegen gäbe es lauter Gleichgesinnte, und das fände ich sehr inspirierend.“*

Nønne Prisle, Universität Oulu

Um diese Prozesse detailliert zu studieren, arbeitet Prisles Team mit den ultrastarken Röntgenblitzen aus Teilchenbeschleunigern wie PETRA III: Die Fachleute schießen einen überschallschnellen Wasserstrahl in eine Vakuumkammer, angereichert mit organischen Molekülen. Trifft ein Röntgenblitz auf diese Lösung, kann er ihr Elektronen entreißen, die sich mit einem Detektor auffangen lassen. Die Analyse der Messdaten verrät, wie sich die Moleküle an der Wasseroberfläche anordnen: „Steigert man die Konzentration an organischen Molekülen im Wasser immer weiter, tritt irgend-

wann eine Sättigung an der Wasseroberfläche auf“, erklärt Prisle. „Es passen dort schlicht keine Moleküle mehr hin.“

Doch welchen Effekt haben diese Phänomene auf die Wolkenbildung und damit auf das Klima? Das hat Nønne Prisle vor einiger Zeit in einer Computersimulation abgeschätzt. „Die veränderte Oberflächenspannung dürfte die Wolkenbildung verstärken und damit einen kühlenden Effekt auf die Atmosphäre haben“, sagt sie. „Dieser Effekt könnte beträchtlich sein.“ Liegen die Fachleute richtig, könnte das in Zukunft unliebsame Folgen haben: Ein Teil jener Schwebeteilchen, die als Kondensationskeime für Wolken dienen, sind menschengemacht und werden durch Verkehr und Industrie in die Atmosphäre geladen. An sich gilt es, diese Luftverschmutzung zu verringern, denn sie fordert jährlich Zigtausende Todesopfer. Eine sauberere Luft täte zwar der Gesundheit gut, würde aber die Wolkenbildung mindern und damit deren Kühleffekt – die globale Klimaerwärmung würde beschleunigt.

Noch aber sind solche Prognosen mit Unsicherheiten behaftet. Um sie zu präzisieren, plant Prisles Arbeitsgruppe nun neue, ausgefeiltere Experimente: Sie arbeitet an einer Apparatur, die statt eines feinen Wasserstrahls eine Folge winziger Tröpfchen produziert, die sich dann per Röntgenstrahlung untersuchen lassen. Versuche, die Nønne Prisle liebend gern im Rahmen des geplanten Wasserzentrums machen würde: „Das ist eine großartige Initiative“, schwärmt sie. „Bislang fühle ich mich oft ein wenig isoliert, wie eine Art Wasser-Nerd. Beim CMWS dagegen gäbe es lauter Gleichgesinnte, und das fände ich sehr inspirierend.“



Nønne Prisle ist Atmosphärenforscherin an der Universität Oulu in Finnland.

# Die ultraschnelle Geburt Freier Radikale

Röntgenblitze liefern einen Einblick in die erste, rasante chemische Reaktion bei der Radiolyse von Wasser

**M**it Hilfe extrem kurzer Röntgenblitze hat ein internationales Forschungsteam erstmals Details der ultraschnellen Entstehung aggressiver Radikale bei der Bestrahlung von Wasser beobachtet. Die Untersuchung gibt bislang unerreichte Einblicke in die schnellste chemische Reaktion in diesem Prozess, der zu Strahlenschäden im Körper führen kann, aber auch auf anderen Feldern wie beispielsweise in den Materialwissenschaften von erheblicher Bedeutung ist.

Die Forscherinnen und Forscher hatten die Radiolyse von Wasser untersucht, so nennen Wissenschaftler die Aufspaltung einer chemischen Verbindung – in diesem Fall Wasser – durch Strahlung. „Unser Körper besteht im Wesentlichen aus Wasser“, erläutert DESY-Forscher Robin Santra, einer der Leiter der Untersuchung. „Wir alle sind im Alltag ionisierender Strahlung ausgesetzt – ob durch Röntgenaufnahmen, natürliche Radioaktivität oder beispielsweise kosmische Strahlung auf Flugreisen. Daher ist das, was hier passiert, von grundlegender Bedeutung.“

Bei der Radiolyse von Wasser schlägt zunächst energiereiche Strahlung ein Elektron aus einem Wassermolekül ( $\text{H}_2\text{O}$ ), es wird dadurch zu  $\text{H}_2\text{O}^+$  ionisiert. In der Folge kommt es zu einem sogenannten Protonentransfer, bei dem das ionisierte Wassermolekül einen Wasserstoffkern (Proton) an ein benachbartes Molekül abgibt. Dadurch entstehen ein extrem reaktionsfreudiges Hydroxyl-Radikal (OH), das Schäden im Organismus anrichten kann, und ein Hydronium-Ion ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ). Der Prozess selbst ist seit langem bekannt, wie er aber genau abläuft, war bislang nicht im Detail beobachtet worden – unter anderem, weil er extrem schnell ist.

„Wir haben die allerschnellste chemische Reaktion in ionisiertem Wasser beobachtet, die zur Geburt des Hydroxyl-Radikals führt“, betont Linda Young vom Argonne National Laboratory in den USA, die zusammen mit Santra und Zhi-Heng Loh von der Technischen Universität Nanyang in Singapur die Studie geleitet hat. „Das Hydroxyl-Radikal selbst ist von wesentlicher Bedeutung, da es sich in einem Organismus, einschließlich unserer Körper, ausbreiten und nahezu jedes Makromolekül wie DNA, RNA und Proteine beschädigen kann.“ Ein tieferes Verständnis der Radiolyse könnte möglicherweise helfen, Strategien zu entwickeln, um die Entstehung des Hydroxyl-Radikals zu unterdrücken.

*„Wir konnten zeigen, dass die Röntgendaten tatsächlich Informationen über die Dynamik der Wassermoleküle enthalten, die den Protonentransfer ermöglicht“*

Robin Santra, DESY

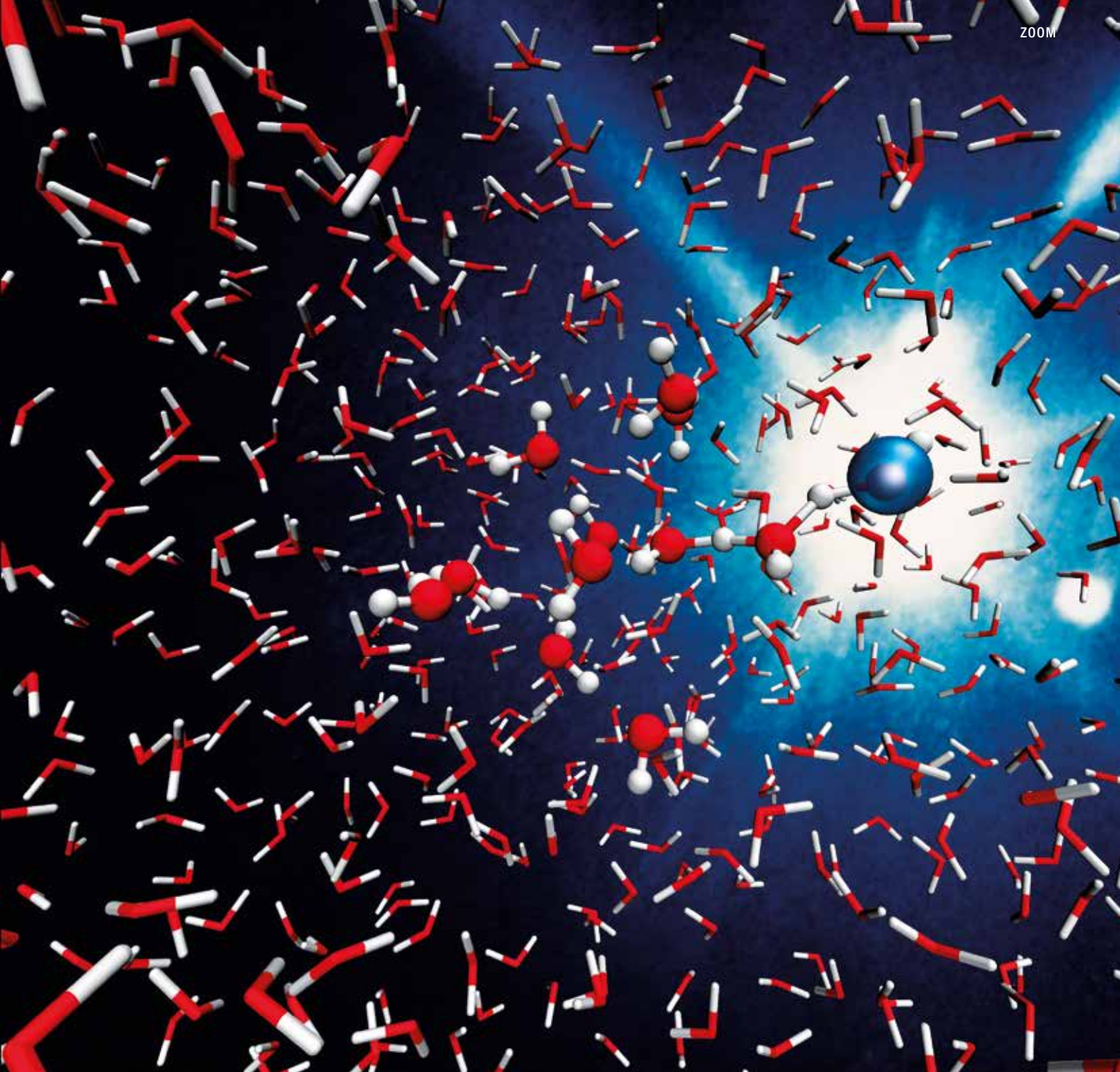
Für die Untersuchung hatten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Wasser per Laser ionisiert und anschließend mit dem Röntgenlaser LCLS des US-Forschungszentrums SLAC in Kalifornien extrem kurze Schnappschüsse der dadurch ausgelösten Prozesse aufgenommen. Der Röntgenlaser ermöglicht ultrakurze Belichtungszeiten von nur rund 30 Femtosekunden (billiardstel Sekunden).

Die detaillierte Analyse der Messdaten bestätigt die theoretische Modellierung des Protonentransfers, die Santra geleitet hat. „Wir konnten zeigen, dass die Röntgendaten tatsächlich Informationen über die Dynamik der Wassermoleküle enthalten, die den Protonentransfer ermöglicht“, berichtet der DESY-Theoretiker. „In knapp 50 milliardstel Sekunden rücken die umgebenden Wassermoleküle auf das ionisierte Molekül zu und drehen ihm ihre reaktionsfreu-



Robin Santra leitet die Theoriegruppe am Center for Free-Electron Laser Science bei DESY.





digste Seite zu, bis eines von ihnen nah genug ist, um sich in einer Art Handschlag eines der Protonen zu greifen, wodurch es zu Hydronium wird und ein Hydroxyl-Radikal zurücklässt.“ Den Beobachtungen zufolge läuft dieser Protonen-transfer typischerweise in nur 46 milliardstel Sekunden ab.

Damit ist den Forscherinnen und Forschern ein erster entscheidender Schritt zur Aufklärung der extrem schnellen Dynamik der Radiolyse von Wasser gelungen. „Unsere Arbeit zeigt, dass die schnellste chemische Reaktion in ionisiertem Wasser auf der Zeitskala von 50 Femtosekun-

den abläuft“, fasst Loh zusammen. „Während 50 Femtosekunden nach den meisten Maßstäben schon kurz sind, existieren innerhalb dieser 50 Femtosekunden noch viele physikalische Prozesse, die noch nicht aufgelöst werden konnten. Das Ziel ist letztlich, das komplizierte Netzwerk der physiko-chemischen Prozesse zu enthüllen, die in ionisiertem Wasser stattfinden, angefangen von dem Moment, in dem ionisierende Strahlung auf das Wasser trifft, bis zur Geburt des hochreaktiven OH-Radikals.“

Science, 2020; DOI: 10.1126/science.aaz4740

Die Abbildung zeigt den Moment des Protonentransfers von einem ionisierten zu einem neutralen Wassermolekül, wodurch ein Hydroxyl-Radikal und ein Hydronium-Ion entstehen. Die blaue Wolke zeigt das Orbital, aus dem das Elektron durch Bestrahlung herausgeschlagen wurde.



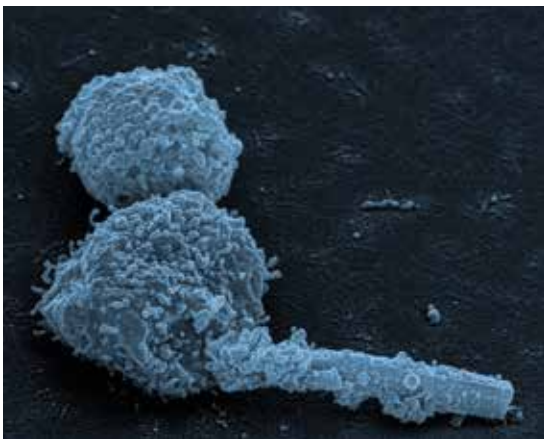
# Forschung kompakt

## Neuer Ansatz für Mittel gegen Schlafkrankheit

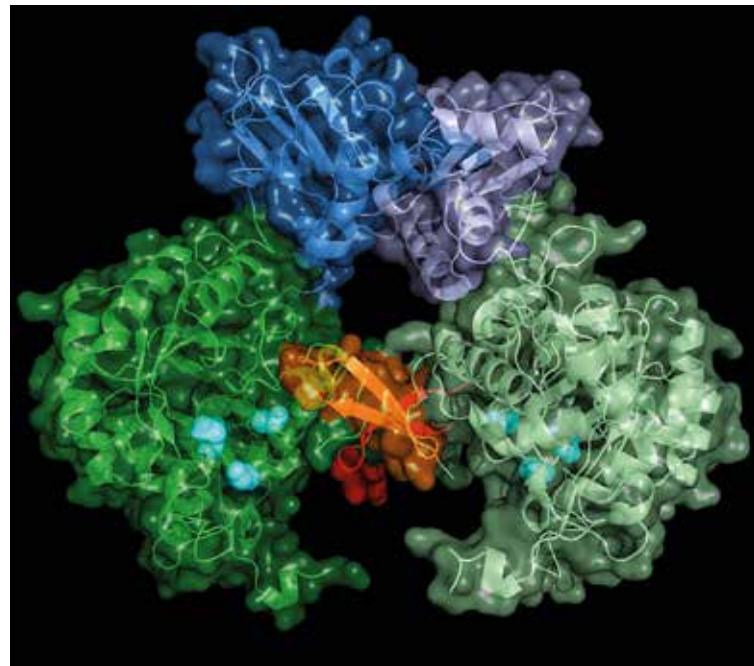
**D**ie Schlafkrankheit wird vom Parasiten *Trypanosoma brucei* ausgelöst, der mit dem Stich der im südlichen Afrika heimischen Tsetsefliege übertragen wird. Tropenmediziner zählen die Infektion zu den bedeutendsten Tropenkrankheiten.

Auf der Suche nach einem möglichen Ansatzpunkt für Medikamente gegen den Erreger hat ein Team um Christian Betzel von der Universität Hamburg, Lars Redecke von der Universität Lübeck und von DESY sowie Henry Chapman von DESY die detaillierte räumliche Struktur eines lebenswichtigen Enzyms des Erregers entschlüsselt. Das Ergebnis liefert Hinweise auf einen möglichen Bauplan für einen Wirkstoff, der dieses Enzym gezielt blockiert und den Erreger somit absterben lässt.

Um das Enzym, die sogenannte Inosin-5'-Monophosphat-Dehydrogenase (IMPDH) zu analysieren, brachten die Forscherinnen und Forscher bestimmte Insektenzellen dazu, das Enzym in ihrem Inneren zu kristallisieren. Die winzigen, nadelförmigen Kristalle wurden am Röntgenlaser LCLS am US-Forschungszentrum SLAC in Kalifornien analysiert.



Die Mikrokristalle werden so lang, dass sie aus den Insektenzellen herausstechen.



Struktur der IMP-Dehydrogenase des Parasiten: Das Enzym bildet im aktiven Zustand Paare (Dimere). Der Schalter des Enzyms (die Bateman-Region) ist in Blautönen dargestellt.

Das Team zeichnete die Beugungsbilder von mehr als 22 000 Mikrokristallen auf und konnte daraus die räumliche Struktur des Enzyms mit einer Genauigkeit von 0,28 millionstel Millimetern (Nanometer) genau berechnen – das entspricht etwa dem Durchmesser eines Aluminiumatoms. „Das Ergebnis zeigt nicht nur die genaue Struktur des Enzymschalters, der Bateman-Region, sondern auch, mit welchen Molekülen die Zelle das Enzym schaltet und wie diese sogenannten Ko-Faktoren an dem Enzymschalter andocken“, berichtet Karol Nass von DESY. Die Daten könnten nun einen Ansatz für eine Blockade der Parasiten-Dehydrogenase liefern.

*Nature Communications*, 2020;  
DOI: 10.1038/s41467-020-14484-w

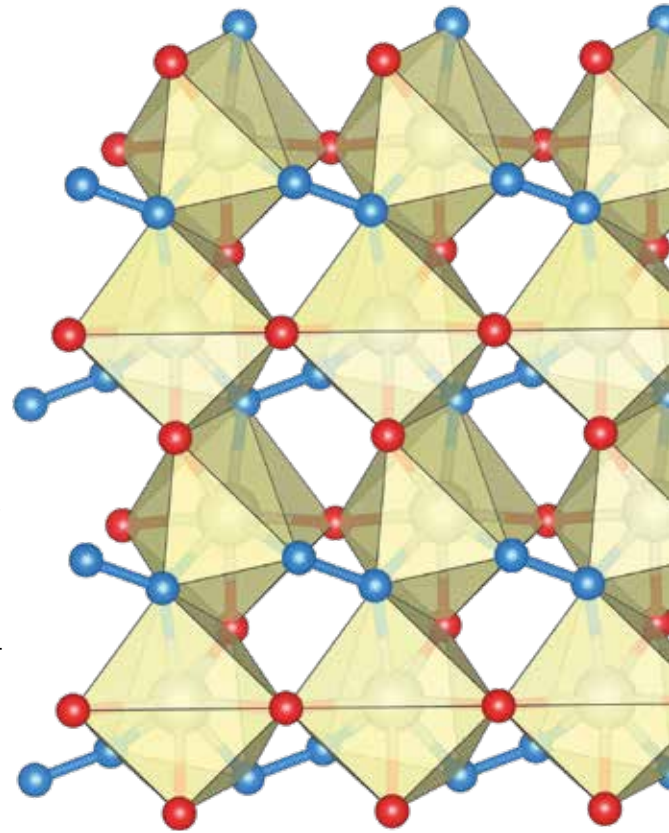
# Neuartiges Material mit Hightech-Perspektiven

**E**ine internationale Forschungsgruppe unter der Leitung von Wissenschaftlern der Universität Bayreuth hat bei DESY ein bislang völlig unbekanntes Material identifiziert: Rhenium-Nitrid-Pernitrid. Es besitzt eine Kombination von Eigenschaften, die bisher als inkompatibel galten, und ist dadurch für technologische Anwendungen hochattraktiv. Bei dem neuen Material handelt sich um einen superharten metallischen Leiter, der wie ein Diamant extrem hohen Drücken standhält. Das in Bayreuth entwickelte Herstellungsverfahren ist auch auf weitere technologisch interessante Materialien anwendbar.

Dass es eine Verbindung geben könnte, die metallisch leitfähig, superhart und ultra-inkompressibel ist, wurde in der Forschung lange Zeit

für unwahrscheinlich gehalten. Man glaubte, diese Eigenschaften könnten nicht gleichzeitig in demselben Material vorkommen und seien daher inkompatibel. Das widerlegen die jetzt veröffentlichten Forschungsarbeiten, die unter anderem an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III stattfanden. Derzeit ist der genaue Anwendungsbereich des neuen Materials schwer zu definieren, doch ist Rhenium-Nitrid-Pernitrid aufgrund seiner außergewöhnlichen Kombination attraktiver Eigenschaften ein Material, das dazu beitragen kann, die technologischen Herausforderungen der Zukunft zu meistern.

*Nature Communications*, 2019;  
DOI: 10.1038/s41467-019-10995-3



Die Struktur des Rhenium-Nitrid-Pernitrids, die einzelne Stickstoffatome (rot) und die Stickstoffanteln N-N (blau) enthält. Größere Kugeln zeigen Rheniumatome.

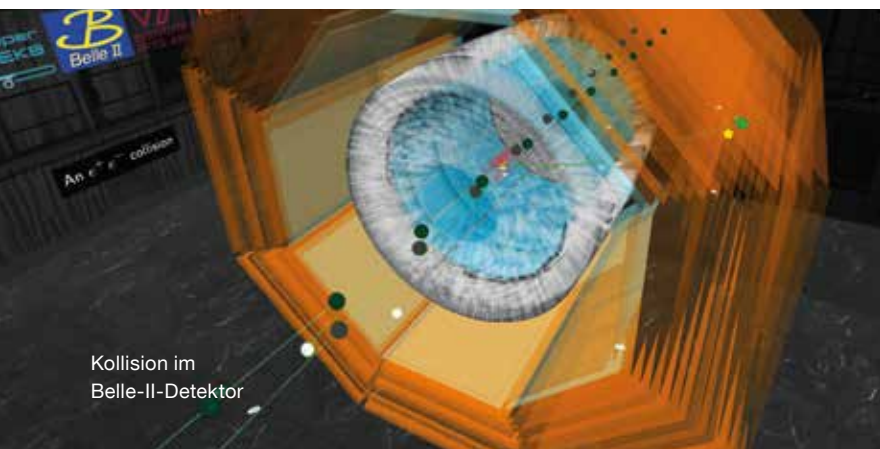
## European XFEL erzeugt Laserlicht mit Rekordenergie

**D**er europäische Röntgenlaser European XFEL hat einen neuen Rekord bei der erzeugten Röntgenstrahlung erreicht: Als einziger Freielektronen-Röntgenlaser weltweit ist der European XFEL jetzt in der Lage, intensive Röntgenblitze mit einer Energie von 25 Kilo-Elektronenvolt pro Lichtteilchen (Photon) zu erzeugen und so in unbekannte Welten vorzudringen und komplexe Phänomene zu untersuchen.

Harte, kurzweilige Röntgenstrahlung in ultrakurzen Pulsen von weniger als 100 milliardstel Sekunden (Femtosekunden) Dauer, wie sie beispielsweise am European XFEL erzeugt werden, eröffnen völlig neue wissenschaftliche Möglichkeiten, um Materie und Materialien auf atomarer Ebene in ultrakurzen Zeitskalen zu untersuchen. Mit der Photonenenergie von 25 Kilo-Elektronenvolt (keV) – das entspricht einer Laserwellenlänge von 0,5 Ångström (0,05 Nanometer) – stellte die DESY-Betriebsmannschaft, die den European-XFEL-Beschleuniger betreibt, einen neuen Wellenlängenrekord für Laserlicht auf. Durch eine Änderung der Einstellung des Undulators SASE1, einer der Lichterzeugungstrecken des European XFEL, konnte das Beschleunigerteam die Grenze sogar noch weiter auf 30 keV hinausschieben und auf einem Szintillatorschirm deutliche Hinweise auf Freielektronen-Laserstrahlung beobachten.



Leuchtfleck der Rekordblitze auf einem röntgenempfindlichen Schirm



Kollision im Belle-II-Detektor

## Auf der Suche nach dem Z'-Boson

Vor rund einem Jahr ist der Belle-II-Detektor am japanischen Forschungszentrum KEK in Betrieb gegangen. Jetzt veröffentlicht das internationale Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die ersten Resultate, die mit Hilfe des Detektors gewonnen wurden. Die Veröffentlichung kreist die Eigenschaften eines neuen Teil-

chens ein, das im Zusammenhang mit der Dunklen Materie steht, die nach heutigem Kenntnisstand im Universum über fünfmal häufiger vorhanden ist als die uns vertraute Materie.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an zwölf Instituten in Deutschland sind maßgeblich am Bau und Betrieb des Detektors beteiligt. DESY hat eine führende Rolle insbesondere bei der Integration und Inbetriebnahme des hochsensiblen innersten Detektors, des Pixel-Vertex-Detektors. Mit Belle II suchen die Forscherinnen und Forscher nach Spuren neuer Physik, mit der sich zum Beispiel das ungleiche Verhältnis von Materie und Antimaterie oder die mysteriöse Dunkle Materie erklären lassen. Eines der bisher unentdeckten Teilchen, dem die Forscher mit dem Belle-II-Detektor auf der Spur sind, ist das Z'-Boson – eine Variante des Photons (Lichtteilchens), das jedoch anders als das Photon eine Masse besitzt. Es könnte eine interessante Rolle beim Zusammenspiel von Dunkler und normaler, sichtbarer Materie spielen, also eine Art Vermittler zwischen den beiden Materieformen sein.

*Physical Review Letters, 2020;*  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.141801

Bild: KEK, Belle II, Zachary Duer, Tanner Uptegrove, Leo Pilonen, George Glasson, W. Jesse Barber, Samantha Spytek, Christopher Dobson (Virginia Tech Institute for Creativity, Arts and Technology, Virginia Tech Department of Physics, Virginia Tech School of Education)

## Wie molekulare Fußbälle im Röntgenlaser zerplatzen

Ein internationales Forschungsteam hat in Echtzeit verfolgt, wie Fußballmoleküle aus Kohlenstoff im Strahl eines Röntgenlasers zerplatzen. Die Untersuchung zeigt den zeitlichen Verlauf des Zerberstens, das weniger als eine billionstel Sekunde dauert, und hat Bedeutung für die Analyse empfindlicher Proteine und anderer Biomoleküle, die ebenfalls häufig mit Hilfe heller Röntgenlaserblitze durchleuchtet werden. Die Fußballmoleküle

lösen sich langsamer und anders als erwartet, wie das Team um Nora Berrah von der Universität von Connecticut (USA) und Robin Santra von DESY herausfand.

Die Forscherinnen und Forscher hatten mit sogenannten Buckminsterfullerenen experimentiert, kurz Buckyballs genannt. Diese eignen sich gut als einfaches Modellsystem für Biomoleküle. Da sie nur aus einer Atomsorte bestehen und symmetrisch aufgebaut sind, lassen sie sich in

Theorie und Experiment gut darstellen. Dies ist ein erster Schritt vor der Untersuchung von komplexeren Molekülen aus unterschiedlichen Atomsorten.

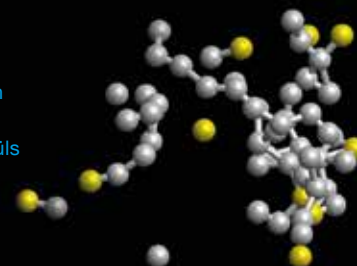
Die erzielten Ergebnisse legten die Basis für ein tieferes Verständnis sowie eine quantitative Modellierung des Strahlenschadens in Biomolekülen durch Röntgenlaserblitze, schreiben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

*Nature Physics, 2019;*  
DOI: 10.1038/s41567-019-0665-7

Bild: DESY, Zoltan Jurek



Computersimulation der Entwicklung eines Fußballmoleküls nach 0, 60 und 240 Femtosekunden.





# Meilenstein für Minibeschleuniger

**E**in DESY-Team hat einen wichtigen Meilenstein für einen Miniatur-Teilchenbeschleuniger erzielt: Erstmals hat ein mit Terahertz-Strahlung betriebener Beschleuniger die Energie der injizierten Elektronen mehr als verdoppelt. Der Aufbau aus zwei gekoppelten Terahertz-Manipulatoren verbesserte dabei auch die

Qualität des beschleunigten Elektronenstrahls im Vergleich zu früheren Terahertz-Experimenten erheblich.

Terahertz-Strahlung liegt zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen und ist ein vielversprechender Antrieb für eine neue Generation kompakter Teilchenbeschleuniger, die neue Anwendungen erschließen.

Die Technik ist gegenwärtig noch in der Entwicklung. Das Team um DESY-Forscher Dongfang Zhang hat nun einen Zwei-Stufen-Beschleuniger gebaut. Die erste Stufe komprimiert die hineinfliegenden Elektronenpakete von ungefähr 0,3 auf 0,1 Millimeter Länge, die zweite beschleunigt die komprimierten Pakete von 55 auf 125 Kilo-Elektronenvolt (keV). „Das ist der erste Energieschub von mehr als 100 Prozent in einem Terahertz-getriebenen Beschleuniger“, betont Zhang. Das Zwei-Stufen-System erzeugt ein Beschleunigungsfeld (Gradient) mit einer Stärke von 200 Millionen Volt pro Meter (200 MV/m), das ist nah an den derzeit stärksten konventionellen Teilchenbeschleunigern.

Der zweistufige Minibeschleuniger wird mit Terahertz-Strahlung (hier rot dargestellt) betrieben. In einem ersten Schritt (links) werden die Elektronenpakete (blau dargestellt) komprimiert, in einem zweiten Schritt (rechts) beschleunigt. Die beiden Einzelelemente sind jeweils rund zwei Zentimeter breit.



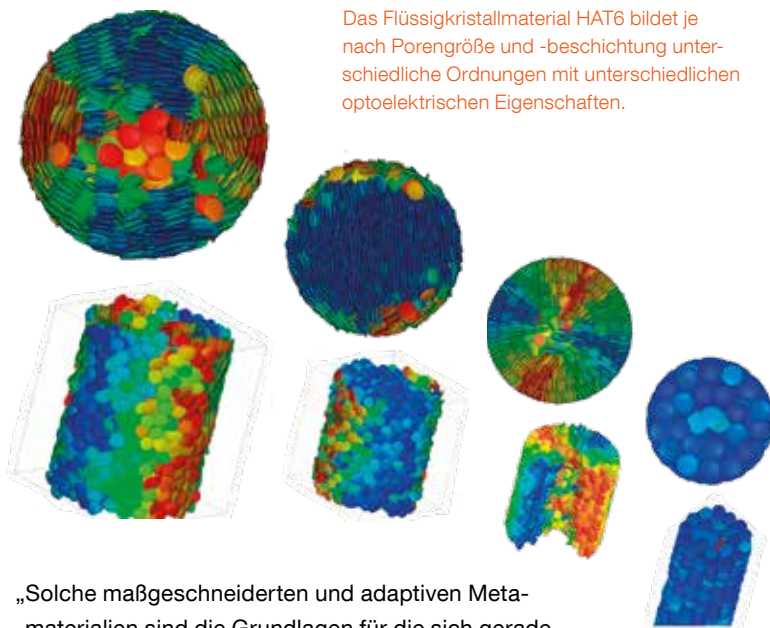
„Optica“, 2019;  
DOI: 10.1364/OPTICA.6.000872

## Selbstorganisation von Flüssigkristallen

**F**lüssigkristalle können sich in nanometerkleinen Poren auf erstaunlich vielfältige Weise selbst ordnen. Diese Selbstorganisation ermöglicht ganz neue Materialien, wie ein Team um Patrick Huber von der Technischen Universität Hamburg berichtet. Die Forscherinnen und Forscher hatten unter anderem an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III untersucht, wie Poren- und Materialeigenschaften beeinflussen, welche Ordnung die Flüssigkristalle ausbilden.

Das Team verwendete dabei ein Flüssigkristallmaterial aus scheibenförmigen Molekülen. Über die Porengröße sowie eine hydrophile oder hydrophobe (wasseranziehende oder -abstoßende) Beschichtung der Porenwand ließ sich dabei steuern, ob sich die scheibenförmigen Moleküle mit der flachen Seite oder der Kante an der Porenwand anlagern, und welche Ordnung sie dann ausbilden.

„Die unterschiedlichen kollektiven Ordnungen der Flüssigkristalle haben verschiedene elektrische und optische Eigenschaften“, erläutert Huber.



Das Flüssigkristallmaterial HAT6 bildet je nach Porengröße und -beschichtung unterschiedliche Ordnungen mit unterschiedlichen optoelektrischen Eigenschaften.

„Solche maßgeschneiderten und adaptiven Metamaterialien sind die Grundlagen für die sich gerade rasch entwickelnde transformative Optik. Hierbei können Lichtwege in Materialien realisiert werden, die mit klassischen Materialien nicht umzusetzen sind. Beispiele sind extrem dünne optische Linsen mit starker Brechkraft, was in Zukunft vielleicht jeden Brillenträger freuen könnte, oder Beschichtungen, die Objekte unsichtbar machen.“

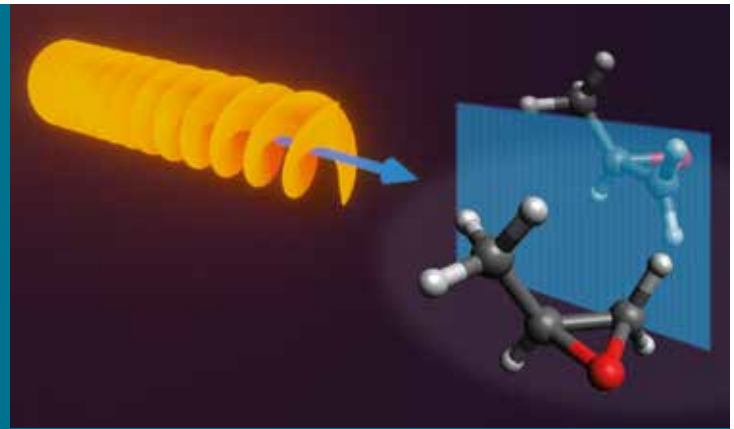
Nanoscale, 2019; DOI: 10.1039/C9NR07143A

# Korkenzieher-Laser sortiert Spiegelmoleküle

**M**it einem innovativen Ansatz lassen sich die oft existierenden spiegelbildlichen Versionen eines Moleküls trennen.

Viele der molekularen Bausteine des Lebens gibt es in zwei spiegelbildlichen Versionen, die ein völlig unterschiedliches chemisches Verhalten aufweisen können. So schmeckt beispielsweise eine Version der organischen Verbindung Carvon nach Minze, ihr Spiegelbild aber nach Kümmel. In der Medizin können Unterschiede auftreten, die lebenswichtig sind.

Bislang ist die Trennung spiegelbildlicher Varianten meist auf Flüssigkeiten ausgelegt. Das von der Gruppe um DESY-Forscher Jochen Küpper entwickelte Verfahren ist für Gase konzipiert. Es basiert auf einem speziellen Laseraufbau, der als optische Zentrifuge bezeichnet wird. Darin regt ein korkenzieherförmiger Laserpuls Moleküle zu ultraschnellen Rotationen an. Dazu kommt ein elektrisches Feld.

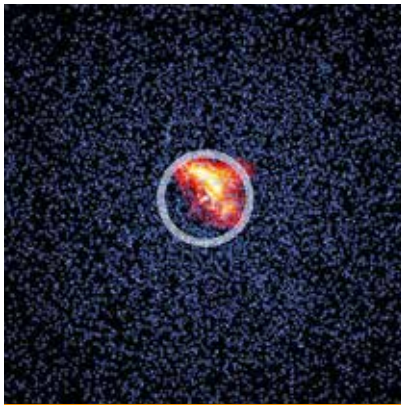


In diesem Aufbau verhalten sich spiegelbildliche Molekülvarianten unterschiedlich und lassen sich so räumlich trennen.

Über die Zeitspanne, in der die Moleküle mit dem Laserfeld interagieren, lässt sich die Anreicherung der jeweiligen Variante steuern, berichten die Forscherinnen und Forscher. Das neue Verfahren schafft auch einen neuen theoretischen Rahmen für das Verständnis des Phänomens der Spiegelbildlichkeit von Molekülen in der Natur.

*Physical Review Letters*, 2019;  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.243202

Das neue Verfahren kombiniert einen korkenzieherförmigen Laserpuls mit einem elektrischen Feld, um spiegelbildliche Versionen einer chemischen Verbindung räumlich voneinander zu trennen.



Der Krebsnebel (gelb-orange), wie ihn das Weltraumteleskop „Chandra“ im Bereich der Röntgenstrahlung sieht (Daten bereitgestellt von M. C. Weisskopf und J. J. Kolodziejczak). Die blauen Punkte entsprechen den rekonstruierten Richtungen der von H.E.S.S. registrierten Gammaquanten vom Krebsnebel. Der weiße Kreis zeigt die daraus ermittelte Ausdehnung im Gammalicht.

## Supernova im Gammalicht

**D**er Krebsnebel ist der Überrest einer vor rund 1000 Jahren beobachteten Supernova in unserer Galaxie. Obwohl es sich um eines der am besten untersuchten Himmelsobjekte handelt, ist es einem internationalen Team von Wissenschaftlern erst jetzt mit Hilfe der H.E.S.S.-Teleskope in Namibia gelungen, die Ausdehnung des Krebsnebels im Bereich der hochenergetischen Gammastrahlung zu bestimmen.

Gammastrahlung wurde 1989 erstmals mit erdgebundenen Teleskopen vom Krebsnebel gemessen. Bis heute konnte der Supernova-Überrest im Gammalicht jedoch nicht von einer Punktquelle unterschieden werden. Grund dafür ist die vergleichsweise schlechte Richtungsauflösung der Teleskope: Sie messen die Gammastrahlen nicht direkt, sondern beob-

achten Teilchenschauer, die von den kosmischen Gammaquanten in der Erdatmosphäre ausgelöst werden. Die Ursprungsrichtung wird daraus berechnet.

„Für diese jetzt veröffentlichte Messung kam erstmals eine neuartige Simulationsumgebung zum Einsatz, welche die Bedingungen bei der Beobachtung des Krebsnebels auf einem bisher unerreichten Detailgrad mit berücksichtigt“, berichtet Stefan Ohm, Leiter der H.E.S.S.-Gruppe bei DESY. Das hat die Genauigkeit drastisch gesteigert. Die ermittelte Ausdehnung im Gammalicht stimmt gut mit der in anderen Wellenlängenbereichen gemessenen überein.

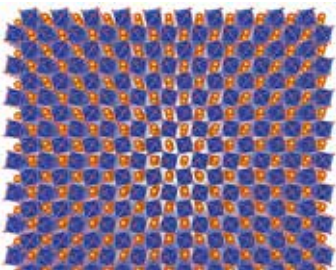
*Nature Astronomy* 2019;  
DOI: 10.1038/s41550-019-0910-0



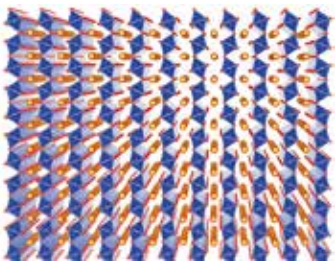
# Blick in den tiefen Erdmantel

**M**it Hochdruck wie in 2700 Kilometern Tiefe hat ein internationales Forschungsteam neue Einblicke in die Eigenschaften des häufigsten Minerals der Erde gewonnen: Die Messungen zeigen, wie sich Bridgmanit an der Grenze zum Erdkern in sogenanntes Post-Perowskit umwandelt. Beide besitzen dieselbe chemische Zusammensetzung, aber einen unterschiedlichen inneren Aufbau. Da Bridgmanit der Hauptbestandteil des Erdmantels ist, hat diese Strukturumwandlung erhebliche Auswirkungen auf die Dynamik im unteren Erdmantel, einschließlich der Ausbreitung von Erdbebenwellen.

„Wir wissen seit 15 Jahren, dass sich Bridgmanit unter diesen Bedingungen in eine andere Kristallstruktur namens Post-Perowskit umwandelt“, erklärt Forschungsleiter Sébastien Merkel von der Universität Lille in Frankreich. „Was wir bisher nicht wussten, war, wie schnell es das tut.“ An der Extreme Conditions Beamline P02.2 von DESYs Röntgenquelle PETRA III konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nun die Dynamik der Transformation untersuchen. Es stellte sich heraus, dass sich die Umwand-



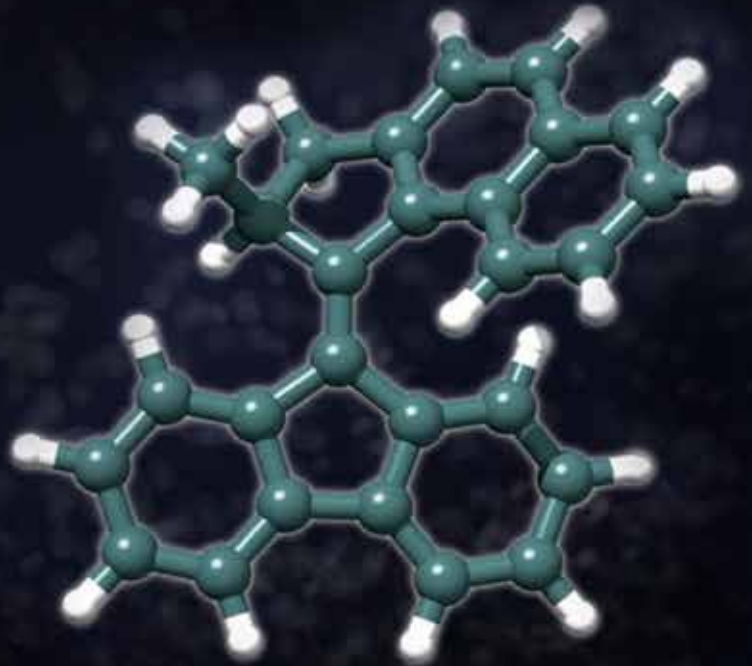
Die Kristallstrukturen von Bridgmanit (oben) und Post-Perowskit (unten)



lung je nach Druck und Temperatur in etwa 10 bis 10 000 Sekunden vollzieht. In diesen Bereich fallen auch die Frequenzen seismischer Wellen. „Das bedeutet, dass seismische Wellen die Transformation auslösen können und damit das seismische Signal verstärken“, betont Merkel. „Diese Beobachtung erklärt, warum manchmal starke Reflexionen zu sehen sind und manchmal nicht. Und sie könnte auch weitere Anomalien erklären.“

*Nature Communications, 2019; DOI: 10.1038/s41467-019-13482-x*

femtomenal



# 47

**ATOME** bilden die kleinste Maschine, die

bei DESY bislang gelaufen ist: Sie besteht aus nur einem einzigen Molekül mit 27 Kohlenstoff- und 20 Wasserstoffatomen. Mit Hilfe von Mikrowellen hat ein Team um DESY-Forscherin Melanie Schnell die exakte Struktur des künstlichen molekularen Motors entschlüsselt, den ein Team um den niederländischen Chemie-Nobelpreisträger Ben Feringa konstruiert hatte. Wie ein großer Motor besitzt das Molekül einen Rotor und einen Stator. Die Untersuchung enthüllte, wie die einzelnen Teile des Mini-Motors aufgebaut sind, der einen Durchmesser von nur 1,2 Nanometern (millionstel Millimetern) hat. Unter der vereinfachten Annahme eines kreisförmigen Moleküls entspräche das einem Umfang von etwa 3,8 Nanometern. Zum Vergleich: Die größte Maschine im Betrieb bei DESY ist der Speicherring PETRA III mit einem Umfang von 2,3 Kilometern – rund das 600-Milliardenfache.

# Röntgen-Kombitechnik

## hilft Tuberkulose- und Osteoporoseforschung

Kombinationsmessung zeigt Verteilung von Metallen in biologischen Proben

**M**it einer Röntgen-Kombinations-technik hat ein Forschungsteam Nanotransporter für Tuberkulose-medikamente mit sehr hoher Präzision in biologischen Zellen aufgespürt. Die Methode vereint zwei ausgeklügelte Röntgenmessungen und kann kleinste Mengen verschiedener Metalle in biologischen Proben mit sehr hoher Auflösung lokalisieren. Um die Vielseitigkeit des Verfahrens zu veranschaulichen, haben die Forscher die Kombinationsmethode darüber hinaus zur Kartierung des Kalziumgehalts in menschlichem Knochen eingesetzt, eine Analyse, die der Erforschung von Osteoporose helfen kann.

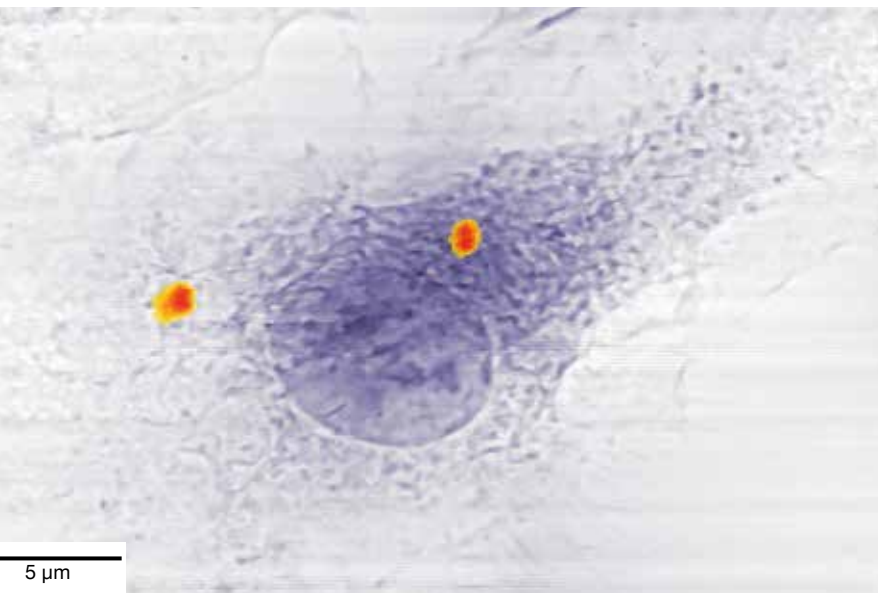
„Metalle spielen bei zahlreichen biologischen Prozessen eine Schlüsselrolle, vom Sauerstofftransport in unseren roten Blutkörperchen

über die Mineralisierung der Knochen bis hin zur schädlichen Anreicherung von Metallen in Nervenzellen, wie sie bei Krankheiten wie Alzheimer zu beobachten ist“, erklärt Karolina Stachnik, die am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY arbeitet. Die hochenergetische Röntgenstrahlung regt Metalle zur Fluoreszenz an, was selbst bei kleinsten Mengen noch nachweisbar ist. „Die Röntgenfluoreszenzmessungen zeigen jedoch in der Regel nicht die Ultrastruktur einer Zelle“, sagt DESY-Wissenschaftler Alke Meents, der die Forschung leitete. „Wenn man die Metalle in der Probe genau lokalisieren will, muss man die Messungen mit einem bildgebenden Verfahren kombinieren.“ Die Ultrastruktur der Zelle umfasst die feinen Details der Zellarchitektur, die nicht mehr mit dem Lichtmikroskop erkennbar sind.

### Röntgen-Panoramabild

Da biologische Proben wie Zellen sehr empfindlich auf Röntgenstrahlung reagieren, sollte ihre Struktur nach Möglichkeit gleichzeitig mit der Fluoreszenzanalyse abgebildet werden, um Strahlenschäden zu minimieren. Daher kombinierte das Team die Fluoreszenzmessungen mit einer bildgebenden Methode, der so genannten Ptychographie. „Ein Ptychographie-Mikroskop ist der Aufnahme eines Panoramabildes ziemlich ähnlich“, erklärt Stachnik. „Eine ausgedehnte Probe wie eine biologische Zelle wird mit einem kleinen Röntgenstrahl abgerastert, der viele überlappende Bilder von Teilen der Probe erzeugt. Diese überlappenden Bilder werden dann anschließend zusammengefügt.“

Die Röntgenstrahlen liefern dabei jedoch nicht direkt Fotografien, sondern erzeugen ein sogenanntes Beugungsmuster, das Informationen über die räumliche Struktur des jeweiligen Teils



Zwei Ansammlungen von Antibiotika-beladenen Eisen-Nanocontainern (rot) in einer Makrophage



der Probe enthält. Die Struktur lässt sich dann aus dem Muster berechnen. „Dies führt am Ende zu einer quantitativen Abbildung der optischen Probendichte“, erklärt Stachnik. „Die Ptychographie liefert mit diesem komplexen Verfahren eine räumliche Auflösung, die über die üblichen Grenzen der Röntgenoptik hinausgeht.“

### Fluoreszenzkarten

Die Rasteraufnahme einer Ptychographie lässt sich optimal mit gleichzeitigen Röntgenfluoreszenzmessungen kombinieren, die eine Art Karte der chemischen Elemente in der Probe liefern. Ptychographiebilder und Fluoreszenzkarten lassen sich dann überlagern. „Die Kombination dieser beiden Abbildungsmethoden ermöglicht

„Wenn man die Metalle in der Probe genau lokalisieren will, muss man die Messungen mit einem bildgebenden Verfahren kombinieren“

Alke Meents, DESY

eine weitgehend störungsfreie Korrelation von Spurenelementen mit der hochaufgelösten Struktur der Probe“, sagt Meents.

Grundvoraussetzung für diese Methode ist, dass die Röntgenstrahlen nur eine „Farbe“ haben, also alle dieselbe Wellenlänge besitzen (monochromatisch sind), und dass sie wie bei einem Laser alle im Gleichtakt schwingen (kohärent sind). „Ausreichend helle, kohärente, monochromatische Röntgenstrahlung mit Energien, die hoch genug sind, um Metalle wie Eisen fluoreszieren zu lassen, sind erst mit modernen Synchrotronstrahlungsquellen wie DESYs PETRA III verfügbar geworden“, sagt Meents.

Um die Methode zu testen, untersuchten die DESY-Forscherinnen und -Forscher zusammen mit der Gruppe von Ulrich Schaible vom Forschungszentrum Borstel die Lokalisierung und Konzentration von Nanotransportern für Tuberkulosemedikamente in Fresszellen des

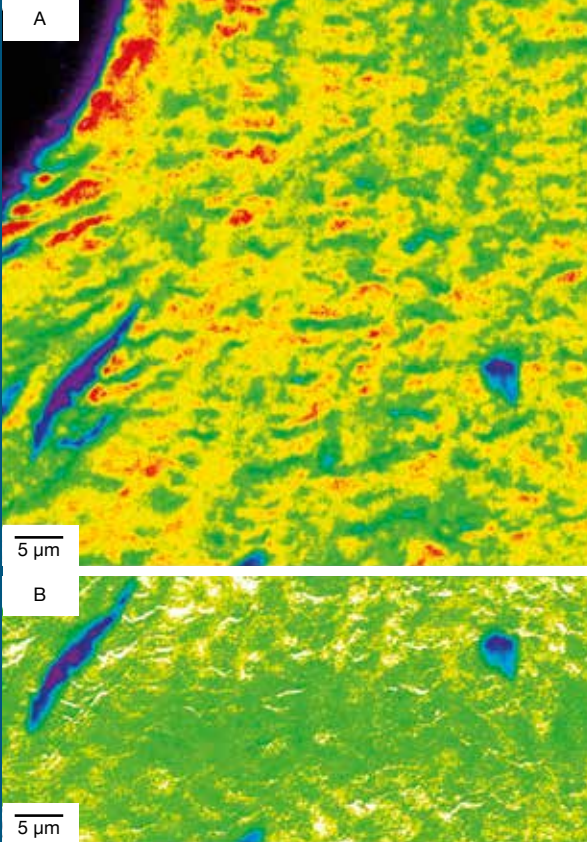


Die Tuberkulose-Erreger *Mycobacterium tuberculosis* sind stäbchenförmige Bakterien. Diese computer-generierte Abbildung basiert auf Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop.

Immunsystems, den Makrophagen. „Normalerweise zerstören Makrophagen Krankheitserreger wie Viren und Bakterien. Leider gelingt es den Tuberkulosebakterien jedoch, der Zerstörung zu entgehen und sich stattdessen in den Makrophagen zu verstecken und sie sogar zum Wachstum zu nutzen“, sagt Schaible. „Eine Barriere für eine wirksame Behandlung ist dabei, dass die Nischen der Bakterien innerhalb der Makrophagen erst einmal von den Antibiotika erreicht werden müssen, damit sie wirken können.“

### Nanokäfige aus Eisen

Eine neue Strategie baut auf das Vorbild des Trojanischen Pferds und verwendet nanometerkleine Eisenkäfige, um Antibiotika direkt in die Zellen zu bringen. Die Käfige sind mit Antibiotika gefüllt und haben weniger als 20 Nanometer Durchmesser (ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter). „Die Makrophagen schlucken die Behälter, und sobald sie sich im Inneren der Zelle befinden, lösen sich die Eisenwände der Käfige langsam auf, da die Bakterien Eisen benötigen. Schließlich werden die Antibiotika freigesetzt und töten die Bakterien ab“, erläutert Schaible. >>



Gemessene (oben) und nach der Massendickenverzerrung korrigierte (unten, Ausschnitt) Kalzium-Verteilung in einer Knochenprobe

Um die Wirksamkeit dieser Strategie zu bewerten, untersuchte das Team Makrophagen, die mit Eisenkäfigen gefüttert worden waren. Mit einer speziell entwickelten Probenbühne an der Beamline P11 zur Untersuchung von biologischen Proben an DESYs Röntgenquelle PETRA III konnten die Forscherinnen und Forscher Ptychographie- und Fluoreszenzbilder von 14 Zellen mit subzellulärer Auflösung aufnehmen und in diesen insgesamt 22 Ansammlungen von Nanotransportern identifizieren.

### Kalziumgehalt in Knochen

In einer zweiten Anwendung analysierten die Forscher zusammen mit der Gruppe von Björn Busse vom Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) den Kalziumgehalt in einer menschlichen Knochenprobe. „Kalzium ist ein Schlüsselement, das unsere Knochen stark macht“, betont Ko-Autorin Katharina Jähn aus Busses Gruppe. „In Zeiten eines hohen Kalziumbedarfs löst der Körper dieses jedoch aus den Knochen, um es anderweitig zu verwenden. Diese und andere altersbedingte Prozesse können zu Osteoporose führen, von der in Deutschland fast ein Viertel aller Frauen im Alter von mehr als 50 Jahren betroffen ist.“

Experimentelle Untersuchungen zur Knochenmineralisierung werden normalerweise an kleinen Knochenscheiben durchgeführt. „Allerdings wird auf diese Weise meist nur der Gesamtgehalt an Kalzium abgebildet“, sagt

Stachnik. „Um ein echtes Maß für die Kalziumkonzentration zu erhalten, muss man die oft variierende Dicke der Probe korrigieren.“ Das Team verwendete eine simultan aufgenommene Ptychographie, um in der Karte der Kalziumverteilung in der Knochenprobe diese sogenannte Massendickenverzerrung zu korrigieren. „Mit diesem Ansatz konnten wir an bestimmten Stellen im Knochen einen lokal niedrigeren Kalziumgehalt beobachten, was dazu beiträgt, den Prozess von Knochenkrankungen besser zu verstehen und die Wirkung von Veränderungen der Knochenmineralisierung bei Patienten zu quantifizieren“, betont Stachnik.

### 3D-Messungen geplant

Um die Methode noch weiter zu verbessern, wollen die Forscherinnen und Forscher die Analyse in Zukunft auf dreidimensionale Messungen ausweiten. „Der Versuchsaufbau wird derzeit erweitert, um die Erfassung von dreidimensionalen, tomographischen Datensätzen an der Mess-

**„Mit diesem Ansatz konnten wir an bestimmten Stellen im Knochen einen lokal niedrigeren Kalziumgehalt beobachten, was dazu beiträgt, den Prozess von Knochenkrankungen besser zu verstehen“**

Karolina Stachnik, DESY

station P11 zu ermöglichen“, berichtet Meents. „Da viele Synchrotronstrahlungsquellen ausgerüstet werden, um noch helleres Röntgenlicht zu erzeugen, gehen wir davon aus, dass damit der Durchsatz an Proben deutlich erhöht werden kann und zu einem Routineverfahren an diesen Anlagen wird.“

Scientific Reports, 2020; DOI: 10.1038/s41598-020-58318-7



# Nanopapier zum Sprühen

## Dünne Zellosoeschichten im industriellen Maßstab

**M**it einem neuen Sprühverfahren lassen sich sehr gleichmäßige Schichten aus Zellulose-Nanofasern (CNF) im industriellen Maßstab produzieren. Röntgenuntersuchungen an DESYs Forschungslichtquelle PETRA III sowie Untersuchungen mit einem Rasterkraftmikroskop und per Neutronenstreuung zeigen dabei, wie die Schichtstruktur aufgebaut ist und sich für verschiedene Zwecke wie beispielsweise extrem dünnes, glattes und festes Nanopapier maßschneidern lässt.

### Nachwachsende Rohstoffe

„Poröse, nanostrukturierte Zellulosefilme besitzen eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften, die sie für verschiedene Anwendungen interessant machen, von ultrastarken bioaktiven Fasern bis hin zu transparentem leitfähigem Nanopapier“, erläutert der Hauptautor der Studie, Calvin Brett von DESY und der Königlich-Technischen Hochschule (KTH) Stockholm. „Sie sind leicht und temperaturstabil, haben hervorragende mechanische Eigenschaften, eine geringe Dichte und bestehen aus nachwachsenden

Rohstoffen – die Zellulose-Nanofasern werden in der Regel aus Holz gewonnen.“ Damit sind die Zellulosefilme eine vielversprechende Alternative zu mineralölbasierten Kunststoffen und aussichtsreiche Kandidaten für die Konstruktion von funktionalen Materialien wie Bio-

*„Wir haben das Verfahren soweit hochskaliert, dass es damit jetzt erstmals möglich ist, auf eine 50 Meter lange Folie einen Zellulosefilm mit nur zwei Nanometern Rauigkeit aufzutragen“*

Calvin Brett, DESY und KTH Stockholm

verbundwerkstoffen oder biologisch inspirierten Sensoren. So lassen sich beispielsweise funktionale Polymere oder andere Stoffe in die Poren des Zellulosefilms einbringen, um bestimmte Funktionen zu erzeugen.

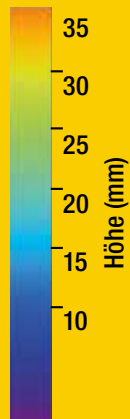
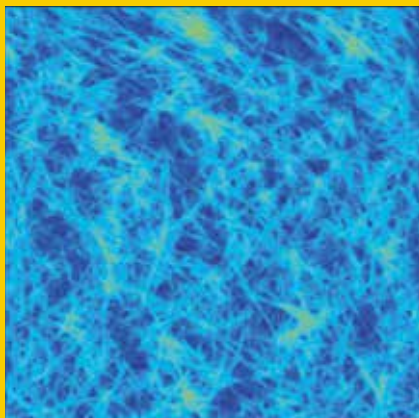
Bei dem an der KTH Stockholm und bei DESY entwickelten Verfahren werden Zellulose-Nanofasern mit einer mittleren Länge von 500 Nanometern (millionstel Millimetern) und einer typischen Dicke von 3 bis 5 Nanometern in einer wasserhaltigen Trägerflüssigkeit auf einen Siliziumträger gesprüht. Das

Trägermaterial wird auf 120 Grad Celsius aufgeheizt, um das Wasser zügig weitgehend zu verdampfen und die Zelluloseschicht so zu stabilisieren. Es entsteht eine sehr gleichmäßige, nur 200 Nanometer dünne Zelluloseschicht – eine Art ultradünnes und extrem glattes Papier. „Eine Kernfrage für die richtigen Eigenschaften ist dabei das Verhältnis zwischen der Schichtung der individuellen Nanofasern, der Porosität und der Nanostruktur

innerhalb der Zellulosefilme“, erläutert DESY-Wissenschaftler Stephan Roth, der auch Professor an der KTH Stockholm ist. „Mit unseren Daten können wir nun Zellulosefilme für bestimmte Anwendungen maßschneidern, die dafür beispielsweise das optimale Verhältnis zwischen Rauigkeit, Wassergehalt und Hohlräumen besitzen.“

### Industrieller Maßstab

Solche Schichten lassen sich nicht nur im Labor-, sondern inzwischen auch im industriellen Maßstab produzieren: „Wir haben das Verfahren soweit hochskaliert, dass es damit jetzt erstmals möglich ist, auf eine 50 Meter lange Folie einen Zellulosefilm mit nur zwei Nanometern Rauigkeit aufzutragen“, betont Brett. In einem nächsten Schritt wollen die Forscher nun funktionale Polymere in den Zellulosefilm einbauen, um auf diese Weise etwa ein Sensor material herzustellen.



Die Untersuchung mit dem Rasterkraftmikroskop zeigt: Das Nanopapier ist extrem glatt.

*Macromolecules*, 2019;

DOI: 10.1021/acs.macromol.9b0053

# „Trojanisches Pferd“-Trick für ultrabrillante Elektronenstrahlen

Plasma-Photokathode für Teilchenbeschleuniger

**M**it einem Trick nach dem Vorbild des Trojanischen Pferds kann eine neuartige Elektronenquelle extrem brillante Teilchenstrahlen erzeugen. Das Verfahren nutzt die Technik der Plasmabeschleunigung und verspricht 100 bis 10 000 Mal enger gebündelte Elektronenstrahlen als konventionelle Beschleuniger derzeit liefern können. Ein internationales Team um Bernhard Hidding von der Universität Strathclyde

im schottischen Glasgow hat die Methode am US-Beschleunigerzentrum SLAC in Kalifornien erfolgreich getestet. An der Arbeit waren DESY-Forscherinnen und -Forscher maßgeblich beteiligt.

## Vielseitige Werkzeuge

Energiereiche Elektronenstrahlen sind vielseitige Werkzeuge zur Erkundung des Reichs der Moleküle, Atome und Elementarteilchen. Sie können entweder dazu dienen,

Elektronen auf ihre Antiteilchen, Positronen, zu schießen, um so die Geheimnisse der subatomaren Welt zu enträtseln. Oder sie werden genutzt, um in speziellen Magnetanordnungen extrem helles Röntgenlicht zu erzeugen, mit dem sich etwa Proteine bei der Arbeit beobachten und neue Nanomaterialien durchleuchten lassen. „In jedem Fall ist ein Elektronenstrahl umso besser, je kälter und je stärker er gebündelt ist“, erläutert DESY-Physiker

Illustration der „Trojanisches Pferd“-Methode: Ein gezielter Laserblitz (rot) setzt Elektronen (hellblau) aus Heliumatomen frei. Einige der Elektronen (rot) werden innerhalb der Plasmaplase (weiße Tropfenform) beschleunigt, die von einem anderen, energiereichen Elektronenpaket (dunkelblau) erzeugt worden ist.

oder ein energiereiches Elektronenpaket geschickt. Es pflügt durch das Plasma und erzeugt eine elektrisch geladene Heckwelle, auf der Elektronen reiten können wie ein Surfer auf einer Ozeanwelle. Die Plasma-Heckwelle kann die Teilchen auf kurzer Strecke extrem stark beschleunigen, viel stärker als die besten konventionellen Beschleuniger es heute schaffen. Noch befindet sich die Technik allerdings in der experimentellen Phase, Anwendungen gibt es bislang erst wenige.

#### Genau gezielte Laserpulse

„Je kälter die Elektronen zu Beginn der Beschleunigung sind, desto weniger Eigenbewegung haben sie, und umso enger bleiben sie zusammen – eine wichtige Voraussetzung für stark gebündelte Strahlen“, sagt Knetsch. Die Physikerinnen und Physiker schleusten für ihr Verfahren kalte Elektronen auf ähnliche Weise in die heiße Plasmaplase ein, wie die Griechen einst Soldaten in einem Holzpferd in die belagerte Stadt Troja geschmuggelt haben sollen. Statt eines Holzpferds dienten jedoch Heliumatome als Versteck für die Elektronen.

Die Forscherinnen und Forscher benutzten als Gas ein Gemisch aus Wasserstoff und Helium. Der Laser, der darin das Plasma erzeugte, war jedoch gerade energiereich genug, um die Elektronen aus den Wasserstoffatomen zu lösen, nicht aber aus den Heliumatomen. So produzierten die Wissenschaftler eine Plasmawelle aus Wasserstoffgas, wobei das Helium zunächst unbeeindruckt blieb. Mit einem genau gezielten zweiten Laserpuls, der eine etwas höhere Energie besaß, schossen sie dann innerhalb der Plasmaplase Elektronen aus ihren Trojanischen Pferden, den Heliumatomen. Diese noch kalten Elektronen wurden dabei in einem winzigen Bereich von einigen tausendstel Millimetern Durchmesser freigesetzt und von der direkt folgenden Plasmawelle noch einmal stark komprimiert. „Unser Experiment zeigt zum ersten

Mal, dass die ‚Trojanisches Pferd‘-Methode tatsächlich funktioniert“, betont Hidding. „Es ist eine der vielversprechendsten Methoden für künftige Elektronenquellen und könnte die Grenzen heutiger Technologie verschieben.“ Das Plasmaverfahren übernimmt dabei die Funktion der Photokathode, die üblicherweise als Elektronenquelle für konventionelle Teilchenbeschleuniger dient.

In diesen heute hochspezialisierten Geräten schlägt ein Laser Elektronen aus einem Stück Metall, die dann von einem elektromagnetischen Feld eingefangen, gebündelt und zu beschleunigergeeigneten Paketen konfektioniert werden.

**„Es ist eine der vielversprechendsten Methoden für künftige Elektronenquellen und könnte die Grenzen heutiger Technologie verschieben“**

Bernhard Hidding, Universität Strathclyde

Die Elektronenpakete aus der jetzt erfolgreich getesteten Plasma-Photokathode können ebenfalls in einen Teilchenbeschleuniger eingespeist werden, lassen sich aber auch direkt im Plasma bereits auf hohe Energien beschleunigen. Im Pilotexperiment erreichten die Elektronen bis zu 700 Mega-Elektronenvolt. Die Forscherinnen und Forscher schätzen, dass sich die Qualität bereits mit etablierten konventionellen Elektronenquellen messen kann. Weitere Versuche sollen nun nicht nur die Qualität und Stabilität des Strahls erhöhen, sondern auch dessen genaue Vermessung verbessern.

*Nature Physics*, 2019;  
DOI: 10.1038/s41567-019-0610-9

Alexander Knetsch, Ko-Autor der Veröffentlichung.

Das Team testete ein Verfahren, bei dem die Elektronen in möglichst „kaltem“, also energiearmem Zustand beschleunigt werden. Dazu wählten sie die Methode der Plasma-Beschleunigung. Ein Plasma ist ein Gas, bei dem die Elektronen von den Molekülen getrennt wurden, so dass es zwei elektrisch gegensätzlich geladene Komponenten besitzt. Durch dieses Plasma wird ein starker Laserpuls





## „Beamline for Schools“ bei DESY

„DESY Chain“ und „Particle Peers“, so heißen die beiden Teams von Jugendlichen aus Salt Lake City in den USA und Groningen in den Niederlanden, die im Jahr 2019 den internationalen Wettbewerb „Beamline for Schools“ gewonnen haben. Sie haben zwei Wochen in Hamburg am Teilchenbeschleuniger DESY II experimentiert.

„Beamline for Schools“ (BL4S) ist ein Wettbewerb, bei dem sich Teams von Jugendlichen aus der ganzen Welt Experimente ausdenken, die man mit einem Teilchenstrahl durchführen kann. 2019 reichten 178 Teams aus 49 Ländern Vorschläge ein. In der Regel kommen die Gewinner von BL4S zum CERN in Genf in der Schweiz. Solange jedoch der Large Hadron Collider (LHC) am CERN aufgerüstet wird und daher alle Beschleuniger abgeschaltet sind, kommen die Teams zu DESY. Die nächste Experimentierunde ist für den Herbst geplant. Dieses Jahr gab es trotz Corona-Pandemie noch mehr Bewerbungen als letztes Jahr. Die Gewinner werden im Sommer bekannt gegeben.

# 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](http://www.desy.de/femto)  
ISSN 2199-5184

## Redaktion

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

## An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein

## Schlussredaktion

Ilka Flegel

## Gestaltung und Produktion

Ulrike Darwisch, Diana von Ilseman

## Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

## Redaktionsschluss

Juni 2020

# femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie  
femto kostenlos!

[www.desy.de/femto](http://www.desy.de/femto)





### Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Teilchenbeschleuniger-Zentren und erforscht die Struktur und Funktion von Materie – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen, dem Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe und lebenswichtiger Biomoleküle bis hin zu den großen Rätseln des Universums. Die Teilchenbeschleuniger 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 neue Fenster ins Universum.

DESY ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft, der größten Wissenschaftsorganisation Deutschlands.