

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 02/22

KUNST IM RÖNTGENBLICK

Von der Lausitz
zu den Sternen

Corona-Mittel
aus Naturstoffen?

Mahlen für nach-
haltigeren Dünger



Kosmischer Teilchenbeschleuniger am Limit

Mit Spezialteleskopen haben Forscherinnen und Forscher so detailliert in einen kosmischen Teilchenbeschleuniger geblickt wie nie zuvor. Die Beobachtungen mit dem Gammastrahlen-Observatorium H.E.S.S. in Namibia zeigen erstmals den zeitlichen Ablauf des Beschleunigungsprozesses in einer sogenannten Nova. Dabei handelt es sich um starke Eruptionen auf der Oberfläche eines Weißen Zwergsterns. In diesem Prozess entsteht eine Schockwelle, die sich durch das Umgebungsmedium pflügt, subatomare Teilchen mitreißt und diese auf extreme Energien beschleunigt. Erstaunlicherweise scheint die beobachtete Nova RS Ophiuchi aufgrund idealer Voraussetzungen Teilchenbeschleunigung am theoretischen Limit zu bewerkstelligen.

Thermonukleare Explosion

Weißer Zwerge sind ausgebrannte, alte Sterne, die in sich zusammengefallen sind und sehr kompakte Objekte bilden. Novae entstehen zum Beispiel, wenn ein Weißer Zwerg mit einem großen Stern in einem Doppelsystem kreist und aufgrund seiner Gravitation Materie von seinem massiven Begleiter aufsammelt. Überschreitet die aufgesammelte Masse eine kritische Grenze, kommt es zu einer thermonuklearen Explosion auf der Oberfläche des Weißen Zwergs.

Die H.E.S.S.-Teleskope wurden schnellstmöglich auf die Nova ausgerichtet, nachdem das Ereignis von einem Hobbyastronomen gemeldet wurde. So konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Nova in Echtzeit mitverfolgen und zum ersten Mal die kosmische Teilchenbeschleunigung wie in einem Film beobachten. H.E.S.S. registrierte noch bis zu einem Monat nach der Explosion höchstenergetische Gammastrahlen. „Diese Art der Beobachtung ist neu und erlaubt in Zukunft noch genauere Einblicke in die Funktionsweise kosmischer Explosionen“, sagt Dmitry Khangulyan, Theoretiker an der Rikkyo Universität in Tokio aus dem Team.

Die künstlerische Darstellung zeigt das Systems aus Weißem Zwerg und Rotem Riesen nach einer Nova-Explosion: Sternmaterial wird in Form eines Stundenglases von der Oberfläche des Weißen Zwergs geschleudert; in der entstehenden Schockwellenfront werden Teilchen beschleunigt. Bei der Kollision mit dem dichten Wind des Roten Riesen (Kugel in der Bildmitte) entsteht energiereiche Gammastrahlung. Die Abbildung stammt aus einer Animation des Phänomens, die DESY und das Kieler Science Communication Lab erstellt haben.

.....
Science, DOI: 10.1126/science.abn0567



<https://youtu.be/XE3mapcBboc>

fentoskop



Inhalt

02 femtoskop

Kosmischer Teilchenbeschleuniger am Limit

06 Von der Lausitz zu den Sternen

In Sachsen entsteht das Deutsche Zentrum für Astrophysik

08 femtopolis

Rammstein rocken
Teilchenbeschleuniger

09 Fahndung nach dem Riss im Standardmodell

Teilchenforscherin Freya Blekman über die Suche nach neuer Physik

11 Neues Level an Präzision

Dem magnetischen Moment des Myons auf der Spur



06



ZOOM: KULTURGÜTER

14 Rembrandt im Röntgenstrahl

Wie Teilchenbeschleuniger helfen, die Gemälde berühmter Meister zu analysieren

17 Protonenschleuder analysiert Fresken

Ein transportabler Beschleuniger durchleuchtet wertvolle Kunstschätze

22 Reise in die Vergangenheit

Röntgenstrahlen erkunden antike Kulturen

26 Hightech für den Louvre

Ein mobiles Röntgengerät für die Analyse antiker Tontafeln

28 „Alles, auf dem Menschen je geschrieben haben“

Ein Exzellenzcluster an der Universität Hamburg untersucht Entwicklung und Einfluss von Handschriften

30 Je kleiner, desto stärker

Alte Sandsteinfassaden lassen sich mit Hilfe winziger Nanopartikel restaurieren

32 Spektrum

Nachrichten aus der Forschung

35 femtomenal

1,4 quintilliardstel Gramm

36 Durch Naturstoffe zu Corona-Medikamenten?

Natürliche Substanzen blockieren ein wichtiges Virusenzym

38 Nachhaltigerer Pflanzendünger

Chemische Mühle produziert effizientere Verbindungen

41 neu: femtoweb

Forschung digital

42 femtofinale

Das Frühstück im Grünen



14



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

Vincent van Goghs berühmte „Sonnenblumen“ welken. Das leuchtende Chromgelb, für das der Maler bekannt ist, ist deutlich nachgedunkelt. Mit einer Röntgenuntersuchung winziger Farbproben des Gemäldes konnte ein Forschungsteam aufklären, was geschehen ist: Van Gogh hatte offensichtlich unterschiedliche Chromgelb-Pigmente benutzt, und eine Variante ist lichtempfindlich. In ihr wurde das Chrom mit der Zeit vom höchsten in einen niedrigeren Oxidationszustand reduziert, wodurch das Pigment seine Farbe ändert.

Röntgenstrahlen können einzigartige Einblicke in Kulturgüter liefern. Mit ihnen lässt sich die Maltechnik alter Meister ebenso erkunden wie deren bevorzugte Farben, sie können antike Schriftstücke lesbar machen, verborgene Gemälde enthüllen, die Produktionstechnik von Metallobjekten enträtseln und zerstörungsfrei in verschlossene Relikte hineinblicken. Solche Erkenntnisse haben auch ganz praktischen Nutzen: Mit ihnen lassen sich Kulturgüter besser schützen, etwa indem die Museumsbeleuchtung auf lichtempfindliche Farben angepasst wird. Und per Röntgenuntersuchung lässt sich auch kontrollieren, wie erfolgreich Schutzmaßnahmen sind, beispielsweise bei der Konservierung bröckelnder Sandsteinfassaden.

Um diesen vielfältigen Nutzen von Röntgenlicht für die Untersuchung von Kulturgütern geht es in diesem Heft. Außerdem stellen wir Ihnen in unserer neuen Rubrik femtoweb (S. 41) interessante Online-Angebote vor, die Forschung im World Wide Web erlebbar machen. Wir wünschen Ihnen Freude und erhellende Erkenntnisse bei der Lektüre dieses Hefts sowie beim Surfen im Web und freuen uns über Kritik, Lob und Anregungen unter femto@desy.de.

Till Mundzeck
Redaktionsleiter



09



38



Von der Lausitz zu den Sternen

In Sachsen entsteht das Deutsche Zentrum für Astrophysik

Deutschland bekommt ein neues Großforschungszentrum für die Astrophysik: In der sächsischen Lausitz entsteht das „Deutsche Zentrum für Astrophysik – Forschung. Technologie. Digitalisierung.“ (DZA). Es soll die Datenströme astronomischer Observatorien rund um den Globus zusammenführen, neue Technologien entwickeln, für die deutsche Wissenschaft den Zugang zu künftigen internationalen Großprojekten gewährleisten und damit auch der Industrie Möglichkeiten eröffnen, sich an Ausschreibungen zu beteiligen.

„Ein nationales Zentrum für Astrophysik fehlte in Deutschland“, betont DESYs Direktor für Astroteilchenphysik, Christian Stegmann, der mit vielen namhaften Wissenschaft-

lerinnen und Wissenschaftlern zu den Antragstellern für das DZA gehört. „Es ist ein großer Gewinn für die deutsche Wissenschaftslandschaft mit internationaler Strahlkraft. Schön, dass es im Osten Deutschlands entsteht.“

Das DZA konnte sich gemeinsam mit dem Center for the Transformation of Chemistry (CTC) im Wettbewerb „Wissen schafft Perspektiven für die Region“ des Bundesforschungsministeriums und der Länder Sachsen und Sachsen-Anhalt durchsetzen. Das CTC, das eine Kreislaufwirtschaft in der chemischen Industrie ermöglichen soll, wird im Mitteldeutschen Revier in Sachsen-Anhalt angesiedelt. Der Bund und die beiden Länder fördern beide Zentren mit insgesamt 2,2 Milliarden Euro.

Hightech mit Innovationskraft

Federführend für die DZA-Initiative und designierter Gründungsdirektor ist der wissenschaftliche Direktor der Europäischen Weltraumorganisation (ESA), Günther Hasinger. „Dieser Wettbewerb eröffnete neue Perspektiven, für die Regionen in Sachsen und für unsere Gesellschaft – ein wichtiges Zeichen der Zukunft in einer schwierigen Zeit“, sagt er. „Nach einem eineinhalbjährigen anspruchsvollen Verfahren, in dem unser Konzept auf Herz und Nieren geprüft wurde, sind wir glücklich, dass wir unser Vorhaben jetzt umsetzen können. Die sächsische Lausitz ist aus vielen Gründen ein idealer Ort für dafür.“

Astrophysik war und ist eine Hightech-Wissenschaft mit großer Innovationskraft. Gleitsichtbrillen,



In Görlitz ist ein offener Campus für Spitzenforschung geplant.

notwendig, und die Daten, die neue Observatorien sammeln werden, machen ein Vielfaches des heutigen Internets aus.

Größter ziviler Datensatz der Welt

Diese Daten aus aller Welt sollen künftig in Sachsen zusammenlaufen, der größte zivile Datensatz der Welt entsteht. Das DZA steht damit vor Herausforderungen, die auch gesellschaftlich relevant sind. Prognosen sagen voraus, dass die IT bald 20 Prozent der globalen Stromproduktion verschlingen wird. Das DZA will sich dieser Herausforderungen annehmen, Green Computing und die ressourcensparende Digitalisierung vorantreiben und neue Technologien für die Gesellschaft von morgen entwickeln.

„Die Astronomie öffnet derzeit neue Fenster zu unserem Kosmos, die nicht nur die Wissenschaft faszinieren, sondern auch als Treiber von Technologie und Innovation das Potenzial haben, unsere Welt zu verändern“, sagt der Präsident der Astronomischen Gesellschaft, Michael Kramer, Direktor am Max-Planck-

forschung betreiben. Diese erstreckt sich über das gesamte elektromagnetische Spektrum und auch auf Gravitationswellen. In der Anfangsphase fokussiert sich das Zentrum wegen vielfältiger Synergieeffekte auf Radio- und Gravitationswellenastronomie. Langfristig wird es sich allen astronomischen Daten widmen.

In der zweiten Säule werden die Datenströme aus aller Welt im DZA gebündelt und verarbeitet. Dazu gehören auch zukünftige Großteleskope. Die Daten dieser Teleskope erfordern ein Mehrfaches des Datenverkehrs im heutigen Internet und daher neue Technologien. Das Zentrum soll diesen Daten-Tsunami bändigen und auf diese Weise auch die Digitalisierung Deutschlands beschleunigen.

Die dritte Säule wird ein Technologiezentrum darstellen, in dem unter anderem neue Halbleitersensoren, Siliziumoptiken und Regelungstechniken für Observatorien entwickelt werden. Aufbauend auf der Erfahrung und dem modernen Umfeld der Industrie in Sachsen, werden so durch Ausgründungen

Ceran-Kochfelder, wesentliche Bestandteile von Mobiltelefonen, Navi oder schnelle elektronische Banküberweisungen via Satellit – das alles gibt es dank astronomischer Forschung. Zurzeit erlebt die Astrophysik einen wahren Boom. Die Hälfte der Physik-Nobelpreise im vergangenen Jahrzehnt betraf Astronomie, Astrophysik und Astroteilchenphysik.

Astronomische Messungen unterscheiden sich heute allerdings grundlegend von der Astronomie früherer Zeiten. Moderne Teleskope sind riesige Anlagen, auf der ganzen Welt verteilt, an denen internationale Kooperationen arbeiten. Sie befinden sich im chilenischen Hochland, den Weiten Australiens und tief im Eis der Antarktis. Für sie sind genaueste Messtechniken

„Ein nationales Zentrum für Astrophysik fehlte in Deutschland. Es ist ein großer Gewinn für die deutsche Wissenschaftslandschaft“

Christian Stegmann, DESY



Institut für Radioastronomie in Bonn und ebenfalls einer der Unterzeichner des DZA-Antrags. „Mit dem DZA entsteht ein Großforschungszentrum mit einem zukunftsweisenden wissenschaftlichen Programm.“

Drei Säulen

Das Konzept des DZA ruht auf drei Säulen: Zum einen wird das Zentrum astronomische Spitzen-

neue Firmen und weitere hochwertige Arbeitsplätze entstehen.

Im Landkreis Bautzen entsteht zudem ein Untergrundforschungslabor: Seismische Wellen, die permanent den Erdboden durchlaufen, sind erhebliche Störfaktoren für Gravitationswellendetektoren. Auch zur Entwicklung von Mess- und Produktionstechnologien sind besonders ruhige geologische >>

Bedingungen notwendig. Unter der Lausitz liegt eine der größten bekannten Granitplatten, die einzigartige schwingungsfreie Bedingungen bietet. In einem Bereich zwischen Hoyerswerda, Bautzen und Kamenz soll daher im Lausitzer Granit das Low Seismic Lab des DZA für Forschung und die Entwicklung neuer Geräte entstehen. Es wird auch für Industrieanwendungen zur Verfügung stehen, etwa für die Entwicklung von Quantencomputern.

Dreijährige Aufbauphase

Standort für das DZA wird die Stadt Görlitz, aufgrund ihrer Nähe zu den Universitätsstädten Dresden, Wrocław und Prag und wegen vielversprechender Neuansiedlungen im Innovations- und Hochtechnologie-sektor. Dort ist ein offener Campus

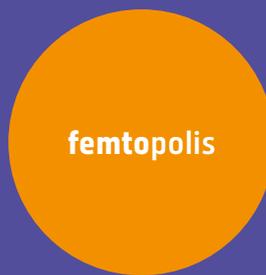
„Dieser Wettbewerb eröffnete neue Perspektiven, für die Regionen in Sachsen und für unsere Gesellschaft“

Günther Hasinger, ESA, designerter DZA-Gründungsdirektor

für Spitzenforschung geplant, eingebettet in die Stadt, mit den Zentren für Astrophysik und Datenwissenschaften, dem Technologiezentrum und dem Zentrum für Innovation und Transfer. Teil des Konzepts ist zudem ein Besucherpark.

Die Förderung sieht eine dreijährige Aufbauphase vor, bevor das Zentrum formal gegründet werden kann. Die TU Dresden wird die Projektträgerschaft in diesem Zeitraum übernehmen und sich darüber hinaus mit ihrer fachlichen Expertise im Themenfeld Data Analytics, Künstliche Intelligenz und High-Performance Computing einbringen.

www.dza-lausitz.de



RAMMSTEIN ROCKEN TEILCHENBESCHLEUNIGER

Der 14. Juni 2022 war an sich kein außergewöhnlicher Tag. Während an DESYs Röntgenquelle PETRA III wie gewohnt Messungen stattfanden, packte im rund zwei Kilometer entfernten Hamburger Volksparkstadion eine nicht ganz gewöhnliche Band ihre berühmte Pyrotechnik aus: Rammstein, bekannt für kontroverse Texte und polarisierende Musikvideos, heizten Hamburg ein.

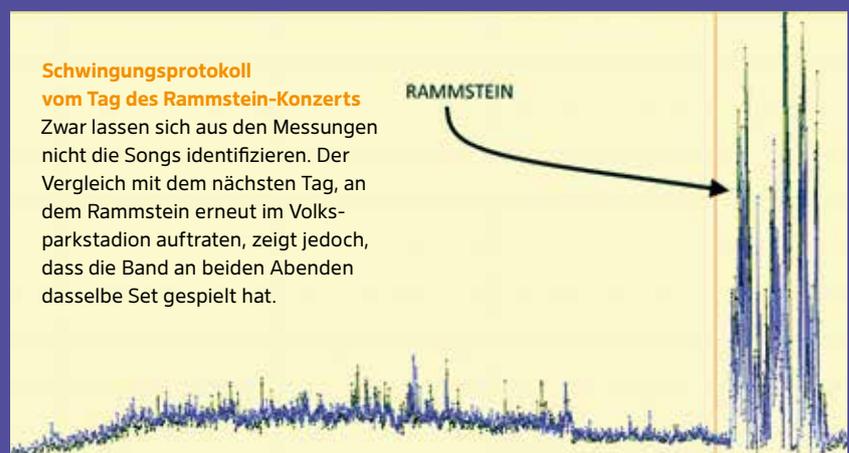
Unter dem Live-Konzert der Tanzmetaller erzitterte auch der Hamburger Boden – und mit ihm der Teilchenbeschleuniger: Die Bodenschwingungen an PETRA III schossen pünktlich zum Konzertbeginn auf die stärksten bis dahin gemessenen Werte des Jahres. Sogenannte Seismometer messen und protokollieren automatisch Bewegungen des Untergrundes, die für den empfindlichen Röntgenstrahl von PETRA III korrigiert werden müssen. Das kann etwa bei Erdbeben der Fall sein. „Wir wollen wissen, wie groß äußere Einflüsse sind und vor allem wie stark sie auf den Strahl durchschlagen“, erläutert DESY-Beschleunigerphysiker Michael Bieler. Das automatische

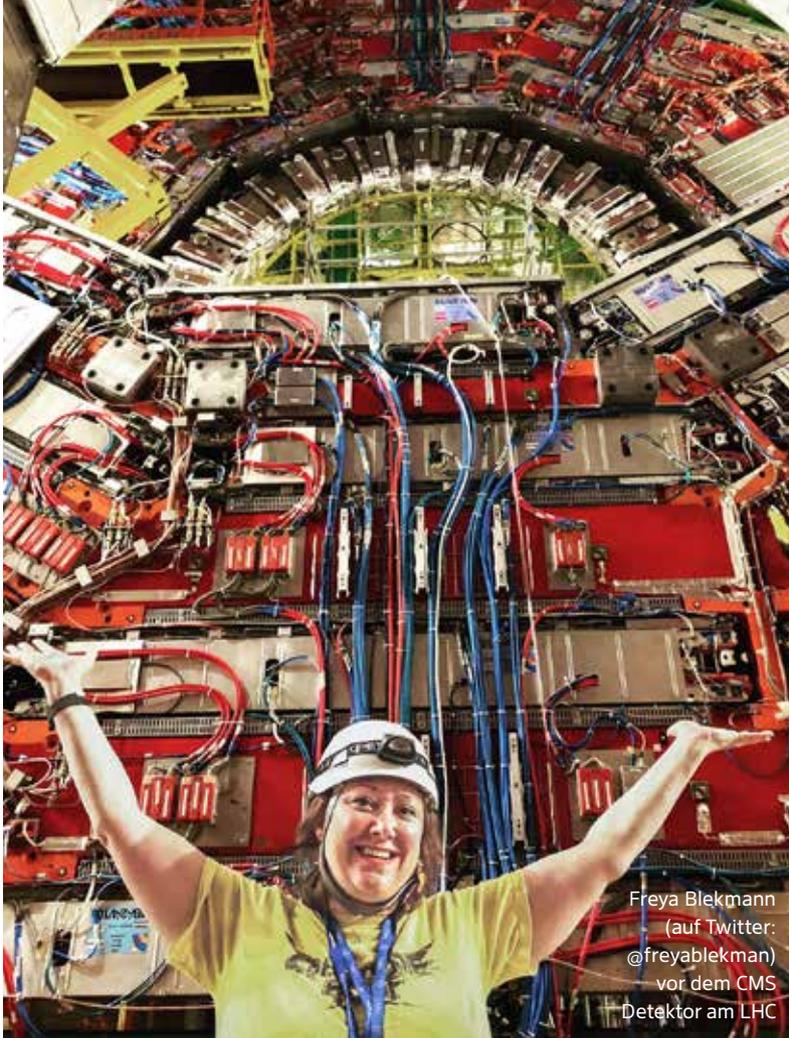
System kann dabei kleine Abweichungen schnell korrigieren.

Während des Konzerts von Rammstein lagen die stärksten Frequenzen deutlich unterhalb der Hörschwelle. Als Erklärung vermutet der Experte das synchrone Hüpfen, Trampeln und Springen der mehr als 50 000 Zuschauer. „Wenn zehntausende Menschen anfangen, sich im Takt zu bewegen, kann so etwas passieren“, sagt Bieler.

Die empfindlichen Seismometer zeigen noch weit entfernte Beben an, selbst aus Chile oder Japan. „Die Erdbebenwellen pflanzen sich durch die Erde fort, und wir sehen hier irgendwann die Ausläufer“, berichtet der Beschleunigerphysiker. In den präzisen Messungen lassen sich nach seinen Worten auch deutlich die Unterschiede zwischen Werktagen mit Berufsverkehr und den ruhigeren Wochenenden erkennen. Konzerte stechen demnach allerdings nochmal heraus.

Zum Glück ließ sich PETRA III von hüpfenden Rammstein-Fans nicht aus der Ruhe bringen. Die Systeme korrigierten routiniert und innerhalb von Sekundenbruchteilen die Bodenbewegungen. Das ist auch gut so, denn knapp zwei Wochen später, am 26. Juni 2022, hatte der Beschleuniger noch eine größere Prüfung zu bestehen: Die Bodenvibrationen waren an diesem Abend sogar dreimal so groß wie bei den Brachial-Rockern. Im Volksparkstadion spielte damals Pop-Ikone Harry Styles – und in der Barclay-Arena nebenan Star-Geiger André Rieu.





Freya Blekman
(auf Twitter:
@freyablekman)
vor dem CMS
Detektor am LHC

„Wir suchen nach einem Riss im Standardmodell“

Zehn Jahre nach Entdeckung des Higgs-Teilchens erkundet die Teilchenphysik neue Horizonte

Die Niederländerin Freya Blekman ist seit Oktober 2021 Leitende Wissenschaftlerin bei DESY. Seit vielen Jahren ist sie am CMS-Experiment am Teilchenbeschleuniger LHC beim europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf beteiligt. Auf Twitter zählt sie zu den reichweitenstärksten Physikerinnen und bringt die Teilchenforschung damit einem breiteren Publikum näher. Mit seinem Umfang von 27 Kilometern ist der Large Hadron Collider (LHC)

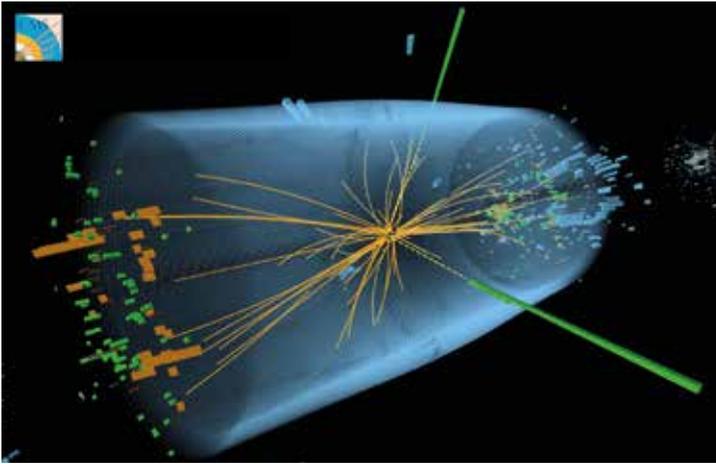
am CERN der größte und stärkste Beschleuniger der Welt. Er beschleunigt Protonen (Wasserstoffkerne) und lässt sie frontal aufeinanderprallen. Riesige Detektoren wie CMS und ATLAS beobachten diese Kollisionen und analysieren, ob dabei seltene, exotische Elementarteilchen entstehen. Auf diese Weise wurde vor zehn Jahren das Higgs-Boson entdeckt – der letzte noch fehlende Baustein im Gefüge des Standardmodells der Teilchenphysik.

femto: 2012 hatte das CERN in Genf eine bedeutende Entdeckung gemeldet: Am LHC war das lang ersehnte Higgs-Boson aufgespürt worden. Was hat diese Entdeckung für die Physik bedeutet?

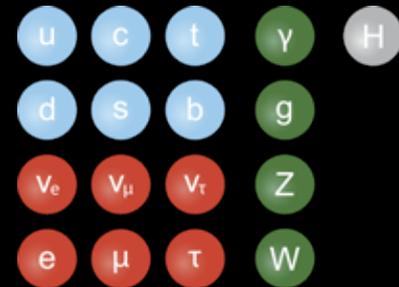
Freya Blekman: Es ist ein überaus wichtiges Teilchen. Vorhergesagt wurde es bereits in den 1960er Jahren, insbesondere von dem Theoretiker Peter Higgs. Das Higgs-Boson ist deshalb so wichtig, weil es uns hilft zu erklären, warum andere Elementarteilchen überhaupt Masse besitzen, etwa die Quarks. Jahrzehntlang hatten verschiedene Beschleuniger nach dem Higgs gesucht, aber erst der LHC war leistungsfähig genug, dieses Teilchen zu erzeugen, und in einer aufwendigen Suche konnten wir es mit Hilfe der beiden Detektoren CMS und ATLAS nachweisen. Für unser derzeitiges Theoriegebäude, das Standardmodell, markierte diese Entdeckung einen letzten Meilenstein: Das Higgs war das letzte noch fehlende Puzzleteil im Standardmodell.

femto: Seit der Entdeckung 2012 haben CMS und ATLAS das Higgs-Boson detailliert unter die Lupe genommen. Was ist dabei herausgekommen, was hat die Fachwelt seitdem über das Higgs gelernt?

Freya Blekman: Wir haben die Masse des Higgs-Bosons genau gemessen, seinen Spin und ob es sein eigenes Antiteilchen ist. Und wir haben gemessen, wie das Higgs mit anderen Teilchen wechselwirkt. Bei all dem hat mich überrascht, wie gut der LHC und die Detektoren funktionieren haben und dass wir durch intelligente Analysen mehr aus den Daten herausholen konnten als erwartet. Durch all das können wir die Vorhersagen des Standardmodells gründlich prüfen. Bislang stimmen unsere Messungen mit dieser Theorie überein. Aber letztlich hoffen wir, bei unseren Experimenten Abweichungen von der Theorie zu finden – und damit einen Riss im Standard-



Links: Typische Signatur des Higgs-Teilchens im CMS-Detektor am LHC



Das Standardmodell der Teilchenphysik besteht aus Quarks (blau), Leptonen (rot), Kraftteilchen (grün) und dem Higgs-Boson (grau)

modell. Denn wir wissen: Das Standardmodell ist nicht der Weisheit letzter Schluss. Es erklärt weder die geheimnisvolle Dunkle Materie, die es im Universum geben muss, noch den rätselhaften Umstand, dass es im All viel mehr Materie als Antimaterie gibt. Deshalb wollen wir das Higgs nun noch genauer mit dem LHC untersuchen, um einen Riss im Standardmodell zu finden, der uns Hinweise auf eine neue, umfassendere Theorie liefert.

femto: In den vergangenen drei Jahren wurden der LHC und auch die Detektoren umgebaut und leistungsfähiger gemacht. Im Sommer 2022 ist die Maschine wieder angelaufen. Was ist besser geworden?

Freya Blekman: Der Beschleuniger kann nun mehr Teilchenkollisionen liefern und dadurch mehr Higgs-Bosonen erzeugen, rund 50 Prozent mehr als zuvor. Gleichzeitig haben wir unsere Detektoren so umgebaut, dass sie mehr Teilchenkollisionen verkraften und präziser messen können. In einigen Jahren soll dann ein weiteres, noch größeres Upgrade kommen. Einige Komponenten dafür bauen wir gerade bei DESY, sowohl für ATLAS als auch für CMS – wirklich cooles Zeug. Nach diesem großen Umbau soll der LHC dann bis zu zehnmal so viele Higgs-Bosonen erzeugen können. Dadurch werden wir das Teilchen noch einmal sehr viel präziser studieren können als bislang.

femto: Was erhoffen Sie sich von den künftigen Messungen, was könnte dabei herauskommen?

Freya Blekman: Die Hoffnung ist weiterhin, Auffälligkeiten beim Verhalten des Higgs-Bosons zu finden und damit einen Riss im Standardmodell aufzuspüren. Aber natürlich werden wir in den Messdaten auch nach Hinweisen auf ganz neue Teilchen fahnden, auf Teilchen jenseits des Standardmodells. Dabei unterstützen uns unter anderem die Algorithmen der Künstlichen Intelligenz. Einige davon funktionieren ähnlich wie Algorithmen, die man zur Bilderkennung nutzt. Sie können uns helfen, verborgene Muster in den Daten aufzuspüren, die ansonsten unerkannt blieben.

femto: Eine der grundlegendsten Fragen der Physik ist: Was steckt hinter jener Dunklen Materie, die offenbar die Galaxien zusammenhält wie ein unsichtbarer Klebstoff? Könnte es eine Verbindung zwischen dem Higgs-Boson und dieser Dunklen Materie geben, und ließe sie sich dadurch aufspüren?

Freya Blekman: Wenn Dunkle Materie Masse besitzt, müsste sie mit dem Higgs-Teilchen wechselwirken. Die Frage ist nur: Lässt sich das beobachten? Im Prinzip müsste das möglich sein: Das Higgs ist ja nicht stabil, sondern es zerfällt gleich nach seiner Erzeugung in andere Teilchen. Dabei könnte es durchaus

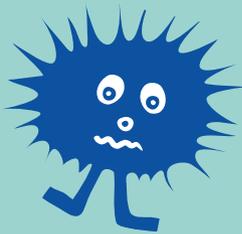
in Teilchen der Dunklen Materie zerfallen. Das können unsere Detektoren zwar nicht direkt beobachten, aber durch bestimmte Tricks scheint es möglich, diese unsichtbaren Higgs-Zerfälle dann doch nachweisen zu können. Das ist schwierig, aber scheint nicht ausgeschlossen. Allerdings werden wir dazu sehr präzise messen müssen, um zu sehen, ob es solche Phänomene gibt.

femto: In Zukunft wird der LHC das Higgs-Boson also viel genauer untersuchen. Wird er damit alle offenen Fragen über das Teilchen beantworten können, oder braucht es dafür andere, neue Beschleuniger?

Freya Blekman: Der LHC schießt Protonen aufeinander, aber noch präzisere Messungen wären möglich, würde man Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, kollidieren lassen. Die Baupläne für einen solchen Beschleuniger gibt es bereits, und gerade bei DESY gibt es eine Menge Know-how dazu, sowohl für den Beschleuniger und die Detektoren als auch für die Analyse und die Theorie. Im Prinzip ließe sich das Higgs-Boson aber auch extrem genau mit einer Maschine untersuchen, die Myonen kollidieren lässt, das sind schwere, aber sehr kurzlebige Verwandte des Elektrons. So ein Myon-Collider ist ein sehr schöner, ehrgeiziger Traum. Doch um ihn in die Tat umzusetzen, bräuhete es noch viel Forschung und Entwicklung.

Mit Mathe-Magie dem magnetischen Moment des Myons auf der Spur

Internationales Theorie-Team knackt ein neues Level an Präzision



Herzstück des „Muon g-2“-Experiments, das 2021 für viel Aufmerksamkeit gesorgt hat: Der Magnetring mit rund 17 Metern Durchmesser erzeugt ein starkes, gleichmäßiges Magnetfeld, in dem Forscherinnen und Forscher die magnetischen Eigenschaften des Myons vermessen und mit den Vorhersagen der Theorie vergleichen.

Jedes Teilchen hat bestimmte Eigenschaften. Dazu gehören zum Beispiel die Ladung, der Eigendrehimpuls oder die Art, auf andere Teilchen zu reagieren. Einige dieser Eigenschaften haben das Potenzial, das Weltbild zum Wanken bringen zu können – nämlich dann, wenn die experimentell gemessenen Werte nicht mit den theoretisch vorhergesagten Werten für diese Eigenschaften übereinstimmen. Ein Team von Theoretikerinnen und Theoretikern, unter ihnen auch der Experte für Gitter-Quantenfeldtheorien Karl Jansen von DESY, hat es jetzt geschafft, ultrapräzise Berechnungen für einen bislang als extrem schwer berechenbar geltenden Teilbereich eines solchen Wertes zu machen. Diese Berechnungen kann das Team jetzt mit den Daten eines Experiments vergleichen, das seit 2021 den Weltrekord an Genauigkeit hält.

Hoffnung auf eine Abweichung

Die Hoffnung ist dabei immer, auf eine Abweichung, eine kleine Diskrepanz irgendwo tief in den Nachkommastellen zu stoßen, die dann auf etwas revolutionär Neues hinweisen würde. Dunkle Materie oder Dunkle Energie sind Kandidaten, die für solche Abweichungen verantwortlich sein könnten, aber auch in der Literatur diskutierte Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik. „Da sind wir aber noch nicht“,

erklärt Karl Jansen. „Noch ist nicht wirklich eine Abweichung zu erkennen.“ Trotzdem seien diese Berechnungen wichtig für alle zukünftigen theoretischen und experimentellen Ergebnisse. „Vor allem zeigt unser Ergebnis eins: dass wir tatsächlich in der Lage sind, diese komplizierten Berechnungen zu machen! Da gab es in der Vergangenheit nämlich erhebliche Zweifel.“

Die Forschungsgruppe, an der Jansen mitarbeitet, hat sich einen Teilaspekt des magnetischen Moments des Myons vorgenommen. Das magnetische Moment ist eine dieser oben erwähnten Teilcheneigenschaften; in diesem Fall beschreibt sie zum Beispiel, wie ein Myon auf ein Magnetfeld reagiert. Das magnetische Moment des Myons gehört zu den am besten bekannten und am präzisesten ausgerechneten Größen der Physik, weshalb sie gern für Vergleiche mit „echten“, also experimentellen Daten herangezogen wird – wie zum Beispiel die vom „Muon g-2“-Experiment in den USA, das 2021 für Schlagzeilen gesorgt hat, weil man tatsächlich eine Abweichung von der theoretischen Vorhersage beobachten konnte, die allerdings noch nicht signifikant genug war, um als Entdeckung zu gelten.

Für die theoretischen Vorhersagen setzt man das magnetische Moment in Relation zu anderen physikalischen Größen – den Kräften,

die zwischen Teilchen wirken, zum Beispiel. Für die elektromagnetische Kraft und die schwache Kraft nimmt man dafür die Störungstheorie. Die beschreibt ein kompliziertes Quantensystem (Teilcheninteraktionen) durch ein einfacheres System mit Hilfe einer Reihe von Näherungen, und die Vorhersagen für das magnetische Moment sind sehr präzise. Für die starke Kraft, die zwischen Quarks und Gluonen wirkt, lässt sich die Störungstheorie allerdings nicht anwenden. Hier waren die Vorhersagen also immer recht ungenau – bis jetzt.

Vierdimensionales Raum-Zeit-Gitter

Der Rechenansatz der Forschungsgruppe um Jansen, die Rechenmethode der Gitter-Quantenchromodynamik anzuwenden, hat jetzt den Fehler verkleinert, insbesondere den systematischen. „Wir haben die Gleichungen aus dem Standardmodell der Teilchenphysik genommen und mathematisch auf ein vierdimensionales Raum-Zeit-Gitter formuliert. So können wir die Gleichungen numerisch ausrechnen und auf das magnetische Moment übertragen. Dazu bedarf es allerdings der besten verfügbaren Supercomputer.“ Nach zehn Jahren in einer weltweiten Aktion haben die Forschenden jetzt mit ihren Berechnungen die Präzision erreicht, die jener der experimentellen Daten schon sehr nahe kommt.

ZOOM

- 14 Rembrandt
im Röntgenstrahl
- 19 Protonenschleuder
analysiert Fresken
- 20 Reise in die
Vergangenheit
- 24 Hightech für den Louvre
- 26 Alles, auf dem Menschen
je geschrieben haben
- 28 Je kleiner, desto stärker

KULTURGÜTER IM RÖNTGENBLICK

Mit welcher Technik hat Jan Vermeer seine Bilder gemalt? Wieso bekommt der Himmel auf Giotto's Fresken grüne Flecken? Und was haben sich Sumerer vor 5000 Jahren in ihren Tonbriefen geschrieben? Röntgenstrahlung gewährt einzigartige Einblicke in Kulturgüter, die anders nicht zu gewinnen sind. Die Analyse liefert dabei nicht nur neues Wissen über Kunstschatze, sondern verbessert auch Methoden zu deren Erhaltung.

E. Leonhardt, R. Haswell, S. de Groot, P. D'Imporzano, G. Davies: "Beauty is skin deep: the skin tones of Vermeer's Girl with a Pearl



Röntgenfluoreszenzkarten: A. van Loon, A. Vandivere, J.K. Delaney, K.A. Dooley, S. De Meyer, F. Vanmeert, V. Gonzalez, K. Janssens
 Earring", *Herit. Sci.* 7, 102 (2019), DOI: 10.1186/s40494-019-0344-0



„Das Mädchen mit dem Perlenohrring“ (linke Seite) entstand um 1665 und ist Jan Vermeers bekanntestes Gemälde. Es hängt im Museum Mauritshuis in Den Haag. Röntgenfluoreszenzkarten (rechte Seite), aufgenommen von einem Team um die Konservatorin Annelies van Loon vom Mauritshuis und dem Rijksmuseum in Amsterdam, zeigen die chemische Zusammensetzung der Farben, die der Meister verwendet hat. Hier beispielsweise Kalium (oben links), Eisen (unten links) und Blei (rechts oben und unten).



REMBRANDT IM RÖNTGENSTRAHL

Wie Teilchenbeschleuniger helfen, die Gemälde berühmter Meister zu analysieren

Einst wurden die Gemälde für die Ewigkeit geschaffen – doch auch an den berühmtesten Meisterwerken nagt der Zahn der Zeit. Im Laufe der Zeit verblassen manche Pigmente und können wie ein Chamäleon ihre Farbe ändern. Aus leuchtendem Gelb kann tristes Braun werden, strahlendes Weiß kann zu dumpfem Schwarz mutieren. Die Ursachen für diese Farbdegeneration lassen sich detailliert mit hochintensiven Röntgenstrahlen aus Teilchenbeschleunigern festmachen: Anlagen wie DESYs Speicherring PETRA III liefern spannende Erkenntnisse über legendäre Meisterwerke von Rembrandt, Munch und van Gogh. Die Ergebnisse können unter anderem helfen, die Bilder in Zukunft effektiver zu konservieren.

Gemälde mit Röntgenstrahlung zu durchleuchten, zählt schon seit längerem zum Repertoire der Kunstverständigen. Mit etwas Glück lässt sich schemenhaft erkennen, welche Veränderun-

gen während des Malprozesses vorgenommen wurden oder ob sogar ein anderes Bild übermalt wurde. Doch was, wenn man für die Analysen die stärksten Röntgenquellen der Erde verwendet – riesige Teilchenbeschleuniger, wie sie bei DESY betrieben werden? „2007 begannen wir, komplette Gemälde nach Hamburg zu bringen und mit der Strahlung abzuscanen, damals noch am DORIS-Speicherring“, erzählt Koen Janssens, Chemiker an der Universität Antwerpen in Belgien.

Unter anderem entdeckten die Fachleute, dass Vincent van Gogh bei seinem Gemälde „Grasgrond“ eines seiner älteren Werke übermalt hatte – das Porträt einer Frau. Anders als bei einer simplen Röntgenaufnahme analysierten die Fachleute dabei die sogenannte Röntgenfluoreszenz. Sie ließ auf die Elementzusammensetzung schließen, wodurch das übermalte Bild viel deutlicher zu erkennen war als bei einem konventionellen Röntgenbild.

In der „Operation Nightwatch“, einem aufwendigen Forschungs- und Restaurationsprojekt des Rijksmuseum in Amsterdam, wurde das gesamte Gemälde von Rembrandt van Rijn aus dem Jahr 1642 mit einem mobilen Röntgenscanner analysiert.



Unter Vincent van Goghs „Grasgrond“ (1887) enthüllten Röntgenuntersuchungen bei DESY das übermalte Porträt einer Frau.

Detektivarbeit an Farbfragmenten

Allerdings erwies es sich als aufwendig, wertvolle Kunstwerke für eine Analyse an den Beschleuniger zu verfrachten. Deshalb entwickelte die Fachwelt mobile, kompakte Röntgenapparate, spezialisiert auf das Abscannen von Gemälden. Diese können vor Ort in den Museen eingesetzt werden, was das Prozedere stark vereinfacht. „Seitdem konzentrieren wir uns auf die eigentlichen Stärken des Beschleunigers – die Analyse winziger Farbfragmente mit extrem feinen, aber hochintensiven Röntgenstrahlen“, erläutert Janssens, einer der Pioniere auf dem Gebiet.

Die Untersuchung dieser Farb-Fitzelchen, die behutsam von geübter Hand von den Meisterwerken entnommen werden, kann überraschende Details über die Kunstschatze verraten. „Unter anderem erhalten wir Informationen darüber, welche Pigmente die Meister ursprünglich verwendet hatten“, sagt Janssens. „Und wir können herausfinden, ob und wie sich diese Pigmente mit der Zeit verändert haben.“

Bei DESY laufen entsprechende Messungen an der Beamline P06, einer der 25 Messstationen des Beschleunigers PETRA III. In dem 2,3 Kilometer großen Speicherring kreisen nahezu lichtschnelle Elektronen. Auf ihrer Kreisbahn durchfliegen sie spezielle Magnetparcours, die sie zum Aussenden eines ungemein starken und gebündelten Röntgenstrahls zwingen. „Das Besondere an dieser Beamline ist, dass wir den aus dem Beschleuniger kommenden Röntgen-

strahl besonders stark fokussieren können“, sagt DESY-Physiker Gerald Falkenberg, hauptverantwortlich für die Beamline. „Unsere Röntgenoptiken bündeln den Strahl auf einen Fleck, der nur 200 bis 300 Nanometer groß ist, der Bruchteil eines Mikrometers.“ Ein Mikrometer wiederum ist ein tausendstel Millimeter. Dadurch lassen sich selbst kleinste Materialproben hochgenau abscannen und analysieren – zum Beispiel winzigste Pigmentkrümel historischer Gemälde.

Grau statt weiß

Bei den Messungen werden verschiedenen Analysemethoden kombiniert: Die Röntgenfluoreszenz kann die Elementzusammensetzung enträtseln – etwa ob und in welcher Menge Stoffe wie Blei oder Chrom vorhanden sind, wie sie für weiße oder gelbe Pigmente verwendet wurden. Allerdings sind manche dieser Elemente mit der Zeit andere chemische Verbindungen eingegangen – und haben dadurch ihre Leuchtkraft oder den Farbcharakter eingebüßt. So kann ein ursprünglich weißes Bleikarbonat zu einem dunklen Oxid mutieren: Stellen, die auf einem Gemälde einst hell leuchteten, präsentieren sich heute in einem ausdruckslosen Grau. „Solche chemischen Veränderungen lassen sich mit anderen Techniken aufspüren, etwa der Röntgenbeugung“, sagt Falkenberg. „Damit lässt sich herausfinden, in welchen Kristallformen und chemischen Verbindungen Elemente wie Chrom, Arsen, Blei oder Eisen vorliegen.“

Jetzt geht Falkenberg in die sogenannte Experimentierhütte der Beamline. Ihre massiven Metallwände schirmen die Röntgenstrahlen ab, so dass man sich, wenn ein Versuch läuft, außerhalb der Hütte gefahrlos aufhalten kann. Im Inneren empfängt einen ein unübersichtliches Arrangement aus Röhren, Kabeln und Vakuumkammern, montiert auf massiven Granit-Tischen. „Der Röntgenstrahl vom Speicherring kommt aus >>

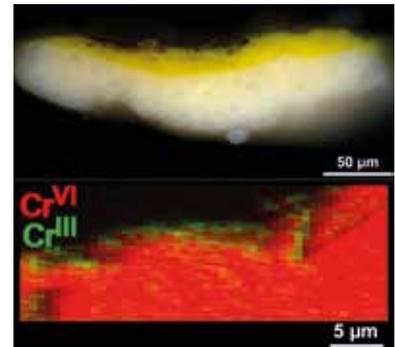


„Unter anderem erhalten wir Informationen darüber, welche Pigmente die Meister ursprünglich verwendet hatten“

Koen Janssens, Universität Antwerpen



Van Goghs berühmte „Sonnenblumen“ (links) verändern mit der Zeit ihre Farbe. Ursache ist die Mischung der Pigmente, wie eine Röntgenanalyse gezeigt hat. Auf der Oberfläche des verwendeten Chromgelbs haben Chrom-III-Verbindungen (grün) die orangegelben Chrom-VI-Verbindungen (rot) ersetzt (unten).



dieser Röhre“, erklärt Falkenberg und zeigt auf ein armdickes Edelstahlrohr, das aus der Stirnwand der Hütte ragt. Dann läuft der Strahl durch einen Metallkasten, hier bündelt ihn eine spezielle Röntgenoptik auf einen winzigen Fleck.

Im Brennpunkt dieser Optik wird die Probe, etwa ein Gemäldekrümelchen, auf einer drehbaren Halterung positioniert. „Bei einem Experiment

wird die Probe langsam im Röntgenstrahl gedreht und Punkt für Punkt abgerastert“, erläutert Falkenberg. „Dabei streut und absorbiert sie das Röntgenlicht, und die entsprechenden Signale fangen wir mit diversen Detektoren auf.“ Diese „Röntgenkamera“ erzeugen eine wahre Flut an Messdaten – manches Einzelbild besteht aus Abermillionen von Bildpunkten, und an jedem Bildpunkt entstehen Megabyte an Daten. „Da kommen bei einer Messreihe schnell viele Terabyte zusammen“, erklärt Falkenberg. Bei der anschließenden Datenanalyse ermitteln aufwendige Computerprogramme die Elementzusammensetzung und die Kristallstruktur des untersuchten Pigmentkrümelns.

Chemisch aktiver als angenommen

Besonders interessant für die Analysen sind Maler wie Vincent van Gogh oder Edvard Munch. „Damals gab es eine Revolution in der Chemie, es wurden neue Pigmente wie Chromgelb und Kadmiumgelb entwickelt“, erzählt Koen Janssens. „Doch manche dieser Materialien erwiesen sich als chemisch aktiver als damals angenommen.“ Die Folge: Nicht wenige Bilder dunkelten im Laufe der Zeit nach, etwa die berühmten Sonnenblumen-Gemälde van Goghs. Experimente bei DESY halfen, die Ursachen aufzuspüren: Im Laufe von Jahrzehnten hat Sonnenlicht das vom Meister verwendete leuchtende Chromgelb in triste braune >>

Antike Augenfarben im Röntgenlicht

Die Varusschlacht ist ein berühmtes Ereignis der Antike: Im Jahr 9 n. Chr. vernichtete das germanische Heer des sagenumwobenen Arminius mehrere römische Legionen und stoppte damit den Vorstoß der Römer ins damalige Germanien. Archäologische Ausgrabungen in Kalkriese zeugen von dieser Schlacht im Teutoburger Wald und förderten unter anderem Knochen, römische Militärgegenstände und Münzen sowie jüngst eine fast vollständig erhaltene Legionärsrüstung zutage. Zu den besonderen Funden von dem Schlachtfeld gehören auch sechs kleine Glasaugen, kaum größer als Fingerkuppen, manche von ihnen blau, andere schwarz. Bei DESY wurde diese Objekte, deren Funktion noch nicht vollständig geklärt ist, mit der hochintensiven Röntgenstrahlung von PETRA III untersucht, um herauszufinden, was die Römer bei der Herstellung ins Glas gemischt haben, um die Färbung zu erreichen. Die Messung zeigt: Schwarz kam offenbar durch einen höheren Eisenanteil zustande, weißes Glas zeichnet sich durch einen hohen Bleigehalt aus, was auf die Verwendung von Bleiweiß schließen lässt, und blaue Bereiche fallen durch einen hohen Kupfergehalt auf.



Protonenschleuder analysiert Fresken

Ein transportabler Beschleuniger durchleuchtet wertvolle Kunstschätze

Das europäische Teilchenforschungszentrum CERN ist darauf spezialisiert, Beschleuniger für Protonen (Wasserstoffkerne) zu bauen – etwa den LHC. Mit seinem Umfang von 27 Kilometern ist der Riesenring der derzeit größte Beschleuniger der Welt und versucht zu enträtseln, aus welchen Bausteinen unser Universum besteht. Zugleich will CERN seine Technologien auch für praxisorientierte Zwecke verwenden. So hat es einen Beschleunigertyp namens RFQ (Hochfrequenz-Quadrupol) so modifiziert, dass er für medizinische Anwendungen genutzt werden kann, etwa für die Tumorthapie.

In Zusammenarbeit mit dem italienischen Institut für Kernphysik (INFN) ist nun ein transportabler Protonenbeschleuniger namens MACHINA entstanden, mit dem sich alte Kunstschätze durchleuchten lassen. Das INFN verfügt über viel Erfahrung bei der Steuerung von Beschleunigern sowie der Materialanalyse, insbesondere von historischen Kulturgütern. Ziel der Partner war es, die RFQ-Technologie für die Analysen wertvoller Kulturgüter weiterzuentwickeln. MACHINA

(Movable Accelerator for Cultural Heritage In-situ Non-destructive Analysis) sollte so kompakt, transportabel und stromsparend sein, dass er sich zu Kunstwerken bringen lässt, deren Transport in ein Labor zu schwierig, zu teuer oder ganz unmöglich ist. Ferner sollte das Gerät kostengünstig sein und möglichst wenig Strahlung aussenden.

Unterschiedliche Schichten

Die Idee kam 2016 auf: „Auf einem Meeting stellte ein CERN-Experte die Anwendungen der RFQ-Beschleunigertechnologie vor, und ich berichtete über unsere Projekte zur Erforschung von Kulturgütern“, erzählt INFN-Physiker Francesco Taccetti. „Danach beschlossen wir, das Gemeinschaftsprojekt aufzulegen.“ Das Prinzip: Ein kompakter Beschleuniger bringt Protonen auf Trab und bündelt sie zu kurzen Pulsen – pro Sekunde sind es 200. Treffen diese Protonenpulse auf ein Material, erzeugen sie darin Röntgenblitze, die sich mit Detektoren auffangen und analysieren lassen. Das Entscheidende: Da unterschiedliche Elemente verschiedenartige Röntgen-



MACHINA nutzt Beschleunigerelemente von CERN.

blitze erzeugen, lässt sich die chemische Zusammensetzung eines Materials genauestens bestimmen. Bei Kunstwerken kann auf diese Weise ermittelt werden, mit welchen Pigmenten ein Gemälde erschaffen wurde oder ob unter dem sichtbaren Bild ein weiteres, übermaltes steckt.

Zwar sind solche Untersuchungen auch mit Röntgengeräten möglich. Für manche Anwendungen aber bieten Protonenbeschleuniger einen Vorteil: „Bei MACHINA können wir die Energie der Protonen grob variieren“, sagt Taccettis Kollege Lorenzo Giuntini. „Unter anderem dringen die Protonen unterschiedlich tief in ein Gemälde ein und können auf diese Weise unterschiedliche Malschichten sichtbar machen.“

Als MACHINAs Heimat wurde das Opificio delle Pietre Dure in Florenz festgelegt, eines der weltweit renommiertesten Institute für die Restaurierung alter Kunstwerke, 1588 von Großherzog Ferdinando I. de' Medici gegründet. „Unter anderem wird MACHINA übermalte Bilder aufspüren können“, erläutert Taccetti. „Aufgrund der unterschiedlichen Protonenenergien ist es möglich, mehrere Bildebenen sichtbar zu machen.“ Ein weiterer Schwerpunkt könnte die Analyse von Fresken sein: Wandmalereien lassen sich nun mal nicht in ein Labor verfrachten, deshalb muss das Analysegerät zum Kunstwerk kommen. „Genau das ist mit MACHINA möglich“, betont Giuntini. „Mit seiner Größe von rund zwei Metern passt es problemlos in einen Transporter.“

Der transportable Protonenbeschleuniger kann unter anderem übermalte Bilder aufspüren.



Pigmente verwandelt – chemisch gesehen wurde Chrom VI zu Chrom III reduziert. Hinzu kommt, dass van Gogh zuweilen absichtlich blassgelbe Farbe benutzte, was die Eintrübung des leuchtenden Gelbs beschleunigt haben könnte.

Auch das legendäre Bild „Der Schrei“ von Edvard Munch, das in verschiedenen Varianten existiert, zeigte im Laufe der Zeit unschöne Veränderungen: Ein Teil der gelben, kadmiumhaltigen Farbe ist verblasst und bröckelt ab, etwa beim dargestellten Sonnenuntergang. Ein internationales Team untersuchte vor einiger Zeit winzige Farbfragmente, die sich vom Gemälde gelöst hatten, mit dem hochintensiven Röntgenlicht aus dem Beschleuniger und verglich sie mit künstlich gealterten Farbproben, hergestellt aus originalen Pigmenten. Das Ergebnis: Das leuchtend gelbe

Kadmiumsulfid war zu farblosem Kadmiumsulfat oxidiert. Als wesentlichen Faktor dafür machten die Fachleute eine zu hohe Luftfeuchtigkeit aus.

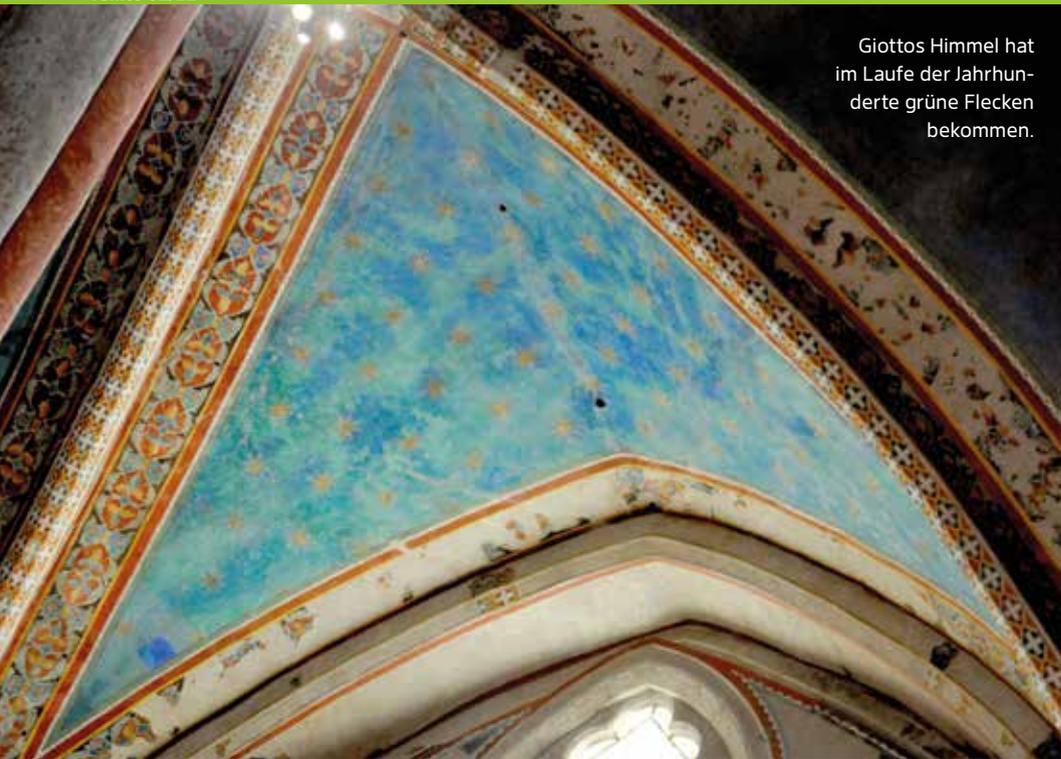
Bei den alten Meistern hingegen war die Kunstwelt lange davon ausgegangen, dass damals überwiegend stabile Pigmente Verwendung gefunden hatten. „Doch in den letzten Jahren stellte sich heraus, dass diese Stoffe doch nicht so stabil sind wie erwartet“, sagt Janssens. „Die Gemälde der alten Meister sind bis zu 700 Jahre alt, und in dieser Zeit können durchaus langsame chemische Prozesse ablaufen.“

Quecksilbertröpfchen

So inspizierte Ermanno Avranovich aus Janssens Team unlängst die Wandmalereien der Basilika des Heiligen Franziskus im italienischen Assisi,



An 18 Punkten wurde Edvard Munchs Gemälde „Der Schrei“ (1910) mit Hilfe von Röntgen-Reflexions- und -Fluoreszenzspektroskopie analysiert.



Giottos Himmel hat im Laufe der Jahrhunderte grüne Flecken bekommen.



„Einige der von Giotto verwendeten Pigmente haben starke Farbveränderungen erlitten“

Ermanno Avranovich, Universität Antwerpen

deren Decke und Wände im 14. Jahrhundert von berühmten italienischen Künstlern bemalt worden waren, darunter Giotto. 1997 hatte ein starkes Erdbeben Teile des Gebäudes einstürzen lassen und die Wand- und Deckengemälde zum Teil stark beschädigt. Vieles wurde seitdem restauriert, doch manche der übriggebliebenen Farbreste konnten Janssens und sein Team mit den raffinierten Röntgenmethoden analysieren.

Das Ergebnis: „Einige der von Giotto verwendeten Pigmente haben starke Farbveränderungen erlitten“, berichtet Avranovich. „So ist das meiste Zinnoberrot in den Deckengemälden schwarz geworden, weil die darin enthaltene Quecksilberverbindung, ein Quecksilbersulfid, mit Chlor reagiert hat.“ Am Ende hatten sich winzige, fein verteilte Quecksilbertröpfchen gebildet, die schwarz aussehen. Ein weiterer Befund betrifft eine berühmte Deckenmalerei von Giotto, sie zeigt einen an sich blauen Himmel mit Sternen. Mittlerweile aber finden sich zahlreiche grüne Flecken im Blau.

Durch die Analysen am Beschleuniger stießen die Fachleute auf die Ursache: Der blaue

Farbstoff, das Kupferkarbonat Azurit, hatte offenbar mit Chlor reagiert und sich in ein exotisches Mineral, ein Karbonatchlorid, verwandelt – und das erscheint grün statt blau. „Vermutlich wurden bei der Reinigung der Basilika über mehrere Jahrhunderte hinweg starke Chlorchemikalien verwendet“, glaubt Janssens. „Unsere Untersuchungen zeigen, dass sogar Farben in Gemälden, die eigentlich als stabil gelten, mit der Umwelt interagieren können. Deshalb sollte man der chemischen Umgebung der Kunstwerke mehr Aufmerksamkeit schenken.“ So kann es für manche alten Kunstschatze auf lange Sicht wichtig sein, sie noch besser als bisher vor äußeren Einflüssen zu schützen – etwa durch Glasscheiben, Klimakammern oder spezielle Lüftungsanlagen.

Operation Nightwatch

Selbst die museale Beleuchtung kann dabei eine Rolle spielen: Vor einiger Zeit fand Janssens Team heraus, dass die relativ starken Grün- und Blauanteile im Spektrum von LED-Lampen manche der von van Gogh genutzten Pigmente schädigen können. Andere Kunstwerke dagegen reagieren weit weniger empfindlich auf grünes oder blaues Licht. Hier lassen sich die stromsparenden LEDs auch in Museen getrost einsetzen.

Auch Farbfragmente eines anderen berühmten Gemäldes wurde bei DESY analysiert – die „Nachtwache“ von Rembrandt. Die Resultate waren zum Teil überraschend: „Bevor wir mit der Untersuchung begannen, war die Kunstwelt davon ausgegangen, dass Rembrandt sehr sparsam

Beispiel für millimeterkleine Farbfragmente von Giottos Werken, die für die wissenschaftliche Untersuchung zur Verfügung standen





„Bei einer Messreihe kommen schnell viele Terabyte zusammen“

Gerald Falkenberg, DESY

war und nur ungern Geld für seine Malutensilien ausgab“, erzählt Koen Janssens. Für Weiß etwa soll er stets das damals günstigste Bleipigment verwendet haben – so die Annahme. „Doch wir fanden heraus, dass das nicht der Fall war“, sagt Janssens. „Rembrandt nutzte durchaus verschiedenen Arten von Bleiweiß, von denen manche wahrscheinlich deutlich teurer waren als andere.“ Der Mythos vom „Geizkragen Rembrandt“ würde damit einen Kratzer erhalten.

Mit der „Nachtwache“ beschäftigte sich unlängst auch das aufwendige internationale Projekt „Operation Nightwatch“. „In diesem Projekt wollten wir verstehen, wie Rembrandt seine Bilder gemalt hat, wie der Zustand des Gemäldes ist und wie wir es für die nächsten Generationen erhalten können“, sagt Katrien Keune, Chefwissenschaftlerin am Rijksmuseum Amsterdam, wo das großformatige Werk ausgestellt ist. Dazu nutzen die Fachleute unterschiedlichste Methoden, von Röntgenaufnahmen und Mikroskopietechniken über chemischen Analysen und Rechnersimulationen bis hin zu einer fotografischen Digitalisierung des Bildes mit einer enormen Bildauflösung.

Unerwartetes Pigment

Auch hier steuerten DESY-Messungen zum Erkenntnisgewinn bei: So stieß das Team auf eine Farbe, von der die Fachwelt nicht erwartet hatte, dass sie von Rembrandt verwendet wurde – ein

Mittelalter-Metallkunst

Gegossen oder getrieben – wie wurde dieser mittelalterliche Hostienbecher vor mehr als 1200 Jahren hergestellt? Diese Frage versuchen Forschende vom Germanischen Nationalmuseum in Nürnberg, vom Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie und von DESY zu beantworten. Mit dem hellen Röntgenlicht von PETRA III haben sie die innere Struktur des Silberbechers ausgespäht, die über den Herstellungsprozess Auskunft geben kann. Nicht nur Gemälde lassen sich mit Röntgenstrahlung analysieren.



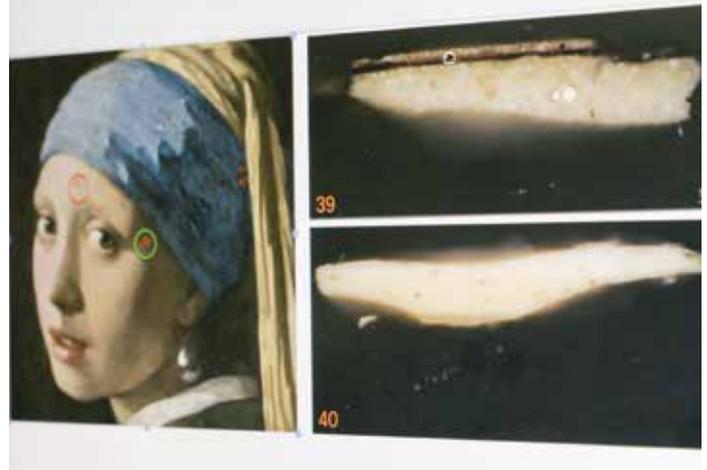
„Wir wollten verstehen, wie Rembrandt seine Bilder gemalt hat“

Katrien Keune, Rijksmuseum Amsterdam

arsenhaltiges gelb-orangefarbenes Pigment, mit dem der Meister die Goldstickereien im Bild gemalt hatte. „Wir waren sehr überrascht, als wir es in einer der Hauptfiguren der Nachtwache fanden, und zwar in seiner Jacke“, berichtet Keune. Des Weiteren nahmen die Fachleute die Grundierung des Gemäldes ins Visier. Das 1642 fertiggestellte Bild war im Laufe der Jahrhunderte mehrmals restauriert worden. Unter anderem wurde seine Rückseite dabei zwecks Stabilisierung durch ein Wachs-Harz-Gemisch mit einer zweiten Leinwand verklebt. „Wir versuchen noch zu klären, inwieweit dieses Gemisch zum Nachdunkeln des Gemäldes beigetragen hat“, erzählt Keune. „Auf jeden Fall haben die Messungen neue Erkenntnisse über die Imprägnierschicht zutage gefördert: Wir vermuten nun, dass Rembrandt eine bleihaltige Imprägnierschicht auftrug und dass dieses Blei dann aufgrund der späteren Wachs-Harz-Behandlung in die Grundierung wandern konnte.“

Die Röntgenanalyse des „Mädchens mit dem Perlenohrring“ enthüllt auch die Arbeitstechnik Jan Vermeers, der das berühmte Gemälde um 1665 schuf. In Falkenbergs Messstation an DESYs Röntgenquelle PETRA III konnte ein Team um Annelies van Loon vom Museum Mauritshuis in Den Haag sowie dem niederländischen Rijksmuseum in Amsterdam winzige Farbproben von Stirn und Schläfe des „Mädchens“ durchleuchten. Die Auswertung zeigt an der Schläfe drei Schichten: Die oberste ist nur einen hundertstel Millimeter dünn und enthält neben reichlich Bleiweiß auch Spuren von Zinnoberrot. Darunter liegt eine Schicht aus dem weißlichen Schwefelmineral Palmierit, wahrscheinlich ein Abbauprodukt von Bleiweiß. Die unterste Schicht ist mit einem zehntel Millimeter vergleichsweise dick und besteht aus einer Mischung von Kalzit und Bleiweiß. Auch an der Stirn des „Mädchens“ finden sich drei Schichten, allerdings sind hier die obere und mittlere Schicht etwas dicker. Der Vergleich der beiden Farbproben zeigt auch, dass Vermeer verschiedene Varianten von Bleiweiß für Stirn und Schläfenpartie verwendet hat. So lassen sich noch nach Jahrhunderten die Techniken der alten Meister enträtseln.

Und die Zukunft? Sie könnte für die Kunstwelt manche weitere Erkenntnis bereit-



Die Röntgenanalyse mikroskopischer Farbproben von der Stirn und der Schläfe des „Mädchens mit dem Perlenohrring“ enthüllt, wie Vermeer das Meisterwerk gemalt hat.

halten, denn in einigen Jahren soll die derzeitige Röntgenquelle PETRA III durch eine leistungsfähigere Anlage ersetzt werden: PETRA IV soll Röntgenstrahlen erzeugen, die noch einmal sehr viel feiner, gebündelter und intensiver sind als bislang. Damit ließe sich dann höchst detailliert mit ansehen, wie sich Pigment-Nanopartikel in einem chemischen Reaktor verändern, wenn sie mit Hitze, Feuchtigkeit oder reaktiven Gasen malträtirt werden – was einer Alterung im Zeitraffer entspricht. „Man kann ja schließlich kein Experiment machen, das 400 Jahre dauert“, erläutert Koen Janssens. „Aber durch die geplanten Zeitrafferversuche hoffen wir dennoch mit anschauen zu können, wie und warum sich Farbpigmente unter bestimmten äußeren Bedingungen verändern.“

Zum einen sollen die Resultate der Kunstwelt helfen, die Eigenschaften ihrer Meisterwerke besser zu verstehen. Zum anderen könnten sie den Konservatoren Hinweise geben, wie die Gemälde in Zukunft zu behandeln und zu restaurieren sind, um sie der Nachwelt noch lange als menschliches Kulturerbe zu erhalten.



Antike Hügelsiedlung mit Ziegelgebäuden auf der Nil-Insel Elephantine

REISE IN DIE VERGANGENHEIT

Röntgenstrahlen erkunden antike Kulturen

Der Nahe Osten gilt als Wiege der Zivilisation: In Mesopotamien und Ägypten entwickelten sich die ersten Hochkulturen der Menschheit, Pyramiden und Tempelanlagen legen noch heute Zeugnis von einer komplexen Gesellschaft im Alten Ägypten ab. Um diese längst vergangenen Kulturen fundiert zu erkunden, untersucht die Fachwelt ihre Relikte, analysiert steinerne Ruinen, uralte Schriftstücke und verblichene Wandmalereien. Teilchenbeschleuniger und Röntgenapparaturen können bei der Klärung wichtiger Detailfragen helfen: Sie machen verborgene Texte lesbar und helfen bei der Analyse und Erhaltung antiker Fresken.

Ein ergiebiger Fundort uralter Schriftstücke liegt tausend Kilometer südlich von Kairo: Elephantine ist eine kleine Insel mitten im Nil, unweit der Grenze zum antiken Nubien, dem heutigen Sudan. Viele Jahrtausende lang diente

sie als wichtige militärische Grenzfestung, aber auch als vitaler Handelsstützpunkt. „Da ging es sehr international zu, ein regelrechter Multikulti-Ort“, sagt Verena Lepper, Ägyptologin an den Staatlichen Museen zu Berlin. Denn auf Elephantine lebten die unterschiedlichsten Kulturen, jede mit einer anderen Sprache und Schrift – darunter

„Elephantine ist der weltweit einzige Ort, an dem wir 4000 Jahre Kulturgeschichte anhand von Schriftstücken erschließen können“

Verena Lepper, Staatliche Museen zu Berlin

Hieroglyphisch, Griechisch und Arabisch, aber auch Koptisch, Syrisch und Aramäisch.

Und: Jede Kultur hinterließ ihre Zeugnisse in Form von Papyrusdokumenten – und zwar über einen erstaunlich langen Zeitraum. „Elephantine ist der weltweit einzige Ort, an dem wir 4000 Jahre Kulturgeschichte anhand von Schriftstücken erschließen können“, schwärmt Lepper. „Es gibt religiöse, medizinische und literarische Texte, aber auch Verträge und Verwaltungsdokumente. Darin spiegelt sich das gesamte Leben auf der Insel über eine Spanne von 4000 Jahren wider.“

Gerollt, gefaltet und versiegelt

Heute sind diese Schriftstücke über die ganze Welt verteilt, wichtige Bestände finden sich unter anderem im Louvre in Paris und im Ägyptischen Museum in Berlin. Bis vor einiger Zeit war allerdings nur ein Bruchteil davon ausgewertet. Um weitere Dokumente zu erschließen, bewarb Lepper sich 2014 erfolgreich um ein vom Europäischen Forschungsrat ERC gefördertes Projekt namens ELEPHANTINE. „In unserer Berliner Sammlung gab es Metallkisten von Grabungen von vor 100 Jahren“, erzählt Verena Lepper. „Doch erst jetzt haben wir sie geöffnet, um ihren Inhalt zu sichten.“ Allerdings ließ sich nicht jedes der Dokumente entziffern. Der Grund: Einst wurden sie sorgsam gerollt, gefaltet und versiegelt. Würde man sie öffnen wollen, könnten sie zerbröseln oder in unzählige Einzelteile bersten, die Texte drohten unwiderruflich verlorenzugehen.

Um dieses Problem zu lösen, tat sich Lepper mit einem Physiker zusammen: Heinz-Eberhard Mahnke ist Honorarprofessor an der Freien Universität Berlin und Physiker am Ägyptischen Museum, der lange am Helmholtz-Zentrum Berlin gearbeitet hat. Dort befindet sich mit dem Beschleuniger BESSY II eine der stärksten Röntgenquellen Deutschlands. „Anfangs war es fraglich, ob sich solche verborgenen Texte mit Hilfe einer speziellen Röntgentechnik sichtbar machen lassen, der Tomographie“, erzählt Mahnke. „Doch dann hat sich gezeigt: Es funktioniert!“

Bei der Tomographie wird das Objekt in 3D geröntgt, das Ergebnis ist eine räumliche Bildaufnahme. „Anhand dieser Messdaten können spezielle mathematische Algorithmen das Schriftstück virtuell entrollen oder entfalten“, beschreibt Mahnke. „Dadurch lässt sich rekonstruieren, was auf dem Dokument geschrieben steht.“ Die Voraussetzung jedoch ist, dass sich die Tinte vom Papyrus, auf dem einst geschrieben wurde, unterscheiden lässt. „Bei Rußtinten ist das

„Anhand dieser Messdaten können spezielle mathematische Algorithmen das Schriftstück virtuell entrollen oder entfalten“

Heinz-Eberhard Mahnke, Fellow am Einstein Center Chronoi

schwierig, denn sie bestehen ebenso wie Papyrus im Wesentlichen aus Kohlenstoff“, erläutert Mahnke. „Günstiger ist es, wenn die Schriftstücke mit eisenhaltiger Gallustinte verfasst wurden, da ist der Bildkontrast deutlich höher.“

Spektakulärer Einblick

Zunächst testete das Team die neue Technik mit „Papyrus-Mockups“, quasi Attrappen, die es selber beschriftete und anschließend zusammenfaltete. Dadurch ließ sich prüfen, ob sich die Methode im Prinzip eignete, verborgene Texte zu entziffern. Nachdem das geglückt war, trauten sich Lepper und ihre Leute an die Originale, es



wurden also echte Schriftstücke aus Elephantine untersucht. Manche dieser Originale wurden an BESSY II durchleuchtet, andere mit kleineren Röntgengeräten.

Das Ergebnis war spektakulär: Als sie ein gefaltetes Amulett aus dem vierten nachchristlichen Jahrhundert aus der Sammlung des Louvre analysierten, konnten die Fachleute einen aus koptischen Buchstaben geformten Spruch entziffern – Oh Herr Jesus Christus. „Das war eine Sensation“, meint Verena Lepper. „Der Satz ist ein Ausdruck der persönlichen Frömmigkeit, und für die Wissenschaft ein beeindruckender Nachweis, dass es auf Elephantine Zeugnisse des frühen Christentums gegeben hat.“



Physiker und Ägyptologin: Heinz-Eberhard Mahnke (l.) und Verena Lepper (r.) untersuchten gemeinsam die Schriftstücke aus Elephantine (unten).

ⲡⲪⲟⲉ[ⲓϥ]

Die rekonstruierte verborgene koptische Schrift „Oh Herr“ nach der Entfaltung (Louvre L/EI227b/1-pC)

Ein Erfolg, der unter anderem der Kooperation zweier an sich völlig unterschiedlicher Forschungsdisziplinen zu verdanken ist – der Ägyptologie und der Physik. „In der Papyrussammlung unseres Museums gibt es zehn verschiedene Sprachen und Schriften“, erinnert sich Lepper. „Für die Zusammenarbeit mit Heinz-Eberhard Mahnke musste ich noch eine weitere Sprache lernen, nämlich die der Physik. Aber das hat sich gelohnt, die Kooperation hat wunderbar funktioniert!“ Eine weitere Disziplin spielte ebenfalls eine Schlüsselrolle: Ohne die Informatikarbeiten der Gruppe um Daniel Baum am Zuse-Institut Berlin konnte weder die Bildgebung noch das virtuelle Entfalten und Entrollen gelingen.

Vielversprechende Pilotversuche

Und: Die Arbeiten sollen fortgeführt, die Röntgenmethoden verfeinert werden. „Künftig würden wir gern auch Dokumente enträtseln, die mit Rußtusche beschrieben worden waren“, erläutert

Mahnke. „Dazu haben wir bereits erste, vielversprechende Pilotversuche unter anderem an PETRA III bei DESY gemacht.“ Der Ansatz: Bei bestimmten Röntgentechniken soll die Rußtinte die Strahlung ein wenig anders absorbieren oder streuen als der Papyrus, auf dem geschrieben wurde. Das Resultat wäre ein schwacher, aber sichtbarer Bildkontrast, der ein Entziffern durchaus möglich machen könnte.

Eine wichtige Rolle soll künftig auch ein besonderer Beschleuniger spielen – die Röntgenquelle SESAME in Jordanien. Sie wurde 2017 eröffnet, beteiligt sind mehrere Länder aus dem Nahen Osten wie Ägypten, Bahrain und die Türkei, aber auch Palästina, Israel und Iran. Damit soll SESAME nicht nur die Wissenschaft in der Region beflügeln, sondern auch verfeindete Staaten an einen Tisch bringen, die auf politischer Ebene nur wenig Kontakt pflegen. „Von Vorteil ist auch, dass Ägypten bei SESAME mitmacht“, betont Verena Lepper. „Deshalb rechne ich damit, dass in Zukunft auch Kulturschätze aus der Region nach Jordanien gebracht und bei SESAME durchleuchtet werden können.“ Dazu werden insbesondere auch neue, von der Helmholtz-Gemeinschaft geförderte Experimentierstationen an SESAME beitragen können.

Ruinen der Felsenstadt

Von SESAMEs Möglichkeiten profitiert auch das Projekt von Maram Naes, Forscherin an der Technischen Universität Berlin: Sie untersucht die Relikte der berühmten antiken Stadt Petra im heutigen Jordanien. Vor 2000 Jahren hatten sich im Nahen Osten mehrere Nomadenstämme zum Königreich Nabatäa zusammengeschlossen, ihre Hauptstadt war Petra. Die Überreste zählen zu den eindrucksvollsten Ruinenstädten der Welt und dienten unter anderem als Kulisse für „Indiana Jones“, die berühmte Abenteuerfilmserie. „Ich habe die Felsenstadt das erste Mal als Schülerin besucht“, erzählt Naes. „Zuerst musste ich durch den Siq gehen, eine kilometerlange, teilweise nur zwei Meter breite Sandsteinschlucht. Als ich dann am Ende der Schlucht vor Al-Khasneh stand, der 39 Meter hohen Schatzkammer der Nabatäer, verschlug es mir glatt den Atem.“

Diese Faszination bewegte die gebürtige Jordanierin später dazu, sich näher mit Petra zu beschäftigen und die Ruinen mit wissenschaftlicher Akribie unter die Lupe zu nehmen. Im Fokus ihres Interesses: die Wandmalereien, die einst die antike Stadt geschmückt hatten. „Heute ist nicht mehr zu erkennen, dass die Wände von Petra fast vollständig bemalt waren, früher war alles voller Farben und Bilder“, sagt Naes. „Die Nabatäer

Das Schatzhaus Al-Khasneh ist das wohl berühmteste Bauwerk Petras.





Die Gebäude in Petra weisen reichhaltige dekorative Wandmalereien im Inneren auf (links). Maram Naes leitete die erste zerstörungsfreie und nicht-invasive Vor-Ort-Untersuchung nabatäischer Wandmalereien mit einem mobilen Röntgenscanner (rechts).

hatten das nicht nur um der Schönheit Willen gemacht, sondern offenbar auch, um den empfindlichen Sandstein vor Verwitterung zu schützen.“ Die meisten Motive haben einen dekorativen Charakter, zum Teil sind geometrische Figuren zu erkennen. „In meinen Augen ein Hinweis, dass die Nabatäer Mathe mochten“, glaubt Naes.

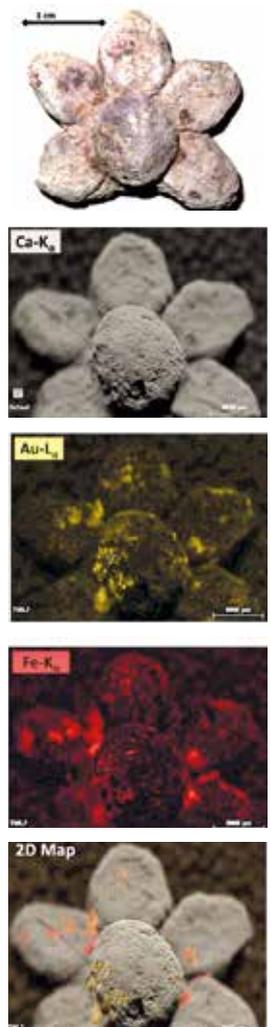
Als sie die Überreste detaillierter untersuchte, entdeckte die Forscherin, dass manche der Relikte einst vergoldet wurden, mittlerweile aber nachgedunkelt sind. „Ich wollte die Zusammensetzung dieser Materialien verstehen“ erzählt sie. „Und ich stellte mir die Frage: Wie können wir sie am besten konservieren, um dieses wertvolle kulturelle Erbe der Nachwelt zu erhalten?“ Um die Antworten zu finden, untersuchte Maram Naes

Neue Konservierungsmethode

Das Ergebnis: Die Fachleute konnten bestimmen, welche Materialien sich über und unter der Goldschicht befinden. Ferner konnten sie feststellen, welche Folgen eine in den 1990er Jahren erfolgte Restaurierung gezeitigt hatte. „Das damals verwendete Konservierungsmittel hat die gesamte Struktur durchdrungen, von der Oberseite der vergoldeten Schicht bis zur Grundierung“, berichtet Naes. „Auf der Oberfläche haben sich zum Teil Oxalatschichten gebildet, die das Gold abdunkeln.“ Allerdings sei der Zustand der Gemälde stabil, weshalb die dunklen Schichten nicht unbedingt entfernt werden müssten.

Handlungsbedarf hingegen besteht an Stellen, wo die Goldbeschichtung abzuplatzen droht. „Deshalb habe ich ein neues Konservierungsmittel entwickelt, es soll das Gold wieder auf seinem Untergrund befestigen“, erläutert Naes. „Es basiert auf einer Mischung aus einem Polymer und Nanoteilchen aus Gold und kann mit feinen Nadeln unter die Goldschicht der betroffenen Wandmalereien gespritzt werden.“

Wie dieses Mittel auf atomarer Ebene funktioniert, will die Forscherin nun an einem neuen Versuchsstand namens HESEB herausfinden. Diese Helmholtz-SESAME Beamline geht auf eine Initiative von DESY zurück und wurde jüngst am jordanischen Speicherring eingerichtet. „Mit der weichen Röntgenstrahlung von SESAME werden wir detailliert beobachten können, wie gut sich das Gold mithilfe des neuen Konservierungsmittels wieder an seinen Untergrund anheften kann“, sagt Maram Naes. „Für diese Analysen bietet HESEB die perfekten Bedingungen.“ Glückt das Experiment, könnte die neue Konservierungsmethode schon bald zum Einsatz kommen und helfen, die Kunstschatze der Nabatäer auch für künftige Generationen zu erhalten.



Die Röntgenuntersuchung von einst vergoldetem Stück (ganz oben) zeigt Kalzium (Ca), verbliebenes Gold (Au) und Eisen (Fe) in einer kombinierten Fluoreszenzkarte (unten).

„Heute ist nicht mehr zu erkennen, dass die Wände von Petra fast vollständig bemalt waren, früher war alles voller Farben und Bilder“

Maram Naes, Technische Universität Berlin

die Objekte mit diversen Experimentiertechniken. Unter anderem sammelte sie winzige Materialfragmente, um sie mit der gebündelten Röntgenstrahlung aus dem Teilchenbeschleuniger zu analysieren. Die Studien liefen am Speicherring BESSY II in Berlin, aber auch bei SESAME in Jordanien.

HIGHTECH FÜR DEN LOUVRE

Ein mobiles Röntgengerät
für die Analyse antiker Tontafeln

Die ersten antiken Hochkulturen verfassten ihre Dokumente auf Tontafeln. Doch längst nicht alle dieser Tafeln sind lesbar – sie stecken in dicken Umschlägen, ebenfalls aus Ton. Im Rahmen eines Exzellenzclusters der Universität Hamburg haben DESY-Fachleute einen speziellen Röntgentomographen konstruiert, der den Inhalt der verborgenen Schriftstücke endlich enträtseln soll. Damit könnte er ganz neue Einblicke in die Gebräuche des Altertums liefern.

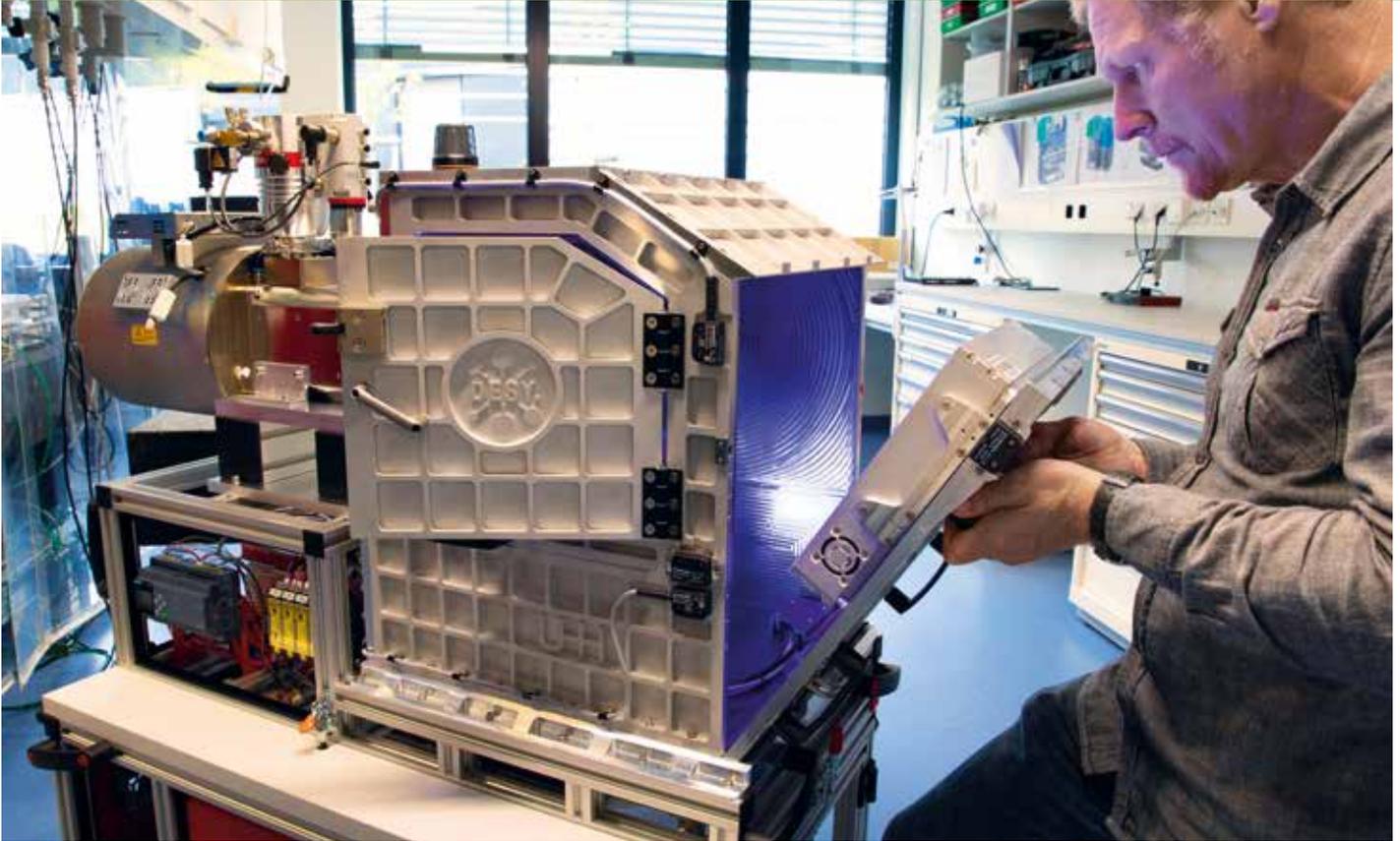
Sie ist womöglich die älteste Schrift der Welt: Ab dem Jahr 3300 v. Chr. pressten die Sumerer in Mesopotamien einen Schreibgriffel in weichen Ton, um sich per Keilschrift zu verewigen. Später wurde die Technik von anderen Kulturen übernommen, etwa den Babyloniern, Assyrern und Persern – bis sie schließlich vor etwa 2000 Jahren von moderneren Schriftformen verdrängt wurde.

Das Faszinierende: Bereits damals galt offenbar das Briefgeheimnis. Viele der beschrifteten Tontafeln wurden in adressierten Umschlägen versandt, ebenfalls bestehend aus Ton. „Das waren private Briefe, aber auch Verträge und Urkunden“, erzählt DESY-Physiker Christian Schroer. „Durch das Studium dieser Tafeln lernt man unglaublich viel über das Leben vor Tausenden von Jahren: Wie haben die Menschen kommuniziert, wie war ihre Gesellschaft organisiert, wo verliefen die Handelsrouten?“ Gelangte der Brief an die korrekte Adresse, wurde der Tonumschlag zerbrochen, die Tafel samt Keilschrift kam zutage.

Für immer ungeöffnet

Doch nicht jedes Dokument erreichte sein Ziel – und manche blieben für immer ungeöffnet. In den Archiven und Museen finden sich heute Tausende solcher verschlossenen Briefe. Zwar ist die Fachwelt brennend an den Inhalten interessiert, mag aber die alten Schätze nicht öffnen – dazu müssten diese schließlich zerstört werden. Mit den bisher in Museen eingesetzten Röntgengeräten gelingt es allerdings nicht, die tönernen Umschläge zu durchleuchten und die Tafeln zu entziffern. Der Grund: Diese Geräte erzeugen Strahlung von relativ niedriger Energie. Das reicht zwar für Analysen von Gemälden und hat den Vorteil, dass sich die Geräte in puncto Strahlenschutz recht einfach abschirmen lassen. Doch die dicken Tonumschläge vermag die niederenergetische Strahlung schlicht nicht zu durchdringen – dazu bedarf es einer höheren Röntgenenergie mit merklich mehr „Durchschlagskraft“.

Jetzt unternimmt die Arbeitsgruppe von Christian Schroer einen neuen, technisch versier-



teren Anlauf: Sie hat eine mobile Röntgenapparatur konstruiert, die mit hochenergetischer Strahlung das Innere der Tonbriefe sichtbar machen und deren Inhalte enträtseln soll. Die Arbeiten finden im Rahmen des Exzellenzclusters „Understanding Written Artefacts“ an der Universität Hamburg statt, bei dem Fachleute aus verschiedenen norddeutschen Forschungseinrichtungen die Entwicklung und Funktion von Schriftstücken aus aller Welt unter die Lupe nehmen. Besonders eng arbeitete Schroers Team dabei mit der Hamburger Assyriologin Cécile Michel zusammen.

„Man geht heute davon aus, dass die Sumerer die eigentlichen Tontafeln zunächst getrocknet haben“, erzählt Schroer. „Danach haben sie die Umschläge relativ lose um die Tafeln herumgepackt, wodurch zwischen beiden ein schmaler Luftspalt entstand.“ Dieser Luftspalt soll im Röntgenbild für den nötigen Kontrast sorgen, um die Tafel vom Umschlag unterscheiden und ihren Inhalt entziffern zu können.

3D-Bilder

Im Labor am Centre for X-ray and Nano Science (CXNS) zeigt Schroers Mitarbeiter Ralph Döhrmann auf den Apparat: Er ist modular aufgebaut und besteht aus mehreren Segmenten, die sich zum Kompletgerät zusammensetzen lassen. „Sämtliche Einzelteile sind tragbar“, erläutert der Ingenieur. „Dadurch kann der Apparat in einem

Museum über Treppen und durch schmale Gänge bewegt werden.“ Zusammengebaut hat das Gerät in etwa die Ausmaße eines übervollen Einkaufswagens – und lässt sich wie dieser auf Rollen durch die Gegend schieben. Sämtliche Einzelteile wurden in den DESY-Werkstätten gefertigt und getestet, die Steuerungsprogramme vom Schroer-Team entwickelt und geschrieben.

Kernstück ist eine spezielle Röntgenröhre, sie bündelt das Röntgenlicht auf einen nur 20 bis 40 Mikrometer großen Fleck. Ein Mikrometer ist

Lesehilfe: Der mobile Röntgenscanner soll Keilschrifttafeln durch ihren Tonumschlag hindurch entziffern.

„Durch das Studium dieser Tafeln lernt man unglaublich viel über das Leben vor Tausenden von Jahren“

Christian Schroer, DESY



ein tausendstel Millimeter. Die Strahlung trifft auf einen Probenhalter, auf dem die Tontafel befestigt wird. „Der Halter besteht aus fingerähnlichen Greifern, mit denen sich die Tafel schonend einspannen lässt“, erläutert Döhrmann. „Er kann gedreht und in alle Richtungen bewegt werden.“ Dadurch lässt sich die Tafel rundum abschnitten >>

„Alles, auf dem Menschen je geschrieben haben“

Ein Exzellenzcluster an der Universität Hamburg untersucht Entwicklung und Einfluss von Handschriften

An der Universität Hamburg koordiniert der Islamwissenschaftler Konrad Hirschler den Exzellenzcluster „Understanding Written Artefacts“. Einer der Partner des Clusters ist DESY. Einem ersten Gemeinschaftsprojekt könnte nun eine stetige Zusammenarbeit folgen.



femto: Seit 2019 befasst sich der Exzellenzcluster „Understanding Written Artefacts“ mit der Entwicklung und der Rolle der Handschrift in unserer Welt. Worum geht es genau?

Konrad Hirschler: Wir untersuchen, wie und wann verschiedenste Kulturen Handschriftlichkeit einsetzten und praktizierten. Wie erklären wir die zahlreichen Unterschiede, in Form und Funktion? Und was haben diese Praktiken wiederum mit den Gesellschaften gemacht, wie haben sie ihre politischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Verhältnisse verändert? Dabei interessieren uns nicht nur Schriftartefakte aus Papier, sondern auch Eierschalen, Palmblätter, Holzbretter oder Metallstangen, die Schriftzeichen tragen – also alles, auf dem Menschen je geschrieben haben.

Einige Projekte beschäftigen sich mit den ältesten Schriftdokumenten der Welt, mit 5000 Jahre alten Tontafeln aus Mesopotamien. Andere analysieren Graffiti auf Hauswänden im heutigen Hamburg. Beteiligt sind vor allem die Geisteswissenschaften, etwa Japanologie, Arabistik oder Assyriologie. Aber es gibt auch einen naturwissenschaftlichen Zweig. Hier geht es darum, die Materialien, auf denen geschrieben wurde, möglichst genau zu analysie-

ren. Zum Beispiel: Aus welcher Region stammt ein indisches Palmblatt, auf dem einst geschrieben wurde, und wie alt ist es? Und bei diesen Fragen kooperieren wir in den letzten Jahren immer enger mit DESY.

femto: Das erste Gemeinschaftsprojekt mit DESY war die Entwicklung eines mobilen Computertomographen zur Analyse mesopotamischer Tontafeln. Welchen Wert wird diese Apparatur für die Forschung haben?

Konrad Hirschler: Damit wird sich die Keilschrift auf Tontafeln entziffern lassen, die bislang noch nicht lesbar sind, weil sie in geschlossenen Umschlägen stecken. Da wir diese Umschläge, die ebenfalls aus Ton bestehen, nicht zerstören möchten und können, benötigen wir spezielle CT-Verfahren, die diese Umschläge durchdringen können. Im Prinzip ließe sich das zwar bei DESY vor Ort machen, denn in Hamburg finden sich einige der leistungsstärksten Röntgenquellen der Welt. Allerdings sind Kultureinrichtungen in der Regel nicht willens, ihre wertvollen Schätze aus der Hand zu geben.

Deswegen haben wir ein mobiles Gerät entwickelt, mit dem wir zu den Einrichtungen fahren, um die Tontafeln vor Ort zu untersuchen. Dadurch können wir der Forschung

künftig vollkommen neue Texte zur Verfügung stellen, aber wir können auch Aussagen zu Herstellungsverfahren von Tontafeln machen. Doch wir wollen das neue Gerät auch für weitere Anwendungen erproben, etwa für die Analyse jahrhundertelanger Buchdeckel. Die wurden häufig hergestellt, indem Blätter alter Handschriften zusammengeklebt wurden. Könnten wir die Schrift auf diesen Blättern mithilfe von Röntgenlicht lesbar machen, würde das bahnbrechende neue Erkenntnisse für unsere Forschung versprechen.

femto: Gibt es weitere Pläne?

Konrad Hirschler: Die Kooperation hat exzellent geklappt, und auf dieser Grundlage ist ein beiderseitiges Interesse entstanden, die Zusammenarbeit zu verstetigen. Das Problem bei Kooperationen zwischen Geisteswissenschaften und naturwissenschaftlichen Einrichtungen ist, dass es sich oft um Forschungsprojekte mit einer begrenzten Laufzeit von wenigen Jahren handelt. Ist das Projekt dann beendet, verschwindet oft auch das damit verbundene Wissen. Mit DESY erhoffen wir uns eine langfristige Zusammenarbeit, die viel tiefer in unsere Felder hineinwirken kann. So arbeiten wir daran, gemeinsam neue Methoden zu entwickeln, um die Mineralzusammensetzung historischer Tontafeln zu analysieren. Dadurch ließe sich herausfinden, wo diese Tafeln einst hergestellt wurden.

Außerdem hoffen wir, neue Verfahren zur Analyse von Papier realisieren zu können. Papier ist unglaublich schwierig zu analysieren, da die organischen Rohstoffe durch etliche Produktionsprozesse gegangen sind. DNA-Analysen sind deshalb kaum möglich, und daher wollen wir mit DESY nach Möglichkeiten suchen, um auf dem molekularen Level Aussagen darüber zu treffen, wie und wo ein Papierdokument einst hergestellt wurde.

– das Gerät ist ein Tomograph, es liefert dreidimensionale Bilder. Ein Röntgendetektor nimmt die durchgedrungene Strahlung auf, die Daten landen auf einem bordeigenen Server nebst Festplatte. Abhängig von den Ausmaßen der Tafel – die größten haben das Format von Ziegelsteinen – wird eine Untersuchung zwei bis drei Stunden dauern, im Extremfall sogar einen Tag.

Die größte Herausforderung bei der Konstruktion: Der Tomograph soll auf kleinstem Raum möglichst viel Power entwickeln, und das auch noch uneingeschränkt sicher. „Durch die hohe Energie der Röntgenröhre ist es gar nicht so einfach, die Strahlung nach außen abzuschirmen, so dass der Strahlenschutz gewährleistet und

„Der Apparat kann in einem Museum über Treppen und durch schmale Gänge bewegt werden“

Ralph Döhrmann, DESY

das Personal sicher ist“, erläutert Döhrmann. Das Problem: Einerseits sollte die Abschirmung aus Wolfram-Aluminium-Platten dick genug sein, um die Strahlung zuverlässig einzuhegen. Andererseits sollte sie nicht zu dick werden, ansonsten würde das Gerät für den mobilen Einsatz schlicht zu schwer – viel mehr als 300 Kilogramm Gesamtgewicht sollte es nicht auf die Waage bringen.

Test im Labor

Dass die Methode im Prinzip funktioniert, konnten die Fachleute schon vor längerem mit einem großen Labortomographen zeigen: Als Testobjekt fungierte ein „nachgebauter“ Tonumschlag mit samt tönernem Inhalt. „Wir waren in der Lage, den inneren Teil vom äußeren Teil zu separieren“, erzählt Ralph Döhrmann. „Anschließend konnten wir anhand der Tomographie-Daten ein 3D-Modell dieser Test-Tontafeln drucken.“ Bald sollen ähnliche Tests auch an dem neuen, kompakten Modell beginnen.

Erster Einsatzort des mobilen Tomographen ist das wohl berühmteste Museum der Welt – der Louvre in Paris. Dort harren rund 50 verschlossene Tonbriefe ihrer Entzifferung. „Ich kann mir vorstellen, dass die Fachleute vom Louvre das Gerät gar nicht mehr hergeben wollen“, glaubt



Schroer. „Denn damit ließen sich noch viele andere Kunst- und Kulturschätze untersuchen.“

Ideen dafür gäbe es bereits, etwa die Analyse der Buchrücken historischer Schriftwerke. Die nämlich wurden nicht selten aus Altpapier gefertigt. Ließe sich per Röntgenscanner erkennen, was auf diesen damals als überflüssig erachteten Dokumenten geschrieben steht, könnte das manch überraschende Einsicht versprechen. „Wir haben bei DESY schon erste Tests gemacht und festgestellt, dass sich Dokumente, die mit eisenhaltigen Tinten verfasst wurden, durchaus identifizieren lassen“, erzählt Schroer.

Der neue mobile Röntgentomograph jedenfalls muss kein Einzelstück bleiben: Zwar war die Entwicklung aufwendig und hat sich über zweieinhalb Jahre hingezogen. Doch die Kosten für die Hardware sind überschaubar, so dass es durchaus möglich erscheint, das Gerät von einer Firma als Kleinserie auflegen zu lassen. „Wenn man erstmal sieht, dass der Tomograph funktioniert“, meint Christian Schroer, „glaube ich schon, dass die Nachfrage groß sein wird.“

Die Tontafeln werden in einen Halter mit fingerähnlichen Greifern eingespannt.



Tontafeln dienten bereits vor Jahrtausenden als Dokumente: Dieses Exemplar aus dem heutigen Zentralanatolien enthält einen rund 4000 Jahre alten Darlehensvertrag.

JE KLEINER, DESTO STÄRKER

Alte Sandsteinfassaden lassen sich mit Hilfe winziger Nanopartikel restaurieren. Durch eine Röntgenuntersuchung fand ein Wiener Forschungsteam nun heraus, wie das in Zukunft noch effektiver geschehen könnte.

Zahlreiche historische Gebäude bestehen aus Sandstein – etwa der Stephansdom in Wien, der Berliner Dom oder auch Teile des Dresdner Zwingers. Das Material lässt sich zwar leicht bearbeiten, neigt jedoch zu starker Verwitterung. Der Grund: „Sandstein ist eine Verbindung aus losen kleinen Körnchen, die nicht sehr stark miteinander verbunden sind“, sagt Markus Valtiner, Physiker an der Technischen Universität Wien. „Dadurch ist das Material porös und bruchanfällig, und bei Temperatur- und Weterereinwirkungen sowie durch den Einfluss von Schwefeldioxid bröseln es irgendwann ab.“ Die Folge: Um berühmte Sandsteinfassaden zu erhalten, sind oft aufwendige Restaurierungen nötig.

Seit einiger Zeit kommt dafür eine noch junge Methode zum Einsatz – eine Behandlung mit Nanopartikeln aus Silikat. Dabei wird der angegriffene Sandstein mit einer Suspension aus Silikat-Nanoteilchen besprüht, die ein bis zwei Zentimeter in das poröse Material eindringt. Dort können die Silikatpartikel als eine Art Klebstoff fungieren: Beim Trocknen binden sie an die Sandsteinkörnchen und bilden verstärkende Brücken zwischen ihnen. „Allerdings war bislang unklar,

welche Größe die Teilchen am besten haben sollten, um die größte Wirkung zu erzielen“, sagt Valtiner. „Deshalb haben wir uns nun angeschaut, wie die Haftkräfte von unterschiedlichen Partikelgrößen abhängen.“

„Je kleiner die Nanopartikel waren, desto größer gerieten die Haftkräfte“

Markus Valtiner, Technische Universität Wien

Suspension von Nanopartikeln

Dazu nutzten die Fachleute eine Kombination aus zwei Experimentiertechniken: Valtiners Team arbeitet mit Apparaturen, mit denen sich die Kräfte, mit denen winzigste Partikel aneinanderhaften, präzise messen lassen. Sein Kollege Markus Mezger, Physiker an der Universität Wien, kennt sich mit Röntgenmethoden aus, die die Struktur der Nanopartikel detailliert erfassen können. Beide Verfahren haben die Fachleute miteinander verbunden: Sie gestalteten das Kraftmessexperiment so, dass es sich zugleich mit der hochinten-

siven, stark gebündelten Röntgenstrahlung von PETRA III durchführen ließ, einer der weltweit leistungsfähigsten Röntgenquellen auf dem DESY-Gelände in Hamburg.

„Wir haben eine Suspension aus Silikat-Nanopartikeln in unsere Apparatur injiziert und sie trocknen lassen“, erläutert Mezger. „Während des Trocknens konnten wir dann messen, inwieweit die Haftkräfte zunahmen, und gleichzeitig mit der Röntgenstrahlung beobachten, wie sich die Struktur der Partikel veränderte.“ Dabei nahm die Arbeitsgruppe mehrere Messreihen auf, und zwar mit Partikeln von jeweils unterschiedlicher Größe: Die kleinsten maßen 11 Nanometer, die größten 27. Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter.

Deutlich mehr Kontaktstellen

Und das Resultat? „Je kleiner die Nanopartikel waren, desto größer gerieten die Haftkräfte“, antwortet Valtiner. Was dahintersteckte, verriet die Röntgenmessungen: Bei kleineren Partikeln bildeten sich deutlich mehr Kontaktstellen aus als bei größeren. „Am Anfang sahen wir die einzelnen Nanopartikel mit Wasser dazwischen“, beschreibt Mezger. „Dann setzte beim Trocknen die Kristallisation in einen glasartigen Zustand ein, und wir beobachteten immer mehr Wechselwirkungen zwischen den Partikeln und gleichzeitig einen Anstieg der Haftkräfte.“

Würde sich das Ergebnis in künftigen, praxisnäheren Experimenten bestätigen, könnte es die Erhaltung alter Sandsteingebäude merk-

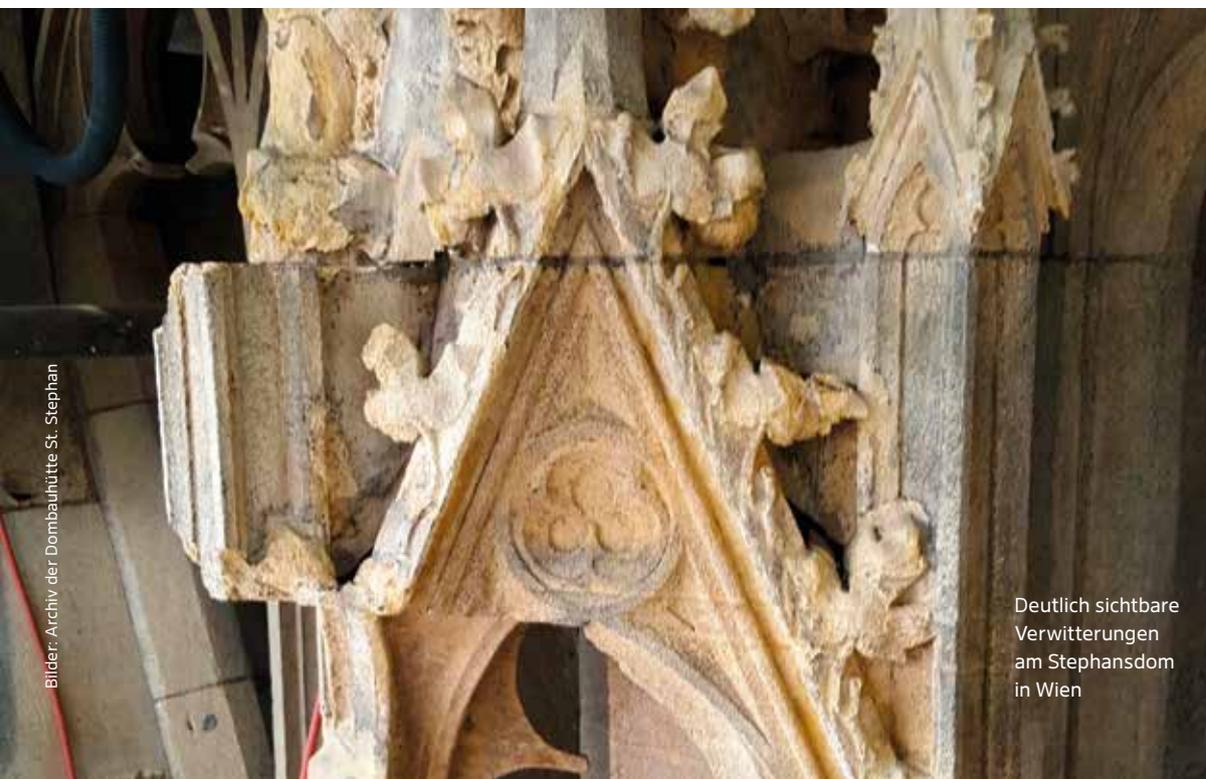
Arbeiten am
Stephansdom in Wien



„Beim Trocknen setzte die Kristallisation in einen glasartigen Zustand ein“

Markus Mezger, Universität Wien

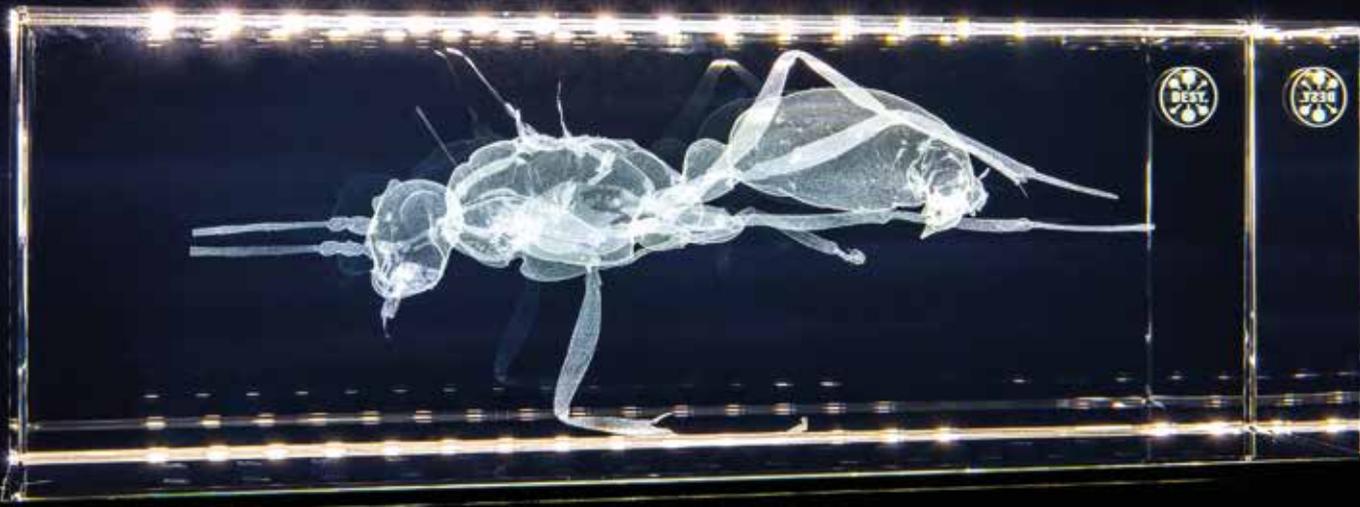
lich verbessern. Bisher nämlich werden bei der Restaurierung deutlich größere Silikat-Partikel verwendet, sie messen 70 bis 100 Nanometer. „Im Prinzip dürfte es günstiger sein, kleinere Partikel zu nehmen“, vermutet Markus Valtiner. „Die sollten für größere Haftkräfte sorgen, und ich kann mir vorstellen, dass sie zusätzlich auch tiefer ins Gestein eindringen.“ Beides zusammen sollte die Festigkeit des Gesteins deutlich erhöhen und dadurch die Restaurierungsmaßnahmen um einiges wirkungsvoller machen. Historische Sandsteinfassaden mit ihren zum Teil kunstvollen Ornamenten wären dann noch besser gegen den Verfall geschützt.



Deutlich sichtbare
Verwitterungen
am Stephansdom
in Wien

SPEKTRUM

Nachrichten aus der Forschung



Vergrößerte Darstellung der ausgestorbenen Ur-Ameise in einem Glasblock

Neue Ameisengattung nach DESY benannt

In einem rund 20 Millionen Jahre alten Stück Bernstein hat ein internationales Forschungsteam unter Leitung der Friedrich-Schiller-Universität Jena eine bislang unbekannte Ur-Ameise identifiziert. Das Team hatte mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III an einer vom Helmholtz-Zentrum Hereon betriebenen Messstation die gut erhaltenen fossilen Überreste von 13 individuellen Tieren untersucht und dabei erkannt, dass sie keiner bekannten Art zugerechnet werden können. Die neue Art begründet sogar eine komplette neue Gattung der Ur-Ameisen, wie das Team berichtet. Die neue Gattung wurde nach DESY benannt, die neue Art nach Hereon: Mit dem wissenschaftlichen Namen †*Desyopone hereon* gen. et sp. nov. honorie-

ren die Entdeckerinnen und Entdecker die beiden Forschungseinrichtungen, die mit modernen Bildgebungsverfahren erheblich zu diesem Fund beigetragen hätten.

Die untersuchten Ameisen sind nur 3 bis 3,5 Millimeter lang. Daher nutzte das Team die Technik der Mikro-Computertomographie an der Hereon-Messstation, um mit dem extrem brillanten Röntgenlicht von PETRA III hochaufgelöste 3D-Röntgenbilder der einzelnen Ameisen zu gewinnen. Auf den Bildern lassen sich noch Details von der Größe eines tausendstel Millimeters erkennen.

Ameisen gibt es nach aktuellem Wissen seit rund 140 Millionen Jahren. Bis heute sind etwa 14 000 lebende und 763 ausgestorbene Arten be-

schrieben worden. Sie gehören zu rund 350 lebenden und 167 ausgestorbenen Gattungen. *Desyopone hereon* ist die 764. ausgestorbene Art und die bislang einzige der neuen (168.) ausgestorbenen Gattung. Es sei jedoch denkbar, dass eine noch existierende Art der neuen Gattung *Desyopone* einmal irgendwo in Afrika entdeckt werde, schreiben die Forschenden. Ein entsprechendes Beispiel gebe es von einer südamerikanischen Ameisengattung. „*Desyopone* könnte also noch irgendwo dort draußen sein“, sagt Hauptautor Brendon Boudinot, der derzeit im Rahmen eines Humboldt-Forschungsstipendiums an der Universität Jena arbeitet.

Insects, DOI: 10.3390/insects13090796

Materialforscherin Nicola Spaldin erhält Hamburger Preis für Theoretische Physik

Die britische Wissenschaftlerin Nicola Spaldin hat den Hamburger Preis für Theoretische Physik 2022 bekommen. Die Professorin für theoretische Werkstoffkunde an der ETH Zürich ist Wegbereiterin für die Entwicklung einer neuen Klasse von Materialien – den sogenannten Multiferroika. Das sind Materialien, die sich sowohl dauerhaft magnetisieren als auch elektrisch polarisieren lassen. Diese physikalischen Eigenschaften treten in der Natur fast nie zusammen auf. Spaldins theoretische Analysen wiesen den Weg zur Herstellung maßgeschneiderter Kristalle, die zugleich ferromagnetisch und ferroelektrisch

sind. Diese ungewöhnliche Kombination könnte den Bau ultraschneller Datenspeicher und hochempfindlicher Sensoren ermöglichen.

Der Hamburger Preis für Theoretische Physik wird seit 2010 gemeinsam von der Joachim Herz Stiftung, dem Wolfgang Pauli Centre bei DESY und den Exzellenzclustern „CU: Advanced Imaging of Matter“ und „Quantum Universe“ an der Universität Hamburg an international renommierte Forscherinnen und Forscher vergeben. Nicola Spaldin ist die erste Frau, die ihn erhält. Er ist einer der höchstdotierten Wissenschaftspreise für Physik in Deutschland. Das von der



Joachim Herz Stiftung getragene Preisgeld beträgt 137 036 Euro, eine Anspielung auf die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante, die in der theoretischen Physik eine wichtige Rolle spielt.

[joachimherzstiftung.tilda.ws/nicolaspaldin](https://www.joachimherzstiftung.tilda.ws/nicolaspaldin)

Bild: Daniel Rihs

Seltene Einblicke in das Wachstum von Nanopartikeln

Wie genau wachsen Nanopartikel in Lösungen? Forscherinnen und Forscher der Universität Hamburg und von DESY konnten diesen Prozess mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III erstmals in Echtzeit verfolgen.

Die Wege, auf denen sich solche komplexen Materialien bilden, sind vielfältig. Den Verlauf des Wachstums zu verstehen und zu kontrollieren, ist daher noch eine große Herausforderung. Die Mikroskopie mit harter Röntgenstrahlung kann wachsende Nanopartikel in chemischen Reaktoren mit einer räumlichen Auflösung von bis zu zehn Nanometern abbilden. Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter.

Die Beobachtung zeigt, dass Nanopartikel auf den Wänden des chemischen Reaktors flacher bleiben, während sich in der Mitte der Lösung im Reaktor gleichmäßige Würfel bildeten. Am Ende wurden die Nanowürfel zu metallischem Kupfer reduziert. Dabei bildeten sich in der Mitte Hohlräume, die sich zur Oberfläche hin ausdehnten und zu hohlen Nanowürfeln führten.

Hohle Nanopartikel mit Größen von mehreren hundert Nanometern haben weitreichendes Anwen-

dungspotenzial, etwa in Lithium-Ionen-Batterien, Sensoren oder zur katalytischen Energiegewinnung. „Um die gewünschte Funktion und Leistung zu erreichen, ist es entscheidend, dass wir die Struktur und Form der Nanopartikel während ihres Wachstums genau kontrollieren können“, sagt Hauptautor Lukas Grote von der Universität Hamburg.

Nature Communications,
DOI: 10.1038/s41467-022-32373-2

Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (links) der fertigen hohlen Kupfer-Nanowürfel außerhalb des chemischen Reaktors. Die Röntgenptychographie (rechts) erreicht zwar nicht dieselbe Auflösung, mit ihr lässt sich jedoch das Wachstum der Nanopartikel im Reaktor live verfolgen.

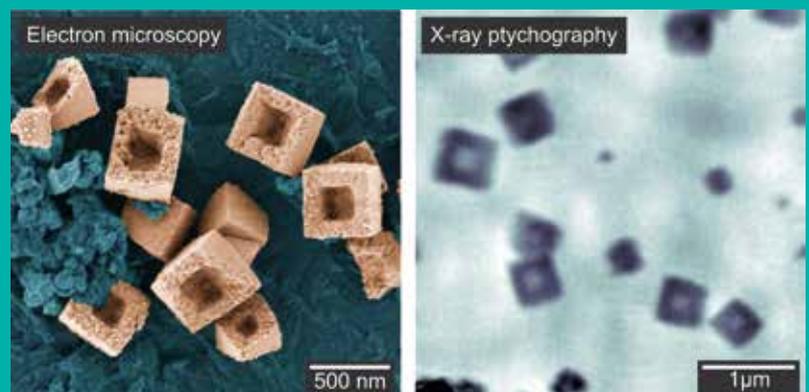


Bild: Grote et al., Nature Communications; CCBY 4.0

„Lichtecho“ verrät kosmische Katastrophe

In einer Galaxie im Sternbild Herkules hat ein gigantisches Schwarzes Loch einen Riesenstern zerrissen. Die kosmische Katastrophe verrät sich durch ein gleißendes „Lichtecho“ im Infrarotbereich, wie ein internationales Team unter DESY-Führung berichtet. Die große Sonne war demnach dem Schwarzen Loch so nahe gekommen, dass dessen Schwerkraft an ihrer Vorderseite viel stärker zerrte als an ihrer Rückseite. Durch diese Gezeitenkraft wurde die Sonne schließlich zerstört. Die intensive Strahlung, die bei

einer solchen Gezeitenkatastrophe entsteht, hat einen Hohlraum in die riesige Staubwolke gebrannt, von der das Schwarze Loch in der fernen Galaxie umgeben ist. Im Umkreis von rund einem halben Lichtjahr verdampfte der Staub dabei sofort. Dahinter heizte ihn die Strahlung extrem auf, so dass er schließlich hell im Infrarotbereich zu leuchten begann. Durch geometrische Effekte erreichte dieses Lichtecho erst ein Jahr nach dem Ende des Riesensterns sein Maximum. „Das Lichtecho im Infrarotbereich ist eine Schlüssel-



Die intensive Strahlung von der Trümmerscheibe um das Schwarze Loch (Zentrum) heizt den Staub extrem auf, bis er hell im Infrarot zu strahlen beginnt. Durch die zeitliche Verzögerung entsteht ein „Lichtecho“.

signatur der Gezeitenkatastrophe“, berichtet Hauptautor Simeon Reusch von DESY. „Damit hat sich die Natur dieses aufleuchtenden Objekts verraten.“

Physical Review Letters,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.221101

Bild: Science Communication Lab für DESY

Hochauflösende Röntgenbilder zeigen Nanopartikel in Fadenwürmern

Ein internationales Forschungsteam hat an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III erstmals einen ganzen Organismus mit so hoher Auflösung abgebildet, dass sich Schadstoffe in einzelnen Zellen nachweisen lassen. Die Röntgenuntersuchung zeigt Nanopartikel des Seltenerdmetalls Cer im Verdauungstrakt des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*, denen sie dabei nur eine relativ geringe Giftigkeit bescheinigt. Die innovative Untersuchungsmethode könnte auch für die Fahndung nach anderen

Umweltschadstoffen nützlich sein, wie das Entwicklungsteam von der Norwegischen Universität für Biowissenschaften (NMBU), der Universität Antwerpen und DESY berichtet.

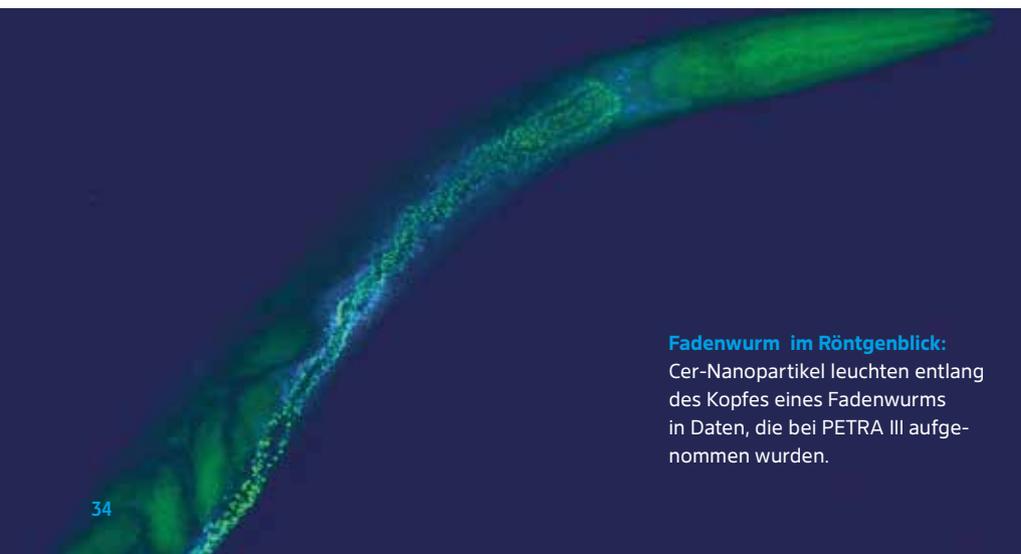
Die untersuchten Cer-Nanopartikel haben zahlreiche Anwendungen, etwa in Autokatalysatoren und Brennstoffzellen, und gehören zu den am häufigsten hergestellten Nanomaterialien. Die Forscherinnen und Forscher setzten die Fadenwürmer einer hohen Konzentration von Cer-Nanopartikeln aus, deutlich höher als sie in der Um-

welt vorkommt. „Mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzspektroskopie ist es uns gelungen, mit einem sehr feinen Röntgenstrahl ein extrem hochaufgelöstes Bild der Fadenwürmer und der Nanopartikel in ihnen zu gewinnen“, sagt Ko-Autor Gerald Falkenberg von DESY.

Diese Daten sind so detailliert, dass sich im Prinzip vom gesamten Organismus bis in einzelne Zellen hinein zoomen lässt, um Cluster von Nanopartikeln dort zu lokalisieren. „Die Abbildung von Schadstoffen mit einer Auflösung von 300 Nanometern im Ganzkörper-Röntgenbild eines intakten Organismus ermöglicht uns eine Untersuchung von Schadstoffwirkungen auf völlig neue Weise“, erläutert Forschungsleiter Ole Christian Lind von der NMBU. „Das ist Toxikologie der nächsten Stufe, bei der wir im Detail zeigen können, dass die Gegenwart eines Schadstoffs in einem Gewebe oder einer Zelle in direktem Zusammenhang mit der von ihm verursachten Wirkung steht.“

Environmental Science and Technology,
DOI: 10.1021/acs.est.1c08509

Bild: NMBU



Fadenwurm im Röntgenblick:
Cer-Nanopartikel leuchten entlang des Kopfes eines Fadenwurms in Daten, die bei PETRA III aufgenommen wurden.

Molekularer Motor entschlüsselt

Ein Team vom Zentrum für Strukturelle Systembiologie (CSSB) bei DESY hat Architektur und Funktionsweise eines molekularen Motors aufgeklärt, der in der Zelle für die Rekombination und Reparatur des Erbgutstrangs der DNA zuständig ist. Der sogenannte RuvAB Branch Migration Complex ähnelt demnach „mit seinem sequenziellen Mechanismus, der Koordination und der Art der Krafterzeugung konzeptionell dem Verbrennungsmotor“, wie Hauptautor Jiri Wald vom Hamburger Universitätsklinikum Eppendorf (UKE) erläutert.



Die durch den Motor angeregten Verzweigungsbewegungen sind sehr schnell und hochdynamisch. Um die einzelnen Schritte dieses Prozesses zu bestimmen, beobachteten die Forschenden den Motor mit Hilfe der zeitaufgelösten Kryo-Elektronenmikroskopie in Zeitlupe. „Wir haben dem molekularen Motor im Prinzip einfach einen langsamer verbrennenden Treibstoff zur Verfügung gestellt, der es uns ermöglicht, die biochemischen Reaktionen während ihres Ablaufs zu erfassen“, erläutert Forschungsleiter Thomas Marlovits von DESY und dem UKE.

Das Team hat mehr als zehn Millionen Bilder von der Interaktion des Motors aufgenommen. Mit Hilfe von Hochleistungsrechnern bei DESY konnten die Forschenden alle Puzzleteile zusammenfügen und einen hochauflösenden Film erstellen, der zeigt, wie der RuvAB-Komplex funktioniert.

Die DNA-Rekombination ist einer der grundlegenden biologischen Prozesse in lebenden Organismen. Dabei trennen sich zwei DNA-Doppelstränge in ihre vier einzelnen Arme und verbinden sich über Kreuz neu. Diese Kreuzung heißt Holliday Junction. Die für diesen Prozess nötige Energie stammt von einer molekularen Maschine, die als RuvAB Branch Migration Complex bezeichnet wird. Sie verteilt sich um die Holliday Junction herum (künstlerische Darstellung).

Nature, DOI: 10.1038/s41586-022-05121-1

femtomenal

0,000 000 000
000 000 000 000 000
000 000 001 426

GRAMM

ist die Obergrenze für das Gewicht des Neutrinos. Das hat eine Präzisionsmessung am Karlsruhe-Tritium-Neutrino-Experiment (KATRIN) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ergeben. Die genaue Masse des Neutrinos ist noch unbekannt und sehr schwer zu messen. KATRIN ist die weltweit empfindlichste Neutrino-Waage. Mit ihr konnten Forscherinnen und Forscher nun die neue Obergrenze für die Neutrino-Masse bestimmen. Das geisterhafte Teilchen wiegt demnach maximal 1,4 quintilliardstel Gramm, oder in den Einheiten der Teilchenphysik maximal 0,8 Elektronenvolt.





Hennastrauch



Tagetes



Durch Naturstoffe zu Corona-Medikamenten?

Röntgenscreening identifiziert Substanzen, die ein wichtiges Virusenzym blockieren

Drei Naturstoffe aus Lebensmitteln wie grünem Tee, Olivenöl und Rotwein haben sich als vielversprechende Kandidaten für die Entwicklung von Medikamenten gegen das Coronavirus erwiesen. Die drei Substanzen binden an ein zentrales Enzym des Virus und können damit

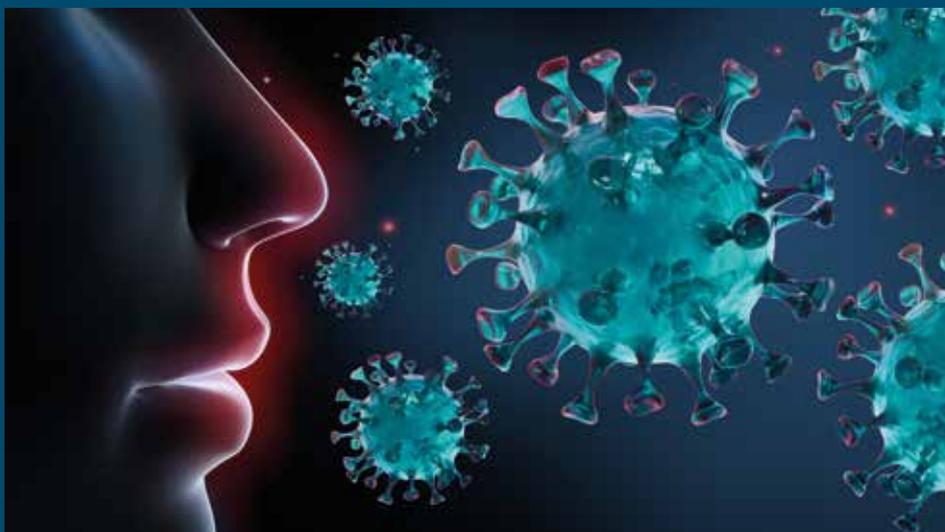
seine Vermehrung lahmlegen. Das zeigt ein umfassendes Screening einer großen Naturstoffbibliothek an DESYs Röntgenquelle PETRA III. Alle drei Verbindungen werden bereits als Wirkstoffe in bestehenden Medikamenten eingesetzt, wie das Team um Christian Betzel von der Universität Hamburg und Alke

Meents von DESY berichtet. Ob und wann sich nach dem Vorbild dieser Naturstoffe ein Corona-Medikament entwickeln lässt, ist derzeit allerdings noch nicht geklärt.

„Wir haben 500 Substanzen aus der Karachi Library of Natural Compounds daraufhin getestet, ob sie an die Papain-like Protease des neuartigen Coronavirus binden, die eines der Hauptziele für ein antivirales Medikament ist“, erläutert die Hauptautorin der Studie, Vasundara Srinivasan von der Universität Hamburg. „Ein Wirkstoff, der sich an der richtigen Stelle an das Enzym bindet, kann dessen Funktion blockieren.“

Molekulare Schere

Die Papain-like Protease (PLpro) ist ein zentrales Enzym für die Virusvermehrung: Wenn das Coronavirus eine Zelle kapert, zwingt es sie, Bausteine für neue Viruspartikel zu produzieren. Diese Proteine werden in Form einer langen Kette herge-





Kupferblatt

stellt. PLpro wirkt dann wie eine molekulare Schere und schneidet diese Kette in die einzelnen Proteine auseinander. Wird dieser Prozess blockiert, können sich keine neuen Viruspartikel zusammensetzen. „PLpro hat aber noch eine andere wichtige Funktion für das Virus“, berichtet Srinivasan. „Es blockiert ein Protein des Immunsystems namens ISG15, und das schwächt die Selbstverteidigung der Zelle erheblich. Können wir PLpro blockieren, können wir auch die Immunantwort der Zelle verstärken.“

Für die Experimente wurde PLpro mit jeder der 500 natürlichen Substanzen in einer Lösung gemischt, so dass diese die Möglichkeit hatten, sich an das Enzym zu binden. Mit einem herkömmlichen Mikroskop lässt sich jedoch nicht feststellen, ob eine Substanz an das Enzym bindet. Stattdessen wurden aus den Mischungen winzige Enzymkristalle gezüchtet. Im Röntgenlicht erzeugen diese Kristalle ein charakteristisches Beugungsmuster, aus dem sich die Struktur des Enzyms bis auf die Ebene einzelner Atome rekonstruieren lässt. „Aus diesen Informationen können wir dreidimensionale Modelle des Enzyms mit atomarer Auflösung erstellen und sehen, ob und wo eine Substanz an das Enzym bindet“, erklärt Meents.

„Können wir PLpro blockieren, können wir auch die Immunantwort der Zelle verstärken“

Vasundara Srinivasan, Universität Hamburg

Kupferblatt und Studentenblume

Das Screening zeigte, dass drei sogenannte Phenole tatsächlich an das Enzym binden: Hydroxyethylphenol (YRL), das für die Experimente aus dem Hennastrauch *Lawsonia alba* isoliert wurde, ist eine Verbindung, die in vielen Lebensmitteln wie Rotwein und Olivenöl vorkommt und als Mittel gegen Herzrhythmusstörungen eingesetzt wird. Hydroxybenzaldehyd (HBA) ist ein bekanntes Antitumormittel und beschleunigt die Wundheilung. Es wurde aus dem Kupferblatt *Acalypha torta* isoliert. Methyl-dihydroxybenzoat (HE9), isoliert aus der Studentenblume *Tagetes patula*, ist ein Antioxidans mit entzündungshemmender Wirkung und kommt in grünem Tee vor.

In den anschließenden Labortests, die von Hévila Brognaro in Betzels Gruppe aufgesetzt und durchgeführt wurden, bremsten die drei Phenole die Aktivität von PLpro in lebenden Zellen um 50 bis 70 Prozent. „Der Vorteil dieser Substanzen ist ihre erwiesene Sicherheit“, sagt Betzel. „Diese Verbindungen kommen natürlicherweise in vielen Lebensmitteln vor. Grünen Tee zu trinken, wird eine Corona-Infektion allerdings nicht heilen! Genauso wenig wie es Wunden oder Krebs heilen würde. Ob und wie ein Corona-Mittel auf Grundlage dieser

Phenole entwickelt werden kann, wird jetzt weiter untersucht.“

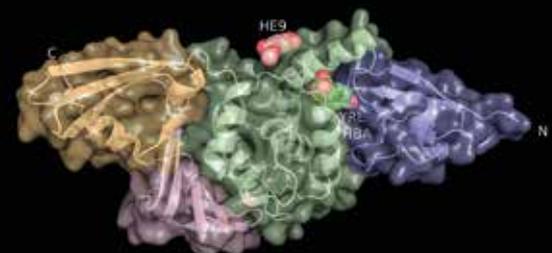
In einem anderen Screening hatte ein Team aus zum großen Teil denselben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern bereits Tausende bestehender Arzneimittel bei PETRA III auf mögliche Hemmstoffe der Hauptprotease (Mpro) des Coronavirus untersucht, die ebenfalls eine molekulare Schere und ein wichtiges potenzielles Arzneimittelziel ist. Das Screening identifizierte mehrere Corona-Wirkstoffkandidaten, von denen die vielversprechendsten die präklinische Testphase erreicht haben. „Die Corona-Initiative von DESY und der Universität Hamburg ist eine der ganz wenigen weltweit, die beide Hauptziele von Covid-19 untersucht hat“, betont Betzel.

Communications Biology,
DOI: 10.1038/s42003-022-03737-7



Schlüsselprotein:

Struktur des Enzyms Papain-like Protease mit den Bindungsstellen der identifizierten Naturstoffe



Chemische Mühle liefert nachhaltigeren **Pflanzendünger**

Röntgenuntersuchung ermöglicht Optimierung des Produktionsprozesses



Der gemahlene Dünger soll Gewässer und Klima schonen.

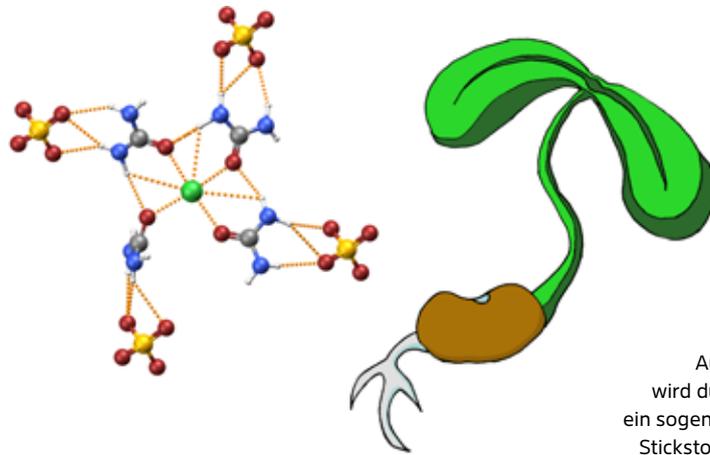
Pflanzendünger sind häufig ein Umweltproblem. Unter anderem versickert fast die Hälfte des in ihnen enthaltenen Stickstoffs im Boden und belastet die Gewässer. Mit einem rein mechanischen Verfahren lässt sich jedoch ein nachhaltigerer Pflanzendünger umweltschonend herstellen. Das zeigt die Optimierung der Methode an DESYs Röntgenstrahlungsquelle PETRA III. Bei dem Verfahren werden Harnstoff und Gips gemahlen, bis eine feste Verbindung aus beiden Stoffen entsteht. Die Verbindung setzt die beiden für die Düngung wichtigen chemischen Elemente Stickstoff und Kalzium dann langsam nach und nach frei und kann daher die Belastung von Gewässern verringern und das Klima schonen.

Das Mahlverfahren ist schnell, effizient und sauber, wie das internationale Forschungsteam berichtet. Die Methode ist demnach auch skalierbar und hat somit das Potenzial zur industriellen Nutzung. Feldversuche mit dem neuen Dünger hat es bislang allerdings noch nicht gegeben.

Die Forscherinnen und Forscher vom Ruđer Bošković Institut (IRB) in Kroatien, der Lehigh University in den USA und DESY haben PETRA III genutzt, um die Produktion des Düngers in der Mühle live zu verfolgen und das Herstellungsverfahren zu optimieren. Teams von DESY und dem IRB erforschen bereits seit einigen Jahren gemeinsam die Grundlagen mechanischer Verfahren zur Auslösung chemischer Reaktionen als Alternative zur Nasschemie. Bei der Mechanochemie werden verschiedene mechanische Verfahren wie etwa Kompression, Schwingungen oder das Mahlen eingesetzt, um eine chemische Umwandlung zu erreichen.

Jahrtausende alte Technik

„Die Mechanochemie ist eine recht alte Technik“, erklärt DESY-Forscher Martin Etter, Leiter der Messstation,



Aus Gips und Harnstoff (Urea) wird durch Mahlen mit Stahlkugeln ein sogenannter Kokristall, der seinen Stickstoff (blau) nur langsam abgibt.

an der die Versuche stattgefunden haben. „Seit Jahrtausenden mahlen wir Dinge, wie zum Beispiel Getreide fürs Brot. Erst jetzt beginnen wir, diese mechanochemischen Prozesse mit Hilfe von Röntgenstrahlen näher zu untersuchen und zu verstehen, wie wir diese Vorgänge nutzen können, um chemische Reaktionen auszulösen.“

Etters Messstation ist eine der wenigen auf der Welt, an der die Mechanochemie routinemäßig mit Röntgenstrahlung eines Synchrotrons während des Prozesses analysiert werden kann. Für die Untersuchung der Düngerproduktion tat sich das Team mit der Gruppe von Jonas Baltrusaitis von der Lehigh University zusammen. Die Ausgangsstoffe wurden als Pulver in

Der Versuchsaufbau erlaubte einen direkten Einblick in die Entwicklung der Reaktionsmischung, ohne den Vorgang unterbrechen zu müssen. Die Forscherinnen und Forscher konnten so die genauen Reaktionswege bestimmen und die Ausbeute und Reinheit des Produkts analysieren. Dadurch ließ sich das mechanische Verfahren im laufenden Betrieb weiter verfeinern. Der optimierte Prozess erreicht die 100-prozentige Umwandlung der Ausgangsstoffe in den gewünschten Dünger.

Robustere Bindung

Das als „Kokristall“ bezeichnete Endprodukt ist ein Feststoff mit kristalliner Struktur, das aus zwei verschiedenen Chemikalien besteht, und wird durch schwächere inter-

„Seit Jahrtausenden mahlen wir Dinge, wie zum Beispiel Getreide fürs Brot. Erst jetzt beginnen wir, diese mechanochemischen Prozesse mit Hilfe von Röntgenstrahlen näher zu untersuchen“

Martin Etter, DESY

einen Mahlbehälter gegeben, in dem sich zwei Stahlkugeln befanden. Durch Schütteln wurden die Pulver gemahlen und verbanden sich schließlich chemisch.

molekulare Wechselwirkungen in sich wiederholenden Mustern stabilisiert. „Man kann sich Kokristalle wie Gebilde aus LEGO-Steinen vorstellen“, erklärt Etter. „Man hat >>

zwei Arten von Steinen und bildet mit diesen beiden Steinen ein sich wiederholendes Muster.“ In diesem Fall handelt es sich bei den Bausteinen um Kalziumsulfat, welches aus Gips gewonnen wird, und Harnstoff. Durch das Mahlen werden der Harnstoff und das Kalziumsulfat aneinandergebunden.

„Harnstoff bildet, für sich allein genommen, einen sehr schwach gebundenen Kristall, der leicht

denen durch überschüssigen Dünger genährte Algen den gesamten verfügbaren Sauerstoff im Wasser aufbrauchen und damit das Meeresleben abtöten.

Schnell und effizient

Außerdem verzehrt die Herstellung dieser Düngemittel über das sogenannte Haber-Bosch-Verfahren zur Stickstofffixierung aus der Luft in Harnstoff große Mengen Energie

resultierende Dünger ist ganz rein, ohne irgendwelche Nebenprodukte, abgesehen von Wasser. „Wir schlagen nicht nur einen effektiveren Dünger vor, wir zeigen auch eine umweltfreundliche Methode zur Synthese auf“, betont Baltrusaitis.

Während es bei der Analyse für die Studie um weniger als ein Gramm Dünger ging, ist es dem Forschungsteam um Baltrusaitis und Krunoslav Užarević vom IRB in Zagreb mit Hilfe der gewonnenen Daten gelungen, ihr Verfahren hochzuskalieren. Bislang können sie mit demselben Verfahren und demselben Wirkungsgrad Hunderte Gramm Dünger herstellen. Als nächsten Schritt plant das Team, die Skalierung bis zu einer industriellen Version des Verfahrens fortzusetzen. Baltrusaitis arbeitet bereits an einer solchen Aufskalierung und an Tests des Kokristall-Düngers unter realen Bedingungen.

„Neben dem Produkt entstehen bei dem mechanochemischen Prozess praktisch keine unerwünschten Nebenprodukte oder Abfälle“, sagt Užarević. „Wir sind optimistisch, dass dieses Verfahren auf der ganzen Welt über ein großes Anwendungspotenzial verfügt.“

*Sustainable Chemistry & Engineering,
DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c00914*

„Wir sind optimistisch, dass dieses Verfahren auf der ganzen Welt über ein großes Anwendungspotenzial verfügt“

Krunoslav Užarević, Ruđer Bošković Institut

zerfällt und seinen Stickstoff zu schnell abgibt“, erläutert Baltrusaitis. „In Verbindung mit dem Kalziumsulfat erhält man aber durch das mechanochemische Verfahren einen viel robusteren Kokristall, der Stickstoff viel langsamer freisetzt.“ Der Vorteil dieses Kokristalls besteht darin, dass seine chemischen Bindungen schwach genug sind, um Stickstoff und Kalzium freizusetzen, aber stark genug, um die Freisetzung der beiden Elemente auf einen Schlag zu verhindern.

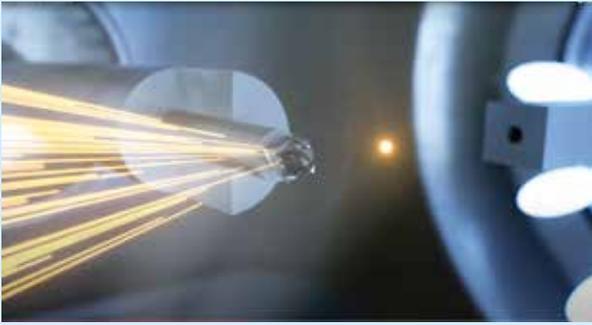
Diese Art der Freisetzung ist der große Vorteil des Düngers. Sie lindert einen der größten Nachteile der seit den 1960er Jahren verwendeten Stickstoffdünger. „Aus Gründen der Ernährungssicherung besteht das aktuelle Prinzip bei Düngemitteln darin, Pflanzen so viel Stickstoff und Phosphor wie möglich zuzuführen“, erläutert Baltrusaitis. Bei herkömmlichen Düngern werden nur rund 47 Prozent des Stickstoffs tatsächlich vom Boden aufgenommen, der Rest wird ausgewaschen und kann zu massiven Störungen der Gewässer führen. In der Nordsee und im Golf von Mexiko entstehen riesige Todeszonen, in

und verbraucht jedes Jahr vier Prozent der weltweiten Erdgasvorräte. Das untersuchte Mahlverfahren hat das Potenzial, diesen Verbrauch deutlich zu senken. „Wenn man die Effizienz der Harnstoffmaterialien um 50 Prozent erhöht, muss man weniger Harnstoff über das Haber-Bosch-Verfahren herstellen und verringert die damit verbundenen Probleme, wie zum Beispiel den Erdgasbedarf“, erläutert Baltrusaitis.

Das Mahlverfahren ist schnell und sehr effizient, und der daraus

Der Dünger entsteht als Pulver auf rein mechanischem Weg, Lösungsmittel oder andere Nasschemie sind nicht nötig.





Medikamenten-Fahndung im Proteinkristall

Mit Hilfe der Proteinkristallographie können Forschende tief in die Arbeitswelt von lebenswichtigen Proteinen schauen. Die Proteine werden dafür zu winzigen Kristallen geformt, die dann mit intensivem Röntgenlicht durchleuchtet werden. Dabei entsteht ein charakteristisches Beugungsmuster, aus dem sich die Struktur der Proteine ablesen lässt. Auf diesem Weg fahnden Forschungsteams an DESYs Röntgenquelle PETRA III zum Beispiel nach – im Wortsinn – passenden Medikamenten gegen das Coronavirus. Eine neue Animation des preisgekrönten Science Communication Lab zeigt verschiedene Schritte, die dazu nötig sind:

youtu.be/Ug-QvhOV7eo



Interaktive Dunkle Materie

Der größte Teil der Materie im Weltall ist dunkel. Die geheimnisvolle Dunkle Materie ist mehr als fünfmal so häufig wie die uns vertraute Materie. Sie heißt aber nicht so, weil sie lediglich nicht leuchtet. Sondern weil es sich um eine unbekannte Materieform handeln muss, die mit Licht so gut wie gar nicht interagiert. Nach den bislang hypothetischen Teilchen dieses mysteriösen Stoffs fahndet unter anderem das Experiment ALPS II bei DESY. Ein neues interaktives digitales Poster erklärt die Zusammenhänge:



darkmatter-alps.desy.de



Teilchenbeschleuniger im Kompaktformat

Per Mausklick auf Lichtgeschwindigkeit: Eine neue interaktive Webseite veranschaulicht das Prinzip der Laser-Plasmabeschleunigung, wie es das Projekt KALDERA bei DESY erforscht. Die Technik soll Teilchenbeschleuniger möglich machen, die deutlich kompakter und kostengünstiger sind als heutige Anlagen. Dazu wird mit einem extrem starken Laserblitz ein Plasma in einem Röhrchen erzeugt. Der Laserblitz pflügt wie ein Schneepflug durch das Gas im Röhrchen und entreibt ihm seine Elektronen. Die Elektronen sammeln sich hinter dieser Plasmawelle und können auf ihr surfen wie ein Wakeboarder auf der Heckwelle eines Schiffs. Wie das funktioniert, lässt sich nun interaktiv an jedem Desktop-PC erkunden:

kaldera.desy.de



Röntgenmikroskop der Zukunft

In Hamburg soll das beste 3D-Röntgenmikroskop der Welt entstehen. Die Anlage mit dem Namen PETRA IV wird 3D-Bilder aus dem Nanokosmos liefern und Einblicke mit bisher unerreichter Präzision in Materialien und biologische Strukturen ermöglichen – vom Aufbau von Krankheitserregern über Katalysatoren bis zu innovativen Mikrochips und Quantenmaterialien. Eine neue Website stellt das Projekt mit Bildern, Videos und Artikeln der Öffentlichkeit vor. Der Ausbau von DESYs Röntgenquelle PETRA III zu PETRA IV ist auch ein Eckpfeiler der geplanten Science City Hamburg Bahrenfeld.

petra4.desy.de



femtofinale



Das FRÜHSTÜCK IM GRÜNEN
sieht ja nett aus, aber der
TEILCHENBESCHLEUNIGER
hat herausgefunden:
Das Gebäck war 4 Tage alt!



mahler

Impressum

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

Redaktionsanschrift

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

Redaktion

Till Mundzeck (v.i.S.d.P.)

Mit Beiträgen von

Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein, Daria Weiglein,
Joseph Piergrossi, Melissa Prass, Maïke Bierbaum, Till Mundzeck

Schlussredaktion

Ilka Flegel

Layout

Jutta Krüger

Artdirektion und Produktion

Diana von Ilseemann

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

November 2022

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto



Titelbild: Detail aus Jan Vermeers „Das Mädchen mit dem Perlenohrring“ (um 1665, Öl auf Leinwand, Mauritshuis, Den Haag). Foto: René Gerritsen, Art & Research Photography. Röntgenfluoreszenzskarten: Annelies van Loon, Rijksmuseum/Mauritshuis. Publiziert in: A. van Loon, A. Vandivere, J.K. Delaney, K.A. Dooley, S. De Meyer, F. Vanmeert, V. Gonzalez, K. Janssens, E. Leonhardt, R. Haswell, S. de Groot, P. D'Imporzano, G. Davies: "Beauty is skin deep: the skin tones of Vermeer's Girl with a Pearl Earring", Herit. Sci. 7, 102 (2019). DOI: 10.1186/s40494-019-0344-0

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.

HELMHOLTZ



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