



FORSCHUNG FRANKFURT

Das Wissenschaftsmagazin der Goethe-Universität

Fremde Welten



[40. Jahrgang] [2023] [ISSN 0175-0992]

1. 2023

UNWIDERSTEHLICHE ANZIEHUNG

Was Gravitationswellen über superschwere Objekte im All verraten

TEILCHEN-CRASHS IM LABOR

Mit Beschleunigern dem Geheimnis der Goldentstehung auf der Spur

TIEF UNTER DEM MEER

Der Klimawandel wirkt bis auf den lichtlosen Grund der Ozeane

RÄTSELHAFTES BÜHNENSPIEL

Avatare und Computerstimmen zwischen Realität und Digitalität

SICHERHEIT IM CYBERSPACE

Wie Daten und Demokratien geschützt werden müssen

ZAHLENSPIELE

Wo ein Kreis unendlich viele Mittelpunkte hat

ÜBER DAS LEBEN HINAUS FÜR DIE PRESSEFREIHEIT

GESTALTEN SIE DIE ZUKUNFT: DEMOKRATISCH UND MIT EINER FREIEN PRESSE

Hunderte Medienschaffende werden jedes Jahr inhaftiert und sogar ermordet. Reporter ohne Grenzen alarmiert die Öffentlichkeit, wenn die Pressefreiheit in Gefahr ist. Unterstützen Sie eine demokratische Zukunft - jetzt informieren: Testament, Nachlass und Zustiftung zugunsten von Reporter ohne Grenzen und Medienschaffenden weltweit! reporter-ohne-grenzen.de/vererben





AUS DER REDAKTION

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

das Erkunden fremder Welten an den Grenzen des Wissens gehört zur DNA jeder Forschung. Forschende des Profillbereichs »Raum, Zeit und Materie« der Goethe-Universität, auf den wir in dieser Ausgabe einige Schlaglichter werfen werden, zählen zu jenen, die sich in solche fremden Koordinatensysteme vorwagen.

Manche von Ihnen, verehrte Leserin, geschätzter Leser, denken bei »Fremde Welten« aber womöglich zunächst ans Weltall und an die ungeheure Faszination, mit der die Menschheit seit Urzeiten in den Himmel schaut. Dieser Faszination sind auch die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Forschungsclusters ELEMENTS erlegen, zu dem sich Goethe-Universität, TU Darmstadt, Universität Gießen und GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung zusammengetan haben. Für Forschung Frankfurt berichten sie: von den Erschütterungen des Raum-Zeit-Gefüges, die wir seit einigen Jahren messen können und die von kosmischen Katastrophen künden. Von der geheimnisvollen Dunklen Materie, die auch Künstlerinnen inspiriert. Und von großen Maschinen zur Untersuchung der kleinsten Bausteine, aus denen die Sterne, aber auch unsere Erde und wir selbst bestehen.

Selbst unser Heimatplanet wirkt fremd auf uns, wenn unsere Forscherinnen und Forscher beschreiben, wie seine Kontinente vor Milliarden von Jahren ausgesehen haben. Und über ein gutes Drittel unserer scheinbar vertrauten Erde wissen wir – einem geflügelten Wort zufolge – weniger als über die Rückseite des Mondes: Bei Tiefseeexpeditionen mit Forschungsschiffen werden täglich neue Tierarten entdeckt. Gleichzeitig macht die Forschung deutlich, wie sehr diese nur wenige Kilometer von der Wasseroberfläche entfernte Welt etwa durch Bergbau und Klimawandel bedroht ist.

Auch wir selbst erschaffen fremde Welten, etwa in Form virtueller Netze, die Waren und Geld verknüpfen, die unsere Beziehungen prägen und den Takt unseres Lebens vorgeben. Und deren Informationsflüsse an der Goethe-Universität erforscht werden, damit wir Krisen künftig besser vorhersagen und managen können – aber auch, um die Hoheit über unsere Daten zu behalten und selbstbestimmt zu leben. Mensch und Virtualität, dieses Thema beschäftigt aber auch die Theaterkunst, wie Sie auf Seite 63 lesen können.

Als Max Planck 1900 mit seinem Strahlungsgesetz die Tür zur Quantenwelt der Atome und Elementarteilchen aufstieß, ahnte er wohl kaum, dass die Quantenphysik wenige Jahrzehnte später so breiten Einzug in unseren Alltag halten würde, etwa in Form der Lasertechnik. An der Goethe-Universität ist man schon weiter: Heute geht es darum, wie Quantencomputer in Superrechner integriert werden können. Ein anderer Zweig sucht nach Materialien mit erstaunlichen Eigenschaften jenseits der Supraleitung.

Reine Grundlagenforschung ist dagegen die theoretische Mathematik: An der Goethe-Universität untersuchen Forscherinnen und Forscher die ebenso abstrakte wie faszinierende Geometrie p-adischer Zahlen, die Kreise mit unendlich vielen Mittelpunkten hervorbringt. Für solche wissenschaftlichen Unterfangen braucht es viel Vorstellungskraft – etwas, worin der romantische Autor E.T.A. Hoffmann weltweit prägend war für die Literatur. Die Realität war für ihn eine Mangelsituation, weiß die heutige Literaturforschung, nur die Fantasie kann einen Zustand der Vollkommenheit beschreiben.

In diesem Sinne wünschen wir Ihnen eine spannende Erkundung unserer fremden Welten.

Anke Sauter und Markus Bernards
Redaktion Forschung Frankfurt

Titelbild

Fasziniert durch Tausende von Lichtjahren entfernte Formationen in den Weiten des Alls suchen wir doch allenthalben das Vertraute. So erhielt die bogenförmige Formation aus Staub und Gas den Namen Pferdekopfnebel (oben rechts im Bild). Das helle Gebilde links unten ist der Reflexions- und Emissionsnebel NGC 2023, eine der hellsten Quellen angeregten molekularen Wasserstoffs, die man von der Erde aus sehen kann.

Titelfoto: ESO/J. Emerson/VISTA; Fabian RRRR; Wikipedia; Person im Vordergrund: Peter Kiefer; Flohkreis: Torben Riehl, Senckenberg

INHALT



4 BLICKPUNKT
The Whirlpool-Galaxie M51

FERNE WELTEN

- 7 Wenn die Schwerkraft Wellen schlägt**
Über die Erforschung kosmischer Katastrophen
von Markus Bernards
- 12 Das meiste ist unsichtbar**
Auf der Spur der Dunklen Materie
von Anne Hardy
- 16 Dunkle Materie**
Dark Matter (2003) von Eva Grubinger
von Verena Kuni

MIKROWELTEN

- 19 Materie am Limit**
Wie Gold, Blei & Co. entstanden sind
von Dirk Eidemüller
- 24 Mit recycelter Energie auf den Spuren schwerer Elemente**
Der supraleitende Beschleuniger in Darmstadt
von Phyllis Mania
- 28 Quantensprünge in der Materialforschung**
Wie im Labor und am Computer Kristalle mit überraschenden Eigenschaften entstehen
von Benedikt Vogel

ERDWELTEN

- 35 Die turbulente Kindheit der Erde**
Diamanten zeugen davon, wie sich unser Planet vor Milliarden Jahren gewandelt hat
von Frank Frick
- 39 Im Dunkeln**
Reisen in die Tiefsee
von Larissa Tetsch



35

UNRUHIGE ERDE

Heftige Vulkaneruptionen brachten einst Diamanten aus großen Tiefen in die Nähe der Oberfläche. Winzige Einschlüsse in den uralten Edelsteinen erzählen von der Entstehung der Kontinente.



58

DAS SIMULIERTE INTERNET

Finanzkrisen und Shitstorms machen deutlich: Es ist schwer vorherzusagen, wie sich Informationen in Netzwerken ausbreiten. Synthetische Netzwerke sollen helfen, die Geflechte besser zu verstehen.



68

FANTASIE, RAUSCH, WAHSINN

Seine fantastischen Erzählungen machten E.T.A. Hoffmann zu einem der einflussreichsten deutschen Autoren. Romantikforscher Wolfgang Bunzel erklärt, warum Hoffmann die Realität nicht reichte.

VIRTUELLE WELTEN

- 45** **Das Paralleluniversum unserer Daten**
von Dirk Frank
- 48** **Ein Kreis mit unendlich vielen Mittelpunkten**
Die erstaunliche Welt der p-adischen Geometrien
von Aeneas Rooch
- 54** **Problemlöser mit Quantenmodul**
Wie die Supercomputer der Zukunft aussehen werden
von Andreas Lorenz-Meyer
- 58** **Gut vernetzt**
Wie sich Netzwerke besser verstehen und sicherer machen lassen
von Dirk Eidemüller

GEISTESWELTEN

- 63** **Theater zwischen den Welten**
Mit »Ultraworld« führen Susanne Kennedy und Markus Selg ihr Publikum in eine simulierte Welt
von Eva Döhne
- 68** **»Unheimlich fantastisch«: E.T.A. Hoffmann als Türöffner in eine andere Welt**
Der Romantikforscher Wolfgang Bunzel im Gespräch
von Anke Sauter
- 71** **Romantik im Fokus**
Ein neuer kulturwissenschaftlicher Forschungsschwerpunkt an der Goethe-Universität
von Anke Sauter

- 74** Nachrichten
- 80** Impressum
- 81** Vorschau

BLICKPUNKT

DIE WHIRLPOOL-GALAXIE M51

Wenn der Himmel klar ist, packt der Astrofotograf Christoph Lichtblau nach der Arbeit seine rund 100 Kilogramm Ausrüstung zusammen und fährt in eine dunkle Gegend, um seinen »eigenen Himmel zu erforschen und Fotos von astronomischen Objekten zu machen, von denen die meisten denken, dass ein Amateur sie niemals machen könne«, wie er sagt. Das unter Hobby-Astronomen beliebte Motiv der Spiralgalaxie M51 mit Begleiter hat Lichtblau aus dem eigenen Garten und von der Rhön aus aufgenommen und die Bilder anschließend mithilfe verschiedener Spezialsoftwares bearbeitet. Lichtblau ist langjähriges Mitglied im Frankfurter Physikalischen Verein, der 1914 acht seiner naturwissenschaftlichen Institute in die Gründung der Goethe-Universität einbrachte und ihr auch heute noch eng verbunden ist. Der Verein unterstützte Lichtblau schon vor zwanzig Jahren beim Erlernen der – leider recht kostspieligen – Hobby-Astrofotografie, in die er viel Zeit und Geld investierte. Die Belohnung sind tolle Bilder.

<https://tinyurl.com/ChristophLichtblau>





The background features a complex, fiber-like or web-like structure in shades of red, orange, and yellow, set against a dark background. A large, semi-transparent red circle is positioned on the left side of the image, partially overlapping the fiber-like patterns. The text 'FERNE WELTEN' is overlaid on this red circle.

FERNE

WELTEN

Wenn die Schwerkraft Wellen schlägt

Über die Erforschung kosmischer Katastrophen

von Markus Bernards

Wenn Neutronensterne oder Schwarze Löcher miteinander kollidieren, erschüttern sie das Gefüge von Raum und Zeit. Die dabei ausgelösten Gravitationswellen können auf der Erde gemessen werden. Was solche Signale aus den Tiefen des Alls über unsere Welt verraten, erforscht Luciano Rezzolla am Institut für Theoretische Physik der Goethe-Universität.

Der 16. Oktober 2017 hätte ein Tag des vollkommenen Triumphs für den theoretischen Astrophysiker Luciano Rezzolla sein können. Denn an diesem Tag gaben Forscherinnen und Forscher des US-amerikanischen Gravitationswellenobservatoriums LIGO und des europäischen Gegenstücks Virgo bekannt, erneut Gravitationswellen – gewaltige Erschütterungen des Raum-Zeit-Gefüges – aus der Tiefe des Weltalls aufgezeichnet zu haben. Die ersten Male in den beiden Jahren zuvor ließen sich die Gravitationswellen auf zwei verschmelzende Schwarze Löcher zurückführen, also auf die Kollision zweier Objekte, die die stärkste Zusammenballung von Masse auf kleinstem Raum darstellen.

Nun wurden erstmals Gravitationswellen von zwei kollidierenden Neutronensternen empfangen, deren Masse ebenfalls extrem verdichtet ist, wenn auch nicht so extrem wie in Schwarzen Löchern. Luciano Rezzolla und andere Forschende hatten solche Gravitationswellen in aufwendigen theoretischen Berechnungen auf der Basis von Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie bereits 2010 prognostiziert. Jetzt gab es endlich Messdaten dazu, die die theoretischen Modelle bestätigten.

Bunte Ästhetik

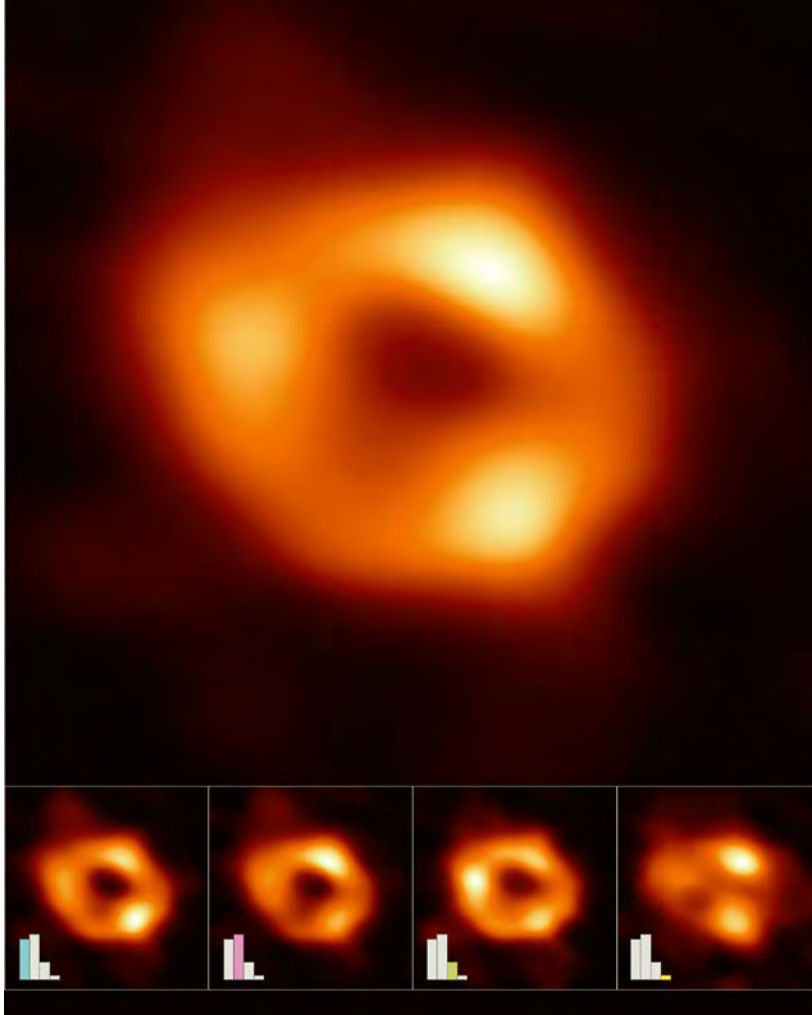
Ein kleiner Schatten dämpfte Rezzollas Freude allerdings: Nur zwei Wochen vor jenem 16. Okto-

ber war sein aufwendiger Forschungsantrag gescheitert, mit dessen Hilfe er ein großes Projekt zur Neutronensternforschung hätte starten können. Der Grund: Die Gutachterinnen und Gutachter hatten es für extrem unwahrscheinlich gehalten, dass man in naher Zukunft die Gravitationswellen kollidierender Neutronensterne würde messen können. »Recht unglücklich«, findet Rezzolla – hätten die Verfasser des Gutachtens nur ein wenig mehr Optimismus an den Tag gelegt!

Wenige Millisekunden nach dem Verschmelzen zweier Neutronensterne zeigt diese Simulationsrechnung, dass das Magnetfeld (weiße und grüne Linien) noch chaotisch ist. In den folgenden Millisekunden formiert es sich zu einem Jet, der Voraussetzung für das Aussenden eines kurzen Gammastrahlblitzes ist, eines so genannten Blitzars.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Existenz von Gravitationswellen, die 2015 erstmals gemessen wurden, sagte Albert Einstein bereits 100 Jahre zuvor in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorher.
- Kollisionen extrem dichter Himmelskörper (wie Neutronensterne und Schwarze Löcher) verursachen Gravitationswellen.
- Im Zusammenspiel theoretischer Berechnungen mit Messungen werden kosmische Katastrophen ebenso wie der Ursprung schwerer Elemente wie Gold erforscht.



Für das erste Bild des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße (oben) werteten Luciano Rezzolla und seine Kolleginnen und Kollegen der internationalen »Event Horizon Telescope«-Kollaboration (EHT) riesige Mengen an Radiowellendaten aus und berechneten Tausende von Bildern, die alle zu den Daten passten. Die Bilder wurden gemittelt und in vier Gruppen eingeteilt (kleine Bilder). Die meisten Bilder zeigten einen durch theoretische Berechnungen erwarteten Ring um das Schwarze Loch.

Neutronensternkollisionen sind ein wichtiger Schlüssel, um zu verstehen, wie sich Materie unter extremen Bedingungen verhält und wie die schweren Elemente entstanden sind, aus denen unsere Welt besteht. Womöglich wird in solchen Kollisionen Materie so sehr verdichtet, dass sie sich in ihre elementaren Bestandteile auflöst. Dies zeigen zum Beispiel die Simulationsrechnungen Rezzollas, die er mithilfe von Supercomputern macht: Auf seinem Bildschirm entfalten die kosmischen Katastrophen eine lebendige, bunte Ästhetik aus Wirbeln oder vielförmigen Sphären in Gelb-, Orange- und Rottönen. »Was man sieht, ist Mathematik«, erklärt Rezzolla, »es ist nur eine andere Darstellungsweise als Zahlenreihen.« Mit diesen Simulationen konnte Rezzolla zeigen, dass Gravitationswellen einer bestimmten Kollisionsphase eine solche Elementarteilchen-»Suppe« beweisen könnten, ein sogenanntes Quark-Gluon-Plasma.

Die Basis ist Einstein

Zur Erforschung von Neutronensternen haben Rezzolla und seine Kolleginnen und Kollegen an der Goethe-Universität, der TU Darmstadt, am Darmstädter GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung und an der Universität Gießen vor zwei Jahren den Forschungscluster ELEMENTS ins Leben gerufen. Sie wollen wissen: Wie sieht das Innere von Neutronensternen aus? In welchem Zustand befindet sich

die Materie während der Kollision? Liegt sie als Plasma der Elementarteilchen (Quarks) vor? Sind die Kollisionen Voraussetzung für die Entstehung schwerer Elemente wie Gold oder Platin? Zur Beantwortung dieser Fragen wollen Rezzolla und sein Team beitragen.

Sie setzen dazu bei der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins an, die dieser bereits 1915 vorstellte. »Die Allgemeine Relativitätstheorie ist eine schöne Theorie«, findet Rezzolla. »Sie ist mathematisch schön, und sie ist schön, weil sie die Wirkung der Gravitation nur unter einer einzigen Annahme erklärt: Es gibt eine obere Grenze der Ausbreitungsgeschwindigkeit, Licht hat also eine Maximalgeschwindigkeit.« Diese Annahme erscheint dem Physiker schlüssig, denn »sonst würde man erwarten, dass Dinge sich augenblicklich verändern können. Wir Menschen wären dann wohl eher geisterhafte Erscheinungen, die ständig überall erscheinen könnten.«

Bewegung entlang der Krümmung

Weniger intuitiv zu erfassen sind allerdings einige der Folgen von Einsteins Theorie: dass Raum und Zeit nicht voneinander zu trennen sind und dass Massen diese Raumzeit verformen. Daraus folgt: Gravitation rührt nicht von der gegenseitigen Anziehung von Massen her – eine Theorie, die Isaac Newton im 17. Jahrhundert entwickelte und die 250 Jahre lang nahezu alle beobachtbaren Bewegungsphänomene glänzend erklärte. Erst als Astronomen die Umlaufbahn des Merkurs exakt vermaßen, bekam Newtons Theorie leichte Risse: Die Umlaufbahn weicht wenig, aber deutlich von der Bahn ab, der er den Newton'schen Prinzipien zufolge eigentlich folgen sollte. Einsteins Theorie dagegen konnte dieses Phänomen erklären.

Laut Einstein führt nämlich die Verformung der Raumzeit dazu, dass sich Massen entlang der Kurven dieser gekrümmten Raumzeit bewegen. Rezzolla vergleicht die Raumzeit mit einem Bettlaken. Legt man eine Bowlingkugel darauf, so drückt die Kugel das Laken zu einem Trichter ein, sie krümmt das Raumzeit-Bettlaken. Eine Murmel am Rand des Bettlakentrichters würde der Krümmung des Trichters folgen und deshalb auf die Bowlingkugel zurollen. Was Newton als Anziehung durch die Masse der Bowlingkugel interpretiert hatte, führt Einstein auf die Krümmung der Raumzeit (also den Trichter) zurück.

Blitze aus dem All

Doch nicht nur Massen, auch Licht und Zeit unterliegen dem Einfluss der Gravitation. Zur Veranschaulichung von Gravitationswellen tauscht man das Bettlaken am besten gegen ein Gumm Tuch oder ein Gartentrampolin aus: Wird die

Dichter geht's nicht: Neutronensterne und Schwarze Löcher

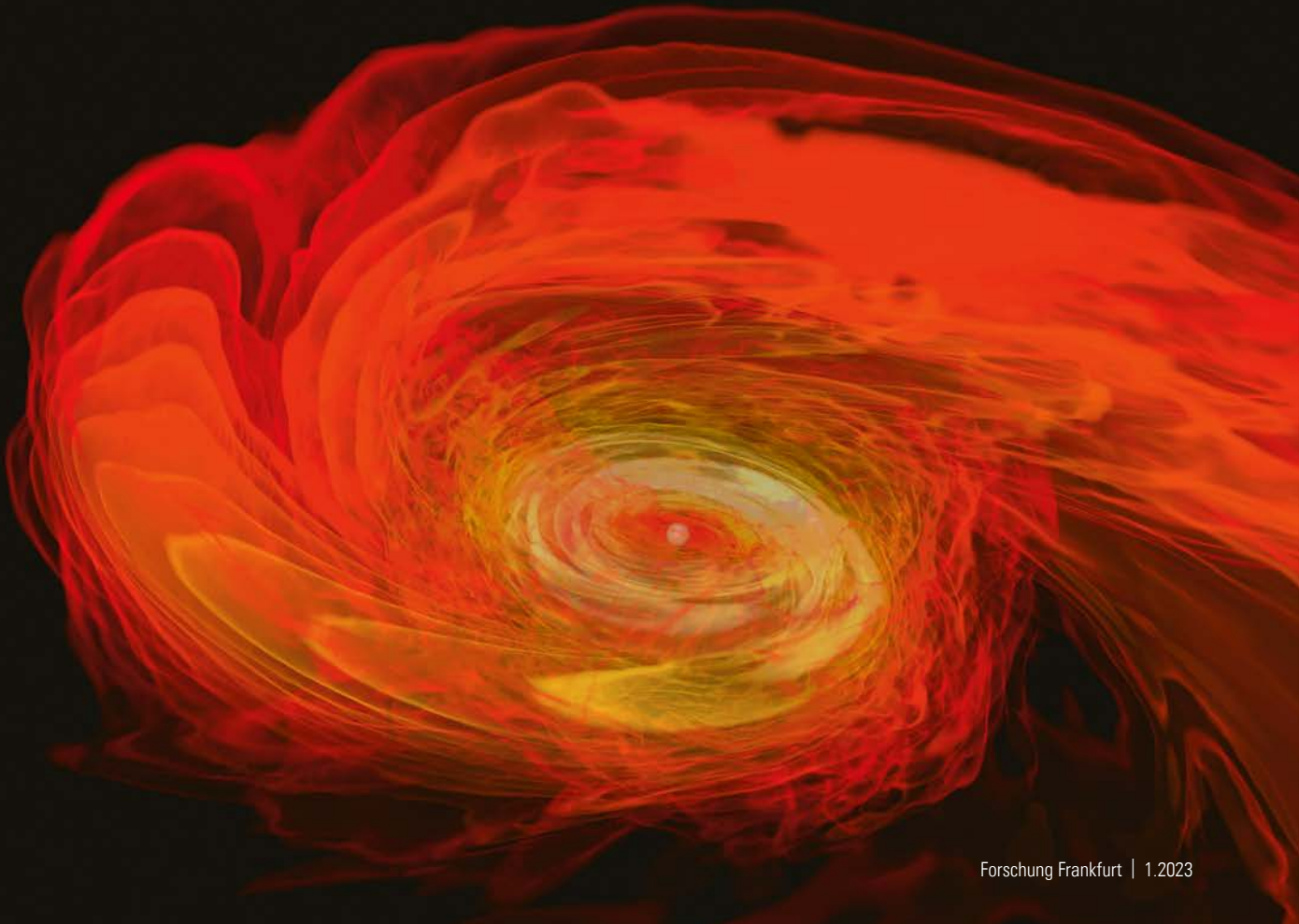
Neutronensterne sind – nach Schwarzen Löchern – die wahrscheinlich kompaktesten Objekte im Universum: In ihnen ist die Masse unserer Sonne auf eine Kugel mit dem Durchmesser einer Großstadt zusammengepresst. Sie bestehen hauptsächlich aus Neutronen. Die meisten Neutronensterne rotieren mit mehreren Hundert Umdrehungen pro Sekunde, haben ein ungeheuer starkes Magnetfeld und senden entlang ihres Nord- und Südpols je einen äußerst starken elektromagnetischen Strahl im Radiofrequenzbereich aus. Meist weicht die Drehachse eines Neutronensterns von seiner magnetischen Achse ab; deswegen kreiselt der elektromagnetische Strahl. Dies kann auf der Erde als rhythmisches Flackern oder Blinken beobachtet werden, weshalb solche auch Pulsare («Pulsating Star») genannten Neutronensterne gerne als kosmischer Leuchtturm bezeichnet werden.

Seine Entstehung verdankt ein Neutronenstern einer gewaltigen Sternexplosion, einer Supernova, als deren Rest er zurückbleibt. Während der Explosion ist es möglich, dass er einen Schub erhält und dann durch den Weltraum schießt. Kommen sich zwei Neutronensterne – mit der passenden Geschwindigkeit – zu nahe, beginnen sie einen tödlichen Tanz: Sie umkreisen einander in einer sich immer enger ziehenden Spirale, an deren Ende die Neutronensterne miteinander kollidieren und verschmelzen. Es bleibt ein größerer Neutronenstern übrig, oder der kleinere zerplatzt und der größere

der Neutronensterne fällt zu einem Schwarzen Loch zusammen. Wenn die Neutronensterne einander umkreisen und schließlich verschmelzen, entstehen so gewaltige Gravitationswellen, dass diese auch Millionen Lichtjahre entfernt auf der Erde noch messbar sind.

In einem **Schwarzen Loch** ist eine riesige Menge an Masse extrem konzentriert. Das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie Messier 87 zum Beispiel umfasst unvorstellbare 6,5 Milliarden Sonnenmassen. Die Gravitation ist so stark, dass – innerhalb eines bestimmten Bereichs – nicht einmal Licht der Anziehung entkommen kann. Die Grenze dieses Bereichs wird als Ereignishorizont bezeichnet. 2019 veröffentlichte die Event Horizon Telescope Collaboration, ein weltweites Forschungsteam, das unter anderem von Luciano Rezzolla geleitet wird, das erste Bild eines Schwarzen Lochs. Es zeigt den Schatten des Schwarzen Lochs: einen Ring von Licht, das der Gravitation des Schwarzen Lochs gerade noch entkommen kann. Wie das Innere eines Schwarzen Lochs aussieht, wissen wir nicht. Hier kommt selbst Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie an ihre Grenzen: Wir können nicht einmal mathematisch verstehen, wie das Innere eines Schwarzen Lochs aussieht.

Simulation der Gravitationswellen, die von zwei verschmelzenden Neutronensternen ausgesendet werden.



Bowlingkugel in Bewegung gesetzt, so gerät das Tuch in Schwingung, und je größer die Masse der Kugel und ihre Geschwindigkeitsänderung ist, desto stärker werden die Gravitationswellen. Im Weltall lösen daher Doppelsysteme zweier Neutronensterne oder zweier Schwarzer Löcher, die sich immer schneller umkreisen, besonders markante Gravitationswellen aus, die wiederum etwas über deren Masse und Bewegung verraten.

Weil sich Gravitationswellen nun messen lassen, könnten sie in Zukunft auch eine andere Theorie von Rezzolla bestätigen, eine seiner Lieblingstheorien. Auch die hängt natürlich mit Neutronensternen und Schwarzen Löchern zusammen. Ausgangspunkt der ganzen Geschichte war eine Kaffeepause während eines Astronomie-Kongresses 2014, zu dem ihn sein Kollege Heino Falcke von der Universität Nijmegen eingeladen hatte. Kurz zuvor hatten Rezzolla und Falcke zusammen mit dem Bonner Astronomen Michael Kramer den Grundstein für eine weltweite Kooperation gelegt, die die ersten Bilder Schwarzer Löcher machen wollte (was später auch gelang).



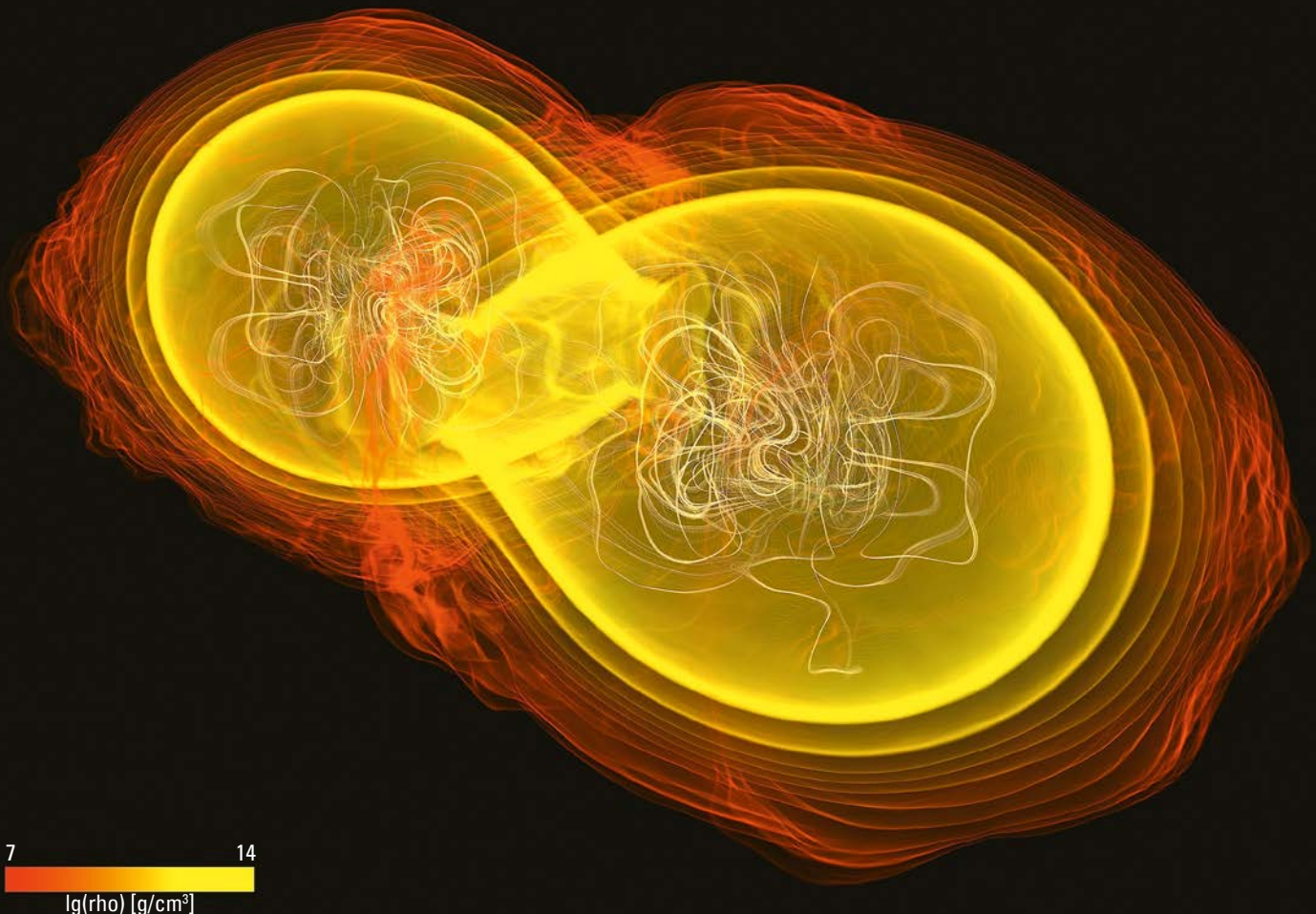
ZUR PERSON

Luciano Rezzolla, Jahrgang 1967, promovierte an der Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati in Triest zu relativistischer Astrophysik, wo er nach einer Postdoc-Zeit unter anderem in den USA Direktor des Computing Centre wurde. 2006 bis 2014 leitete er die Gruppe Numerische Relativität am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover, bevor er als Professor für Theoretische Astrophysik an die Goethe-Universität berufen wurde. Mit der weltweiten Forschungskollaboration Event Horizon Telescope (EHT) veröffentlichte er 2019 und 2022 die ersten Bilder von Schwarzen Löchern. Gemeinsam mit Nobert Pietralla (s. Seite 24) ist er Sprecher des Forschungsclusters »ELEMENTS: Exploring the Universe from Microscopic to Macroscopic Scales«.

rezzolla@itp.uni-frankfurt.de

Millisekunden vor der Verschmelzung zweier Neutronensterne zu einem Schwarzen Loch geraten die Magnetfelder (weiße Linien) der Neutronensterne durcheinander. Sekundenbruchteile später lösen sie sich vom Schwarzen Loch und verursachen einen Gammastrahlenblitz (Blitzar).

$t=7.4\text{ms}$



In jener Kaffeepause ging es jedoch um ein anderes, in der Astronomie heiß diskutiertes Phänomen: schnelle Radioblitze, englisch *Fast Radio Bursts* oder FRBs. Davon habe er noch nie gehört, meinte Rezzolla, als Falcke ihn darauf ansprach. Es handele sich, so erklärte dieser, um kurze, einmalige Signale, die zuweilen von den riesigen Schüsseln der Radioteleskope empfangen würden, in einem engen Frequenzbereich. Dass die höheren Frequenzen des Signals etwas früher einträfen als die niedrigeren, deute auf eine Herkunft außerhalb unserer Galaxis hin. Erstmals waren die FRBs 2007 dem Briten Duncan Lorimer aufgefallen, der sie als echte Signale und nicht etwa als technische Empfangsstörungen interpretierte.

Artefakte aus der Mikrowelle

Lorimers Theorie geriet allerdings etwas in Misskredit, als sich herausstellte, dass in einem australischen Radioteleskop eine Reihe der gemessenen Signale von Mikrowellenöfen des Besucherzentrums stammten, in denen das Mittagessen für die Gäste aufgewärmt wurde. Da jedoch FRBs auch bei geschlossenem Besucherzentrum sowie in anderen Radioteleskopen empfangen wurden, bliebe die Frage, so Falcke, woher sie stammten. Das wisse er genau, meinte Rezzolla, es seien Neutronensterne, die zu Schwarzen Löchern kollabieren würden. »Die Erklärung«, sagt Rezzolla, »ist wie folgt: Ein Schwarzes Loch kann kein Magnetfeld haben. Daher reißen die Magnetfeldlinien ab und breiten sich als Radiowellen im Weltraum aus. Weil der Kollaps eines Neutronensterns nur ein paar Millisekunden dauert, entsteht nur ein kurzes, einmaliges Signal.«

Kurz zuvor hatte Rezzolla genau für dieses Szenario Simulationsrechnungen gemacht, um das Schicksal des Magnetfelds eines kollabierenden Neutronensterns zu untersuchen. Jetzt arbeiteten er und Falcke die Details aus und verfassten einen wissenschaftlichen Aufsatz dazu, was kaum eine Woche dauerte. Erheblich mehr Zeit nahm die Suche nach dem Namen für das Phänomen in Anspruch, denn die beiden konnten sich nicht einigen – bis drei Wochen später Rezzolla mit seiner Frau im Auto fuhr. »Fahr langsamer, da ist ein Blitzer«, warnte sie vor einer Radarfalle. Damit hatte das wissenschaftliche Kind einen Namen: Blitzar – ein einmaliger »Blitzer« entsprechend dem periodisch blinkenden Pulsar.

Bislang unwiderlegt

Die Blitzar-Theorie ist seitdem eine von einer Reihe möglicher Erklärungen für FRBs, zumindest für diejenigen, die nicht mehrfach hintereinander beobachtet werden konnten. »Bisher konnte die Blitzar-Theorie nicht widerlegt wer-

den«, freut sich Rezzolla. »Es ist auch klar: Wenn Neutronensterne mit einem Magnetfeld langsamer werden und die Schwerkraft überhandnimmt, kollabieren sie zu einem Schwarzen Loch, zum Beispiel direkt nach einer Neutronensternkollision. Dabei wird ein Radiowellensignal ausgesendet, da gibt es gar keinen Zweifel.«

Auf die Theorie der Blitzare ist Rezzolla deshalb so stolz, weil sie sozusagen ganz nebenbei entwickelt wurde. »So entstehen Ideen«, ist der Physiker überzeugt, »indem vorhandene Informationen und Erkenntnisse miteinander verknüpft werden. Das hat auch Einstein nicht anders gemacht, der die von Carl Friedrich Gauß, Bernhard Riemann und weiteren Mathematikern entwickelte Differentialgeometrie zur Erklärung der Gravitation nutzte.« So bleibt nur zu hoffen, dass Rezzolla und seine Kolleginnen und Kollegen noch in vielen weiteren anregenden Kaffeepausen Erklärungen für Geheimnisse unseres Universums finden. ●

Weitere Informationen

Gravitationswellen könnten Existenz des Quark-Gluon-Plasmas beweisen:
<https://tinygu.de/Quarkgluon>

Der europäische Verbund zur Erstellung von Bildern Schwarzer Löcher:
<https://blackholecam.org>

Gravitation populärwissenschaftlich erklärt: »Die unwiderstehliche Anziehung der Schwerkraft«
<https://tinyurl.com/Unwiderstehlich>



Der Autor

Dr. Markus Bernards, Jahrgang 1968, ist Molekularbiologe, Wissenschaftsjournalist und Redakteur von Forschung Frankfurt

bernards@em.uni-frankfurt.de

Das meiste ist unsichtbar

Auf der Spur der Dunklen Materie

von Anne Hardy

Es gibt sie, die Dunkle Materie. Daran besteht kein Zweifel mehr. Aber woraus besteht sie? Darüber gibt es viele Mutmaßungen. Seitdem es möglich ist, Gravitationswellen zu messen, hat sich eine spannende neue Möglichkeit eröffnet, die Teilcheneigenschaften von Dunkler Materie zu erforschen.

Als ein schweizerischer Astronom Anfang der 1930er Jahre vorschlug, Dunkle Materie als Erklärung für seine rätselhaften Beobachtungen einzuführen, konnte er sich in der Fachwelt zunächst nicht durchsetzen. Fritz Zwicky hatte bemerkt, dass die Gravitationskraft der sichtbaren Sterne in der Milchstraße und in großen Galaxienhaufen nicht ausreicht, um die Gebilde zusammenzuhalten.

In den 1960er Jahren entdeckte die Astronomin Vera Rubin, dass die Umlaufgeschwindigkeit von Sternen in Galaxienhaufen an den Rändern viel schneller ist, als sie es aufgrund der Schwerkraft sein dürfte, die von der sichtbaren Materie ausgeübt wird. Heute ist die Existenz der Dunklen Materie durch die Beobachtung weiterer astrophysikalischer Phänomene gesichert. Und sie macht, zusammen mit der Dunklen Energie, sogar den allergrößten Teil der Energiedichte des Universums aus.

95 Prozent des Universums sind unbekannt

»Das wissen wir relativ genau aus Beobachtungen der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung und aus der großräumigen Struktur im Universum: 95 Prozent des Universums sind unbekannt«, erläutert Laura Sagunski vom Institut für Theoretische Physik. »Die Dunkle Materie ist etwa fünfmal häufiger als die sichtbare Materie, aus der Sterne und Galaxien bestehen.« Vieles weist darauf hin, dass Dunkle Materie Teilcheneigenschaften haben muss. Das sieht man etwa am Bullet-Cluster, einem Gala-

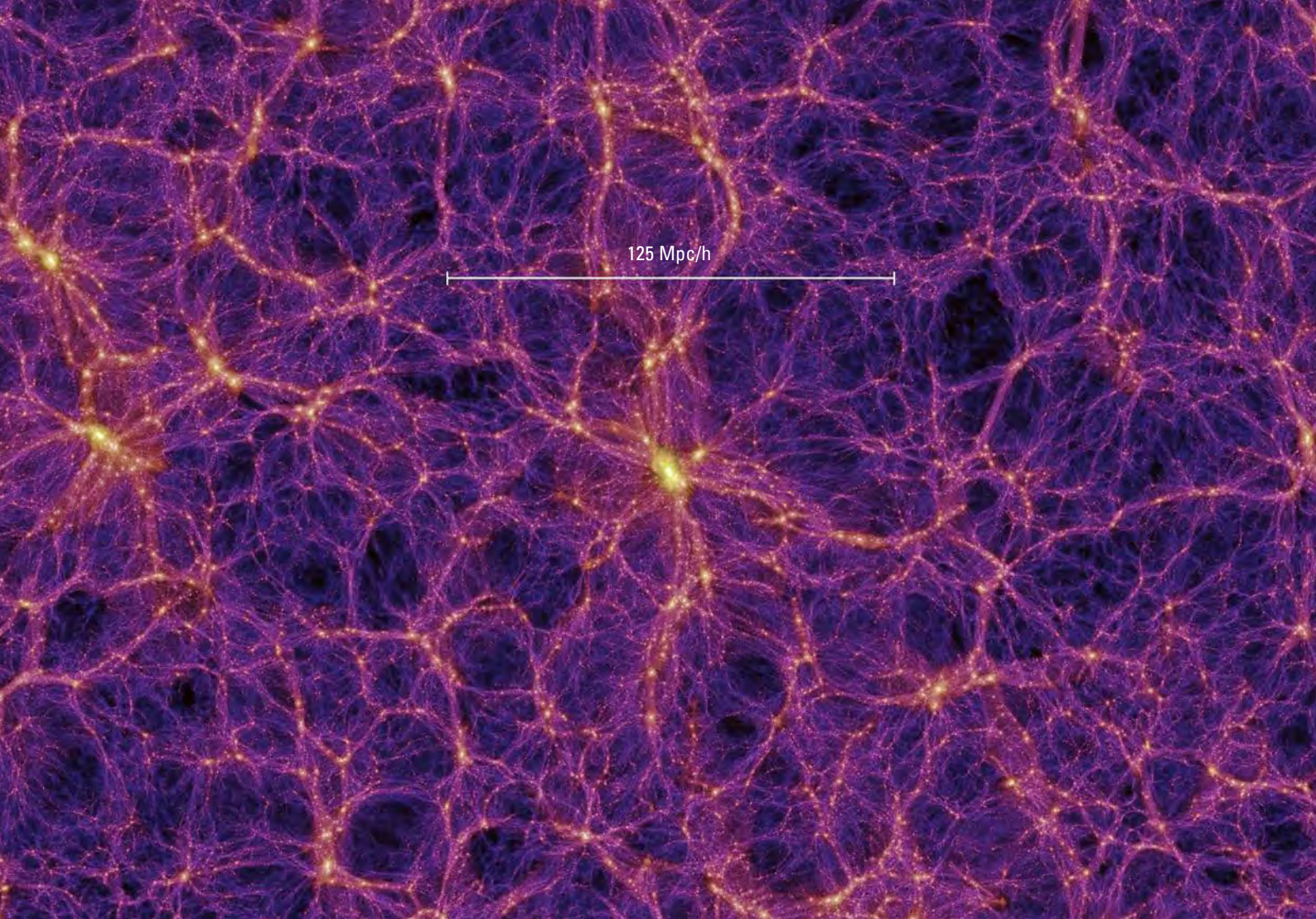
xienhaufen im Sternbild des Schiffes. Es handelt sich genau genommen um zwei Haufen, einen größeren, der von einem kleineren wie von einer Geschosskugel durchquert wird (daher der Name von englisch bullet – »Kugel«).

Interessant ist an diesem Gebilde, dass das leuchtende interstellare Gas der Masseverteilung der Galaxienhaufen hinterherhinkt, wie Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops zeigen. Vermutlich steckt die Dunkle Materie hinter dieser »Verklumpung« der Galaxienhaufen im Zentrum. »Die beiden Galaxienhaufen sind fast kollisionslos durcheinander durchgelaufen. Das können wir erklären, wenn wir annehmen, dass Dunkle Materie Teilcheneigenschaften hat und dass diese Teilchen fast nicht miteinander kollidieren.« Zwischen den beiden interstellaren Gaswolken gibt es jedoch Zusammenstöße, die sie abbremsen. Deshalb hinkt das Gas den Galaxien hinterher. Sagunski interessiert: Was sind diese Teilchen aus Dunkler Materie? Es könnten zum Beispiel selbstwechselwirkende Dunkle Materie, primordiale – sehr alte und leichte – Schwarze Löcher, MACHOs oder Axionen sein.

Machos, Schwächlinge und andere Kandidaten

Die Abkürzung MACHO steht für »massereiche, astrophysikalische, kompakte Halo-Objekte« und bezieht sich auf die Beobachtung, dass diese Objekte mit ihrem ungeheuren Schwerefeld die Raumzeit so verbiegen, dass eine Gravitationslinse für das Sternenlicht entsteht. Dieses wird wie durch eine Linse fokussiert, sodass der Stern vorübergehend heller aufleuchtet, wenn er sich in der Nähe eines MACHOs befindet.

Es könnte aber auch sein, dass sich innerhalb von Neutronensternen Dunkle Materie befindet, oder es gibt kompakte Sterne, die vollständig aus Dunkler Materie bestehen. Dieser Frage geht Sagunski mit ihrer Gruppe im For-



schungscluster ELEMENTS und innerhalb des Sonderforschungsbereichs »Strong-interaction matter under extreme conditions« nach. In diesem Cluster, an dem außer der Goethe-Universität auch die Universitäten in Gießen und Darmstadt sowie das GSI Helmholtzzentrum in Darmstadt beteiligt sind, bringen Forscherinnen und Forscher Wissen aus der Kern-, der Teilchen- und der Astrophysik zusammen. Dabei geht es unter anderem um die Frage, wie Neutronensterne aufgebaut sind.

»Bisher wissen wir nicht viel über die Teilcheneigenschaften von Dunkler Materie, speziell über ihre Masse. Die leichtesten wären die Axionen, das sind hypothetische Teilchen, die man eingeführt hat, um das Standardmodell der Elementarteilchenphysik zu erweitern. Dann kämen die WIMPs und dann die primordialen Schwarzen Löcher«, so die Physikerin. WIMP steht für »Weakly interacting massive particles«, also schwach wechselwirkende, massive Teilchen. »Wimp« bedeutet aber auch Weichei – ein Wortspiel, das den Kontrast zu den massereichen »Machos« unterstreicht.

Wenn die Masse an Dunkler Materie groß genug ist und wenn sich ihre Bewegung ändert, sollten die Raumzeit-Änderungen selbst hier auf der Erde zu messen sein, als Gravitationswellen.

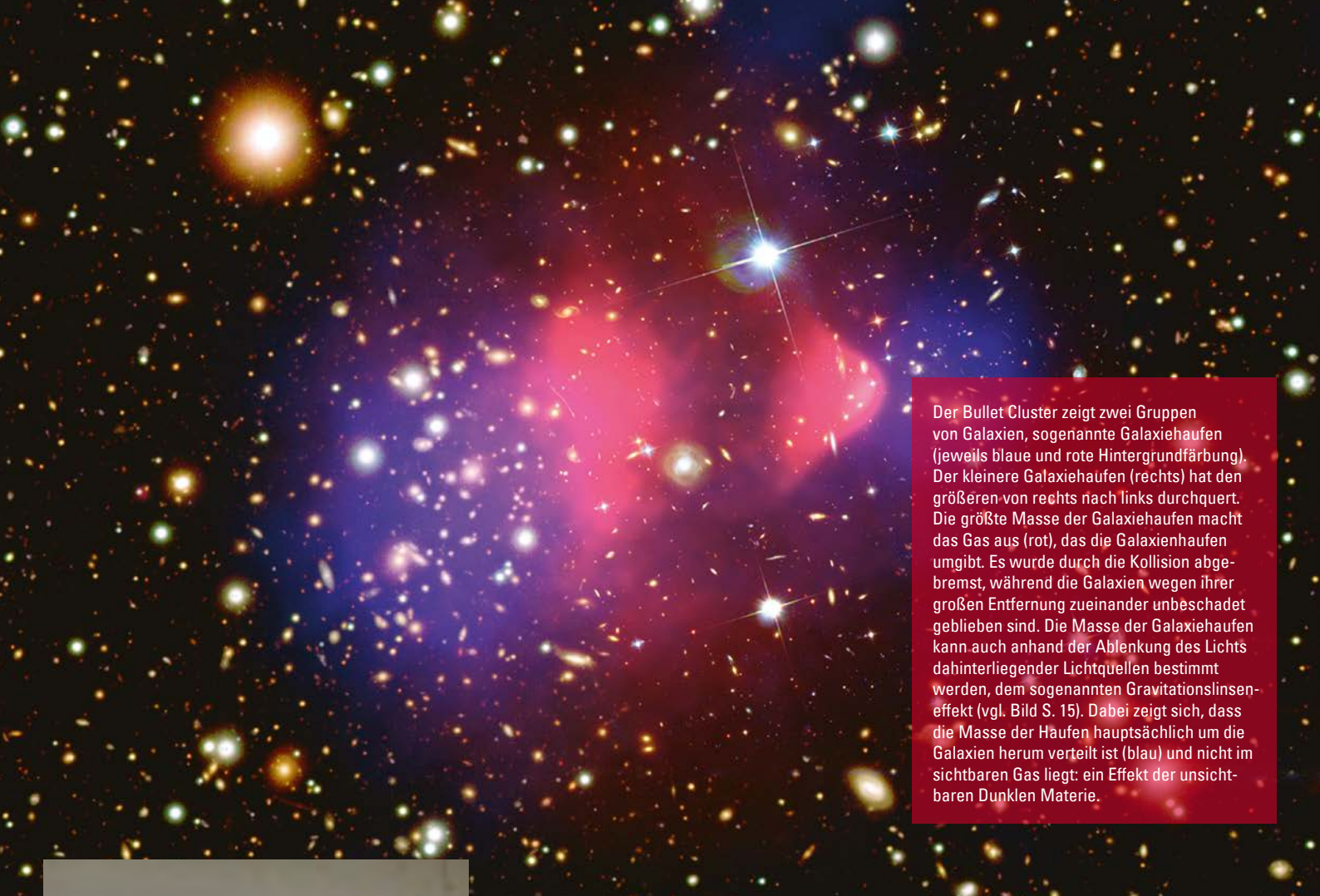
Denn Gravitationswellen entstehen immer, wenn Massen beschleunigt werden, ähnlich der elektromagnetischen Wellen, die von beschleunigten Ladungen in einer Antenne abgestrahlt werden. Allerdings sind Gravitationswellen sehr viel schwächer, weshalb man sie wohl nur bei sehr massereichen astrophysikalischen Objekten überhaupt messen kann: bei verschmelzenden Schwarzen Löchern etwa oder Neutronensternen, die einander umkreisen.

Signale von Löchern und Neutronensternen

2015 gelang es erstmals mithilfe der LIGO-Detektoren in den USA, die von Einstein bereits 1916 vorhergesagten Gravitationswellen direkt zu messen. Sie stammten von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern. Zwei Jahre später wurde eine weitere spektakuläre direkte Messung von Gravitationswellen mithilfe der LIGO-Detektoren und des Virgo-Detektors bekannt gegeben, die aus der Kollision zweier Neutronensterne resultierte. Laura Sagunski kann sich noch genau an diesen Tag erinnern: »Ich hielt einen Vortrag zu exakt diesem Thema am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching.«

Für Sagunski und ihre Kolleginnen und Kollegen hat sich damit ein Tor zu revolutionärer neuer Forschung aufgetan. Denn erstmals kön-

Dunkle Materie in Farben:
Wenn sie sichtbar wäre,
würde sich Dunkle Materie
so in unserem Universum
verteilen, wie das Millennium
Simulation Project zeigt.



Der Bullet Cluster zeigt zwei Gruppen von Galaxien, sogenannte Galaxiehaufen (jeweils blaue und rote Hintergrundfärbung). Der kleinere Galaxiehaufen (rechts) hat den größeren von rechts nach links durchquert. Die größte Masse der Galaxiehaufen macht das Gas aus (rot), das die Galaxiehaufen umgibt. Es wurde durch die Kollision abgebremst, während die Galaxien wegen ihrer großen Entfernung zueinander unbeschadet geblieben sind. Die Masse der Galaxiehaufen kann auch anhand der Ablenkung des Lichts dahinterliegender Lichtquellen bestimmt werden, dem sogenannten Gravitationslinseneffekt (vgl. Bild S. 15). Dabei zeigt sich, dass die Masse der Haufen hauptsächlich um die Galaxien herum verteilt ist (blau) und nicht im sichtbaren Gas liegt: ein Effekt der unsichtbaren Dunklen Materie.



ZUR PERSON

Prof. Dr. Laura Sagunski promovierte an der Universität Hamburg und am Forschungszentrums DESY in Hamburg. Von 2016 bis 2019 war sie Postdoktorandin an der York University in Toronto and am Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo, Kanada. Nach einem Jahr an der RWTH Aachen nahm sie 2020 den Ruf auf eine Professur für Theoretische Gravitationswellenphysik an der Goethe-Universität an. Sie ist Principle Investigator im Forschungscluster ELEMENTS und dem SFB »Stark wechselwirkende Materie unter extremen Bedingungen«. 2022 organisierte sie die Online-Konferenz »Women in the World of Physics«, an der mehr als 950 Physikerinnen aus aller Welt teilnahmen.

sagunski@itp.uni-frankfurt.de

nen sie experimentelle Daten von Gravitationswellen dazu nutzen, nach neuen physikalischen Phänomenen zu suchen, die von bisher unbekanntem Dunkle-Materie-Teilchen herühren. Zwar weiß man bisher noch nicht, woraus Dunkle Materie wirklich besteht, aber die Frankfurter Theoretikerin hat klare Favoriten. Laura Sagunski spricht von den diversen Kandidaten für Dunkle Materie wie von guten Bekannten. Einer ihrer Favoriten sind die Axionen. Sagunski hat erstmalig im Rahmen des Forschungsclusters ELEMENTS Teilcheneigenschaften von Axionen, wie etwa die Masse und die Zerfallskonstante, mit den LIGO-Daten erforscht.

Fasziniert von dunklen Photonen

Bisher weiß man, dass die Teilchen der Dunklen Materie untereinander über die Schwerkraft wechselwirken. Aber

möglicherweise tun sie das auch noch über neue, bisher unbekannte Kräfte. »Man bräuchte dazu ein weiteres Austauschteilchen, das analog zu den Photonen bei der elektromagnetischen Wechselwirkung als dunkles Photon bezeichnet wird«, sagt Sagunski. Auch das sei zurzeit nur eine Hypothese, aber man spürt, welche Faszination für Sagunski von diesen »wirklich spannenden« Objekten ausgeht. Denn die Annahme dunkler Photonen erlaubt Vorhersagen über die Wechselwirkungen von Dunkler Materie. Es kann zum Beispiel sein, dass Dunkle Materie nicht wie üblicherweise angenommen kollisionslos ist, sondern Dunkle-Materie-Teilchen miteinander selbstwechselwirken können. Diese Selbstwechselwirkung kann über ein dunkles Photon als Austauschteilchen vermittelt werden.

»Ich persönlich bin ein Riesenfan der selbstwechselwirkenden Dunklen Materie, weil wir damit zum Beispiel die Rotationskurven von Zwerg-Galaxien viel besser erklären können«, sagt Sagunski. Die erwähnten Rotationskurven stellen die Umlaufgeschwindigkeit der Sterne in Abhängigkeit von ihrer Entfernung vom Zentrum der Galaxie dar. Oft gibt es Diskrepanzen zwischen den beobachteten und berechneten Kurven, wie schon Vera Rubin in den 1960er Jahren aufgefallen war. Bei Zwerggalaxien kann selbstwechselwirkende Dunkle Materie diese

Bildquelle: X-ray: NASA/CXC/GFA/M Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI

Diskrepanzen besser erklären als kollisionslose Dunkle Materie.

Zur Untersuchung von selbstwechselwirkender Dunkler Materie mit Gravitationswellen zieht Sagunski supermassive Schwarze Löcher heran, die zwischen tausend und einer Million Mal schwerer sind als die Sonne. Deren Gravitationskraft ist so stark, dass sich riesige Halos aus Dunkler Materie um sie herum bilden müssten. Anders als die Halos aus Licht, die Himmelskörper wie ein Heiligenschein umgeben, wären sie aber unsichtbar.

Kompakte kleinere Objekte wie Schwarze Löcher oder Neutronensterne, die das Schwarze Loch umkreisen, verlieren dabei Energie, und zwar umso mehr, je dichter der Halo aus Dunkler Materie ist. »Wir haben uns jetzt gerade angeschaut, ob wir anhand der Gravitationswellen, die so ein System aussendet, auf das Dichteprofil und die Teilcheneigenschaften der Dunklen Materie zurückschließen können. Und das ist tatsächlich möglich«, erklärt Sagunski.

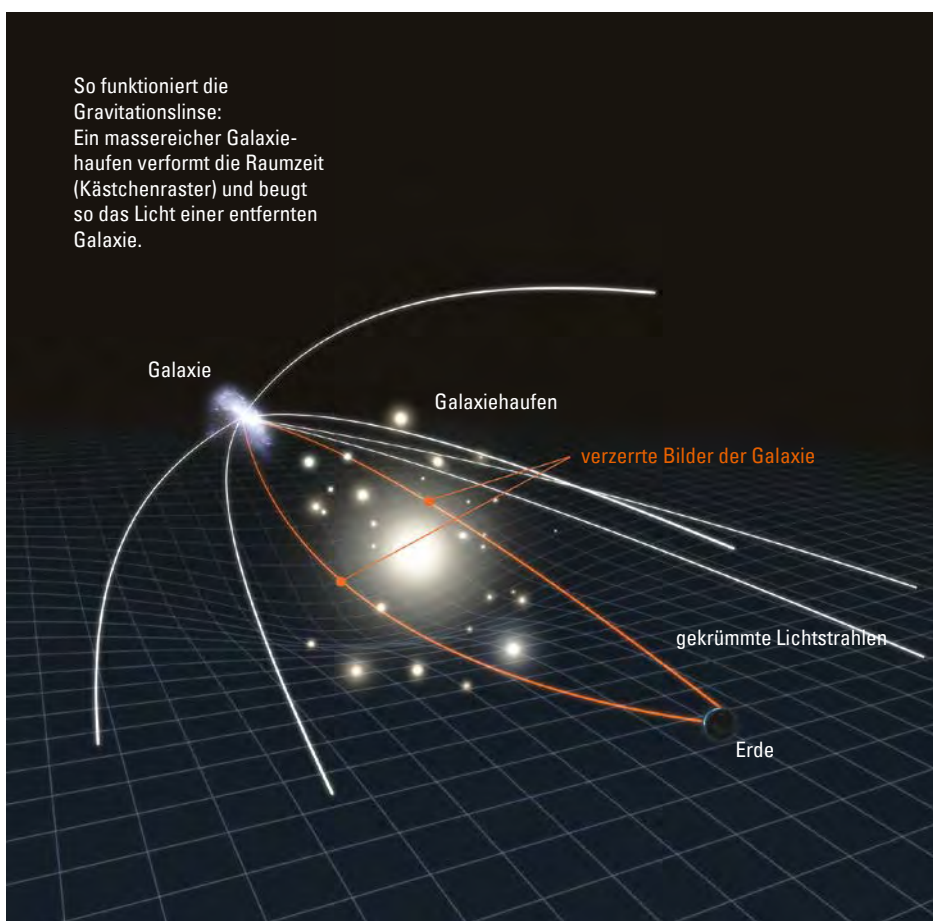
»Wir«, das ist ihre Gruppe, bestehend aus einem Postdoktoranden, je vier Doktoranden, Master- und Bachelorstudierenden. Die Arbeit im Team ist ihr wichtig: »Ich ziehe einen großen Teil meiner Energie aus der Zusammenarbeit mit den tollen Menschen um mich herum«, sagt sie. Und sie schätzt eine Umgebung, in der Frauen und Männer mit vielfältiger Herkunft und unterschiedlichem Fachwissen zusammenarbeiten. »Das ist eine der ganz großen Stärken von ELEMENTS und das macht auch die Projekte für mich besonders.«

Ein Blick in die Zukunft

Die experimentellen Daten, mit denen Sagunski die neusten Berechnungen ihrer Gruppe prüfen möchte, werden noch etwas auf sich warten lassen. Sie sollen Mitte der 2030er Jahre von dem geplanten Weltraum-Laser-Interferometer LISA kommen. Das gemeinsam von den europäischen und amerikanischen Weltraumbehörden ESA und NASA geplante Experiment besteht aus drei Satelliten, die in Form eines Dreiecks mit einer Kantenlänge von 2,5 Millionen (!)



Foto Virgo-Detektor: The Virgo Collaboration/Wikimedia; Bild Gravitationslinse: NASA, ESA & L. Calçada



So funktioniert die Gravitationslinse: Ein massereicher Galaxiehaufen verformt die Raumzeit (Kästchenraster) und beugt so das Licht einer entfernten Galaxie.

Kilometern angeordnet sind. Ebenso wie LIGO/Virgo wird das Experiment Gravitationswellen messen. Während die LIGO/Virgo-Detektoren Signale von verschmelzenden Neutronensternen oder Schwarzen Löchern bei relativ großen Frequenzen messen, wird der LISA-Detektor aufgrund seiner Größe jedoch Signale bei kleineren Frequenzen messen können, beispielsweise die von supermassiven Schwarzen Löchern, die von kompakten Objekten umkreist werden. Damit birgt LISA jede Menge Potenzial für spannende neue Entdeckungen.

Einstweilen haben Laura Sagunski und ihr Team aber genügend andere Mysterien der Dunklen Materie, die sie im Grenzgebiet zwischen Teilchenphysik, Kosmologie und Gravitationswellenphysik untersuchen können. Eine davon ist die Möglichkeit, die Effekte, für die jetzt die Dunkle Materie herangezogen wird, noch ganz anders zu erklären. Nämlich dadurch, dass Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie noch erweitert oder verändert werden muss. Auch für diese Möglichkeit können Sagunski und ihr Team den Realitätscheck durch den Abgleich mit Daten von Gravitationswellen machen. »Die infrage kommenden Theorien sind inzwischen stark eingeschränkt, aber definitiv ausschließen können wir die Möglichkeit nicht«, erläutert sie. ●

Der Virgo-Detektor nahe Pisa zeichnete zusammen mit den US-amerikanischen LIGO-Detektoren 2015 erstmals Gravitationswellen zweier kollidierender Neutronensterne auf. (Bild links)



Die Autorin

Dr. Anne Hardy, Jahrgang 1965, ist Diplom-Physikerin und promovierte Medizin- und Technikhistorikerin. Sie arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Frankfurt.

anne.hardy@t-online.de



DUNKLE MATERIE

DARK MATTER (2003) von Eva Grubinger

Dark Matter ist ursprünglich für das 2002 eröffnete BALTIC Centre for Contemporary Art in Gateshead (UK) entstanden, das als Teil der post-industriellen Neuentwicklung in der Stadt erbaut worden ist; Stadt und Region im Nordosten Englands waren lange vom Kohleabbau und -handel dominiert, bevor sich zunehmend Dienstleistungen wie Callcenter ansiedelten. Die Soundcollage wurde von Curd Duca komponiert. 2007 war die Installation im Rahmen von Eva Grubingers Einzelausstellung »Spartacus« in der Schirn Kunsthalle Frankfurt zu sehen.

Schon aus der Ferne wirken sie seltsam. Fremd und vertraut, abweisend und anziehend zugleich. So treten wir in ihren Kreis, unsicher, ob wir ausgeschlossen, einbezogen oder eingesogen werden sollen. Dunkle Materie: Das ist hier ganz wörtlich zu nehmen: Tiefschwarze Körper aus einem unbekanntem Material, das ebenso extrem schwer wie federleicht sein könnte. Opake Oberflächen, die alles Licht absorbieren, sowie schwarze Spiegel, die jeden Blick auf sich selbst zurückwerfen.

Zunächst fühlen wir uns eingeladen, die frei stehenden Objekte neugierig zu umrunden und zu erkunden. Aufgrund ihrer Proportionen begegnen sie uns nahezu auf Augenhöhe – mehrheitlich allerdings überragen sie selbst die Größten unter uns, sodass wir zu ihnen aufschauen müssen. Zudem: Egal wie nah wir ihnen kommen, sie geben kaum etwas von sich preis. Vage verweisen sie auf Architekturen und Dinge, die wir aus dem Alltag kennen: Ein Hochhaus. Ein Kühlturm. Ein Wachturm. Ein riesiges Headset. Zwei weitere Elemente halten sich gleichsam im Hintergrund: eine kleine Dreiviertelkugel, deren Gestalt an einen Hochleistungsreaktor erinnern kann. Und an der Rückwand des Raumes rechteckige Platten, die wie eine versiegelte Fensterfront wirken.

Sie alle tragen je auf ihre Weise zu einem Unbehagen bei, das weiter wächst, je länger wir in ihrem Kreis verweilen. Am wenigsten mag das im Fall des Wachturms verwundern – wie beim Vorbild sorgen auch beim Modell verspiegelte Fenster für ein einseitiges Blickregime, das uns im Ungewissen lässt, ob wir gerade jetzt beobachtet werden oder nicht. Nicht weniger unheimlich ist es, über die ebenfalls spiegelnde Bodenplatte ins Innere des Kühlturms zu blicken, dessen Funktionsarchitektur sich als leere Hülle entpuppt, während der Reaktor in unserem Rücken bedrohlich brummt. Oder bilden wir uns das nur ein?

Beim Hochhaus wiederum sind es nicht nur die blinden Fensterreihen der monoton gegliederten Fassade, an deren Fuß wir vergeblich nach einem Eingang suchen; was wenigstens von Weitem wie eine Öffnung wirkt, hält ebenfalls Enttäuschung bereit: Der horizontal versetzte Teil der oberen Stockwerke ruht allein auf steilen Stelzen auf den

unteren auf, ein Übergang zwischen beiden Zonen scheint nicht vorgesehen zu sein.

Tritt man schließlich ins Halbrund des Headsets, wird das Unbehagen physisch wahrnehmbar: tiefe Schwingungen, die aus den gigantischen Kopfhörern dringen, Klangwellen zwischen Rauschen, Flüstern und Summen, die sich im selben Moment wieder entziehen, kaum da wir sie gehört zu haben meinen, die im Übrigen auch eher in unseren Eingeweiden als in unseren Ohren nachhallen. So schwingen wir mit.

Dunkle Materie: Obzwar für uns unsichtbar, steht zu vermuten, dass sie nicht nur existent, sondern von existenzieller Bedeutung für unser Universum ist. Noch immer fehlen uns die Instrumente, ihre Struktur und ihre Kräfte zu erfassen – die zu erforschen wir jedoch nicht müde werden sollten. Immerhin geht es um die Welt, in der wir leben.

Zwar sind die Gegenstände und Architekturen, in deren Sog wir hier geraten, nichts als Bilder. Und die Systeme, für die sie stehen, sind von vergleichsweise bescheidenen Dimensionen. Doch kaum von ungefähr wirft die Reihe der schwarzen Spiegel an der Rückwand die Bilder in den Raum, auf uns zurück und sorgt dafür, dass wir mit ihnen in Eins verschmelzen.

Anders als jene im Universum ist diese Dunkle Materie von Menschen für Menschen gemacht. Das gilt sowohl für die tief-schwarzen Objekte wie auch für jene real existierenden, mitunter kaum weniger versiegelten, uns weitgehend unzugänglichen Apparate und Systeme, auf die sie verweisen. Unheimlich sind sie uns, weil wir zu wenig von ihnen wissen und zugleich spüren, dass sie Macht über uns besitzen. Weil wir uns außerhalb von ihnen wähnen, während wir doch Teil von ihnen sind.

Die Systeme, die wir konzipieren und konstruieren, mit und in denen wir uns einrichten, arbeiten und leben, sind tatsächlich kleine Universen. Und genau deshalb sollten wir wissen wollen, wie sie funktionieren. Um verantwortungsvoll und zukunftsfähig in ihnen handeln zu können, müssen wir sie verstehen.

Verena Kuni

Verena Kuni ist Professorin für Visuelle Kultur am Institut für Kunstpädagogik.

kuni@kunst.uni-frankfurt.de

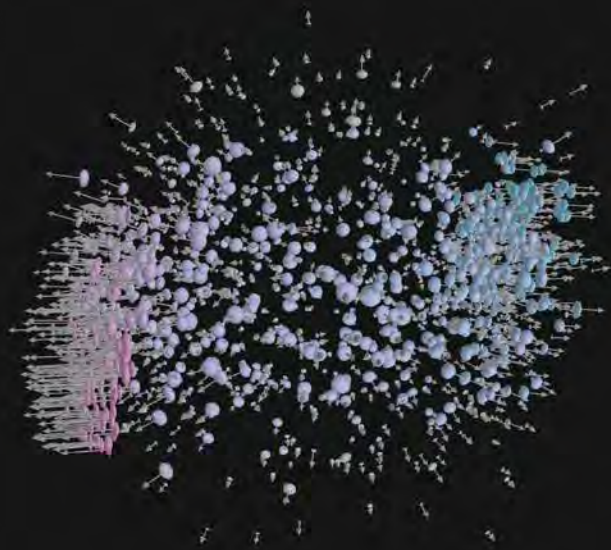


ZUR PERSON

Eva Grubinger, geboren 1970 in Salzburg, lebt und arbeitet in Berlin. Ihre Werke werden in internationalen Ausstellungen gezeigt und sind sowohl in öffentlichen als auch privaten Sammlungen vertreten. Sie wurde mit zahlreichen Stipendien und Preisen ausgezeichnet. Zwischen 2008 und 2018 lehrte sie zudem als Professorin beziehungsweise Gastprofessorin an den Kunsthochschulen Linz, Düsseldorf und München.

www.evagrubinger.com

Foto »Dunkle Materie«: Markus Hawlik; Foto Grubinger: Annette Hauschild, Agentur Ostkreuz, Berlin



mikro

WELTEN

Materie am Limit

Wie Gold, Blei & Co. entstanden sind

von Dirk Eidemüller

Beim Clusterprojekt ELEMENTS von Goethe-Universität, TU Darmstadt, Universität Gießen und GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung arbeiten Theorie und Experiment Hand in Hand, um die Struktur der Materie unter extremen Bedingungen zu verstehen. So wird ersichtlich, warum etwa Kollisionen von Neutronensternen viele der schweren Elemente auf unserem Planeten geliefert haben.

Wer sich mit der Entstehung der Elemente befassen will, muss sich auf Superlative gefasst machen. Denn aus dem Urknall sind nur die leichtesten Elemente wie Wasserstoff und Helium hervorgegangen. Um all die Materie zu schaffen, aus der Planeten wie die Erde und wir selbst bestehen, mussten diese leichten Atomkerne erst sukzessive zu schwereren Elementen verschmelzen. Je schwerer die Elemente, desto extremere Bedingungen werden benötigt: Wer hätte schon beim Blick auf seinen goldenen Ring gedacht, dass dieses Material der Überrest einer Neutronensternkollision ist? Am Clusterprojekt ELEMENTS wollen Forscherinnen und Forscher Materie unter genau solchen extremen Bedingungen untersuchen. Durch Versuche an Teilchenbeschleunigern und den Vergleich mit kosmischen Daten wollen sie dem Ursprung der Elemente und dem Verhalten bei sogenannten kataklysmischen kosmischen Prozessen auf die Schliche kommen, also Prozessen, die mit einer plötzlichen Zerstörung einhergehen (von griechisch *Kataklysmos*).

Der Prozess, wie Elemente im Lauf der kosmischen Entwicklung gebildet wurden, heißt Nukleosynthese. Dabei spielen eine ganze Reihe von Vorgängen eine Rolle – von der Kernfusion im Innern von Sternen wie unserer Sonne über Supernovaexplosionen bis hin zu Kollisionen

von Neutronensternen. Die ersten Schritte bei diesem Prozess, die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium und dann weiter zu Kohlenstoff, Sauerstoff, Eisen und anderen mittelschweren Elementen, ist heute bereits gut verstanden. Diese Elemente werden im Wesentlichen durch Fusionsprozesse in Sternen gebildet, wobei leichte Sterne nur leichte Elemente produzieren können, während schwere Sterne auch schwerere Elemente bis zur Größe von Eisen und Nickel zusammenbacken.

Entstehung der schweren Elemente

Doch die Entstehung der schweren Elemente wie Gold, Blei und Uran wirft viele Fragen auf: Welche Bedingungen müssen herrschen, damit derart schwere Atomkerne weiter anwachsen können? »Die Fusion kommt irgendwann an Grenzen«, sagt Hannah Elfner, die als Professorin für theoretische Kernphysik an der Goethe-Universität sowie am Darmstädter GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung arbeitet und bei ELEMENTS mitwirkt. »Je schwerer ein Atomkern ist, desto größer ist auch seine elektrische Ladung. Da Atomkerne unglaublich klein sind, herrschen in der Nähe des Atomkerns sehr starke elektrische Felder, die andere Atomkerne abstoßen.« Selbst die hohen Temperaturen im Zentrum von Sternen reichen dann nicht aus, um so schwere Atomkerne miteinander ver-

Wenn die Kerne schwerer Atome mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen, bilden sich aus der ungeheuren Energie des Zusammenstoßes unzählige neue Teilchen, wie diese Simulationsrechnung zeigt. Sie künden von den Eigenschaften der extrem komprimierten Materie im Moment des Zusammenstoßes.

schmelzen zu lassen. Auf der Erde stellen die notwendigen hohen Temperaturen zum Beispiel beim Bau von Fusionsreaktoren wie ITER eine Hürde dar, obwohl dort lediglich Wasserstoff fusioniert werden soll.

»Sehr schwere Elemente entstehen deshalb nicht durch Kernfusion, sondern durch Anlage von Neutronen, die elektrisch neutral sind und deshalb nicht von den Atomkernen abgestoßen werden«, so Elfner. Nun sind frei umherfliegende Neutronen nicht stabil, sondern zerfallen, wenn sie nicht von Atomkernen eingefangen werden. Um schwere Atomkerne zu erzeugen, braucht es eine große Menge an Neutronen. »So viele Neutronen werden nur bei extremen kosmischen Prozessen freigesetzt«, erklärt Elfner. Das sind zunächst Supernova-Explosionen, bei denen ganze Sterne zerstört werden. Je nach Art der Supernova kann am Ende ein Schwarzes Loch, ein Neutronenstern oder nichts weiter als eine heiße expandierende Gaswolke stehen. Falls Neutronensterne kollidieren, erzeugt dies noch extremere Bedingungen als eine Supernova. Die schwersten Elemente gehen aus solchen gigantischen Explosionen hervor, bei denen sogar Raum und Zeit so ins Wackeln geraten, dass diese Kollisionen mit sogenannten Gravitationswellendetek-

toren nachgewiesen werden können. Das ist vor ein paar Jahren endlich geglückt und wurde mit dem Nobelpreis gewürdigt.

»Für die heutige Astro- und Kernphysik sind Neutronensterne besonders spannend, weil sie aus reiner Kernmaterie bestehen und weil sie unglaublich dicht sind«, sagt Tetyana Galatyuk, die als Professorin für experimentelle Teilchenphysik der Technischen Universität Darmstadt ebenfalls an ELEMENTS beteiligt ist. »Uns interessieren dabei aber weniger die Gravitationswellen, die freigesetzt werden, wenn zwei solcher Objekte zusammenstoßen. Uns beschäftigt vielmehr die Frage, wie sich die Kernmaterie unter diesen Bedingungen verhält.«

Atomkerne zerplatzen

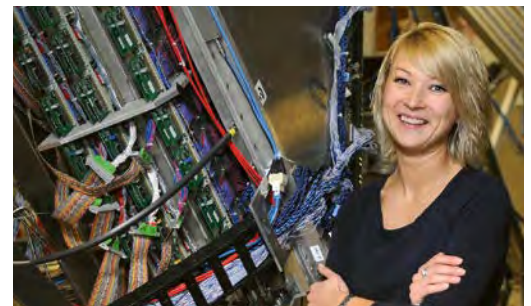
Denn Atomkerne unterliegen selbst schon riesigen Kräften. Ein Atomkern ist winzig im Vergleich zu seiner Elektronenhülle und rund um den Faktor 100 000 kleiner. Auf diesem kleinen Raum drängen sich Neutronen und positiv geladene Protonen. »Und wir bei ELEMENTS wollen sehen, was passiert, wenn wir diese Kernmaterie weiter verdichten und aufheizen«, erklärt Galatyuk. »Dazu schießen wir in Teilchenbeschleunigern wie etwa hier an der GSI oder auch am CERN und in Brookhaven in



ZUR PERSON

Hannah Elfner, Jahrgang 1982, ist Leiterin der Sektion »Heiße und dichte quantenchromodynamische Materie« an der GSI und koordiniert die theoretische Forschung am Helmholtzzentrum. Die gebürtige Frankfurterin hat an der Goethe-Universität Physik studiert und wurde hier auch promoviert. Anschließend hat sie als Postdoc am Helmholtz International Center for FAIR gearbeitet, bevor sie als Feodor-Lynen Fellow an die Duke University in North Carolina ging. Danach kehrte sie nach Deutschland zurück und übernahm eine Professur an der Goethe-Universität sowie Leitungspositionen an der GSI. Seit 2013 ist sie zudem Fellow und seit 2022 Senior Fellow des Frankfurt Institute for Advanced Studies.

elfner@itp.uni-frankfurt.de



Tetyana Galatyuk, Jahrgang 1981, ist Leiterin der Gruppe »QCD Matter Research« an der GSI und Professorin für Experimentelle Hadronen- und Kernphysik am Institut für Kernphysik der TU Darmstadt. Geboren in Kuznetsovsk, Ukraine, hat sie ihren Master in Kern- und Teilchenphysik an der Universität Kiew abgelegt und wurde anschließend an der Goethe-Universität promoviert. Unter anderem erhielt sie den Röntgenpreis der Universität Gießen und den Preis der Freunde und Förderer der Goethe-Universität. Sie ist Sprecherin der Allianz »Kosmische Materie im Labor« im Helmholtz-Programm »Materie und Universum« und Vorsitzende des Komitees für Hadronen- und Kernphysik in Deutschland.

tgalatyuk@ikp.tu-darmstadt.de



Forscherinnen und Forscher aus neun Ländern haben zum Bau des HADES-Detektors im GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung beigetragen, der hier von der Rückseite zu sehen ist. Die schirmartig angeordneten Detektorelemente fangen die Teilchenschauer auf, die als Folge kollidierender schwerer Atomkerne entstehen.



Zusammenprall der schweren Kerne: Nahe der Lichtgeschwindigkeit sind die Atomkerne nicht mehr kugelförmig, sondern länglich verzogen (blau und rot, links). Beim Zusammenprall bildet sich ein Feuerball, in dem sich für einen winzigen Sekundenbruchteil eine »Suppe« der Elementarteilchen bildet, das Quark-Gluon-Plasma. Mit der Expansion schließen sich die Quarks und Gluonen wieder zu Kernbausteinen, den Hadronen, zusammen (rechts).

den USA, schwere Atomkerne aufeinander und analysieren die Kollisionen.« Große Detektoren machen die Spuren sichtbar, die diese Atomkernkollisionen hinterlassen.

Dabei finden innerhalb kürzester Zeit hochkomplexe Prozesse statt, die aufwendiger Analyse bedürfen. »Solche Geschehnisse lassen sich nicht mehr einfach aus den bekannten Naturgesetzen berechnen«, sagt Elfner. Die Atomkerne zerplatzen, vermischen sich und können sogar neue Materiezustände annehmen. »Um die Daten von solchen Experimenten zu interpretieren, müssen wir Theoretiker mit Modellen und Simulationen arbeiten.«

Ohne eine enge Zusammenarbeit von Experiment und Theorie geht hier nichts: Nur aufwendige Analysen erlauben es, in der Vielzahl von Spuren in den Detektoren die interessanten Ereignisse zu finden, die neue Erkenntnisse über die Kernmaterie bringen. »Wenn wir schwere Atomkerne wie Blei- oder Goldkerne aufeinanderschießen, kann sich dort ein neuartiger Materiezustand bilden, das sogenannte Quark-Gluon-Plasma«, erklärt Galatyuk. Dabei platzen die Protonen und Neutronen in den Atomkernen gewissermaßen auf und ihre elementaren Bestandteile, die Quarks und Gluonen, fliegen für einen winzig kurzen Augenblick frei durcheinander, bevor sie sich wieder zu Kernteilchen vereinigen.

New York als Zuckerwürfel

»Bei solchen Kollisionen werden Temperaturen von rund einer Billion Grad erreicht, das ist

100 000-mal heißer als im Zentrum der Sonne«, so Galatyuk. »Dabei wird die ohnehin extrem dichte Kernmaterie nochmals um den Faktor drei bis fünf zusammengequetscht und erreicht eine gigantische Dichte von rund 280 Millionen Tonnen pro Kubikzentimeter. Das ist so, als würde man die gesamte Stadt New York mit allen Gebäuden in einen Zuckerwürfel komprimieren.«

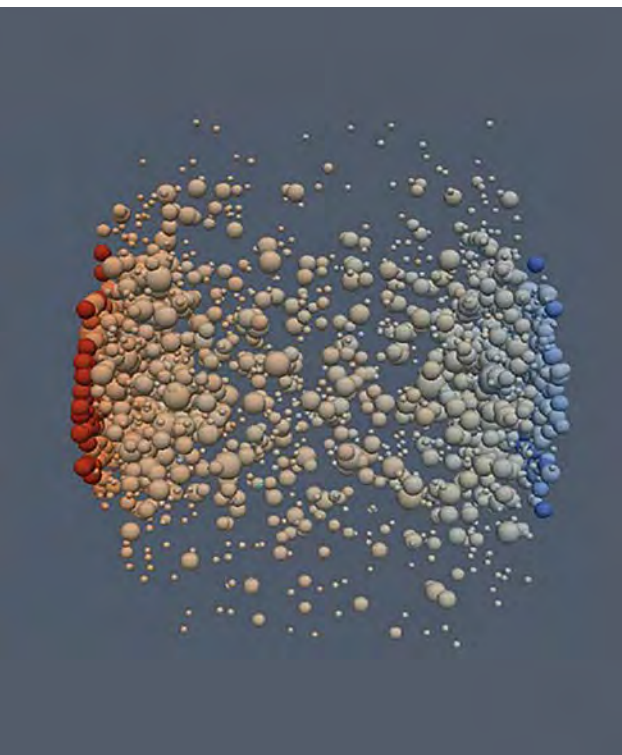
Allerdings besteht so ein ultraheißer Feuerball, wie er bei der Kollision von schweren Atomkernen entsteht, nur für extrem kurze Zeit. Schon nach weniger als einer milliardstel billionstel Sekunde ist er wieder zerfallen. »Innerhalb dieser kurzen Zeitspanne können die zahlreichen Quarks und Gluonen in diesem Feuerball rund ein Dutzend wechselseitige Zusammenstöße machen, was für ein sehr komplexes Signal im Detektor sorgt«, erklärt Elfner.

Allerdings kommt den Forscherinnen und Forschern hier ein willkommener Effekt zugute: In seltenen Fällen wird mitten im heißen Feuerball ein sehr hochenergetisches Lichtteilchen erzeugt, das seine Energie dann in ein Paar aus Elektron und Positron – dem Antiteilchen des Elektrons – umwandelt. Das Elektron und das Positron gehen keine Wechselwirkung mit den Quarks und Gluonen des Feuerballs ein und können deshalb Informationen über dessen Inneres nach außen tragen.

Der Feuerball im HADES

»Diese Elektron-Positron-Paare können wir nutzen, um sozusagen »Röntgenbilder« des

Bild: Hannah Elfner, Jonah Bernhard, MADAL collaboration



AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Teilchenbeschleuniger können geladene Atomkerne (Ionen) auf nahezu Lichtgeschwindigkeit bringen.
- Prallen diese Ionen mit Atomkernen zusammen, so lösen sich für Sekundenbruchteile und auf winzigstem Raum die Atomkerne in ihre Elementarbestandteile auf.
- Mit solchen Experimenten und theoretischen Berechnungen wollen Forscherinnen und Forscher herausfinden, wie bei Kernmaterie feste und Plasmaphasen ineinander übergehen.

Feuerballs zu schießen, da sie ihn gut durchdringen können, ähnlich wie Röntgenstrahlen den menschlichen Körper durchleuchten«, sagt Galatyuk. »Ein wichtiger Teil meiner Arbeit ist es deshalb, Methoden und Detektorkomponenten zu entwickeln, mit denen man diese Elektron-Positron-Paare möglichst gut erkennen und auswerten kann.«

Im Augenblick nutzt die Kernphysikerin noch den Detektor HADES (High Acceptance Di-Electron Spektrometer), der seit 2002 seine Dienste bei GSI verrichtet. Für das neue Beschleunigerzentrum FAIR, das gerade in Darmstadt entsteht, soll der im Bau befindliche Detektor CBM (Compressed Baryonic Matter)

diese Aufgabe weiterführen. »Bislang haben wir beispielsweise Goldkerne auf 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, bei FAIR werden bis zu 99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreicht«, so Galatyuk.

Und das ist nur eine Seite der Medaille: An der neuen Anlage werden wesentlich mehr Kollisionen stattfinden. Das heißt auch, der neue Detektor wird rund 500-mal schneller Daten aufzeichnen müssen als der alte. Versuchsreihen, die bislang einen Monat gedauert haben, lassen sich nun in der Mittagspause durchführen. Das eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten und gibt Hoffnung, vor allem seltene Effekte schneller mit überzeugender Statistik nachweisen zu können. »Allerdings müssen bei der gestiegenen Kollisionsrate auch die Signale der elektronischen Komponenten viel schneller ausgelesen und gespeichert werden«, erklärt Galatyuk. »Wir werden hier weltweit Rekordmaßstäbe setzen.«

Von Atomen zu Sternen

Einige Detektorkomponenten haben die Darmstädter sogar schon am Beschleuniger von Brookhaven getestet. Nach der Reise per Container über den Atlantik haben die neuen Komponenten an der dortigen Anlage gute Dienste geleistet und werden nach Wunsch der amerikanischen Kollegen vielleicht sogar dort verbleiben, während an der GSI an Weiterentwicklungen gearbeitet wird.

Wenn die Anlage erst einmal wie gewünscht läuft, werden sich auch ausgefallene Wünsche der Wissenschaftsgemeinde hoffentlich erfüllen lassen. »Wir würden gerne wissen, ob Kernmaterie ebensolche Phasenübergänge durchmacht, wie wir das etwa von Wasser kennen«, sagt Elfner. Beim Übergang von Eis zu Wasser oder von Wasser zu Dampf ändert sich die Temperatur nicht, während Energie zugeführt wird. Diese zusätzliche Energie wird in die Umwandlung des Aggregatzustands gesteckt. »Es wird vermutet, dass sich das bei Kernmaterie ähnlich verhält«, so Elfner. Um das zu ermitteln, brauchen die Theoretiker neue Daten wie etwa die Elektron-Positron-Röntgenbilder aus dem Herzen der kleinen Feuerbälle. Aber nicht nur dies, sondern auch die Erzeugung exotischer Teilchen und die Präzisionsuntersuchung bekannter Phänomene stehen auf dem Forschungsprogramm.

»Es ist bei unserer Arbeit immer wieder faszinierend zu sehen, wie die Physik des Kleinsten, die subatomare Kern- und Teilchenphysik, mit kosmischen Phänomenen wie Neutronensternen, Supernovae und der Nukleosynthese zusammenhängt«, fasst Elfner zusammen. »Und ohne eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten in Theorie und Experiment geht heute gar nichts mehr.« ●



Der Autor

Dirk Eidemüller, Jahrgang 1975, studierte Physik und als Nebenfach Philosophie in Darmstadt, Heidelberg, Rom und Berlin, schloss mit einem Diplom in Astroteilchenphysik ab und promovierte in Wissenschaftsphilosophie. Er wohnt in Berlin und arbeitet als freier Autor und Wissenschaftspublizist.

dirk.eidemuller@gmx.de

A photograph of a superconducting accelerator in Darmstadt. The image shows a large, complex structure of superconducting magnets, with a prominent coil of magnets in the foreground. The scene is illuminated with a mix of green and blue light, creating a futuristic and scientific atmosphere. A radiation warning sign is visible on the right side of the structure.

Mit recycelter Energie auf den Spuren schwererer Elemente

Der supraleitende Beschleuniger in Darmstadt

von Phyllis Mania

Am Teilchenbeschleuniger in Darmstadt werden die extremen Bedingungen unseres Universums im Labor erforscht. Dabei gelang es den Physikerinnen und Physikern, eine Technologie zu entwickeln, die Energie zur Teilchenbeschleunigung wiederverwendet und einspart. Der Teilchenbeschleuniger ist eingebunden in das Clusterprojekt ELEMENTS, das gemeinsam von der Goethe-Universität Frankfurt und der TU Darmstadt geleitet wird.

Geht man über den Campus Stadtmitte der Technischen Universität Darmstadt, so beeindruckt das Institut für Kernphysik auf den ersten Blick wenig. Ein grauer Siebzigerjahre-Bau, Waschbeton, viele Fenster. Drinnen Linoleumböden und Reihen von identischen Türen. Hinter einer dieser Türen verbirgt sich jedoch ein beeindruckender Raum mit vielen Monitoren und Steuerpulten, deren zahllose Lämpchen und Schalter an einen Science-Fiction-Film aus dem vergangenen Jahrhundert erinnern. Es ist der Kontrollraum und zugleich der Eingang einer riesigen Anlage im Keller des Instituts. Dorthin geht es eine Treppe hinunter, nach der man sich durch eine 15 Tonnen schwere Betontür wagen muss – und mit einem imposanten Anblick belohnt wird: eine große Halle voller technischer Gerätschaften, Edelstrahlrohre und Kabel. Hier steht der »Superconducting Darmstadt LINear Accelerator«, kurz S-DALINAC, einst Europas erster supraleitender rezirkulierender Linearbeschleuniger.

1991 wurde er in Betrieb genommen, seither arbeiten vor allem junge Forschende kontinuierlich daran, ihn weiterzuentwickeln. So ist erst kürzlich ein phänomenaler Durchbruch in der Beschleunigerphysik gelungen: die Wiederverwendung zuvor eingesetzter Energie durch eine Mehrfachnutzung des Hauptbeschleunigers. Institutsleiter Norbert Pietralla erläutert: »Mit diesem mehrstufigen Energierückgewinnungsmodus wird es möglich, riesige Mengen an Energie zu sparen. Normalerweise nehmen weit unter 1 Prozent der beschleunigten Elektronen an wissenschaftlich interessanten Reaktionen teil, den Rest schmeißen wir praktisch weg, zusammen mit der Energie, die sie tragen. Durch die neue Technologie hingegen kann diese Energie durch Abbremsen der Teilchen wieder genutzt werden, ähnlich wie in einem

Auto mit Hybridantrieb.« Das hatte sich der gebürtige Rheinländer nicht träumen lassen, als er 2006 seine Stelle an der TU Darmstadt antrat.

Ein Quantum Glück

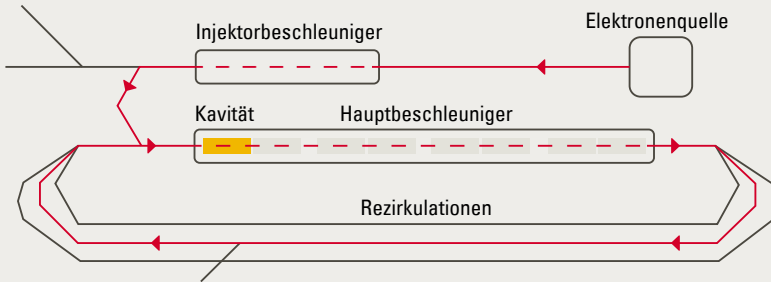
Bereits während seiner Doktorarbeit tüftelte Pietralla am Darmstädter Beschleuniger. Damals studierte er in Köln und widmete sich der Streuung von Photonen an Atomkernen, also der Ablenkung der Bahn eines dieser Lichtteilchen durch einen Kern. Dies ist möglich, weil sich Licht nicht nur wie eine Welle verhält, sondern auch wie ein Teilchenstrom. »Das war so ein richtiges Nischenthema – dazu hat zu der Zeit kaum jemand was gemacht«, erinnert sich Pietralla. Diese Nische sollte für ihn der Schlüssel zum Erfolg werden. Als er einige Jahre später auf einer Konferenz in den USA mitbekam, dass an der Duke University ein millionenschwerer Laser stand, der aufgrund fehlender Finanzierung nicht seine ursprüngliche Bestimmung in der militärischen Forschung erfüllen konnte, packte er die Gelegenheit beim Schopfe. »Ich war ja nur so ein kleiner Post-doc, und auf einmal haben die da dieses Riesending und wissen nicht, was sie damit machen sollen. Das muss man sich mal vorstellen!« Mit seiner Expertise rund um Photonen durfte Pietralla seine Experimentidee realisieren. Dabei gelang ihm die erste sogenannte Kernresonanzfluoreszenz-Reaktion mit einem Gammastrahl einer bestimmten

In einer thermionischen Elektronenquelle werden aus einer heißen Metallplatte unter Hochspannung die Elektronen gelöst.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Im supraleitenden Beschleuniger S-DALINAC werden Elektronen bis fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.
- Die Elektronen können Atomkerne spalten, deren Fragmente Rückschlüsse auf die Entstehungsweise schwerer Elemente im Universum zulassen.
- Nur ein kleiner Teil der Elektronen wird für Experimente genutzt. Die übrigen Elektronen werden so in den Beschleuniger zurückgeführt, dass ihre Energie weiter genutzt werden kann.

Energie-Recycling im Beschleuniger



Das Konzept des Energierückgewinnenden Linearbeschleunigers (engl. Energy Recovery Linac) gelang am S-DALINAC bereits 2017 zum ersten Mal in Deutschland. Dabei wird der Elektronenstrahl zurück in den Hauptbeschleuniger geführt, wo er durch ein präzises Abpassen des richtigen Zeitpunkts nach der wissenschaftlichen Nutzung wieder abgebremst wird. Dieser Vorgang kann seit 2021 bis zu dreimal wiederholt werden, indem die Elektronen an einem definierten Zeitpunkt und Ort ihre Energie wieder an das elektromagnetische Feld des Beschleunigers abgeben. So wird die Energieeffizienz des ganzen Systems erhöht.

Beitrag in Nature Physics: <https://tinyurl.com/Energierueckgewinnung>

Virtuelle Besichtigung des S-DALINAC <https://www.ikp.tu-darmstadt.de>



ZUR PERSON

Norbert Pietralla, Jahrgang 1967, ist Kernspektroskopiker und Beschleunigerwissenschaftler. Er studierte Physik an der Universität zu Köln, war Postdoc an der Yale University und Professor für Kernphysik an der State University of New York sowie an der Universität zu Köln. Seit 2006 ist er ordentlicher Professor an der Technischen Universität Darmstadt und seit 2008 Direktor des dortigen Instituts für Kernphysik. Für seine Arbeiten zur Kernresonanzfluoreszenz erhielt er Ehrendoktorwürden der Polytechnischen Universität in Bukarest sowie der Sofioter Universität Hl. Kliment Ohridski. Seit 2021 ist er Co-Sprecher des Clusterprojekts ELEMENTS, eines Forschungsverbunds von Goethe-Universität, TU Darmstadt, JLU Gießen und GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung.

pietralla@ikp.tu-darmstadt.de

Wellenlänge (monochromatischer Gammastrahl). Bei der Kernresonanzfluoreszenz nimmt ein Atomkern ein (Gammastrahlen-)Photon auf und gibt daraufhin ein anderes Photon wieder ab. Das Verfahren wird seither vielfach genutzt, um Eigenschaften von Atomkernen zu bestimmen, und konnte Antworten auf lange ungeklärte Fragen geben. Die Community war in heller Aufregung, und Pietrallas wissenschaftlichem Aufstieg stand nichts mehr im Wege. »Das war der schönste Moment in meiner Karriere«, stellt er fest.

Schweren Elementen auf der Spur

Heute konzentriert sich Pietrallas Arbeit beim Clusterprojekt ELEMENTS, einem Forschungsverbund von Goethe-Universität, TU Darmstadt, GSI Helmholtzzentrum und Universität Gießen, auf die Entstehung schwerer Elemente wie Gold und Platin. Im Universum entstehen diese nur unter extremen Bedingungen, etwa der Kollision von Neutronensternen [siehe Seite 19]. Bei solchen Kollisionen können Neutronen in großen Mengen frei umherschwirren. Unter diesen Bedingungen können sehr schwere Atomkerne entstehen, indem sie Neutronen einfangen (sogenannter r-Prozess). Es werden große Mengen an neutronenreicher Materie freigesetzt. Diese Materie ist instabil und unterliegt schnellen Kernspaltungs- und Beta-Zerfallsprozessen, bei denen die kurzlebigen radioaktiven Atomkerne anschließend rasch zu stabilen Atomkernen wie Gold oder Blei oder zu langlebigen Formen etwa von Uran zerfallen. Die Entdeckung von Gravitationswellen und Lichtsignalen zweier kollidierender Neutronensterne im Jahr 2017 untermauert diese Vorstellung. Theorien von ELEMENTS-Wissenschaftlern betreffen präzisere Analysen der astronomischen Beobachtungen und legen eine große Bedeutung der wenig verstandenen Spaltprozesse superschwerer Kerne nahe. Die Aufgabe des Teams am S-DALINAC ist es nun, diese Erwartungen mit Experimenten zu untermauern.

Als »Axt« für die Spaltung von Kernen nutzen die Forscherinnen und Forscher Elektronen, denn diese sind als Elementarteilchen »stabil« und nicht weiter teilbar. Die Elektronen werden mit nahezu Lichtgeschwindigkeit (knapp 300 000 Meter pro Sekunde) etwa auf Plutonium-Atomkerne geschossen. Die dabei entstehenden Fragmente liefern aufschlussreiche Informationen über die Verteilung von Masse im r-Prozess. »Mit diesen Hochpräzisionsmessungen kommen wir unserem Verständnis der Entstehung von schweren Elementen ein Stückchen näher«, sagt Pietralla. »Wie die exotischen Kerne im Inneren von Neutronensternen aussehen, dabei helfen uns die Theoretikerinnen und Theoretiker bei ELEMENTS mit ihren Modellen auf die Sprünge.«



Die Reise der Elektronen

Bis die beschleunigten Elektronen bei den schweren Kernen ankommen, müssen sie einen weiten Weg zurücklegen. Der beginnt in einer kleinen Kammer, wo die winzigen Teilchen unter Hochspannung von einer sogenannten Quelle erzeugt werden: Aus einem Heizfaden werden kontinuierlich Elektronen gelöst, die hier auf etwa 74 Prozent der Lichtgeschwindigkeit vorbeschleunigt werden. Um sie effektiv nutzen zu können, wird der Strahl in einzelne Abschnitte getrennt und schließlich komprimiert. Diese Elektronenpäckchen treten in den supraleitenden Injektorbeschleuniger ein. Die dort verbauten Hohlraumresonatoren, sogenannte Kavitäten, werden in einem Bad aus flüssigem Helium bei nur 2°K betrieben. Das entspricht mit -271 °C ungefähr der Eiskälte im interstellaren Raum. Hier erreicht der Strahl 99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. In einer Art Weiche kann der Elektronenstrahl hier bereits zu einem ersten Experiment gelenkt werden. Alternativ werden die Elektronen in den 15 Meter langen Hauptbeschleuniger gelenkt, wo sie weitere acht Kavitäten passieren. Dort nehmen sie durch elektromagnetische Mikrowellenfelder weiter Fahrt auf.

Danach gibt es wieder eine Weiche: Entweder werden die Elektronen über einen Magneten direkt in die benachbarte Experimentierhalle geleitet, oder sie werden Teil des weltweit einzigartigen Energierückgewinnungsmodus (siehe Kasten). Schließlich geht es mit 99,999 Prozent der Lichtgeschwindigkeit über weitere Stationen, die die Qualität des Strahls

optimieren, zu den Experimenten. Diese findet man in einem Labyrinth aus Metall und Beton, Stapel von Blei dienen zur Abschirmung, einige Aufbauten ragen mehrere Meter in die Höhe. Hier stehen auch die sogenannten Spektrometer, mit denen die Fragmente der Kernspaltungsexperimente gemessen werden. In naher Zukunft sollen hochsensible Detektoren dazukommen, mit denen die Forschenden bei ELEMENTS die Struktur schwerer Atomkerne noch genauer entschlüsseln können.

Zukunftsweisende Technik

Die erfolgreiche Umsetzung des Energierückgewinnungsmodus wurde Anfang 2023 im Fachjournal Nature Physics veröffentlicht. Damit ebnet die Forschung am S-DALINAC den Weg für zukunftsweisende Vorhaben. So könnte mit dieser Technologie beispielsweise am CERN der seit Langem diskutierte »Large Hadron-Electron Collider« endlich realisiert werden. Bislang wäre hierfür ein Stromverbrauch im zweistelligen Gigawatt-Bereich vonnöten gewesen, was der Leistung mehrerer Kernkraftwerke entspricht. Durch die Darmstädter Technologie wird davon nur noch ein Bruchteil benötigt, womit das Vorhaben realistisch wird. Auch die ELEMENTS-Experimente an der GSI werden von den Fortschritten profitieren: Mit dem Bau von DICE (»Darmstadt Individually Circulating Compact ERL«) soll die nächste Generation des relativ kleinkalibrigen Linearbeschleunigers verwirklicht werden. Wenn es soweit ist, geht der mehr als 30 Jahre alte S-DALINAC in Rente. Bis dahin heißt es weiter: »Klein, aber oho!« ●

Blick in die Beschleunigerhalle. Mithilfe der Präparationssektion (vorne rechts) werden die Elektronenpakete vorbereitet und im Injektorbeschleuniger (hinten rechts) vorbeschleunigt, um im Hauptbeschleuniger (links) auf nahezu Lichtgeschwindigkeit gebracht zu werden.



Die Autorin

Phyllis Mania, Jahrgang 1988, studierte Psychologie und Kognitive Neurowissenschaften in Hamburg und Maastricht. Nach ihrer Promotion arbeitete sie unter anderem als freie Autorin. Sie ist als Referentin für Wissenschaftskommunikation im Clusterprojekt ELEMENTS an der Goethe-Universität Frankfurt tätig.

mania@physik.uni-frankfurt.de



Quantensprünge in der Materialforschung

von Benedikt Vogel

Wie im Labor und am Computer
Kristalle mit überraschenden
Eigenschaften entstehen.

Seit hundert Jahren ist bekannt, dass die mikroskopische Welt der Atome und Moleküle von den Gesetzen der Quantenphysik regiert wird. Lange Zeit galten Quantenphänomene als verworren und unkontrollierbar. Heute arbeiten Physikerinnen und Physiker daran, unter Nutzung quantenphysikalischer Effekte Materialien mit neuartigen Eigenschaften zu kreieren.

Am Physikalischen Institut auf dem Campus Riedberg im Norden Frankfurts hat Cornelius Krellner sein Büro. Der Physikprofessor dreht sich auf seinem Stuhl nach hinten und öffnet die Tür eines senffarbenen Schrankes. Er lächelt schelmisch über seinen verborgenen Schatz. »In dem Schrank haben wir praktisch alle chemischen Elemente in Reinstform«, sagt Krellner. Es ist eine Sammlung, die man eher bei einem Chemiker erwarten würde. In diesem Fall nutzt ein Experimentalphysiker die chemischen Elemente für seine Forschung. Er stellt aus ihnen Kristalle her, also Stoffe, in denen die Atome in regelmäßiger Abfolge angeordnet sind. »Kristalle eignen sich dank ihrer geordneten Struktur in besonderer Weise, den atomaren Aufbau der Materie zu verstehen«, sagt Krellner.

Quantenmaterial Supraleiter

Cornelius Krellner erforscht Quantenmaterialien. In einem gewissen Sinn ist jeder Stoff der materiellen Welt ein Quantenmaterial. Jeder Stoff besteht nämlich aus Atomen, und deren Bausteine gehorchen den Gesetzen der Quantenphysik. Die Wissenschaft definiert »Quantenmaterial« aber enger: Hier bezeichnet der Begriff Materialien, deren makroskopische Eigenschaften auf Quanteneffekten beruhen. Das prominenteste Beispiel sind Supraleiter. In diesen Materialien fließt elektrischer Strom – anders als in den uns bekannten Kupferleitern – ohne Widerstand. Warum das so ist, erklärt die Quantenphysik: Elektronen bewegen sich in Supraleitern verlustfrei, weil sie sich zu flinken, durch nichts zu bremsenden Paaren verbinden.

Supraleiter faszinieren, denn sie könnten in Zukunft eine Stromversorgung ohne Übertragungsverluste ermöglichen. So erstaunt es wenig, dass die Forschung nach anderen Quantenmaterialien Ausschau hält, die ähnlich nütz-



liche Eigenschaften besitzen. Cornelius Krellner hat schon mehrere solcher Materialien hergestellt. Der gebürtige Dresdner nennt beispielhaft ein Quantenmaterial, das durch seine magnetischen Eigenschaften verblüfft: Der Stoff verliert seine magnetische Kraft, wenn man ihn zusammenpresst. Um das Material zu kristallisieren, benutzte Krellner drei Elemente aus seinem senffarbenen Schrank: Europium, Palladium und Silizium. Diese Elemente bilden einen Kristall, ein regelmäßiges Gitter aus Einheitszellen. Jede Einheitszelle besteht aus einem Europium-Atom und jeweils zwei Palladium- und Silizium-Atomen. Die chemische Formel EuPd_2Si_2 ist zugleich der Name des Quantenmaterials: »Europium Palladium zwei Silizium zwei«.

Unter dem Schutz von Edelgasen entstehen im Herzen dieser Apparatur (großes Bild S. 28 und Ausschnitt oben) Kristalle nach dem Czochralski-Verfahren: In eine Schmelze wird ein Metallstab mit einem Impfkristall eingetaucht und dann langsam wieder herausgezogen, so dass das Material knapp unterhalb des Schmelzpunkts kristallisieren kann.

Doktorandin Katharina Zoch legt einen der winzigen im Labor gezüchteten Kristalle (s. Bildschirm) unter ein Auflichtmikroskop.



Ein Elektron macht den Unterschied

»Die interessante Physik steckt im Europium«, sagt Cornelius Krellner. Um zu erklären, warum dieses Material bei Drücken seinen Magnetismus einbüßt, nimmt er den Journalisten mit auf eine Reise in die mikroskopisch kleine Welt der Atome. Europium ist ein Metall der Seltenen Erden. Um den Atomkern tummeln sich 63 Elektronen. Sie sind auf sechs Schalen beziehungsweise 13 Unterschalen verteilt. Die Unterschale, die ein Elektron belegt, definiert den Abstand zum Atomkern und seinen Energiezustand. Für den Magnetismus von Europium ist ein einziges der 63 Elektronen verantwortlich: ein 4f-Elektron. Es heißt so, weil es normalerweise auf der Unterschale 4f zu Hause ist. Wird der Kristall nun aber zusammengepresst, springt das Elektron von 4f auf Unterschale 5d.

Obwohl sich sein Energiezustand nur unmerklich ändert, hat dieser quantenphysikalische Vorgang für das Europium zwei einschneidende Folgen: Es schrumpft um rund 20 Prozent – und es verliert seinen Magnetismus. Durch äußeren Druck wird der ganze EuPd_2Si_2 -Kristall also nichtmagnetisch. Entfällt der Druck, kehren die Elektronen von der Unterschale 5d auf ihren angestammten Platz zurück; der Kristall wird wieder magnetisch. In der Fachsprache

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Bei tiefen Temperaturen können sogenannte Quantenmaterialien zum Beispiel Strom verlustfrei leiten (Supraleiter), andere verlieren unter Druck ihren Magnetismus.
- Physikerinnen und Physiker versuchen Kristalle so zu züchten, dass sie als Quantenmaterialien bei einer Verformung etwa ihre elektrischen oder magnetischen Eigenschaften verändern.
- Theoretische Physikerinnen und Physiker komplettieren diese Arbeiten mit mathematischen Modellen, die zeigen, wie neue Quantenmaterialien aussehen könnten.

der Physik: Durch eine Manipulation von außen vollziehen Quantenmaterialien einen »Phasenübergang« zwischen zwei »Quantenzuständen«. Damit sich dieser Effekt zeigt, muss der EuPd_2Si_2 -Kristall auf minus 100 Grad Celsius abgekühlt werden.

ZUR PERSON

Cornelius Krellner, Jahrgang 1978, studierte Physik an der Universität Dresden und der Eidgenössisch-Technischen Hochschule Zürich. Für seine Dissertation wurde er mit der Otto-Hahn-Medaille der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet. Nach einem Aufenthalt im englischen Cambridge wurde er 2012 als Professor für Experimentalphysik an die Goethe-Universität berufen.

krellner@physik.uni-frankfurt.de



Die Frage nach dem Warum

Cornelius Krellners Gruppe umfasst 15 Forschende und Studierende. Sie untersuchen gegenwärtig ein Dutzend Quantenmaterialien, die durch Drücken, Biegen oder Dehnen ihre magnetischen, aber auch ihre elektrischen oder weitere Eigenschaften verändern. »Ein Material untersuchen wir typischerweise zwei bis fünf Jahre«, berichtet Krellner. »Wir suchen Materialien, die so interessante Eigenschaften zeigen, dass andere Forschungsgruppen weltweit sich mit diesen Materialien vertieft befassen wollen.« Anders ausgedrückt: Die Quantenmaterialien aus dem Frankfurter Physiklabor sind nicht dafür gedacht, morgen schon eine neue Generation von Hightech-Anwendungen zu ermöglichen. Die Forschung schafft vielmehr das grundlegende Verständnis, das erforderlich ist, um Quantenmaterialien mittel- und langfristig kommerziell zu nutzen.

Für ihre Experimente verwendet die Forschungsgruppe eine Armada von Spezialgeräten. Mit ihnen vermessen sie magnetische Momente, elektrische Ströme, thermodynamische Eigenschaften, den atomaren Aufbau des Kristallgitters, auch spezielle Zustände, die die Elektronen an der Oberfläche der Materialproben zeigen. Doch all diese Messwerte verraten

ihnen nicht, warum Quantenmaterialien diese verblüffenden Eigenschaften zeigen. Die Frage nach dem Warum beantwortet in Frankfurt eine theoretische Physikerin. Sie hat ihr Büro wie Cornelius Krellner im Physikgebäude, allerdings in einem entfernten Flügel. Dort arbeitet Roser Valentí, Professorin für theoretische Physik. In ihrem Büro gibt es eine Wandtafel, voll beschrieben mit mathematischen Symbolen. »Die Tafel brauchen wir für die Diskussionen in meiner Forschungsgruppe«, sagt Valentí.

In der Sprache der Quantenphysik

Die Wissenschaftlerin spanischer Herkunft betreut ein Dutzend Postdocs, Promovierende, Master- und Bachelorstudierende. Die Forschungsgruppe arbeitet nicht mit Laborgeräten wie das Team um Cornelius Krellner, sondern mit Gleichungen. Die mathematischen Werkzeuge wurden in den 1920er Jahren von Physikern wie Erwin Schrödinger und Paul Dirac erdacht. Mit ihnen lassen sich Elektronen, die in Quantenmaterialien eine zentrale Rolle spielen, exakt beschreiben, und zwar mit Wellenfunktionen. Das klappt, weil Elektronen nach dem Verständnis der Quantenphysik Mischwesen aus Teilchen und Wellen sind.



ZUR PERSON

Roser Valentí, Jahrgang 1963, promovierte an der Universität Barcelona, forschte unter anderem an der University of Florida und wurde 2003 als Professorin für theoretische Festkörperphysik an die Goethe-Universität berufen, der sie 2009 bis 2012 als Vizepräsidentin vorstand. Valentí vertritt den Sonderforschungsbereich ElastoQMat als Sprecherin und ist damit die treibende Kraft hinter der Forschungsinitiative. Gemeinsam mit Luciano Rezzolla, Professor für theoretische Astrophysik (s. Seite 7), ist sie Gründungssprecherin des Profilbereichs »Raum, Zeit, Materie« der Goethe-Universität.

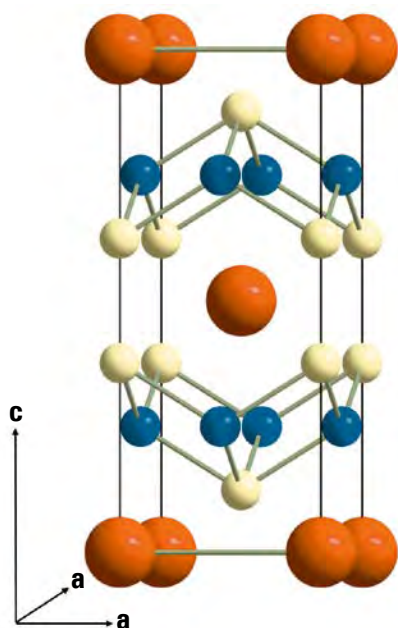
valenti@itp.uni-frankfurt.de

Die Forschungsgruppe von Roser Valentí führt ihre Untersuchungen unter anderem an Kristallen durch, die in den Labors von Cornelius Krellner vermessen wurden. Die Informationen aus den Messungen übertragen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Gleichungen, die anschließend gelöst werden. Dadurch verstehen sie, warum sich Kristalle so verhalten, wie sie sich verhalten, sagt Roser Valentí: »Aus den Lösungen der Gleichungen können wir ableiten, welche Wechselwirkungen der Elektronen untereinander beziehungsweise mit den Nachbaratomen des Kristallgitters die Eigenschaften des untersuchten Quantenmaterials hervorrufen.« Um solche Gleichungen zu lösen, braucht es ausgeklügelte mathematische Lösungswege, die Roser Valentí mit entwickelt hat. Es braucht zudem Computer mit großer Rechnerleistung.

Neue Materialien aus der Küche der Theoretiker Quantenmaterialien zu verstehen, ist das eine. Die theoretischen Physikerinnen und Physiker gehen noch einen Schritt weiter. Sie stellen Vermutungen an, wie ein bisher nicht existierendes Quantenmaterial zusammengesetzt sein müsste, damit es bestimmte Eigenschaften annimmt. Ihre Ideen spielen sie zurück an

die Experimentalphysiker. Diese versuchen, die fraglichen Kristalle herzustellen und die vorhergesagten Eigenschaften zu messen. So wurde zum Beispiel in EuPd_2Si_2 das Silizium teilweise durch das verwandte Germanium ersetzt. Es zeigte sich: Auch dieses Material verliert durch Druck seinen Magnetismus, allerdings bei einer um 50 Kelvin niedrigeren Temperatur.

Das Pingpong zwischen Theorie und Experiment wurde erst möglich, weil experimentelle Physiker wie Cornelius Krellner in den vergangenen Jahren große Fortschritte bei der Züchtung von Kristallen erzielt haben. Wie groß diese Fortschritte sind, verdeutlicht das Beispiel von EuPd_2Si_2 : Das Material ist seit vier Jahrzehnten bekannt, die Züchtung von Kristallen, mit denen sich gut experimentieren lässt, gelang aber erst vor sechs Jahren. Die Frankfurter Forscherinnen und Forscher nutzen für die Kristallherstellung die Czochralski-Methode: Die Kristalle werden hierbei aus einer Schmelze gezogen, quasi wie beim Kerzenziehen. Das auf 1400 Grad Celsius erhitzte Stoffgemisch ist so aggressiv, dass ihm kein Behälter standhält. Deshalb muss die Schmelze durch elektromagnetische Kräfte in der Schwebe gehalten werden, damit die Kristallzüchtung gelingt.



Modell und Kristall: Bei minus 100 Grad Celsius büßt dieser Kristall namens »Europium-Palladium-zwei-Silizium-zwei« (EuPd_2Si_2 , auf Millimeterpapier liegend) unter Druck seine magnetischen Eigenschaften ein. Wie es zu dieser Eigenschaftsänderung kommt, ergründet die theoretische Physikerin Roser Valentí. Im Modell der Kristall-Einheitszelle sind die Europiumatome rot, die Palladiumatome blau und die Siliziumatome weiß gefärbt.

Forschungsverbund ElastoQMat

Bei allen Schwierigkeiten der praktischen Umsetzung: Quantenphänomene werden heute in vielen Fällen verstanden, und sie sind beherrschbar geworden. Damit rückt auch ihre technische Nutzung immer näher. Im Jahr 2022 ging der Physik-Nobelpreis an drei Forscher, die mit ihren Arbeiten die Grundlagen für die Quantentechnologie gelegt haben. Sie schufen die Voraussetzung für die Nutzung von Quantenphänomenen in Computern, in der Verschlüsselungstechnik oder in Sensoren. Das alles sind mögliche Einsatzgebiete, die ebenfalls von den Arbeiten der Quantenmaterial-Forscher Roser Valentí und Cornelius Krellner profitieren könnten.

Das Frankfurter Duo arbeitet seit zwei Jahren unter dem Dach des überregionalen Sonderforschungsbereichs ElastoQMat, der durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Der Forschungsverbund untersucht Quantenmaterialien, die ihre Eigenschaften ändern, wenn sie elastisch verformt werden. Unter der Federführung der Goethe-Universität und der Sprecherschaft von Roser Valentí arbeiten 18 Gruppen aus Forschungseinrichtungen in Mainz, Karlsruhe und Dresden mit. Wenn alles rund läuft, haben die Wissenschaftlerinnen und

Wissenschaftler weitere zehn Jahre vor sich, um das Zusammenspiel von Elektronen und Kristallgittern in Quantenmaterialien umfassend zu verstehen. »Unser Antrieb ist die pure Lust am Entdecken von neuen Dingen«, sagt Cornelius Krellner. »Wir denken, wenn man mehr versteht, kann man später auch irgendwas Nützliches daraus machen.« ●



Der Autor

Dr. Benedikt Vogel, geboren 1964 in Luzern/Schweiz, arbeitet von Berlin aus als freiberuflicher Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkten in den Bereichen Physik, Energie und Medizin. Zusätzlich berät er Hochschulen, Verbände und Behörden in strategischen Fragen der Kommunikation.

www.vogel-komm.ch



ERDWELTEN

Die turbulente Kindheit der Erde

Diamanten zeugen davon, wie sich unser Planet vor Milliarden Jahren gewandelt hat

von Frank Frick

Vor mehr als vier Milliarden Jahren prägten heiße Magma-Ozeane die Oberfläche der Erde. Als die Erde allmählich abkühlte, bildeten sich an manchen Stellen Krusten, später die ersten Kontinente. Die Geowissenschaftlerin Dr. Sonja Aulbach erforscht die damals ablaufenden Prozesse anhand spezieller Gesteinsproben und mit hochmoderner Analysetechnik.

Wenn besonders reine, große und berühmte Diamanten den Besitzer wechseln, muss der Käufer üblicherweise mehrere zehn Millionen Euro überweisen. Und Diamantschmuck steht als glitzernder Blickfang hoch im Kurs. Da verblüfft es, wenn eine Frau sagt: »Das eigentlich Wertvolle an Diamanten sind ihre mineralischen Einschlüsse.« Ausgerechnet die Verunreinigungen, die den in Geld aufgewogenen Wert eines Diamanten deutlich mindern?

Sonja Aulbach, von der die Worte stammen, sieht die Edelsteine eben mit den Augen einer Forscherin. Und wie die Wissenschaft auf Diamanten und die darin eingeschlossenen Mineralien blickt, lässt sich dem Vorwort eines aktuellen wissenschaftlichen Bandes entnehmen, der gewaltige 845 Seiten umfasst: Die Einschlüsse sind demnach »Botschafter aus einer anderen Zeit und von einem anderen Ort«, ähnlich wie es »Mondgestein, einzigartige Meteoriten, Proben von Kometenvorbeiflügen oder Asteroidenlandungen« sind. Die Einschlüsse liefern Informationen, »die wir auf keinem anderen Weg erhalten werden« von der Vergangenheit »des dynamischsten und aktivsten Gesteinsplaneten unseres Sonnensystems, unserer Erde«. Sonja Aulbach vom Institut für Geowissenschaften der Goethe-Universität gehört zu den Autorinnen und Autoren dieses Übersichtsbandes, in

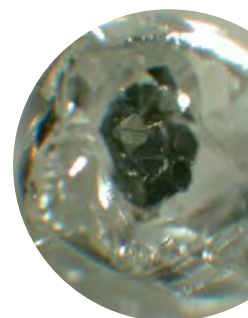
AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Einschlüsse in Diamanten verraten, dass diese vor bis zu 3,5 Milliarden Jahren entstanden sind. Damit sind sie viel älter als das explosive Magma, mit dem sie an die Oberfläche gelangten.
- Analysen zufolge gab es vor drei Milliarden Jahren bereits Land über dem Meeresspiegel und eine Art Kohlenstoffkreislauf, der wichtig für die Entstehung von Leben war.
- Bei hohem Sauerstoffgehalt im obersten Erdmantel wird Diamant zu Kohlendioxid umgewandelt, das mit Magmen in die Atmosphäre gelangt.

den auch ihre eigenen Forschungsergebnisse eingeflossen sind.

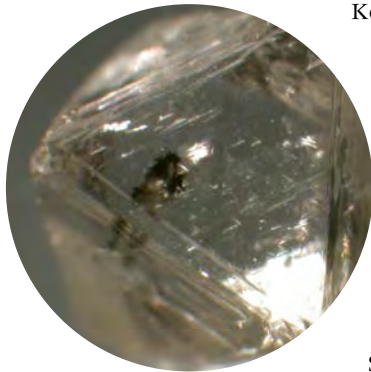
In Edelsteinqualität kommen Diamanten nur in bestimmten Kernregionen der Kontinente vor, in denen es keine Erdbeben gibt. Solche Regionen werden von Geowissenschaftlern als Kratone bezeichnet. Und innerhalb dieser Kratone treten sie nur in einem bestimmten magmatischen Gestein namens Kimberlit auf. Die Frage, warum die Vorkommen von Diamanten

Während die Lava bei einem Ausbruch des Ätnas eher aus dem Krater überfließt, schoss das Magma bei den seltenen, sogenannten kimberlitischen Eruptionen in der geologischen Vergangenheit wohl mit bis zu 250 Kilometern pro Stunde nach oben und riss dabei Diamanten aus großer Tiefe mit sich.



und kratonischen Kimberliten eng miteinander verknüpft sind, ist der Ausgangspunkt für viele Erkenntnisse über die Kindheit der Erde.

Aus Laborexperimenten ist bekannt, dass zur Erzeugung von Diamanten aus Kohlenstoff bei einer Temperatur von 950 bis 1400 Grad Celsius ein Druck nötig ist, der mindestens 40000-mal so hoch ist wie der Luftdruck. Solche Verhältnisse herrschen auch heute in mehr als 100 Kilometern Tiefe im Gestein des sogenannten oberen Erdmantels. Allerdings darf dort nur wenig Sauerstoff vorhanden sein, damit nicht anstatt der edlen Steine Kohlendioxid (CO₂) entsteht. Zudem ist in dieser Tiefe nur jedes 10000ste Atom eines aus Kohlenstoff, sodass die Bildung von Diamanten dort eher die Ausnahme ist. Selbst wenn sie dort häufiger stattfinden würde, kämen Diamantsucher nicht an die Edelsteine ran: Kein Bohrgerät ist bislang tiefer als zwölf Kilometer ins Erdinnere vorgedrungen.



Die mineralischen Einschlüsse in diesen nur drei bis vier Millimeter großen Diamanten verraten deren Alter und lassen Rückschlüsse zu auf die Entwicklung der großen Gesteinsplatten der Erde.

Das Alter bestimmen

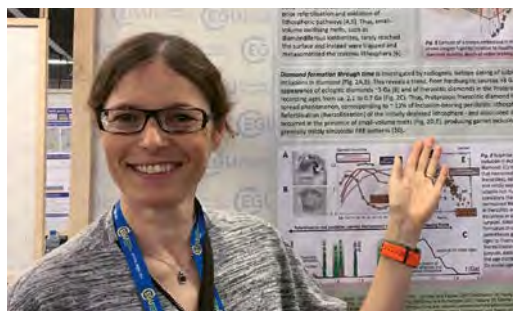
Um in Minen gefundene Diamanten als Zeugen früherer Epochen der Erdgeschichte verwenden zu können, muss man ihrer Entstehung einen Zeitpunkt zuweisen. Dazu nutzen Geowissenschaftler aus, dass einige chemische Elemente auch in instabilen radioaktiven Varianten – den

radioaktiven Isotopen – vorkommen. Diese zerfallen mit einer gewissen Geschwindigkeit zu Isotopen anderer Elemente, die als Tochterisotope bezeichnet werden. So weiß man beispielsweise, dass vom Mutterisotop Samarium-147 nach 106 Milliarden Jahren noch die Hälfte der ursprünglichen Menge vorhanden ist, weil aus der anderen Hälfte das Tochterisotop Neodym-143 entstanden ist. Mit der Kenntnis der Zerfallsgeschwindigkeit lässt sich somit aus den heutigen Isotopenverhältnissen das Alter eines Gesteins berechnen.

Messen lässt sich die Isotopenzusammensetzung eines Gesteins mithilfe von Massenspektrometern, denn Isotope unterscheiden sich in ihrer Masse. »Ich habe Zugang zu den hochmodernen Geräten des Frankfurt Isotope and Element Research Center (FIERCE)«, sagt Aulbach, die ihrer Forschung mithilfe eines Heisenberg-Stipendiums der Deutschen Forschungsgemeinschaft nachgeht.

Entsprechende Datierungen von Geowissenschaftlern weltweit zeigen, dass sich die bisher gefundenen Kimberlite bis auf wenige Ausnahmen vor höchstens 550 Millionen Jahren gebildet haben.

Die direkte Altersbestimmung reiner Diamanten im Kimberlit ist unmöglich, da sie vollständig aus Kohlenstoff bestehen, von dem es kein genügend langsam zerfallendes Isotop gibt. Hier nun kommen die Einschlüsse in den Diamanten ins Spiel: »Sie enthalten geeignete Isotope«, sagt Aulbach, die an solchen Datierungen beteiligt war. Demnach sind die Einschlüsse je nach Fundort der Diamanten bis zu 3,5 Milliarden Jahre alt. Die Diamanten mitsamt ihren Einschlüssen sind also zumeist wesentlich älter als der sie umgebende Kimberlit.



ZUR PERSON

Sonja Aulbach studierte Geologie an der Goethe-Universität und promovierte 2005 an der Macquarie University in Australien. Nach Postdoc-Aufenthalten in den USA und Kanada kehrte sie 2009 an die Goethe-Universität zurück, wo sie seitdem in der Facheinheit Mineralogie am Institut für Geowissenschaften forscht. Seit 2022 ist sie Heisenberg-Stipendiatin mit dem Projekt »Kruste-Mantel-Entwicklung und Volatilzyklen des Erdinnern im Verlauf der Zeit«.

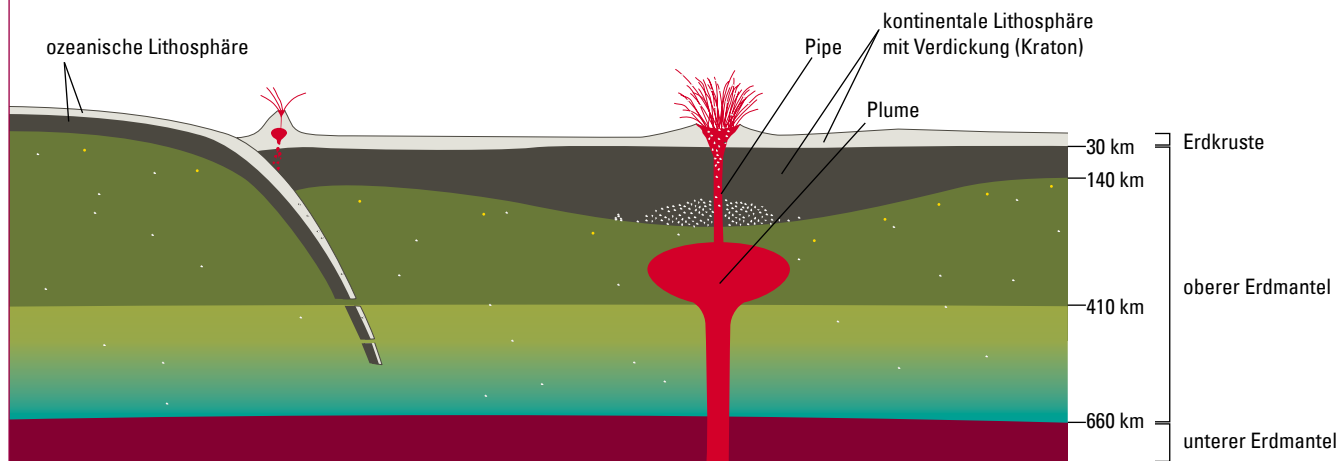
s.aulbach@em.uni-frankfurt.de

Aus einer Tiefe von 200 Kilometern

Dies ist ein entscheidendes Indiz für die folgende allgemein akzeptierte geowissenschaftliche Theorie: Im Phanerozoikum, das den Zeitraum von 540 Millionen Jahren bis heute umfasst, stieg bei speziellen seltenen und explosiven vulkanischen Ausbrüchen Magma aus einer Tiefe von mehr als 200 Kilometern auf. Diese kimberlitischen Eruptionen brachen die feste und starre obere Schicht der Erde – die Lithosphäre – auf. Die Lithosphäre ist bei Kontinentalkernen besonders dick und nimmt nicht an den Umwälzungen im festen Erdmantel, der Mantelkonvektion, teil. Während der kimberlitischen Eruptionen riss das Magma Diamanten und andere Gesteinsmaterialien aus dem tiefen Erdmantel – Xenolithe – mit, die dort vor mehr als eine Milliarde Jahre entstanden sind.



Vulkane und Diamanten



Diamanten können nur in Tiefen jenseits von etwa 140 Kilometern entstehen (weiße Punkte). Wegen der höheren Temperatur und des größeren chemischen Potenzials von Sauerstoff im konvektierenden Mantel (olivgrün) oxidieren die Diamanten zu CO_2 (gelbe Punkte). Daher kommen Diamanten bevorzugt in alten Kontinentalkernen vor (Kratone), die eine dicke und kalte Lithosphäre besitzen.

An die Oberfläche gelangen diese Diamanten durch sogenannte kimberlitische Eruptionen: Warmes und chemisch angereichertes Mantelmaterial (Plumes) steigt in festem Zustand auf bis unter die Lithosphäre, wo es aufgrund von Druckentlastung gewisse Mengen an flüssigem

Magma bildet (Kimmerlitschmelze). Gase wie Kohlendioxid und Wasserdampf sorgen dafür, dass das Magma mit Geschwindigkeiten von bis zu 250 Kilometern pro Stunde in schmalen Schloten (Pipes) hochschießt und in einer vulkanischen Eruption ausgeschleudert wird. Beim Aufstieg reißt es Bruchstücke von Fremdgestein (Xenolithe) sowie Diamanten mit sich. Weil dies sehr schnell geschieht, oxidieren nicht alle dieser Diamanten und können am Rand der Pipe abgelagert werden. Viele der heute aktiven Vulkane befinden sich an Grenzen tektonischer Platten, wo eine Platte unter eine andere abtaucht (links). Das in der abtauchenden Platte enthaltene Wasser

wird unter dem zunehmenden Druck so stark erhitzt, dass es Gesteine zum Schmelzen bringt. Das Magma steigt auf und bildet eine Kammer, die einen Vulkan speist.

An der Grenze vom oberen Teil des Erdmantels (olivgrün) zur Mantel-Übergangszone (hellgrün und bläulich) und von dort zum unteren Erdmantel (dunkelrot) ändert sich – bei gleicher chemischer Zusammensetzung – das Gestein (Mineralogie) und damit dessen Fließfähigkeit und Dichte.

(Grafik nicht maßstabsgetreu)

»Die Natur hat somit für uns Forschende gearbeitet und etwas zutage gefördert, was wir ansonsten nicht erschließen könnten«, begeistert sich Sonja Aulbach.

Die Xenolithe wurden nach ihrer Bildung im Erdmantel durch die dort ablaufenden Prozesse verändert. »Währenddessen befanden sich die vergleichbaren mineralischen Einschlüsse in einem nahezu perfekten Behälter, dem Diamant«, sagt Sonja Aulbach. Damit ergeben sich aus dem Vergleich zwischen Xenolithen und Diamanteinschlüssen wichtige Anhaltspunkte, wie sich die Lithosphäre über Hunderte Millionen Jahre entwickelt hat.

Um aus der Kenntnis der chemischen Zusammensetzung und der Isotopenverhältnisse von Gesteinen ein frühes Bild der Erde zu erhalten, benötigt man ein grundlegendes Verständnis davon, wie sich die chemischen Elemente im Gestein bei dessen Aufschmelzen, Erkalten, bei Druckänderungen und Transportprozessen umverteilen. Zu diesem Verständnis tragen zum einen Laborversuche bei, in denen das Verhalten von Stoffen bei hohem Druck und verschiedenen Temperaturen untersucht wird. Zum anderen helfen Computersimulationen,

die Prozesse nachzuvollziehen. »Dabei nähern wir Geowissenschaftler uns der frühen Erde aus zwei Richtungen: Von den Anfängen des Sonnensystems her, über das uns Meteoriten viel verraten. Oder von der heutigen Erde her, die aus Kruste, Mantel und Kern besteht und in der sich durch Differenzierungsprozesse viele verschiedene Gesteine gebildet haben«, erläutert Aulbach. Diese Prozesse gelte es zu erkennen und zurückzuverfolgen.

Vom Magmaozean zu den Kontinenten

Trotz aller wissenschaftlichen Fortschritte bleibt das Bild der Erde zwischen ihrer Entstehung vor 4,567 Milliarden Jahren – ein Alter, das sich aus Meteoritenfunden ergibt – und der Zeit vor rund eine Milliarde Jahren noch unscharf. Klar ist, dass sich am Anfang der metallische Erdkern gebildet hat, der von einem Ozean flüssigen, silikathaltigen Magmas umgeben war. Denn die Erde war sehr viel energiereicher und damit heißer als heute – die Folge unter anderem von hoher Radioaktivität





Wo einst hochexplosive Eruptionen Diamanten aus der Tiefe in obere Regionen der Erdkruste bewegten, werden sie heute in Minen wie zum Beispiel in Koidu-Sefadu im afrikanischen Sierra Leone abgebaut.



Der Autor

Frank Frick, promovierter Chemiker, arbeitet seit rund 25 Jahren als freier Wissenschaftsjournalist. Er schreibt für Zeitschriften, Forschungseinrichtungen und forschende Unternehmen. Er lebt in Bornheim bei Bonn. www.wissenschaftsjournalist.eu

und Meteoritenbeschuss. Eine allmähliche Abkühlung führte dann vor mindestens vier Milliarden Jahren stellenweise zur Bildung einer festen Kruste, auch wenn weiterhin zähflüssige Magmaströme vorherrschend waren. Diese Kruste schmolz dann teilweise wieder, während an anderen Stellen neue Kruste auskristallisierte. Bei jedem dieser Vorgänge verteilten sich die chemischen Elemente neu: Manche verblieben im Mantel, manche reichertem sich unter anderem aufgrund der Größe ihrer Ionen im flüssigen Magma an, aus dem sich die Kruste bildete.

Vor 4,02 Milliarden Jahren entstand das erste Gestein, das bis heute überlebt hat, und vor rund 3,5 Milliarden Jahren bildeten sich die ersten Kontinentalkerne. »Wann genau dann die Plattentektonik einsetzte, also Lithosphärenplatten begannen, sich auf dem Erdmantel zu bewegen, ist umstritten«, sagt Aulbach. »Unsere Ergebnisse weisen jedenfalls darauf hin, dass es vor drei Milliarden Jahren die Plattentektonik gab und dass sich zu diesem Zeitpunkt bereits Teile der frühen kontinentalen Platten über den Meeresspiegel erhoben. Damit waren sie der Verwitterung ausgesetzt, mit weitreichenden Konsequenzen für die Stoffkreisläufe und die Entwicklung des Lebens.«

Zusammenhang zwischen Erdmantel und Atmosphäre

Für die Entstehung des Lebens auf der Erde bedeutsam ist auch das Schicksal des Elements Kohlenstoff im Laufe der Jahrtausende. Damit will sich die Geowissenschaftlerin künftig verstärkt beschäftigen. Bereits nachgewiesen hat sie, dass es schon vor drei Milliarden Jahren eine Art Kreislauf gab, bei dem Kohlenstoff von der ozeanischen Kruste zumindest bis in 150 Kilometer Tiefe gelangte. Dort kristallisierte der Kohlenstoff zu Diamant, der dann an den Umwälzungsprozessen des Mantels teilnahm und beim langsamen Transport nach oben oxidiert wurde. Bei diesem auch heute stattfindenden Prozess bildet sich wiederum CO_2 , das dann durch Magmenbildung und Vulkanismus in die Atmosphäre ausgestoßen wird.

Daher betrachtet Geowissenschaftlerin Sonja Aulbach Diamanten nicht nur hinsichtlich ihres Wertes mit anderen Augen als die meisten Menschen. Dem berühmten Werbeslogan des Diamantenhändlers De Beers »Ein Diamant ist unvergänglich« hält sie entgegen: »Nach jetzigem Kenntnisstand könnte man durchaus argumentieren: Das Kohlendioxid, das manche Vulkane heute ausgasen, stammt aus verbrannten Diamanten.« ●



Im Dunkeln

Reisen in die Tiefsee

Die Tiefsee macht mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche aus und sie beherbergt wahrscheinlich mehr als die Hälfte aller Arten auf der Erde. Und doch ist über diesen riesigen Lebensraum bislang nur wenig bekannt. Die Zoologin Angelika Brandt untersucht die uns weitgehend fremde Tierwelt der dunklen Tiefe – und hat dabei herausgefunden, wie sehr diese durch den Klimawandel und durch die anderen globalen Auswirkungen menschlichen Handelns bedroht ist.

Auf der Landkarte gibt es kaum noch weiße Flecken und selbst ins All dringt der Mensch mit seinem Wissensdurst immer weiter vor. Doch direkt vor uns liegt ein riesiges Ökosystem, über das weniger bekannt ist als über die von uns abgewandte Seite des Mondes – die Tiefsee. Der Grund dafür ist einfach: Die Tiefsee ist derart groß und tief, dass Menschen sie nur mit besonderen Geräten von Schiffen aus erkunden können.

Per definitionem beginnt die Tiefsee ab einer Meerestiefe von 200 Metern. Hier herrschen ewige Dunkelheit und gleichbleibende Temperaturen von nur rund zwei Grad Celsius. Auch in anderer Hinsicht ist das Leben in der Tiefsee kein Zuckerschlecken. Mit zunehmender Tiefe

steigt der Wasserdruck immens – pro zehn Meter um rund einen Atmosphärendruck (1 bar) –, und Nahrung ist extrem knapp. Da in der Dunkelheit keine Pflanzen wachsen können, werden Nährstoffe hauptsächlich von der Wasseroberfläche eingetragen. Dabei ist die Sedimentation sehr gering, wie die Zoologieprofessorin und Senckenbergforscherin Angelika

Brandt erklärt: »In 4000 Metern Tiefe dauert es etwa 1000 Jahre, bis sich ein Millimeter Sediment gebildet hat.« Ein verendeter Fisch oder gar ein Wal, der auf den Meeresboden sinkt und dort verwest, ist als Nahrungsquelle ein seltener Glücksfall für Tiefseeorganismen. Als Energielieferanten spielen außerdem Bakterien eine Rolle, die kein Licht benötigen, um Biomasse aufzubauen.

Wesentlicher Faktor im Klimageschehen

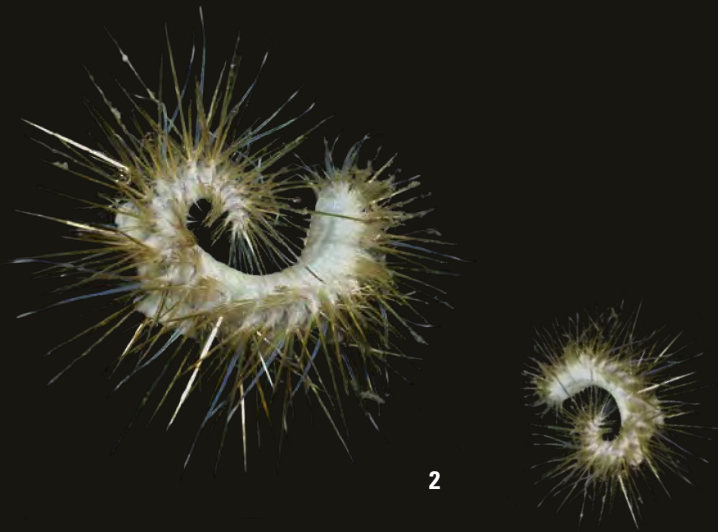
Lange Zeit war man überzeugt davon, dass in der kalten Dunkelheit der Tiefsee keinerlei Leben mehr möglich sei. Der Brite Edward Forbes, Mitbegründer der Tiefseeforschung, legte diese Grenze Mitte des 19. Jahrhunderts auf 500 Meter

von Larissa Tetsch

5378 Meter unter dem Meer:
Tiefseegarnele im Nordwest-
pazifik.

Tiefseebewohner: Collage der Tiere (in unterschiedlicher Vergrößerung), die auf Forschungsfahrten mit der »Polarstern« in der Antarktis gesammelt wurden. Fast bei jedem Tauchgang werden neue Arten entdeckt.

- 1 Tiefseeassel (*Vanhoeffenura* sp.)
- 2 Borstenwurm (*Eunoe spica*)
- 3 Flohkrebs (*Epimeria similis*)
- 4 Flohkrebs »Roter Ritter« (*Epimeria rubrieques*)
- 5 Flohkrebs (*Epimeria inermis*)
- 6 Weiße Seegurke (*Psolus* sp.)
- 7 Antarktis-Asse (*Antarcturus* sp.)
- 8 Flohkrebs (*Anchiphimedia* cf. *dorsalis*)
- 9 Moostierchenkolonie (*Reteporella hippocrepes*)
- 10 Flohkrebs (*Anchiphimedia* cf. *dorsalis*)
- 11 Asse (*Dolichiscus* cf. *meridionalis*)

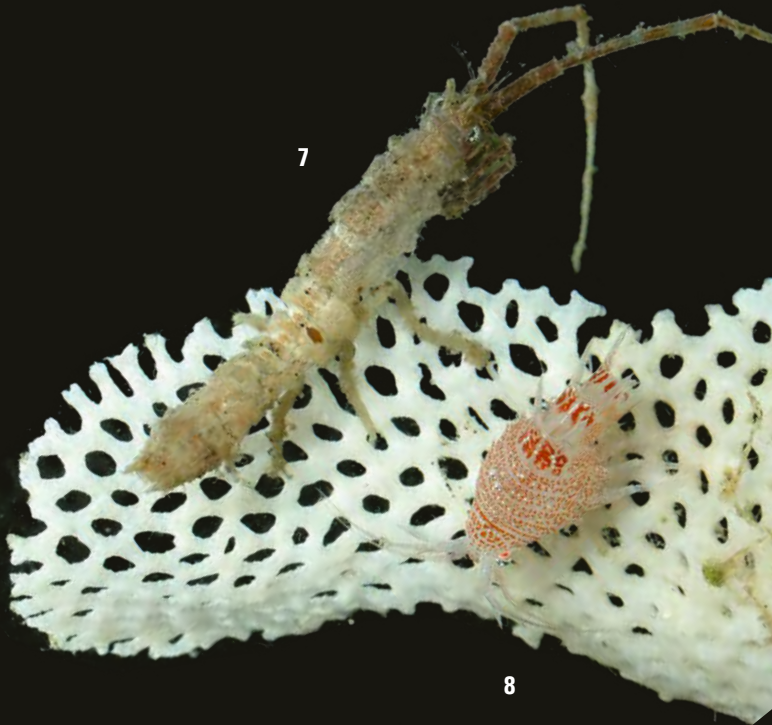




1



6



7

9

8



10



11

Meerestiefe fest – und irrte damit gewaltig: »Jacques Piccard und Don Walsh haben mit ihrem Tauchboot Trieste in den 1960er Jahren sogar in den Tiefseeegräben in einer Tiefe von 6000 bis 11000 Metern Leben gefunden«, so Brandt. Die Zoologin hat sich auf die Erforschung der Makrofauna in der Tiefsee und den Polregionen spezialisiert – also der Tiere mit einer Größe von zwischen einem halben und zehn Millimetern, wie Asseln, Flohkrebse, Schnecken, Muscheln und Ringelwürmer. Sie hält regelmäßig öffentliche Vorträge über ihre Arbeit und erzählt dort unter anderem, wie wichtig die Tief-

see für unser Klima und deren Biodiversität für das Wohlergehen der Menschheit ist. So ist die Tiefsee für 80 Prozent des globalen Wärmehaushalts und 50 Prozent der globalen Sauerstoffproduktion verantwortlich. Zusätzlich hat sie eine Pufferfunktion für das Klimagas CO₂ aus der Atmosphäre und spielt eine wichtige Rolle für unseren Klimahaushalt sowie den Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf.

Vor allem beherbergt die Tiefsee geschätzt zwischen 50 und 80 Prozent aller auf der Erde vorkommenden Arten. »Die Tiefsee ist ein riesiger Lebensraum«, sagt Brandt und verdeutlicht das in Zahlen. Mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt, etwa 70 Prozent unseres Planeten gehören zur Tiefsee. »Davon wiederum kennen wir ein Areal, das so groß ist wie zwei Fußballfelder im Vergleich zu der gesamten Landmasse der Erde«, zitiert die Meeresforscherin den verstorbenen Tiefseeforscher John Gage aus Oban in Schottland.

Geschätzt warten noch zehn Millionen Arten in diesem riesigen Lebensraum auf ihre Entdeckung. »Unser Wissen über die Tiefseefauna ist äußerst lückenhaft«, bedauert Brandt. »Ungefähr 99 Prozent aller online verfügbaren Nachweise über das Vorkommen von Meerestieren stammen aus Tiefen bis 200 Meter.« Die größten Ökosysteme der Welt sind aber die abyssalen Ebenen, die in einer Tiefe von 3500 bis 6000 Meter liegen (vom griechischen Wort *abyssos* für »das Bodenlose«). Tiefer geht es dann nur noch in den Tiefseeegräben, die bis 11000 Meter tief sein können. »Nur 0,1 Prozent unseres Wissens stammt aus diesem

Lebensraum unterhalb von 4000 Metern«, so Brandt.

Unbekannt und doch bedroht

Alle, auch die noch unerforschten Lebensgemeinschaften der Tiefsee sind durch Klimawandel und Meeresverschmutzung massiv bedroht. Die globale Erwärmung erreicht mit Verzögerung auch die Meere: Das von der Atmosphäre eingetragene CO₂ wird im Wasser zu Kohlensäure und führt zur Ozeanversauerung, die Organismen wie Schnecken, Muscheln und Korallen den Aufbau ihrer Kalkschalen erschwert. Hinzu kommt die Umweltverschmutzung durch Abfälle: Erst kürzlich hat Brandt mit Kolleginnen und Kollegen die Mikroplastikbelastung der Tiefsee untersucht – mit alarmierendem Ergebnis. Selbst in einer Tiefe von 9600 Metern wurde noch Mikroplastik gefunden. »Wir kennen dort die Fauna noch nicht, aber der Mensch hat bereits Spuren hinterlassen.«

Wertvolle Bodenschätze wie Manganknollen, Methanhydrat, Erdöl und Gas als fossile Energiequellen oder Seltene Erden für die Produktion von Computern und Solarzellen machen die Tiefsee außerdem attraktiv für den Bergbau. »Die Tiefsee ist aber nicht nur das größte und älteste Ökosystem der Welt, sondern auch das, welches am empfindlichsten auf Störungen reagiert«, weiß die Senckenbergforscherin und berichtet von Studien, die zeigen, dass sich die dortigen Lebensgemeinschaften nach dem Abbau von Rohstoffen nur sehr langsam erholen. »Wir verzeichnen in der Tiefsee aktuell einen großen Biodiversitätsverlust. Vor diesem Hintergrund ist es unsere Aufgabe, die dort vorkommenden Arten zu entdecken, zu beschreiben und auch zu beschützen.«

Forschung als logistische Herausforderung

Allerdings ist Tiefseeforschung logistisch enorm aufwendig und zudem teuer. Denn Proben vom Meeresboden zu holen, funktioniert nur mit hohem apparativem Aufwand. »Ein Tag auf dem Forschungsschiff ›Sonne‹ kostet beispielsweise etwa 50000 Euro«, verdeutlicht Brandt die Dimension. »In 8000 bis 9000 Metern Tiefe kann die Probennahme bis zu zwölf Stunden dauern. Eine einzelne Probe kostet dann 25000 Euro.«

Je nach wissenschaftlicher Fragestellung setzen die Forscher unterschiedliche Geräte für die Probennahme ein. Der Epibenthoschleppnetz schleppt beispielsweise zwei Netze über den Boden und sammelt damit kleine wirbellose Tiere wie Asseln und Flohkrebse, die auf dem Meeresboden leben oder direkt darüber schwimmen. Kleine Tiere wie Fadenwürmer, Ruderfußkrebse, Muschelkrebse, Hakenrüssler, Bärtierchen und Bauchhärlinge leben meist im



ZUR PERSON

Angelika Brandt, Jahrgang 1961, ist seit April 2017 am Senckenberg Forschungszentrum Standort Frankfurt Leiterin der Abteilung Marine Zoologie und Direktionsmitglied der Senckenberg Gesellschaft. Gleichzeitig ist sie an der Goethe-Universität Professorin für Spezielle Zoologie. Zuvor war Angelika Brandt 22 Jahre Professorin an der Universität Hamburg und leitete von September 2004 bis Oktober 2009 das Zoologische Museum der Universität. Sie erforscht die Biodiversität der Makrofauna in der Tiefsee und in den Polarregionen. Dabei hat sie sich insbesondere auf die Gruppe der Meeresasseln spezialisiert. Für ihre Forschung hat sie bislang an 30 Schiffs-Expeditionen teilgenommen, davon mehrfach in leitender Funktion.

angelika.brandt@senckenberg.de

Sediment, das mit dem Multicorer, einem Sedimentgreifer mit vielen Plexiglasrohren, ausgestanzt werden kann. Der Großkastengreifer stanzt größere Sedimentstücke aus und fördert damit ebenfalls unter anderem Krebse, Muscheln und Borstenwürmer zutage. Für größere Tiere – also Schwämme, Seesterne, Seegurken, Schnecken, Seeigel, Schlangensterne und Fische – kommt das Agassiz-Trawl zum Einsatz. Dabei handelt es sich um einen Metallschlitten mit einem Schleppnetz mit zehn Millimeter Maschenweite, das den Meeresboden absammelt.

Da die Organismen an die Bedingungen in der Tiefsee angepasst sind, versuchen die Forscher diese Bedingungen während der Probenahme konstant zu halten. Dazu wird das kalte Tiefenwasser konsequent gekühlt. An Bord befinden sich Gefrierschränke, um wertvolle Proben bei minus 20 Grad Celsius oder – nach vorheriger Fixierung in minus 20 Grad kaltem Ethanol – bei minus 80 Grad einzufrieren. Nach Beendigung der Expedition werden die Proben in Minus-21-Grad-Gefriercontainern in die Heimatlabore verschickt.

Von der Bestandsaufnahme zur Artbeschreibung

Wenn die kostbare Probe an Bord ist, machen die Forscher erst einmal eine gründliche Bestandsaufnahme. Dazu schauen sie sich jedes einzelne Lebewesen unter einem Vergrößerungsglas (Binokular) oder dem Mikroskop an und fotografieren es, um die natürliche Färbung zu dokumentieren. Durch genetische Analysen können sie Verwandtschaftsverhältnisse und die geographische Verbreitung von Arten bestimmen. »Von den auf so einer Expedition gefundenen Arten sind oft 90 Prozent unbekannt«, ist Brandt begeistert. »Im Jahre 2015 kannte man etwa 52 Arten von Meeresasseln im Ochotskischen Meer. Während unserer Expedition ›Sea of Okhotsk Biodiversity Studies‹ mit dem Forschungsschiff ›Akademik M. A. Lavrentjev‹ haben wir allein beim Sortieren an Bord mehr als 1000 neue Arten entdeckt.« Die gerade abgeschlossene Forschungsfahrt AleutBio (Aleutian Biodiversity Studies) mit dem Forschungsschiff »Sonne« (SO293) brachte interessanterweise ebenfalls bereits knapp 1000 Arten an Deck, davon einige, die auch im Kurilen-Kamtschatka-Graben in 3000 Kilometer Entfernung vorkommen. Die wenige Millimeter großen Krebstiere sind in den Tiefseeegräben demnach weitverbreitet. »Unsere Proben zeigen jedes Mal nur einen winzigen Ausschnitt der Tiefseefauna«, so die Tiefseeforscherin. »Da ist es unwahrscheinlich spannend, wenn wir heute Arten finden, die frühere Expeditionen an der gleichen Stelle oder auch sehr weit entfernt gefunden haben.«

Besonders interessante Arten werden im Labor in Frankfurt detailliert beschrieben. Dazu



setzen die Forscher moderne bildgebende Verfahren wie die Licht-, Rasterelektronen- und die konfokale Lasermikroskopie ein. Neue Arten werden außerdem mit einem unverwechselbaren genetischen Barcode – einer Art Strichcode, der sich aus der Abfolge der Basenpaare eines Markergens ergibt – versehen oder genomisch untersucht. Das Exemplar der Erstbeschreibung einer neuen Art wird als Typus-exemplar in der wissenschaftlichen Sammlung hinterlegt, wo auch zukünftige Generationen darauf Zugriff haben. Denn: Nur das Typusobjekt selbst kann zweifelsfrei Auskunft über die Art geben.

Brandt ist überzeugt, dass wissenschaftlichen Sammlungen zukünftig eine noch größere Bedeutung zukommen wird. Denn internationale Abkommen wie das Nagoya-Protokoll wollen eine gerechte Aufteilung der Vorteile erzielen, die sich aus der Nutzung genetischer Ressourcen ergeben. Dadurch erschweren sie es jedoch zunehmend, Sammlungsgenehmigungen zu erhalten. »Hinzu kommt, dass wir, um die Biodiversität zu schützen, immer nichtinvasiver arbeiten müssen. Daher müssen wir auch verstärkt die Arten beforschen, die bereits in wissenschaftlichen Sammlungen lagern.«

Im Moment wird Brandts Forschung außerdem massiv durch den Ukrainekrieg beeinträchtigt. Denn viele Expeditionen, insbesondere ins Ochotskische Meer im Nordwestpazifik oder in den Kurilen-Kamtschatka-Graben, wurden bislang in Kooperation mit russischen Forscherinnen und Forschern durchgeführt. »Wir hatten eine unglaublich gute Zusammenarbeit mit unseren russischen Kollegen. Seit Kriegsausbruch ist keine Zusammenarbeit mehr möglich, und wir können auch nicht mehr vor Ort arbeiten«, bedauert Brandt. Dabei drängt die Zeit. »Schon jetzt laufen wir Gefahr, dass in der Tiefsee, der großen Unbekannten, Arten aussterben, die noch gar nicht entdeckt wurden.« ●

Das deutsche Forschungsschiff »Sonne« verfügt unter anderem über starke Kräne, mit denen die tonnenschweren Tiefseeroboter ins Wasser gelassen werden können.



Die Autorin

Dr. Larissa Tetsch hat Biologie studiert und in Mikrobiologie promoviert. Anschließend war sie in der Grundlagenforschung und später in der Mediziner- und Medizinerjournalistin und seit 2015 arbeitet sie als freie Wissenschafts- und Medizinerjournalistin und betreut zusätzlich als verantwortliche Redakteurin das Wissenschaftsmagazin »Biologie in unserer Zeit«.

www.larissa-tetsch.de

VIRTUELLE WELTEN

f 1 4 8 a 7
9 7 6))
f 1 4 8 a 2
5 f 6 0 (4
c 2 6 7 0 9
4 7 9) f
e 8 2 8 8 4
e e . 9 0
e 8 2 8 8
e 8 2 8 8 4
e 0 0 C r a h

Das Paralleluniversum unserer Daten

Es geht um Werbung, Betrug oder die Optimierung von Geschäftsmodellen: Verbraucherdaten sind ein kostbares Gut, das Kreditgeber und Versicherer genauso interessiert wie Händler und Kriminelle.

Kai Rannenberg, Professor für Mobile Business & Multilateral Security an der Goethe-Universität, forscht zur Cybersicherheit.

Dirk Frank hat mit dem Wirtschaftsinformatiker über Datenschutz, Hackerangriffe und das Auto als »Handy auf Rädern« gesprochen.

Dirk Frank: Herr Professor Rannenberg, wir sprechen heute virtuell miteinander, über ein gängiges Konferenzttool, und da sind wir quasi schon mittendrin im Thema Datenschutz und Datensicherheit, oder?

Kai Rannenberg: Sie haben einiges anklicken müssen, um der Aufzeichnung unseres Gesprächs zuzustimmen. Das folgt den EU-weiten Regeln der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO). Viele Konferenzsysteme machen ihren Nutzerinnen und Nutzern nicht in gleicher Weise klar, was wie aufgezeichnet wird. Vielfach werden die Daten auch nicht wie bei diesem System in Europa, also im Schutzbereich der DSGVO, verarbeitet und gespeichert, sondern anderswo – »irgendwo in der Cloud«. Oder es bleibt unklar, wer Zugriff auf die Daten hat, weil die Verwaltung der Systeme von außerhalb Europas erfolgt beziehungsweise gar nicht klar ist, wo die Systeme verwaltet werden. Das Projekt CyberSec4Europe hat mit dem BigBlueButton-Server des Projektpartners TU Delft, den wir gerade für die Aufzeichnung nutzen, schon sehr schnell nach Beginn der Pandemie gezeigt, dass man einen leistungsfähigen Konferenzserver in Europa zu-

verlässig, mit Open-Source-Software und nach den Regeln der DSGVO betreiben kann – für Besprechungen, große öffentliche Konferenzen, die Lehre und sogar für offizielle Projektbegutachtungen. Das hat uns auch für die Nutzung des inzwischen an der Goethe-Universität aufgebauten BigBlueButton-Servers geholfen. Insgesamt war diese Aktivität für den Datenschutz wie auch die Cybersicherheit wichtig, denn natürlich leisten auch Web-Konferenzsysteme einen wesentlichen Beitrag oder Nichtbeitrag zur Cybersicherheit und damit zur digitalen Souveränität.

Spätestens seit der Coronapandemie haben viele im Beruf damit zu tun, vorher war das wahrscheinlich eher auf einen kleineren Nutzerkreis beschränkt.

Wir haben in Hessen einen sehr wachen Datenschutzbeauftragten. Der hat den hessischen Ausbildungsinstitutionen, speziell den Schulen, vorgeschrieben, mit Systemen zu arbeiten, bei denen man weiß, wo die Daten liegen und dass sie garantiert im Bereich der Datenschutzgrundverordnung bleiben. Ein Anbieter etwa in Frankreich oder Dänemark kann

okay sein. Aber die Daten zum Beispiel nach China zu übermitteln, wo rechtsstaatliche Grundsätze nicht in unserem Sinne gelten und die Einhaltung der DSGVO unterstützen, wäre untersagt.

Wie gehen Sie denn damit um, wenn Sie mit Kolleginnen und Kollegen aus den USA konferieren?

Wenn ich mit Kolleginnen und Kollegen in den USA spreche, dann kann ich sie in unser Konferenzsystem einladen. Dabei müssen sie aus den USA über einen Weg dahin gelangen; dieser Weg ist natürlich genauso sicher oder unsicher wie das, was sie in den USA eben vorfinden. Es geht bei den Diskussionen, die in diesem Zusammenhang geführt werden, nicht darum, zu behaupten, dass es keine Rechtsstaatlichkeit in den USA gäbe. Tatsache ist aber, dass eine spezielle Regulierung in den USA existiert, die Dienstanbieter dazu verpflichtet, Abhörmaßnahmen aus Gründen der nationalen Sicherheit zuzulassen, ohne die Kunden darüber zu informieren. Dagegen wurde in den USA geklagt, auch mit Blick auf den damit verbundenen Wettbewerbsnachteil, bislang aber

ohne Erfolg. Die Vorbildfunktion, die Europa beim Thema Datenschutz und Datensicherheit mithilfe zum Beispiel der DSGVO einnimmt, hat natürlich auch den Vorteil, dass sich Firmen und Organisationen weltweit darauf berufen können. Diese europäische Regulierung hat geradezu eine Nachahmungsbewegung bewirkt. In Indien etwa hat man verstanden, dass die Einhaltung der einschlägigen Regeln eine wesentliche Voraussetzung ist, um am europäischen Markt erfolgreich sein zu können.

Wenn man momentan über das Thema Cybersicherheit spricht, kommt man am Krieg gegen die Ukraine nicht vorbei. Man denkt dann natürlich vor allem an Cyberattacken auf die sogenannte Kritische Infrastruktur. Wird dadurch nicht vielleicht auch übersehen, dass Datensicherheit und Datenschutz auch schon in unserer alltäglichen IT-Nutzung eine Rolle spielen?

Angriffe auf Kritische Infrastrukturen hatten wir schon vor dem Krieg, zum Beispiel auf den Deutschen Bundestag, auf Energieversorger, auf Universitäten in Gießen und Berlin, auch auf die Stadt Potsdam. Nach dem, was wir von Kolleginnen und Kollegen aus der Ukraine wissen, ist die Furcht vor Angriffen auf die Kritische Infrastruktur gegenwärtig oft größer als die vor Ausspähung im Internet oder in Mobilfunknetzen, weil die Schäden der Angriffe auf die Kritische Infrastruktur unmittelbarer sind. Aber immer mehr Menschen dort wissen nun auch, dass das eine das andere ermöglicht. Wie weit sich dieser Zusammenhang inzwischen bei uns herumgesprochen hat, ist eine interessante Frage.



Prof. Kai Rannenberg

Cybersicherheit für Europa

CyberSec4Europe als Pilot für das »European Cybersecurity Competence Centre and Network (ECCC)« entwirft, testet und demonstriert Governance-Strukturen für das ECCC und nutzt dabei Best-Practice-Beispiele, das Wissen und die Erfahrung der 42 Partner. Gleichzeitig arbeitet CyberSec4Europe an sicheren Softwarekomponenten, die Lücken in der Forschung schließen und mit den realen Anwendungsfällen verknüpft sind, etwa in den vertikalen Sektoren digitale Infrastruktur, Finanzen, Behörden und intelligente Städte, Gesundheitswesen und Transport.

Das langfristige Ziel von CyberSec4Europe ist eine Europäische Union, die über alle erforderlichen Fähigkeiten verfügt, um ihre demokratische Gesellschaft zu sichern und aufrechtzuerhalten, die im Einklang mit den europäischen Verfassungswerten lebt, zum Beispiel in Bezug auf den Schutz der Privatsphäre und die Nutzung von Daten, und die eine weltweit führende digitale Wirtschaft hat.

Auf www.CyberSec4Europe.eu/our-results/books finden sich zwei E-Books, die die Ergebnisse leicht lesbar zusammenfassen.

Wir haben seit vielen Jahren eine Vielzahl von Apps zur Verfügung, die größtenteils kostenfrei angeboten werden. Aber natürlich zahlt man auch mit seinen Daten. Fehlt hier noch das nötige Bewusstsein?

Ja, leider. Manchmal wird es auch leichtsinnigen Nutzerinnen und Nutzern bewusst, dann aber oft auf schockierende Weise. Es gab einen Aufschrei, als bekannt wurde, dass Cambridge Analytica auf Daten von Facebook Zugriff hatte. Und zwar sowohl auf Daten, die auf dem Facebook-Server lagen, als auch auf Daten, die mit der Facebook-App gesammelt wurden.

Aber auch in »erwachsenen« Lebens- und Konsumwelten kommen Apps massenhaft zum Einsatz, man denke nur an Autos.

Das Auto ist inzwischen im Prinzip auch ein Handy auf Rädern. Im Auto lassen

sich natürlich noch viel mehr Informationen einsammeln: Wie reagiert die Fahrerin oder der Fahrer auf Stress, wie wird beschleunigt, wie gebremst et cetera. Die Bewegungsprofile der Personen, die bei Handys auch schon existieren, werden noch greifbarer, wenn man mit dem Auto unterwegs ist. Die Wochenzeitung »Die Zeit« hat einmal eine Website aufgesetzt, die die Bewegungsdaten des Politikers Malte Spitz für einen Zeitraum von sechs Monaten aufzeigt. Der hatte sich von der Telekom seine Handy-Ortungsdaten geben lassen. Auf der Website kann man sehr präzise sehen, wo sich Spitz aufgehalten hat, weil auch die Funkzellengrößen mit in die Animation eingearbeitet wurden. Das hat viele Menschen durchaus aufmerken lassen. Wir erwähnen es auch in unseren Vorlesungen, damit auch unsere Studierenden ein Verständnis dafür bekommen, was digitale Infrastrukturen bereits erfassen.

An Ihrem Lehrstuhl wurde vor einigen Jahren eine App entwickelt, die Datenschutzrisiken aufgespürt hat, um damit den Nutzerinnen und Nutzern die Kontrolle über das Verhalten ihrer Apps zurückzugeben.

Diese App hat es damals auch in die Tagespresse geschafft, speziell wegen der Erkenntnisse bezüglich der Sport-Apps. Diese erfassen über zusätzliche Sensoren, etwa an Armbändern, Körperfunktionen. Mehr Aufklärung ist in solchen Fällen sinnvoll: Datenschutz ist wie Zähneputzen. Es ist unbequem, nicht gerade sexy, manchmal tut es sogar weh, aber es

zahlt sich langfristig aus. Es gibt wiederum die weitverbreitete Aussage »Ich habe nichts zu verbergen.« Eigentlich hat doch jeder etwas zu verbergen, weil jeder Schwächen hat, die, wenn sie in einem bestimmten Moment zugänglich sind, von Nachteil sein können. Die Freigabe von Daten ist natürlich auch eine Sache der Abwägung. Wenn ich zum Beispiel dringend Hilfe holen muss, dann ist die Tatsache, dass ich dabei geortet werden kann, nicht unbedingt mein größtes Problem.

Die SCHUFA hat jüngst betont, dass sie keine Daten aus Social Networks verarbeitet.

Das haben sie aber erst unter öffentlichem Druck bekannt gegeben. Wir wissen auch nicht, wie das bei allen anderen Kreditauswertungsunternehmen aussieht. Versicherungen sind natürlich sehr interessiert, alle möglichen Daten zu erfahren. Sie können, wenn Sie mehr Daten von sich preisgeben, Ihre Auto-Haftpflichtversicherung zu einem günstigeren Tarif abschließen. Manche Leute sagen, das widerspreche eigentlich dem Versicherungsgedanken, wonach man für eine Schwäche eben nicht abgestraft werden dürfte. Wenn einem diese Art Datenhandel angeboten wird, muss man sich der Tatsache bewusst sein, dass man der kleinere Partner ist. Beim europäischen Verband der Verbraucherschützer gibt es dafür eine eigene Abteilung, die sich um Datenschutz kümmert, und zwar speziell in Haushaltsgegenständen beziehungsweise in den Dienstleistungen, die Verbraucherinnen und Verbraucher ganz normal verwenden. Das kann zum Beispiel Spielzeug sein: Beim sogenannten Internet der Dinge sind die Geräte mit dem Internet verbunden. Spielzeuge sind damit Cloud-Endpunkte, aber darüber werden die Kunden nicht ausreichend informiert, gerade bei den Billiggeräten.

Anfang Dezember gab es den »Momentum CyberSec4EuropeSummit Event« in Brüssel. Worum ging es dabei?

Bei einigen Pilotprojekten zum Thema Cybersicherheit ging es bisher um Hochsicherheitsanwendungen im militärischen Bereich. Wir haben uns in unserem Projekt CyberSec4Europe aber auch gezielt Anwendungen vorgenommen und sie-

ben Anwendungsbereiche adressiert: den Austausch medizinischer Daten, auch weil sich mehr und mehr Therapien darauf beziehen; das elektronische Einkufen; Bankdaten, speziell das Thema »ich und mein Girokonto«; den Bereich Ausbildung und Zertifizierung von Ausbildungsleistungen beziehungsweise Zulassung zu Ausbildungsinstitutionen. Zwei

men von Smart-Manufacturing erstellt. Dann geht es ja damit los, dass erstmal Ihr Kopf vermessen werden muss, und alle möglichen personenbezogenen Daten inklusive der Fehler, die Ihre Zähne schon hatten, müssen an den Gebissfertiger übermittelt werden. Anhand der genannten Anwendungsbereiche sieht man, dass die europäischen Werte



weitere, ebenfalls im zivilen Bereich, aber nicht direkt mit Relevanz für einzelne Bürgerinnen und Bürger, sind der Schutz von maritimen Infrastrukturen, speziell die Kommunikation zwischen Häfen und Schiffen, und das Thema digitale Wertschöpfungsketten in der Produktion. Diese Wertschöpfungsketten werden ja immer länger, daher müssen die Beteiligten einander vertrauen können. Der siebte Bereich sind dann die Smart Cities; in den Städten kommt bekanntlich immer mehr Digitalisierungstechnik in vielfältigsten Anwendungsszenarien zum Einsatz.

Sie wurden im Vorfeld der Veranstaltung folgendermaßen zitiert: »Cybersicherheit muss mit europäischen Werten wie Freiheit und Respekt für jeden Einzelnen sowie dem Schutz der am meisten gefährdeten Personen verbunden bleiben.«

Stellen Sie sich vor: Ihr neues Gebiss wird irgendwo in Einzelfertigung automatisiert oder semiautomatisiert im Rah-

nicht nur abstrakt behandelt werden, sondern mit Blick auf Menschen im Alltag. Wie läuft das bei »normalen« Menschen, was passiert denen eigentlich gerade? Natürlich hat ein Gebissproduzent ein Interesse daran, die Gebisse präzise zu fertigen, sonst kann er sie am Ende nicht verkaufen. Aber es gibt die Versuchung, die sehr persönlichen Daten der Kundinnen und Kunden auch für andere Dinge zu verwenden. Wichtig ist, dass die Menschen darüber nicht nur entscheiden, sondern auch darauf vertrauen können, dass ihre Entscheidungen von den Lieferantinnen und Lieferanten respektiert und verlässlich technisch umgesetzt werden.

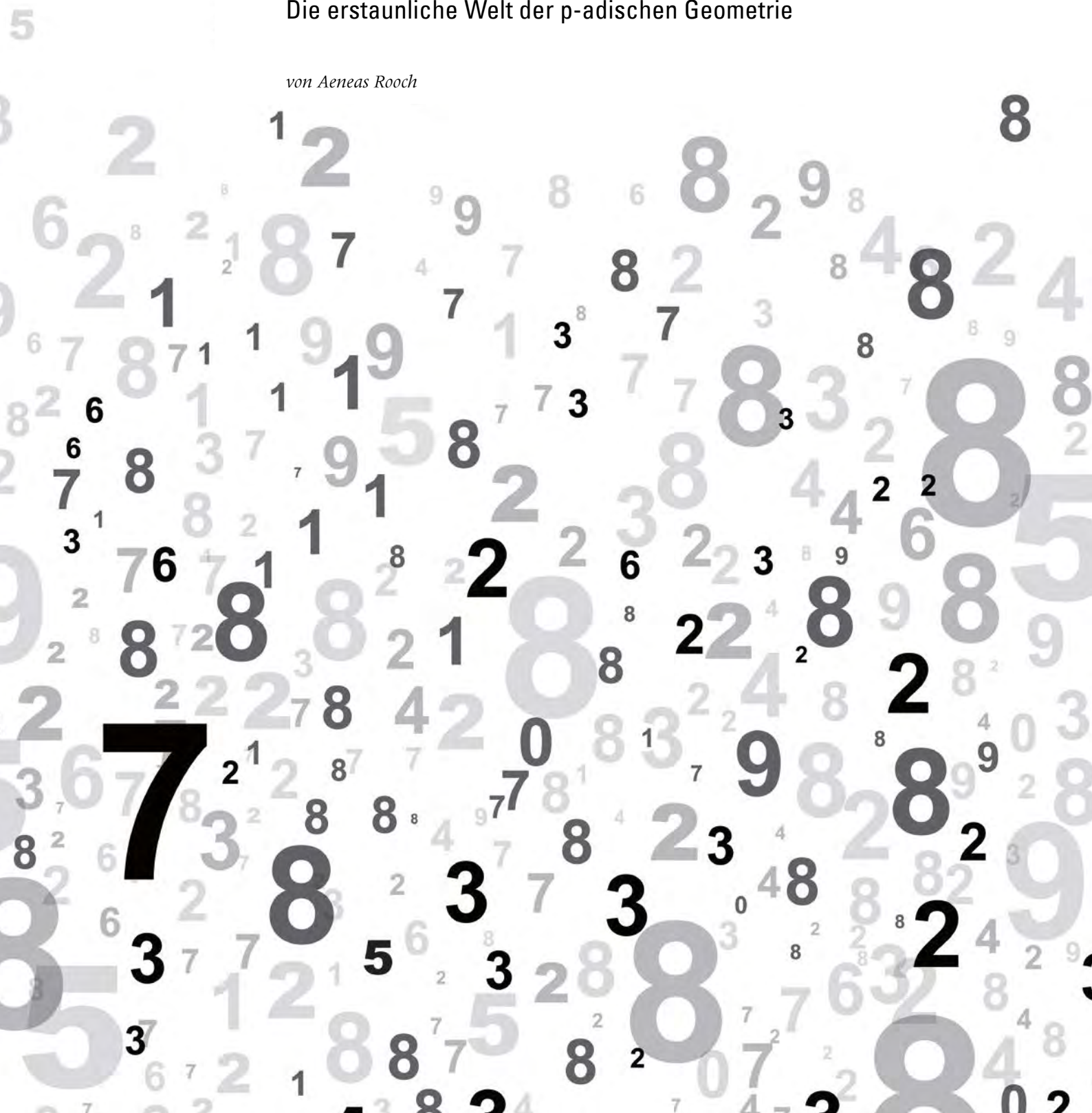
Dr. Dirk Frank arbeitet als Pressereferent an der Goethe-Universität.

frank@pww.uni-frankfurt.de

Ein Kreis mit unendlich vielen Mittelpunkten

Die erstaunliche Welt der p-adischen Geometrie

von Aeneas Roach



Die Welt, die Annette Werner untersucht, erscheint uns fremd, fast schon absurd: Verschiedene Zahlen haben hier die gleiche Größe, und Kreise besitzen unendlich viele Mittelpunkte.

Die Mathematikprofessorin forscht auf dem Gebiet der sogenannten p-adischen Geometrie – einem Bereich der modernen Algebra, der in den letzten Jahrzehnten einen stürmischen Fortschritt erlebt hat.

Wenn wir jemandem mitteilen wollen, wie weit ein Ort von einem anderen entfernt liegt, können wir das auf verschiedene Arten tun: Wir können zum Beispiel die Luftlinie in Kilometern nennen, in Yard oder in Lichtjahren. Wir können aber auch angeben, wie lange der Weg zu Fuß dauert, mit dem Auto oder mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Je nachdem, welche Messweise und welche Einheit wir wählen, erhalten wir unterschiedliche Werte für den fraglichen Abstand. Es kann sogar passieren, dass wir diese Werte nicht einmal intuitiv ineinander umrechnen können, weil sich die Messsysteme grundlegend unterscheiden. So können zwei Orte bloß wenige Kilometer voneinander entfernt liegen, trotzdem dauert die Reise mit Bus und Bahn aber eine Ewigkeit – in einem solchen Fall ist die Entfernung in Kilometern klein, während sie gemessen mit dem ÖPNV groß ist. Jede einzelne Messart jedoch – ob nun Luftlinie, Straßenstrecke, Fußweg oder Reisedauer per ÖPNV – funktioniert und ist legitim.

Eine ungewohnte, aber ebenso plausible und konsistente Art, Abstände zu messen, steht am Anfang von Annette Werners Forschung. »Ich nehme sozusagen bloß ein anderes Lineal«, sagt sie lapidar, dabei ändert ihre Art zu messen den Charakter der ganzen Welt, die sie vermisst. Das mag dramatisch klingen, es ist aber ganz normal: Eine andere Methode, Abstände zu beziffern, liefert halt auch andere Konzepte von »nah« (kleiner Abstand) und »fern« (großer Abstand), siehe die unterschiedlichen Entfernungen bei den Messmethoden »Luftlinie« und »ÖPNV« – und was man jeweils unter »nah« und »fern« versteht, macht den Charakter eines Raumes wesentlich aus. Das Lineal, das Annette Werner in der Mathematik benutzt, um die

Größe von Zahlen zu messen – und das die Zahlenwelt für Außenstehende so ungewohnt und fremd erscheinen lässt –, basiert auf der Primfaktorzerlegung.

Jede natürliche Zahl kann eindeutig in Potenzen von Primzahlen zerlegt werden, zum Beispiel:

$$30 = 2 \cdot 3 \cdot 5$$

$$33 = 3 \cdot 11$$

$$36 = 2^2 \cdot 3^2$$

$$75 = 3 \cdot 5^2$$

$$76 = 2^2 \cdot 19$$

Diese Primfaktorzerlegung kann nun auch zur Größenmessung herangezogen werden. Anstatt den gewöhnlichen Betrag der Zahl zu nehmen (das ist sozusagen das Standardlineal, mit dem Zahlen üblicherweise vermessen werden), schaut man auf ihre Zerlegung und ignoriert alle bis auf einen bestimmten Faktor, der p genannt wird, etwa $p = 3$ oder $p = 907$ oder einen anderen. Der Kehrwert der Potenz dieses Faktors p in der Primfaktorzerlegung einer Zahl ist der sogenannte p-adische Betrag der Zahl. Man schreibt also einfach p so oft in den Nenner, wie diese Primzahl als Faktor in der Prim-

faktorzerlegung auftritt. Es ist ein simples Konzept. Berechnen wir schnell den p-adischen Betrag der obigen Zahlen für den Fall, dass wir $p = 5$ festhalten:

$|30| = 1/5$
(weil 5 als Primfaktor genau einmal vorkommt)

$|33| = 1$
(weil 5 als Primfaktor nullmal vorkommt, und $5^0 = 1$)

$|36| = 1$
(ebenso)

$|75| = 1/5^2 = 1/25$
(weil 5 als Primfaktor genau zweimal vorkommt)

$|76| = 1$ (s.o.)
Halten wir die Primzahl $p = 3$ fest, sind die p-adischen Beträge der obigen Zahlen:

$|30| = 1/3$

$|33| = 1/3$

$|36| = 1/3^2 = 1/9$

$|75| = 1/3$

$|76| = 1$

Diese Art, die Größe einer Zahl zu messen, wirkt skurril: Halten wir beispielsweise $p = 3$ fest, so sind die Zahlen 30, 33 und 75 gleich groß, und 36 ist kleiner als 33. Das alles widerspricht unserem Gefühl für Zahlen und Größen. Davon abgesehen aber sei am p-adischen Betrag überhaupt nichts seltsam, im Gegenteil, erläutert Annette Werner: »Man kann zeigen, dass der p-adische Betrag im Prinzip genau wie unser

Alltagsabstand funktioniert.« Das bedeutet, es ist eine technisch widerspruchsfreie Methode, die zusätzlich bestimmte Voraussetzungen erfüllt, die für die Messung einer Länge sinnvoll sind. Im Kern also funktioniert der p-adische Betrag genauso wie andere Verfahren zur Längenmessung. »Die meisten Leute sind mit dem gewöhnlichen Lineal zufrieden«, schmunzelt Werner, »aber wir Mathematiker eben nicht. Das zeigt sehr schön, wie wir denken. Wir fragen uns, was allgemein hinter dem Prinzip ›Abstand‹ und ›Lineal‹ steckt und was die Mechanismen sind, die alle Lineale und Abstände gemeinsam haben.«

Das Konzept des p-adischen Betrags, also die Größe einer Zahl durch einen ihrer Primfaktoren p anzugeben, funktioniert nicht nur für natürliche Zahlen, sondern lässt sich auch auf Brüche ausweiten. Dabei spielt es übrigens keine Rolle, welches p man in Gedanken festhält, weil jede Wahl eines konkreten p zu einer Welt führt, die nach den gleichen Gesetzen funktioniert. »Es ergibt überhaupt keinen Sinn, sich zum Beispiel nur $p = 17$ anzuschauen«, erläutert Annette Werner, »alle p sind für uns gleich.« Deshalb spricht man auch von »p-adischen« Zahlen und Beträgen, mit einem anonymen p statt einer konkreten Zahl: Die Struktur der Zahlen und der Beträge bleibt die gleiche, ganz egal, ob nun $p = 11$ oder $p = 599$ oder eine andere Primzahl gewählt wird. Mathematikerinnen und Mathematiker schauen nicht auf konkrete Situationen, sondern auf alle Fälle zugleich – indem sie ein flexibles p als Platzhalter stehen lassen.

Es gibt in der p-adischen Welt noch mehr als eine Entsprechung unserer altbekannten Brüche: Genau so, wie die Lücken zwischen unseren klassischen Brüchen von irrationalen Zahlen wie π , e oder $\sqrt{2}$ gefüllt werden, lassen sich auch die Lücken zwischen den p-adischen Brüchen stopfen, so dass eine dichte Zahlengerade entsteht, ganz ähnlich den reellen Zahlen – nur dass es hier halt etwas andere Zahlen sind und Abstände hier anders beziffert werden.

Von diesen neuen Zahlen und Abständen aus gelangt man nun zum Fachgebiet von Annette Werner, der p-adischen Geometrie, indem man diese neuen Zahlen als Grundlage für geometrische Konzepte verwendet. In einem ersten Schritt kann man etwa Gleichungen analysieren und die Figuren untersuchen, die die Lösungen der Gleichungen liefern, ganz genau so, wie man es bei den herkömmlichen reellen Zahlen auch tut. Die reelle Gleichung $x = y$ wird etwa von allen Punkten (x, y) im zweidimensionalen Koordinatensystem gelöst, bei denen x und y identisch sind; diese Lösungspunkte bilden eine Gerade. Die Gleichung $x^2 + y^2 = 1$ hingegen liefert einen Kreis. Zu untersuchen, welche



ZUR PERSON

Annette Werner, Jahrgang 1966, studierte Germanistik, Musikwissenschaften und Publizistik an der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster, bevor sie ihr Interesse für Mathematik entdeckte. Nach ihrer Promotion arbeitete sie am MPI für Mathematik in Bonn und war Professorin an der Universität Siegen und der Universität Stuttgart, bevor sie 2007 eine W3-Professur an der Goethe-Universität antrat. Sie erhielt ein Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und war Gastprofessorin am Mathematical Sciences Research Institute in Berkeley, Kalifornien. Ihre Arbeitsgebiete sind arithmetische algebraische Geometrie, nichtarchimedische analytische Geometrie und tropische Geometrie. Annette Werner ist Mutter zweier erwachsener Kinder und Principal Investigator im SFB/Transregio 326 »Geometry and Arithmetic of Uniformized Structures«.

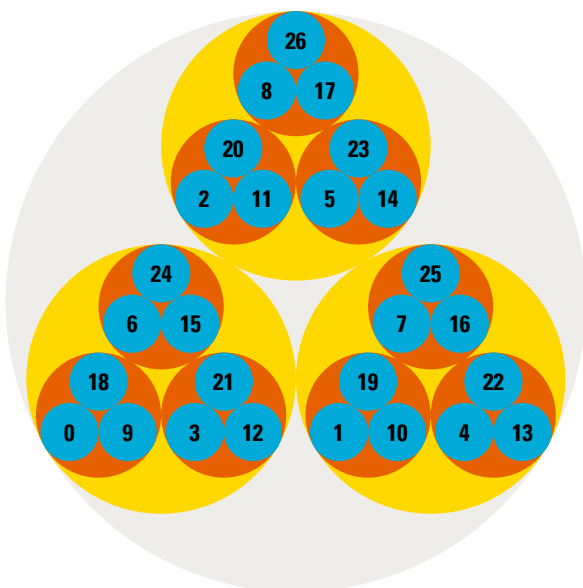
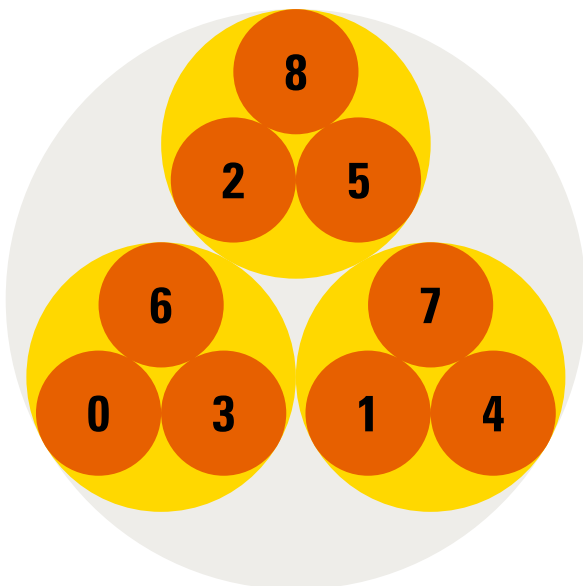
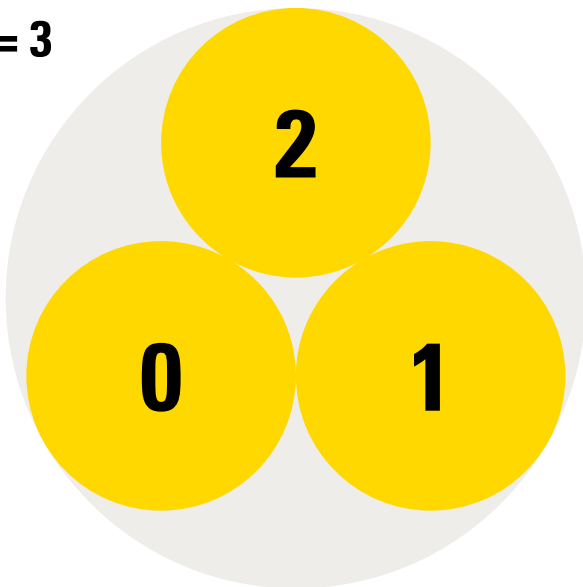
werner@math.uni-frankfurt.de

Gleichungen welche Figuren beschreiben und welche abstrakten Eigenschaften der Gleichungen sich in welchen Eigenschaften der entsprechenden Figuren widerspiegeln, ist eine der klassischen Herausforderungen in der Geometrie.

Mit p-adischen Zahlen entsteht eine andere Art der Geometrie als die, die wir von unserem Anschauungsraum gewohnt sind, weil sich Größen eben anders verhalten, und das hat kuriose Konsequenzen: In der p-adischen Geometrie besitzt zum Beispiel ein jeder Kreis unendlich viele Mittelpunkte. »Bildlich kann man sich das nicht vorstellen«, beruhigt Annette Werner, »aber das muss man auch nicht, man kann es ja mit mathematischen Methoden genau untersuchen.« Unendlich viele Mittelpunkte können wir uns nicht ansatzweise vorstellen, und es klingt grotesk, letztlich ist es aber das deutliche und unanfechtbare Ergebnis einer simplen Berechnung: Der Mittelpunkt eines Kreises ist – in unserer wie auch in anderen Geometrien – als der Punkt definiert, der von allen Punkten auf der Kreislinie den gleichen Abstand besitzt, und mit der p-adischen Art, Abstände zu messen, ist es eben so, dass alle Punkte im Inneren des Kreises von allen Punkten auf der Kreislinie den gleichen Abstand haben. Damit sind, jenseits aller Vorstellbarkeit, schlicht alle Punkte im Kreis, egal wo sie liegen, Mittelpunkt.

Eine andere einfache Rechnung, die ebenso Studierende als Hausaufgabe erledigen können, ergibt, dass in der p-adischen Welt jedes Dreieck mindestens zwei gleich lange Seiten besitzt, oder anders gesagt: Dreiecke mit drei verschiedenen langen Seiten kann es hier nicht geben. »Das klingt jetzt alles komisch«, räumt Annette Werner ein, »aber das liegt nur daran, dass die Wörter »Dreieck« und »Kreis« in unseren Köpfen die Bilder aus der Anschauungsmetrik hervor-

$p = 3$



Man kann sich p -adischen Zahlen durch ganze Zahlen nähern, die dieselben Restklassen haben. Teilt man natürliche Zahlen zum Beispiel durch 3, bleibt als Rest entweder 0, 1 oder 2 übrig:

- $0 \text{ modulo } 3 = 0$
- $1 \text{ modulo } 3 = 1$
- $2 \text{ modulo } 3 = 2$
- $3 \text{ modulo } 3 = 0$
- $4 \text{ modulo } 3 = 1$

Wie man »modulo 3« rechnet, wird zum Beispiel erklärt auf <https://tinyurl.com/ModuloRechnen>. Alle Zahlen, die nach Division durch 3 denselben Rest (gelbe Kreise im oberen grauen Kreis) ergeben, werden als Restklasse bezeichnet.

Der graue Kreis darunter enthält die Reste, wenn man natürliche Zahlen durch zweite Potenz von 3, also $3^2 = 9$ teilt: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8 in orangen Kreisen.

Drei orange Kreise liegen in einem gelben Kreis, wenn die entsprechenden Zahlen dieselbe Restklasse modulo 3 haben, zum Beispiel:

- $2 \text{ modulo } 3 = 2$
- $5 \text{ modulo } 3 = 2$
- $8 \text{ modulo } 3 = 2$

Daher finden sich oben (wo vorher nur die 2 war) jetzt im gelben Kreis die kleineren, orangen Kreise mit 2, 5 und 8, die alle den Rest 2 modulo 3 haben – wenn auch verschiedene Reste modulo 9.

Das Spiel geht im dritten grauen Kreis mit der dritten Primzahlpotenz 3^3 weiter: Wenn wir Reste modulo $3^3 = 27$ suchen, dann wird jeder orange Kreis noch mal in drei Kreise unterteilt. In dem Kreis zu 8 ganz oben wird dann einbeschrieben 8, 17 und 26: Diese drei Zahlen haben alle den Rest 8 modulo 9, aber verschiedene Reste modulo 27. Daher sind sie im gleichen orangen Kreis, aber in verschiedenen blauen.

rufen, und die sind konkrete Spezialfälle, die die p -adische Situation nicht zeigen.«

Dreiecke mit mindestens zwei gleich langen Seiten, Kreise mit unendlich vielen Mittelpunkten, große Zahlen mit kleinem Betrag – das alles mag auf uns mit unserer Alltagserfahrung absurd wirken, die p -adischen Zahlen bilden jedoch eine ordnungsgemäße, plausible, reguläre Welt, innerhalb derer alles streng nach einheitlichen, logischen Gesetzen zugeht. Das, was diese Welt für uns so kurios macht, ist lediglich, dass sie von Zahlen bevölkert wird, die wir aus unserem Alltag so nicht kennen, und dass die Spielregeln, nach denen sie sich richten, auch andere sind als die, die wir von unseren Alltagszahlen gewohnt sind.

Geometrie ist mehr, als eine formale Gleichung und ihre Lösungsmenge zu untersuchen. Man kann zum Beispiel auch mehrere Gleichungen gemeinsam analysieren. Man kann auch eine Variable in einer Summe mit unendlich vielen Summanden auftreten lassen und sich fragen, wann und in welchen Zusammenhängen diese Summe, die erst einmal nichts weiter ist als ein formal hingeschriebenes Objekt, eine sinnvolle Bedeutung erhält, welche Eigenschaften sie besitzt, was sie mit den unend-

lichen Summen gemeinsam hat, die wir aus der Welt der reellen Zahlen kennen, und vieles mehr.

»Ich schäle gern den Kern der Dinge heraus«, erzählt Annette Werner, »ich nehme zum Beispiel ein Konzept und schaue, ob es in einem anderen Zusammenhang auch so funktioniert, wie man es kennt, oder eben doch irgendwie anders. Und warum mache ich das? Weil wir Mathematiker eben so ticken!« Sie erklärt: »Wir fragen uns, in welcher Sprache wir ein Objekt verstehen können und was es wohl in anderen Sprachen bedeutet.« Aktuell ist es der Professorin der Goethe-Universität gelungen, Teile der sogenannten Simpson-Korrespondenz in die p -adische Welt zu übertragen. Dabei geht es um mathematische Strukturen namens Higgs-Bündel und wie sie mit der Topologie von Mannigfaltigkeiten zusammenspielen.

Eine Mannigfaltigkeit ist eine abstrakte Verallgemeinerung einer Fläche, man kann an so etwas wie eine Brezel oder einen Bagel denken. Topologie ist die Lehre von räumlichen Objekten und ihren zerreißungsfreien Verformungen. Man kann sich etwa vorstellen, die Brezel wäre aus Gummi und man zöge an den Schlingen, ohne sie zu zerreißen; die Brezel ändert dann zwar ihre Form, die Anzahl ihrer Löcher aber bleibt gleich. Solche Erhaltungsgrößen wie die Löcheranzahl, die nicht von der konkreten Gestalt eines Objektes abhängen, sondern etwas über die grundlegende Struktur des Objektes verraten, sind in der mathematischen Forschung von besonderem Interesse. Higgs-Bündel schließlich lassen Bezüge zum Higgs-Boson erkennen, dem berühmten Elementarteilchen, für dessen theoretische Untersuchung im Jahr 2013 der Nobelpreis für Physik verliehen wurde (nachdem der Experimentalphysikforschung am Teilchenbeschleuniger CERN in Genf 2012 der experimentelle Nachweis gelungen war, dass dieses Teilchen tatsächlich existiert).

Annette Werner hat dieses Konzept – das Zusammenspiel der Higgs-Bündel mit Mannigfaltigkeiten – in die p -adische Geometrie überführt. »Ich schaue mir sozusagen die p -adischen Cousins dieser Higgs-Bündel an und untersuche, welche Informationen sie über die Geometrie und Topologie enthalten, der sie hier begegnen.« Für ihre Arbeit hat Werner unter anderem die Technik der perfektoiden Räume genutzt, die der Bonner Mathematiker Peter Scholze entwickelt hat. Scholze erhielt für seine Arbeit 2018 die Fields-Medaille, eine der höchsten Auszeichnungen des Fachs, die auch »Nobelpreis der Mathematik« genannt wird. »Sich in diese Methoden einzuarbeiten, ist schon mühsam, wenn man nicht mehr jung ist«, erinnert sich Annette Werner, »aber ich kann mit diesen starken Methoden Dinge

klären und beweisen, die mir vorher verschlossen waren.«

Trotz der inhaltlichen Verwandtschaft zum berühmten Higgs-Boson werde die Arbeit wohl niemanden am CERN interessieren, glaubt Annette Werner. Es ist schließlich Grundlagenforschung. »Mir ist es egal, ob das, was ich herausgefunden habe, bei einem konkreten Problem angewandt werden kann, das ist nicht meine Motivation. Ich weiß aber, dass ich mit meiner Arbeit ein sicheres Fundament für unsere Wissenschaft lege, und das brauchen wir früher oder später, um zukünftige konkrete Probleme zu lösen.«

Als Principal Investigator forscht die Mathematikerin auch im Sonderforschungsbereich Transregio 326 mit (an dessen Akronym GAUS – für »Geometrie und Arithmetik uniformisierter Strukturen« – sich viele der Beteiligten vermutlich erst einmal gewöhnen mussten, weil der gleich klingende Mathematiker anders geschrieben wird). Der Verbund hat sich zum Ziel gesetzt, strukturelle Fragen in der Geometrie und Arithmetik zu beantworten und grundlegende Zusammenhänge zwischen Konzepten wie Modulräumen, automorphen Formen, Galois-Darstellungen oder kohomologischen Strukturen zu finden. GAUS wird an der Goethe-Universität koordiniert und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit 9,2 Millionen Euro gefördert.

»Die Forschung in der Geometrie ist natürlich weit von dem entfernt, was man im Schulunterricht über Geometrie lernt und was man sich bildlich vorstellen kann«, sagt Annette Werner, »die p -adische Geometrie ist zum Beispiel ein hilfreiches Werkzeug für die moderne Zahlentheorie.« Das Wissen darüber, wie Zahlen funktionieren, welche Eigenschaften sie besitzen und wie man mit ihnen arbeiten kann, ist für die digital vernetzte Welt unverzichtbar geworden: Jeder Verschlüsselungsalgorithmus, von E-Mail bis Online-Banking, arbeitet mit Objekten und Methoden aus der Zahlentheorie. Im abstrakten Werkzeugkasten, mit dem Zahlen untersucht und behandelt werden, haben auch die p -adischen Zahlen und Beträge einen Platz gefunden: »Die p -adischen Beträge von Zahlen zu untersuchen, liefert uns ganz andere und oft überraschend nützliche Informationen über Strukturen in den Zahlen«, erklärt Annette Werner. ●

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- p -adische Zahlen sind eine andere Art, Abstände zu messen, und sie beruhen auf der Zerlegung einer Zahl in Primzahlen, also Zahlen, die nur durch sich selber oder 1 teilbar sind.
- Wie mit reellen Zahlen lassen sich auch mit p -adischen Zahlen geometrische Figuren berechnen, nur dass diese für uns nicht plastisch vorstellbar sind und scheinbar groteske Eigenschaften haben.
- p -adische Geometrie ist ein Werkzeug für die moderne Zahlentheorie, die wiederum Basis für Verschlüsselungsalgorithmen ist.



Der Autor

Aeneas Rooch, geboren 1983, hat Mathematik und Physik studiert und in Wahrscheinlichkeitstheorie promoviert. Er arbeitet als Wissenschaftsjournalist und unterstützt Forschende bei Vorträgen und Science Communication.

<https://rooch.de>



Problemlöser mit Quantenmodul

Wie die Supercomputer der Zukunft aussehen werden

von Andreas Lorenz-Meyer



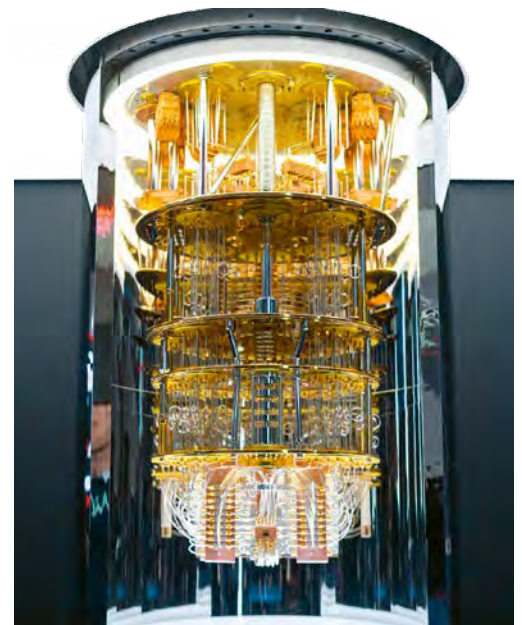
Foto: Andrew Lindemann/IBM

Wenn viele Computer zu einem Supercomputer zusammengeschlossen werden, spricht man von High Performance Computing. Die Goethe-Universität hat einen solchen Rechnerverbund – und bald kommt sogar noch ein Quantencomputer dazu. Der hilft, Rechenaufgaben zu bewältigen, die heute noch unlösbar sind.

Sie heißen Leonardo, Fugaku oder Jupiter und verfügen über enorme Rechenpower. Es sind Supercomputer, also geschlossene Reihen von mächtigen, »Racks« genannten IT-Schränken, die in Universitätsgebäuden in kahlen Räumen stehen und geheimnisvoll blinken, wenn sie etwas ausrechnen. Zusammen bilden sie ein Cluster, also einen »Haufen« von vernetzten Computern. Regelmäßig werden in der Welt der Hochleistungsrechner neue Rekorde aufgestellt. Der derzeitige Spitzenreiter der Top500-Liste, der Supercomputer Frontier des Oak Ridge National Laboratory in den USA, durchbrach als Erster offiziell die magische 1-Exaflop-Grenze. 1 Exaflop Leistung bedeutet eine Trillion – 1 000 000 000 000 000 000 – Rechenoperationen pro Sekunde. Mit einer solchen technischen Ausstattung lassen sich komplizierteste Rechnungen durchführen: Klimamodelle, die bis weit ins 21. Jahrhundert reichen, oder Simulationen, welche räumlichen Strukturen das Corona-Spike-Protein einnehmen kann. Oft geht es bei Supercomputern um die großen Fragen. Wie retten wir das Klima? Wie bekämpfen wir Pandemien? Jedoch wächst der Schwierigkeitsgrad der Aufgaben immer weiter, weswegen es mehr braucht als nur möglichst viele Operationen pro Sekunde. Es müssen auch Ideen her, wie die geballte Rechenkraft der Supercomputer schlau anzuwenden ist.

Eine solche Idee wird gerade an der Goethe-Universität verwirklicht, genauer am Center for Scientific Computing (CSC). Das gehört zum 2021 gegründeten Verein Nationales Hochleistungsrechnen (NHR), so etwas wie die deutsche Supercomputer-Elite. Der CSC-Rechnerkomplex hat aktuell eine Leistung von ein paar Petaflops – ein Petaflop bedeutet eine Billion Operationen pro Sekunde. Auf die schiere Rechenpower kommt es aber nicht an, vielmehr geht es um das Grundkonzept. Es nennt sich Modular Supercomputing Architecture (MSA). Der Physiker und Informatiker Thomas Lippert, der zu den Wegbereitern des Konzepts gehört, will damit in Frankfurt einen Hochleistungsrechner der besonderen Art aufbauen. Was MSA grundsätzlich kann, erklärt er so: »Es ermöglicht die parallele Bearbeitung von Rechenproblemen auf Systemebene, wir nennen es auch funktionalen Parallelismus.« Wofür der genau da ist? Man stelle sich vor, eine Rechenaufgabe besteht aus zwei Teilen, die sich

Das Center for Scientific Computing der Goethe-Universität betreibt momentan einen Rechnerkomplex mit 25 000 CPU Cores (Prozessoren) und 880 AMD MI50 GPUs (Grafikkarten). Die CPU-Leistung liegt bei zwei Petaflops pro Sekunde, die GPU-Leistung bei sechs Petaflops pro Sekunde. Ein Petaflop entspricht einer Billion Operationen pro Sekunde. Für 2023 ist ein Upgrade geplant, der Beschaffungsprozess läuft. Lippert: »Unsere Ausbauphilosophie sieht so aus: Wir werden das Hochleistungssystem kontinuierlich erneuern, streng orientiert an den Bedürfnissen der Wissenschaft und bei maximaler Energieeffizienz, anstatt das System in Zyklen von vier bis fünf Jahren komplett zu ersetzen, wie es sonst bei Supercomputern üblich ist.«



Sieht auch spektakulär aus: 2021 wurde der »Quantum System One« von IBM als erster Quantencomputer Deutschlands in Ehningen bei der Fraunhofer-Gesellschaft eingeweiht.

nur auf zwei Parallelrechnern gut lösen lassen, welche aber eine ganz unterschiedliche Systemarchitektur haben.

Stilmix der Computer-Architekturen

Solche verschiedenen Architekturen haben zum Beispiel ein CPU-Cluster und ein GPU-Cluster. CPUs, central processing units, verfügen über eine begrenzte Zahl von Rechenkernen (Cores) und erledigen Aufgaben hintereinander. GPUs, die Grafikkarten, bestehen dagegen aus Tausenden sehr kleiner Cores, die im Gleichtakt an einem Problem arbeiten. Zwei grundverschiedene Funktionsweisen also – die modulare Architektur bringt sie dennoch zusammen. »Sie liefert ein einfaches Konzept und die notwendigen Tools und Softwareumgebungen, damit beide Systeme gleichzeitig einsetzbar sind«, erläutert Lippert. »Dadurch wird der ganze Prozess bezüglich Zeit- und Energieaufwand optimiert.« Wie so etwas praktisch funktioniert, zeigt sich bei der Weltraumwetterbeobachtung der Europäischen Weltraumbehörde. Hier gibt es ein Rechensystem, das den Sonnenwind – bei Sonneneruptionen ausgeschleuderte geladene Teilchen (Plasma) – und seine Wechselwirkung mit der Erdmagnetosphäre simuliert. Der Workflow setzt zwei sogenannte Löser voraus. Der



ZUR PERSON

Der Physiker und Informatiker **Thomas Lippert** hat eine eigene modulare Architektur für Supercomputer entwickelt und patentieren lassen. Seit August 2020 hält er die Professur für »Modulares Supercomputing und Quantencomputing« am Institut für Informatik der Goethe-Universität. Er ist zudem Direktor des Jülich Supercomputing Centre (JSC) des Forschungszentrums Jülich, mit dem der Frankfurter CSC zusammenarbeitet. In Jülich wird der Computer Jupiter aufgebaut, der erste europäische Supercomputer im Exaflop-Bereich. Lippert sitzt auch im Direktorium des John von Neumann Institute for Computing (NIC), welches Supercomputer-Rechenzeit für Forschungsprojekte bereitstellt. Die Goethe-Universität soll Mitglied des NIC werden.

lippert@fias.uni-frankfurt.de

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Sehr komplexe Berechnungen etwa für globale Klimamodelle, die Formenvielfalt flexibler Biomoleküle oder große KI-Anwendungen werden mit Supercomputern gemacht.
- Künftig sollen in Supercomputern auch Quantencomputer zusammen mit klassischen Rechnern verbaut werden.
- Durch eine Modulbauweise werden die Stärken beider Computertypen miteinander verbunden.

Feldlöser berechnet die Entwicklung des elektromagnetischen Feldes der Erde – diesen Part übernimmt ein CPU-Cluster. Der Teilchenlöser berechnet die Bewegung der geladenen Teilchen in dem vom Feldlöser berechneten elektromagnetischen Feld – was auf einem GPU-Cluster läuft.

Um eine ähnliche Aufgabenteilung geht es auch beim eigentlichen Clou der CSC-Pläne: Der schon bestehende Supercomputer bekommt in diesem Jahr ein Quantencomputermodul eingebaut. Klassisches High Performance Computing und Quantencomputing sollen in Zukunft ein Team bilden. Was aber nicht einfach so zu bewerkstelligen ist, denn Quantencomputer bewegen sich in ganz anderen Sphären als klassische Computer. Die haben Bits (binary digits) als Informationseinheit, welche sich immer in genau einem von zwei möglichen Zuständen befinden: 0 oder 1. Quantencomputer bedienen sich dagegen der verrückt erscheinenden Gesetze der Quantenwelt, also der Welt der aller kleinsten Teilchen: Photonen oder Quarks. Gerechnet wird da mit Quantenbits, kurz Qubits. Diese können nicht nur gleichzeitig 0 und 1 sein, sondern auch unendlich viele Zustände dazwischen annehmen. Es können sogar komplexe Zahlen sein, die über die reellen Zahlen hinausgehen. Qubits sind mit einer drehenden Münze vergleichbar: Es gibt nicht nur Kopf oder Zahl, sondern alle möglichen Zustände auf einmal.

Aufbau in Modulen

Diese Überlagerung wird als Superposition bezeichnet. Sie bildet die mathematische Grundlage für das exponentielle Wachstum der Rechenleistung, das Quantencomputern eigen ist. Während bei klassischen Computern die Rechenleistung linear mit der Anzahl der Rechenbausteine steigt, erhöht sich die Rechen-

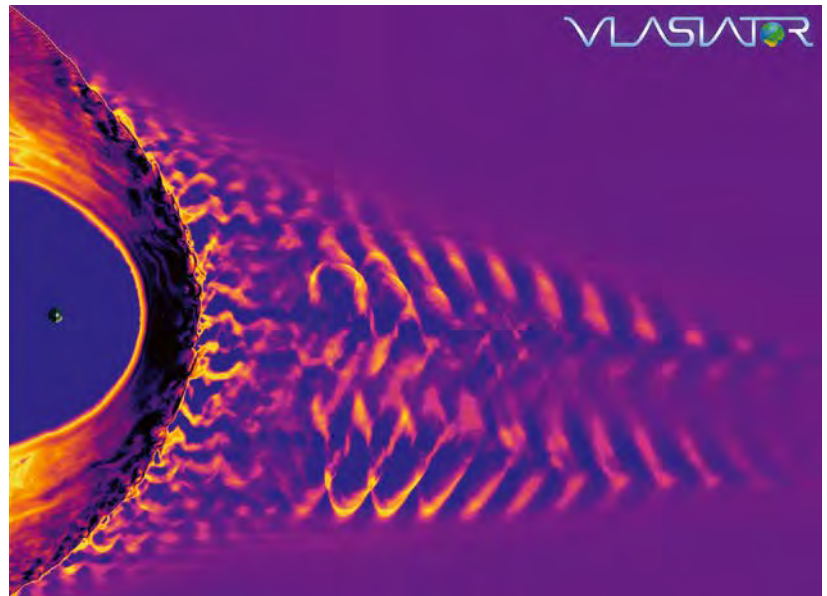
leistung eines Quantencomputers exponentiell mit der Anzahl der eingesetzten Qubits. Lippert veranschaulicht das mit Zahlen: »Für einen Zustand mit zwei Qubits braucht man vier komplexe Zahlen zur Charakterisierung, für einen Zustand mit drei Qubits aber nicht sechs, sondern bereits acht. Und 50 Qubits kodieren nicht etwa 100 Zahlen, sondern $2 \text{ hoch } 50$ komplexe Zahlen – das sind 1 125 899 906 842 624, also mehr als eine Billion.« So können Quantencomputer hochkomplexe Probleme lösen, an denen klassische binäre Computer allein scheitern würden. Was ein Quantencomputer in 200 Sekunden schafft, daran kann ein »normaler« Computer schon mal 10 000 Jahre herumrechnen – so das spektakuläre Ergebnis eines Experiments.

Eine Menge großer Unterschiede, und dennoch lassen sich beide Grundtypen auf einfache Weise miteinander koppeln. Auch dafür sorgt die modulare Architektur. »Damit werden unser Quantencomputer und unser Supercomputer gemeinsam an einem Problem arbeiten können – und dabei jeweils die für sie optimalen Aufgaben übernehmen«, so Lippert. Zum Einsatz kommen dabei hybride Algorithmen mit einem Anteil klassischem High Performance Computing und einem Anteil Quantencomputing. »Wir werden Quantenalgorithmen in Zukunft überall da brauchen, wo sehr schwierige Optimierungsprobleme anstehen. Zum Beispiel bei der Planung von Verkehrsrouten oder Flugzeug-Flugplänen. Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass sich die Quantenoptimierung sehr schnell wiederholen lässt. Wir sind dann in der Lage, alle paar Sekunden die Verkehrslage in einer Millionenstadt neu zu optimieren und zu steuern.« Das führe zu Energieeinsparungen und verbessere den Umweltschutz.

Supercomputer der Zukunft

Eine grundsätzliche Einordnung ist Lippert wichtig: »Quantencomputer werden nicht gebaut, um klassische Hochleistungsrechner zu ersetzen. Sie sind ja auf dem Gebiet der klassischen Arithmetik ziemlich schwach und lassen sich auch nur sehr begrenzt einsetzen. Vielmehr bauen wir sie als Ergänzung, um uns Bereiche zugänglich zu machen, die wir bisher einfach noch nicht rechnen konnten.« Der klassische Supercomputer übernehme auch weiter den Großteil der Aufgaben.

Fragt sich, welche Quantencomputertechnik der CSC bekommt. Qubits lassen sich ja auf unterschiedliche Art erzeugen, zum Beispiel mit Ionenfallen. Dabei werden die geladenen Teilchen in elektrische Felder gesperrt, mit Mikrowellen oder Lasern bestrahlt und so gezielt in verschiedene Zustände gebracht. So entstehen



die Qubits. Die Entscheidung am CSC ist noch nicht gefallen, aber es gibt einen »sehr interessanten Kandidaten«, und dessen Alleinstellungsmerkmal verrät Lippert auch schon: Er kann bei Raumtemperatur betrieben werden. Ein großer Vorteil gegenüber den Quantencomputertypen, die nur bei Temperaturen fast am absoluten Nullpunkt laufen, bei fast minus 273,15 Grad Celsius.

Es dauert noch eine Weile, bis die modulare Architektur im CSC komplettiert ist, aber für Lippert steht jetzt schon fest, dass in diesem Ansatz die Zukunft des Hochleistungsrechnens liegt. »Wir brauchen MSA dringend, um die exponentiell wachsenden Rechenanforderungen im Bereich der Simulation, der digitalen Zwillinge oder groß angelegter KI-Anwendungen bewältigen zu können.« So fänden sich hoffentlich auch Lösungen für die großen Krisen von heute, sei es die Corona-, die Klima- oder die Energiekrise. ●

Sonnenwind-Simulation mit Supercomputern: Das Magnetfeld, das die Erde umgibt (kleiner Punkt links im Bild), blockiert den Sonnenwind, der in einem Bogen um die Erde herumgelenkt wird. Das Wirbelmuster rechts entsteht durch reflektierte Sonnenwindteilchen, die sich mit dem Sonnenwind überlagern.



Der Autor

Andreas Lorenz-Meyer, Jahrgang 1974, wohnt in der Pfalz und arbeitet seit 13 Jahren als freischaffender Journalist mit Schwerpunkt Nachhaltigkeit, Klimakrise, erneuerbare Energien, Digitalisierung. Er veröffentlicht in Tageszeitungen, Fachzeitschriften, Universitäts- und Jugendmagazinen.

andreas.lorenz.meyer@nachhaltige-zukunft.de



Gut vernetzt

Wie sich Netzwerke
besser verstehen und
erzeugen lassen

von Dirk Eidemüller



Das Gebiet der synthetischen Netzwerke boomt. Mithilfe solcher im Computer simulierten Netze werden heute so unterschiedliche Dinge wie die Verknüpfung der Neuronen im Gehirn, der Datenverkehr im Internet oder Stromnetze untersucht. Ein Forscherteam um Ulrich Meyer vom Institut für Informatik der Goethe-Universität hat nun Standardverfahren zur Erstellung solcher Netze einen wichtigen Schritt vorangebracht.

Unser ganzes Leben ist eingebettet in die unterschiedlichsten Arten von Netzwerken. Dazu zählen nicht nur die sozialen Beziehungen, die heute über die sozialen Medien von Algorithmen mitbestimmt werden. Die Produkte, die wir für unseren Lebensunterhalt kaufen, benötigen ein komplexes Geflecht aus Stoffströmen und Logistik, bevor sie im Regal landen. Auch der elektrische Strom aus unserer Steckdose hängt an einem komplexen Netz, das mit dem Ausbau erneuerbarer Energien laufend erweitert und umgestaltet wird.

Je komplexer Netzwerke sind, desto schwerer lässt sich vorhersagen, wie sich Informationen verbreiten oder wie sich Schwankungen oder Störungen auf den Fluss von Waren oder Strom auswirken. Weil die Grundstruktur aller Netze jedoch gleich ist – sie bestehen aus Elementen (Knoten), die über Verbindungen (Kanten) miteinander verknüpft sind –, können alle Netzwerke in abstrakter Weise dargestellt und analysiert werden. Hierzu haben die theoretische Informatik und die Mathematik das mächtige Werkzeug der Graphentheorie geschaffen. Ein zentraler Bestandteil der aktuellen Forschung hierzu sind die synthetischen Netzwerke, die im Computer erzeugt werden und die keine direkte Abbildung eines realen Netzwerks sind. Bei dieser Form der Darstellung werden die Elemente, also Dinge, Akteure oder Ereignisse, in Form von Knotenpunkten simuliert, die über Kanten miteinander verbunden werden. Dies sieht so ähnlich aus wie die Verbindung von Nervenzellen über Synapsen. Aus diesem Grund ist die Hirnforschung einerseits eine wichtige Inspiration für die theoretische Informatik – und synthetische Netzwerke sind andererseits ein probates Mittel zur Untersuchung echter Nervensysteme. Mit solchen Netzwerken kann man aber auch Infra-

strukturen simulieren, etwa Straßen-, Strom- und Wassernetze.

Tests am künstlichen Netz

»Es gibt viele Zwecke, für die man synthetische Netzwerke braucht«, sagt Ulrich Meyer, Professor für Algorithm Engineering an der Goethe-Universität und Fellow am Frankfurt Institute of Advanced Studies (FIAS). Bei manchen Anwendungen spielt der Datenschutz eine Rolle, weshalb man etwa die Kontakte zwischen Menschen in sozialen Medien oft nur mit simulierten Daten untersucht. Oder Forscherinnen und Forscher wollen unterschiedliche Szenarien durchspielen, die real noch gar nicht vorliegen – etwa wenn man neue Funktionen bei sozialen Medien einführen und vorher die möglichen Verknüpfungen zwischen Menschen untersuchen will. Manchmal ist auch die Gewinnung der exakten Daten enorm schwierig – etwa bei der Verknüpfung von Neuronen im Nervensystem. Auch in der Physik benötigt man für viele Fragestellungen große Mengen synthetisch erzeugter Daten, um damit Algorithmen zu trainieren. Es kommt auch vor, dass bei manchen Netzwerkanalysen die realen Datenmengen so riesig sind, dass es lange dauern würde, sie in einen Supercomputer einzuspeisen.

Doch ein solches Elektronengehirn kann ein vergleichbares synthetisches Netzwerk in kurzer Zeit selbst erzeugen. Denn Supercomputer ver-

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Wer die Netze beispielsweise von Strom, Finanzen, Viren oder Waren besser verstehen oder sicherer machen will, muss testen, wie sich Informationen ausbreiten oder Störungen und Schwankungen auswirken.
- Wenn technische oder Datenschutzgründe die Analyse echter Netzwerke kompliziert machen, können sie durch synthetische Netze simuliert werden.
- Forschende an der Goethe-Universität arbeiten an synthetischen Netzwerken, die keine Supercomputer benötigen, sondern auf handelsüblichen PCs laufen können.



ZUR PERSON

Ulrich Meyer, Jahrgang 1971, promovierte 2002 in Informatik an der Universität des Saarlandes und dem Max-Planck-Institut für Informatik. Nach Stationen in Ungarn und den USA wurde er 2007 als Professor für Algorithm Engineering an die Goethe-Universität berufen. Von 2014 bis 2022 war er Sprecher des DFG-Schwerpunktprogramms »Algorithmen für große Daten«. Seine aktuelle Forschung umfasst sowohl theoretische als auch experimentelle Aspekte der Verarbeitung großer Datensätze mit fortschrittlichen Berechnungsmodellen.

umeyer@ae.cs.uni-frankfurt.de



Manuel Penschuck, Jahrgang 1988, promovierte 2021 an der Goethe-Universität über die skalierbare Erzeugung von Zufallsgraphen. Als Postdoc arbeitet er jetzt an der Goethe-Universität mit dem Schwerpunkt auf parallele Graphen-Algorithmen in Anwesenheit von Speicherhierarchien für große Netzwerke.

mpenschuck@ae.cs.uni-frankfurt.de

fügen nicht nur über Tausende von Prozessoren, was extrem schnelle Rechenoperationen ermöglicht, sondern besitzen auch einen riesigen Arbeitsspeicher, der für den Zugriff und die Verarbeitung der vielen Giga- bis Terabyte an Daten benötigt wird, die größere Netzwerke erreichen können. Der Nachteil: Die Rechenzeit auf Supercomputern ist teuer und nur begrenzt verfügbar. »Wir arbeiten deshalb mit unserem Forschungsteam schon seit Jahren daran, die

Verfahren zur Erzeugung synthetischer Netze zu optimieren«, sagt Meyer. Das Ziel: die Arbeit mit größeren synthetischen Netzwerken auch auf handelsüblichen Computern nutzbar zu machen. Bisher sei dafür aber vor allem der Arbeitsspeicher der Computer mit 8 bis 16 Gigabyte zu klein, erklärt Meyer. Damit hakt es an einem entscheidenden Punkt, denn dann muss der Computer die Daten vom Arbeitsspeicher auf die Festplatte auslagern, was bei unstrukturierten Zugriffsmustern die Ladezeiten deutlich erhöht. Das bremst den Rechner extrem aus – und zwar um mehrere Größenordnungen – und kann die Arbeit mit solchen Netzwerken schnell unmöglich machen. »Wir arbeiten deshalb mit unserem Forschungsteam schon seit Jahren daran, die Standardverfahren zur Erzeugung synthetischer Netzwerke zu optimieren«, sagt der Informatiker.

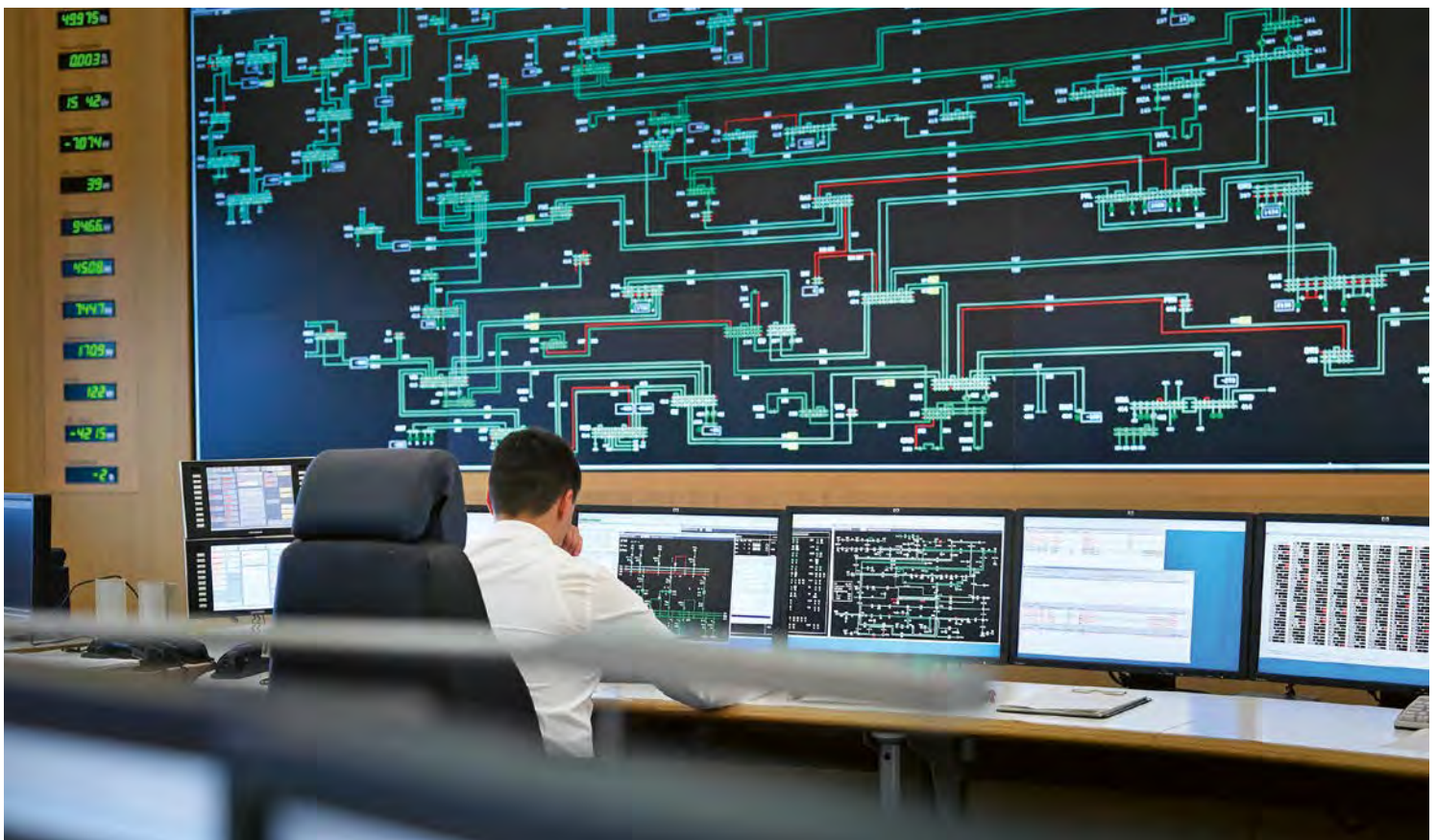
PC statt Supercomputer

Zum Team gehört auch Manuel Penschuck, der über die Erzeugung synthetischer Netzwerke promoviert hat und nun als Postdoc in der Frankfurter Gruppe arbeitet. Wie er betont, ist die Skalierbarkeit solcher Verfahren entscheidend. »Wenn es gelingt, die Erzeugung großer Netzwerke auch auf normalen Computern mit vertretbarem Zeitaufwand zu gestalten, dann könnten damit viele Anwendungen möglich werden, mit denen wir heute noch gar nicht rechnen«, sagt er. Das war schon in der Vergangenheit häufig so: Neue Anwendungen folgen den technischen Möglichkeiten. Konnte sich bei den ersten Personal Computern noch niemand vorstellen, wozu Privatleute jemals mehr als ein paar Megabyte an Speicherplatz benötigen könnten, so benötigen heute Videospiele, Bildbearbeitung und Videoschnitt viele Gigabyte an Daten.

Dass beim Erzeugen synthetischer Netzwerke so viele unstrukturierte Zugriffe entstehen, liegt an der Architektur der Netzwerke: »Wenn man einen Knotenpunkt neu zu einem Netzwerk hinzufügt, kann dieser in vielen Netzwerkmodellen mit zufälligen anderen Knotenpunkten aus dem bestehenden Netz verknüpft werden«, erklärt Penschuck. »Liegt dieser alte Knotenpunkt nun nicht im aktuellen Arbeitsspeicher vor, sondern befindet sich auf der Festplatte, muss er dort erst ausgelesen werden.« Die Frankfurter Forscher haben deshalb spezielle Systeme entwickelt, mit denen sie den gesamten Prozess unempfindlicher gegenüber den langsamen Festplatten- oder SSD-Zugriffen machen können.

Leistung sparen durch schlaue Strukturen

»Unser Verfahren beruht auf einer intelligenten Strukturierung der Daten«, sagt Meyer. Dazu



werden die Knoten etwa nach Anzahl ihrer bestehenden Verbindungen vorsortiert und dann in strukturierten Blöcken im Speicher abgelegt. Außerdem lässt sich ein hinreichend komplexes Netzwerk in Unterteile aufteilen. Das Hinzufügen neuer Knotenpunkte und Verbindungen lässt sich dann parallelisieren – also auf mehrere Prozessorkerne im Computer verteilen. Heutige Computer besitzen zur schnelleren Bearbeitung verschiedener Aufgaben mehrere Prozessorkerne auf dem zentralen Chip. Das erhöht auch die Arbeitsgeschwindigkeit bei der Generierung von synthetischen Netzwerken entsprechend.

»Mithilfe all dieser Kniffe lässt sich der Einbruch der Rechengeschwindigkeit umgehen, sobald das Netzwerk nicht mehr in den Computerspeicher passt«, sagt Penschuck. »Das erkaufen wir uns zwar dadurch, dass unser Verfahren – bedingt durch die Strukturierung der Daten – bei kleineren Netzwerken etwas langsamer ist als das jeweilige Standardverfahren zur Erzeugung synthetischer Netzwerke. Aber während die Standardverfahren bei großen Netzwerken grob um einen Faktor Tausend langsamer werden, sobald der Arbeitsspeicher mit den Netzwerkdaten gefüllt ist, verlieren die von uns entwickelten Netzwerk-Generatoren kaum an Geschwindigkeit.«

Netzwerke für die nächste Epidemie

In Zukunft wollen die Forscher die synthetischen Netzwerke leichter allgemein zugänglich

machen. Bislang erfordert der Umgang mit ihnen noch ein hohes Maß an Kompetenz in Informatik und eine gewisse Einarbeitung. Gerade bei vielen gesellschaftlich relevanten Fragestellungen sollen solche Netzwerke künftig einfacher zur Anwendung kommen – sei es bei der Simulation von Infektionsketten in der Epidemiologie oder bei der Analyse von Kontakten in sozialen Netzwerken im Rahmen der sogenannten Sozioinformatik. »Deshalb wollen wir eine Art Werkzeugkoffer für synthetische Netzwerke entwickeln, mit dem man auch ohne große Vorkenntnisse arbeiten kann und der dennoch alle wichtigen Instrumente zur Verfügung stellt«, erklärt Meyer.

Dieser Werkzeugkoffer wird nicht nur den neuen Netzwerk-Generator enthalten, sondern auch viele weitere Verfahren, die von der weltweiten Forschungsgemeinde in den vergangenen Jahren entwickelt wurden. Dieses Softwarepaket kann dann auf allen möglichen Gebieten eingesetzt werden – in der Epidemiologie und Sozioinformatik, aber auch in der Physik und der Analyse von Stromnetzen. »Wir sind selbst gespannt, zu welchen Zwecken die Anwender solche Netzwerke noch nutzen werden«, so Meyer. Die Möglichkeit, mit großen Netzwerken an handelsüblichen PCs zu arbeiten, ohne Rechenzeit am Supercomputer beantragen (und bezahlen) und sensible Daten herausgeben zu müssen, dürfte für Forscherinnen und Forscher aus den unterschiedlichsten Gebieten interessant sein. ●

Komplexe Versorgung:
Im Control Center des Unternehmens 50Hertz steuern und überwachen Mitarbeitende das Stromübertragungsnetz im Norden und Osten Deutschlands.

Der Autor

Dirk Eidemüller
dirk.eidemueller@gmx.de
(siehe Seite 23)

GEISTES WELTEN



Theater zwischen den Welten

Mit »Ultraworld« führen Susanne Kennedy und Markus Selg ihr Publikum in eine simulierte Welt

von Eva Döhme

Unser Alltag wird immer digitaler. Auch das Theater als Medium, das mit den Vorstellungen von Realität und Wirklichkeit spielen kann, greift die Virtualisierung der Realität künstlerisch auf. Susanne Kennedy und Markus Selg konfrontieren das Publikum mit einer zunächst rätselhaft wirkenden technologisierten Erscheinungsform von Theater. Sie führen es damit immer wieder an die Schwelle zwischen leiblicher und virtueller Weltwahrnehmung.

Zu Beginn des Theaterstücks »Ultraworld« ertönt eine körperlose Stimme. Es ist die Stimme C/C/A, ein Akronym für Computer/Child/Animal. Sie spricht den Avatar Frank an, der mitten auf der Bühne im Schneidersitz auf einer Art Hocker sitzt, eine Virtual-Reality-Brille auf der Nase:

»If the virtual reality apparatus, as you call it, was wired to all of your senses and controlled them completely, would you be able to tell the difference between the virtual world and the real world?«

Die Frage nach dem Unterschied zwischen der virtuellen Welt und der vermeintlich realen Welt legt sich über die gesamte Inszenierung – und zieht sich durch beinahe alle Arbeiten Kennedys, die in den vergangenen Jahren entstanden sind. Wie lebt es sich in einer Welt, in der permanent neue Technologien hervorgebracht werden? Wie entsteht eine Welt? Leben wir in der Realität? Sind unsere Vorstellungen von Realität nicht mittlerweile so sehr durchsetzt von digitalen Erfahrungen, dass die Grenzen zwischen virtueller und realer Welt fließend verlaufen? Gibt es dabei überhaupt selbstbestimmtes Handeln des Menschen?

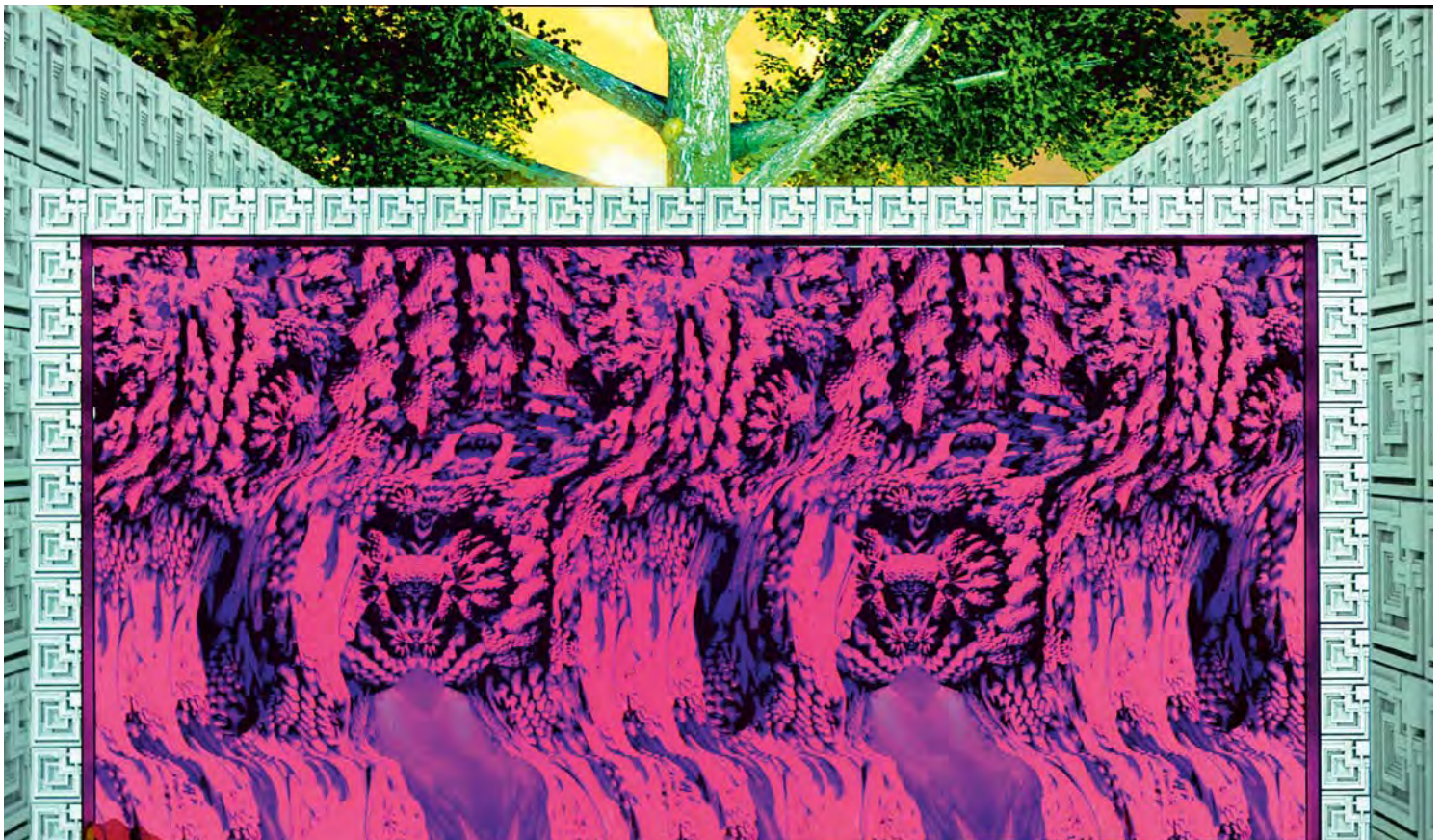
Auf der Suche nach Antworten begab sich Kennedy in den Arbeiten der vergangenen

Jahre mitunter auf spirituell, philosophisch, hypnotisch, psychedelisch und literarisch inspirierte Pfade. Im deutschsprachigen Raum erreichte sie 2013 mit der Bühnenadaption von Marieluise Fleißers Text »Fegefeuer in Ingolstadt« Aufsehen. Auf große Resonanz stieß damals schon besonders die Methode der Lippensynchronisation. Dabei werden fremde Stimmen vom Band eingespielt, die die Schauspielerinnen und Schauspieler auf der Bühne mimisch aufgreifen – als eine Art Playback. Kennedys Theaterarbeiten, die sie mit ihrem gut eingespielten Team, bestehend aus dem Sounddesigner Richard Jansen, den Videokünstlern Rodrik Biersteker und Markus Selg und weiteren Künstlerinnen und Künstlern auf die Bühne bringt, rufen seither Bewunderung, aber auch heftige Ablehnung hervor. Bei den einen ist es »Kult«, zu Kennedy zu gehen – die anderen können mit dieser Art des Theaters wenig bis gar nichts anfangen, verschlafen die Aufführungen oder verlassen den Saal.

Konstruktion hyperrealer Welten

Die Zusammenarbeit zwischen Kennedy und Selg begann mit der Arbeit »Medea.Matrix« auf der Ruhrtriennale 2017. 2019 schufen sie mit der begehbaren Installation »Coming Society« erstmals eine gemeinsame Arbeit für die Berliner Volksbühne, bevor Kennedy an der Volksbühne

»Wenn der Apparat der virtuellen Realität, wie Sie ihn nennen, mit allen Ihren Sinnen verkabelt wäre und diese vollständig kontrollieren würde, wären Sie dann in der Lage, den Unterschied zwischen der virtuellen und der realen Welt zu erkennen?«



Die Bühnentechnik macht's möglich: Mit ihrer ganz eigenen Art der Theaterinszenierung zieht Susanne Kennedy das Publikum in eine Welt aus Farben und Projektionen.

bereits 2017 »Women in Trouble« inszeniert hatte. In »Coming Society« wurde die Konstruktion einer hyperrealen Welt thematisiert. Das Publikum konnte Stationen auf der Drehbühne besuchen und dabei Performerinnen und Performer bei sich stets wiederholenden und kultisch anmutenden Handlungen beobachten. Das Ganze wirkte wie eine Versuchsanordnung über die Akzeptanz menschlicher Endlichkeit und wurde durch die großflächigen Videoprojektionen und Symboliken von Selg auf den Wänden beleuchtet. »The old world is dying, and the new world struggles to be born«, raunte es aus den Lautsprechern. Im Januar 2020 führten sie mit »Ultraworld« an der Berliner Volksbühne eben jene Theaterarbeit über die Entstehung einer simulierten Welt auf. Es folgten weitere Zusammenarbeiten mit der begehbaren VR-Installation »I AM (VR)« 2021, »Jessica« 2022 und der opulenten dreieinhalbstündigen Musicaltheaterinszenierung »Einstein on the Beach« 2022.

Besonders mit »Ultraworld« haben Kennedy und ihr Team ein Theatermodell über das Fremdsein und das Umherwandern des modernen Menschen zwischen Realität und Virtualität, zwischen Technologie und Analogie geschaffen. Kennedy und Selg nähern sich damit existenziellen Fragen des Lebens: Was ist Realität? Wie ist die Welt, in der wir leben, entstanden, und wie fühlt sich das leibliche Leben an? Was macht das Menschsein aus? Wie lässt sich die Endlichkeit des menschlichen Lebens akzeptieren?

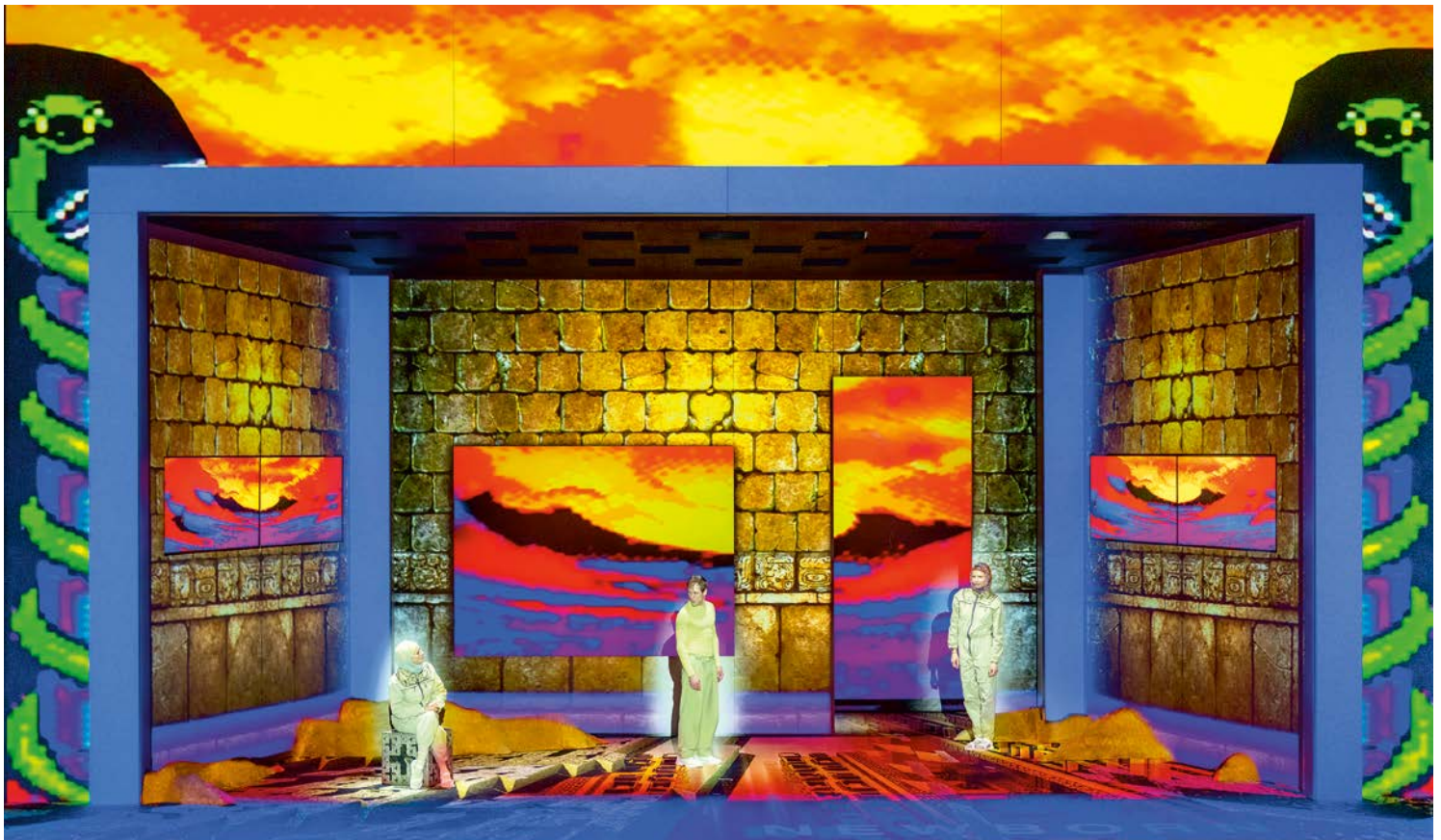
Kennedy und Selg nutzen ein breites Repertoire an künstlerischen Mitteln, um ihr Publi-

kum in die simulierte Welt der »Ultraworld« zu führen. Eine flüssig wirkende Projektion, innen dunkel, dann bläulich bis violett und nach außen hin magentarot, bewegt sich über die Fläche der fahrbaren Leinwand, die statt des eisernen Bühnenportals frontal im Bühnenrahmen der Volksbühne hängt. Die Videoleinwand schließt den dahinterliegenden Bühnenraum ab, der zu Beginn des Stücks noch nicht einsehbar ist. Der ebenfalls auf die Leinwand projizierte Rahmen erinnert an Computerspielästhetik und altägyptische Motive. Sowohl die Einrahmung als auch der Bühnenraum werden

Vom 30. Juni bis 2. Juli 2023 wird die neue Arbeit: **Angela (a strange loop)** von Susanne Kennedy und Markus Selg im Rahmen des Festivals »Theater der Welt« 2023 Frankfurt am Main – Offenbach zu sehen sein. Das Programm ist ab Frühling verfügbar unter: <https://theaterderwelt.de>

mit wechselnden Projektionen bespielt und scheinen unendlich veränderbar. Die Bühne wird zum Fenster in eine andere Welt.

Tief hallende, sphärische Klänge und ein sanftes Rauschen sind zu hören. Dann beginnt eine Geschwindigkeitssimulation. Die Bilder flackern. Ein Sog in die Tiefe des Alls oder eine Reise in eine vorplatonische Höhle? »Am Anfang war überall nur Dunkelheit. Da war das ruhende



All. Kein Hauch. Kein Laut. Reglos und schweigend die Welt. Und des Himmels Raum war leer«, tönt eine weibliche Stimme aus den Lautsprechern. Der Text enthält Überlieferungen über die Entstehung der Welt aus der mittelamerikanischen Mayakultur, aus hinduistischen Erzählungen und aus der Genesis, dem ersten Buch Mose. Dann eine weitere Schöpfungserzählung: »Am Anfang war nur das große Selbst, das sich in Gestalt eines Menschen widerspiegelte. Sich sinnend, fand es nichts als sich Selbst. Und sein erstes Wort war (*hier öffnet sich die fahrbare Leinwand*): This am I.«

Simulierte Welt

Das Stück »Ultraworld« bietet keine klassische Handlung. Es thematisiert Fragen nach der Entstehung der Welt – der realen und der virtuellen –, indem es auf der Bühne eine Welt simuliert. »Ultraworld« ist zugleich der Name des Computerspiels, in das das Publikum durch die gespielten Szenen und die Figuren auf der Bühne hineingezogen wird. Die Akteure durchleben und durchleiden die virtuelle Realität des Spiels, befragen jedoch auch die Regeln des Spiels:

»Ultraworld is a game in which a blond male/female avatar explores a maze filled with different patterns and landscapes. There are choices to be made but regardless of the choices made, across the next 2 hours, the avatar invariably ages, and ultimately dies.«

So stellt die Stimme aus dem Off das Spiel vor. Zuvor schon wurde das Publikum Zeuge dessen, wie der Avatar Frank, gespielt von dem Performer Frank Willens, zwei sogenannte Tests durchlaufen hat. Frank ist zugleich der »blond male avatar« des Spiels und die Hauptfigur des Theaterstücks. Er versucht die Regeln der »Ultraworld« zu verstehen. Er sucht sich dabei auch selbst, seine eigene Identität in dieser ihm fremd erscheinenden Welt. Zwar kann er einige wenige Entscheidungen treffen, dennoch scheint es für ihn kein Entkommen aus dem Spielverlauf zu geben.

Die simulierte Welt auf der Bühne leidet unter hochgradigem Wassermangel, erfährt man aus dem Radio, das auf der Bühne steht. Im Durchspielen sogenannter *Tests* versucht der Avatar seine Familie, Frau und Kind, mit Namen April 1 und 2, ebenfalls gesprochen von eingespielten Stimmen aus dem Off, vor dem Verdursten zu retten. Aber am Ende jedes Tests sterben sie. Das Sterben auf der Bühne ist kein neues Motiv in Kennedys Arbeiten. »Die Körper dort sterben für uns im Spiel immer wieder aufs Neue. Und wir schauen zu und üben«, schrieb sie bereits 2014. In den Tests der »Ultraworld« wird die simulierte Welt modellhaft durchgespielt. Auch für das Publikum ist das ein Test, der sich aufgrund der ermüdenden Wiederholungsschleifen (Loops) der Szenen, der dröhnenden Basstöne zwischen den Szenen und der flackernden, grell farbigen Projektionen als große Herausforderung erweist.

Was ist Wirklichkeit, was Spiel? Frank (Frank Willens, Mitte), Kate/M (Kate Strong, links) und Cassandra (Suzan Boogaerd, rechts) sind Suchende im irritierenden Bühnenszenario.

»Ultraworld ist ein Spiel, worin ein blonder männlicher/ weiblicher Avatar ein Labyrinth mit verschiedenen Mustern und Landschaften erkundet. Entscheidungen müssen getroffen werden, aber unabhängig von diesen Entscheidungen altert der Avatar im Laufe der nächsten zwei Stunden und stirbt schließlich.«

Ein sprechender Obelisk, der im hinteren Bühnenraum der Volksbühne von der Decke herabgelassen wird, beendet das Spiel auf der Bühne – und gibt Frank (Frank Willens) und dem Publikum neue Fragen auf.



AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Theatermacherin Susanne Kennedy vermittelt mit neuen Ausdrucksformen und Bühnentechniken eine sogartige, hypnotisch wirkende und oft auch rätselhaft bleibende Theatererfahrung.
- Ihr Stück »Ultraworld« ist das Theatermodell einer simulierten Welt, in der Figuren verfremdete Texte sprechen, Tests durchlaufen, Bewegungsabläufe und Choreografien zeigen und sich dabei permanent selbst suchen.
- Mit einer perfekten Komposition aus Bühnenelementen wie der Mechanik der Kulissen, gesampelten Soundcollagen von Geräuschen, Klängen, Stimmen, Video- und Lichtprojektionen erreicht Kennedy eine irritierende, verfremdete und zugleich anziehende Wirkung.
- Alle Figuren werden in Stimme, Körper und Rolle aufgeteilt und damit radikal depersonifiziert und entfremdet. Die Inszenierung stellt Realität als Simulation dar und zeigt die Verstrickung des Menschen in die ihn umgebende technologisierte Welt.

Theater als Ausnahmeort des fremden Sprechens

Kennedy beschreibt Theater als einen Raum, in dem ein Ausnahmezustand herrsche, »ein Ausnahmeraum, in dem wir gemeinsam das Leiden erproben können: über diese Körper, die vor uns stehen und sprechen oder auch nicht sprechen«.

Diese Aussage erinnert stark an die Poetik des Aristoteles: das Theater als Kraft, die beim Zuschauer eine seelische Reinigung bewirken kann, die sogenannte Katharsis.

Doch wozu führt die Inszenierung des fremden Sprechens? Durch die Methode der eingespielten Stimmen, die auf der Bühne per Lippen-synchronisation gemimt werden, erscheint die Darstellung wie fremdgesteuert. Die vorproduzierten Audioaufnahmen stammen – bis auf die Stimmen von Frank Willens und Kate Strong, die in »Ultraworld« die Figur der M spielt, – nicht von den Performenden selbst. M gibt sich als Programmiererin des Spiels aus. Sie hat die Regeln verstanden. Ihr Name ist zugleich ein rätselhafter Verweis auf das *am* von *I am*.

Viele Texte der Arbeit wurden, wie auch schon in vorherigen Arbeiten der Regisseurin, ohne vorherige Proben von Komparsen, Laien oder auch Mitgliedern des Produktionsteams eingesprochen, vom Sounddesigner Jansen auseinandergeschnitten und neu zusammengesetzt. Dabei wurden im ungezwungenen Lesefluss zwangsläufig vorhandene Versprecher in der Nachbearbeitung gezielt verstärkt. Auf diese Weise technisch hervorgehoben, haben diese Versprecher eine große Wirkung. Sie markieren einerseits die Künstlichkeit des Sprechens auf der Bühne und verweisen damit zugleich auf die Unnatürlichkeit vermeintlich perfekten Sprechens. Sprechen, Weinen, Atmen, Lachen oder das Singen des Kindes wie ein anfangs und am Ende ertönendes »Lalalalala« kommen allesamt vom Band. Das wirkt befremdlich und auch ein wenig gruselig. Die Inszenierung des fremden Sprechens führt zur radikalen Auflösung der Einheit von Körper und Sprache innerhalb der menschlichen Darstellung auf

der Bühne. Die Figuren erscheinen nicht als einheitliche Gestalten, auch nicht als einheitliche Identitäten, sondern eher als plastische Gebilde, als Körperhüllen.

Das Spiel auf der Bühne irritiert beim Zuschauen und Zuhören, da nicht alle Referenzen entziffert werden können und durch Musik- und Videoeinspielungen bewusste Zeit- und Raum-Irritationen einsetzen. Dazu tragen auch die eingespielten Fremdstimmen bei, das psychedelische und symbolisch aufgeladene Bühnenbild und der Umstand, dass einige Performer in unterschiedlichen Rollen auftreten. Suzan Boogaardt performt beispielsweise die Spielfigur Cassandra, und Cassandra wiederum übernimmt die Rolle von April I, später auch von Gabi. Zudem ist Boogaardt professionelle Mime-Künstlerin und kann dadurch Geschichten allein mit Mimik und Körperbewegungen, ohne verbale Sprache, erzählen.

Radikale Entfremdung

Das Komplizierte, das Verschachtelte, das Irritierende – all dies ist gewollt. Denn das Rätselhafte selbst ist Teil der künstlerischen Strategie von Kennedy und ihrem Team. Rätselhaft bleiben nicht nur die unbeantworteten Fragen: Woher kommen die Figuren? Welche Rollen gibt es? Wer verkörpert wen, wie? Wer spricht? Gibt es eine Handlung, oder aber gibt es bloß lose Szenenabfolgen? Wo ist der Zusammenhang? An welchem Ort findet die Szene statt?

Rätselhaft bleiben auch die ungelösten Eindrücke beim Zuschauen und damit die Wahrnehmung des Bühnengeschehens. Bedingt durch die Verfremdungen des Sprechens und Bewegens, der verschachtelten Handlung, der simulierten Welt des Computerspiels, der scheinbaren Ausweglosigkeit des Spielverlaufs, aber auch durch die dröhnenden Basstöne, die flimmernden Videoprojektionen und die hypnotischen Visualisierungen auf dem Bühnenbild stellt sich beim Zuschauen ein Gefühl des Unwohlseins her.

Dieses Gefühl des Unwohlseins, das die Zuschauenden zwangsläufig anwandeln muss, ist gebündelt in der Figur des Avatars Frank. Er scheint nicht ganz hineinzupassen in diese simulierte Welt, auch wenn er selbst aus dieser kommt. Er ist gefangen im Loop der »Ultra-world«, und er ist allein. Kein Entkommen, ewige Wiederkehr, ewige Wiederholung. Am Ende des zweiten Tests ruft er zu M: »I want out!« und M antwortet: »The only way out is in.« Alle Tests werden mit dem Herunterfahren der Leinwand und einer pink-schwarz flackernden Projektion einer kultischen Naturgott-darstellung und dröhnender Musik beendet. Das Portal schließt sich, beendet die Szene, beendet den Test.

Die Inszenierung führt eine simulierte Vorstellung von Welt vor, in der der Mensch als erfundenes Wesen, als Avatar in Verbindung und Verschränkung mit seiner technologischen Umwelt auf der Bühne auftritt. Es scheint unmöglich zu sein, diese Entfremdung des Menschen von sich selbst und seiner Umgebung zu unterbrechen. Damit führt die Arbeit zwar in eine simulierte Welt und stellt diese modellhaft aus. Ob die Wahrnehmung der simulierten Welt dann durch die technische Entfremdung tatsächlich fremd erscheint oder aber vielmehr darauf verweist, wie sehr auch die Momente der Gegenwart von Gefühlen des Fremd- und Unwohlseins bestimmt sind, bleibt offen. Klar wird jedoch, dass es ein von der Umgebung losgelöstes Dasein in der Welt nicht gibt. Denn wie auch der Avatar Frank in den Verlauf des Spiels verstrickt ist, so befinden sich auch die Zuschauenden am fließenden Übergang zwischen psychischer und virtueller Welt-erfahrung, nicht nur im, sondern ganz besonders auch außerhalb des Theaters.

Gegen Ende des Spiels kann Frank die Endlichkeit des Lebens akzeptieren oder aber kapituliert angesichts der ermüdenden und erbarmungslosen Wiederkehr der immer selben Situation. Ob er sich dadurch selbst findet? Eher unwahrscheinlich. Dann öffnet sich das hintere Portal im großen Rundraum der Volksbühne. Nebel steigt auf, flackernde Lichter am Boden und ein laut erklingender Choral bestimmen die Atmosphäre. Ein bunter Kristall, ein kopfüber hängender Obelisk in schrillen, neonfarbenem Mosaikmuster fährt herunter und beleuchtet als Licht- und Farbinstallation den hinteren Raum der Rundbühne. Der Obelisk spricht:

»What we call the beginning is often the end. And to make an end is to make a beginning. And the end is where we start from.«

Das Spiel kann von Neuem beginnen. ●

Literatur

Kennedy, Susanne:
Die Wunder zeigen.
Das ideale Theater ist
eine Übung im Sterben,
in: Theater Heute,
Jahrbuch 2014, S. 106.



DIE AUTORIN

Eva Döhne, Jahrgang 1989, ist Doktorandin der Theaterwissenschaft an der Goethe-Universität. Sie hat in Berlin, Leipzig und Frankfurt Theater-, Film- und Medienwissenschaft und Philosophie studiert. Ihre Dissertation trägt den Titel »Die (Un)darstellbarkeit der Frau in Theorie und Theater«. Darüber hinaus beschäftigt sie sich mit historischer und zeitgenössischer Performancekunst, Intersektionalität, Genderforschung und Repräsentationsfragen.

doehne@em.uni-frankfurt.de

»Was wir den Anfang nennen, ist oft das Ende. Und ein Ende zu machen bedeutet, einen Anfang zu machen. Und das Ende ist unser Anfang.«

»Unheimlich fantastisch«: E.T.A. Hoffmann als Türöffner in eine andere Welt

Für den großen Romantiker hatte
die Wirklichkeit viele Dimensionen

E.T.A. Hoffmann gilt als einer der auch international einflussreichsten deutschen Autoren. Mit seinen Erzählungen, in denen die Welten von Traum, Fantasie und Wahnsinn gleichberechtigt neben der Wirklichkeit bestehen, ist er ein Vorläufer vieler späterer Autoren und Genres. Ein Gespräch mit dem E.T.A.-Hoffmann-Experten Prof. Wolfgang Bunzel, dem Leiter der Abteilung Romantik-Forschung am Freien Deutschen Hochstift in Frankfurt.



Sauter: E.T.A. Hoffmann hat Frankfurt nie betreten, und doch spielt sein Kunstmärchen »Meister Floh« in der Stadt am Main. Warum hat Hoffmann diese Erzählung ausgerechnet hier angesiedelt?

Bunzel: Ehrlich gesagt war die Hoffmann-Forschung in diesem Punkt lange Zeit reichlich ratlos. Man sah nur die Verbindung zum Frankfurter Verleger Friedrich Wilmans und argumentierte, dass Hoffmann ihm entgegenkommen wollte, indem er seine Erzählung in Frankfurt spielen ließ. Aber das war eine Verlegenheitserklärung.

Die Wirklichkeit einer Stadt ist ja nur eine Dimension in Hoffmanns Werk, das immer auch die Tür öffnet ins Fantastische,

in die Welten von Traum, Rausch und Wahnsinn. Vielleicht war es ja gar nicht wichtig, in welcher Stadt die Realität angesiedelt ist?

Das wäre ein falscher Schluss. Wenn man auf das Gesamtwerk blickt, wird klar: E.T.A. Hoffmann hat oft große und bekannte Städte als Handlungsorte gewählt. Der »Ritter Gluck« und die »Abenteuer der Silvesternacht« spielen in Berlin. »Der goldne Topf« in Dresden, »Prinzessin Brambilla« in Rom und eben »Meister Floh« in Frankfurt am Main. Das ist gewissermaßen ein Erzählprinzip bei Hoffmann. Er wählt diese Städte, weil sie einerseits Verdichtungs-zonen des gesellschaftlichen Lebens sind. Andererseits will er das Geschehen, das ja – wie Sie zu Recht sagen – immer

rasch ins Fantastische abdriftet, lokal verankern. Dafür braucht er sichere topografische Fixpunkte.

Indem er das Geschehen in einer möglichst konkreten Wirklichkeit angesiedelt, erreicht er für die fantastische Dimension seiner Texte mehr Glaubwürdigkeit?

Ja, er versucht, dieser etwas »gefährlichen« Fantasiekomponente eine glaubhafte Grundierung zu geben, sie an die Realität rückzubinden. So wirkt er dem Vorwurf entgegen, das seien nur Hirngespinnste, bloße Einbildungen. Hoffmann behauptet ja, dass die Realität durchlässig ist auf das Wunderbare, man müsse nur genau genug hinschauen. Seine Texte sind sehr präzise Arrange-



links: »Meister Floh« löste einigen politischen Wirbel aus; die entsprechenden Akten sind erhalten geblieben.

Seite 68: Hoffmanns Märchenroman »Meister Floh« spielt in Frankfurt am Main. Das Umschlag-Motiv hat der Autor selbst ausgewählt; es stammt aus einem naturkundlichen Werk.

ments, und wenn man genau hinschaut, öffnen sich in der Realität, die man ja so fest und unverrückbar glaubt, Portale ins Fantastische und Wunderbare.

Sind die Handlungsorte also austauschbar, Hauptsache, sie sind bekannt und können genau beschrieben werden?

Das nicht. E.T.A. Hoffmann nutzt sehr bewusst bestimmte Vorstellungen, die sich mit einer Stadt verbinden, sogenannte Imagines. Rom beispielsweise ist eine südliche Stadt, die für geschichtliche Tiefe steht, aber auch für Lebensfreude. Als Zeit der Handlung der »Prinzessin Brambilla« wählt er den römischen Karneval, wo sich alles auf der Straße abspielt, die Stadt zur großen Bühne wird. Solche Konstellationen lassen sich jeweils nur an einem Ort finden, die funktionieren andernorts nicht.

Und warum ist Frankfurt nun der optimale Schauplatz für »Meister Floh«?

Frankfurt galt seit jeher als Stadt des Handels und der Ökonomie, der Messe, des Merkantilen. Peregrinus Tyß, die Hauptfigur im »Meister Floh«, hat einen

sehr pragmatischen Vater, der ist ein erfolgreicher und wohlhabender Kaufmann, der auch an der Börse spekuliert. Sein Sohn soll mal in dieselbe Richtung gehen. Hoffmann nutzt die Städte-Imago Frankfurts als handelszentrierte Börsen- und Kaufmannsstadt. Aber der kindliche



Als echtes Multitalent versah Hoffmann seine Briefe nicht selten mit einem Selbstporträt, wie hier das Signet unter einem Brief an seinen Freund Theodor Gottlieb von Hippel.

und scheinbar entwicklungsverzögerte träumerische junge Mann, Peregrinus Tyß, verkörpert eine Gegensphäre. Er wächst zwar in Frankfurt auf, weigert sich aber, in die Fußstapfen des Vaters zu treten. Und hier macht sich Hoffmann eine weitere Eigenart Frankfurts zunutze, die versteckte Seite als kulturdurchdrungene Stadt. Dafür steht zum einen Goethe, deshalb gibt es diverse Goethe-Anspielungen im »Meister Floh«. Hier lebten aber auch die Brentanos, eine der wohlhabendsten Handelsfamilien in Frankfurt. Nur die Kinder Clemens und Bettine wollten dann nicht so wie der Vater und die älteren Geschwister und wurden zu Protagonisten der Romantik. Diese zwei Gesichter machen die Stadt Frankfurt zum idealen Schauplatz des »Meister Floh«.

In dieser Geschichte ist ein Floh dafür zuständig, die Tür zum Fantastischen hin zu öffnen. Welche Rolle spielt das Fantastische in diesem Werk?

Die Fantastik zeigt sich schon im Untertitel: »Eine Geschichte in sieben Abenteuern zweier Freunde«. Das sollte man ernst nehmen. In sieben Abenteuern,



den sieben Hauptkapiteln, wird die Geschichte einer Freundschaft erzählt, und die ist einigermaßen kühn. Denn es geht um eine artenübergreifende Freundschaft zwischen einem Menschen und einem Floh. Dass Mensch und Haustier eine enge Symbiose eingehen, ist nichts Ungewöhnliches. Aber Flöhe? Die gelten als lästige Schadinsekten, und allein durch den Größenunterschied denkt man: Da sind ja keinerlei Kommunikationsmöglichkeiten vorhanden.

Aber dann gibt es sie doch: Denn der Floh kann sprechen, so wie die Tiere in Äsops Fabeln.

Ja, diese Hilfskonstruktion führt Hoffmann sehr konsequent durch und zeigt dadurch eine Dimension, die der Mensch übersieht. Wie sich zeigt, ist Meister Floh nicht irgendein Floh, sondern der König des ganzen Flohvolkes. Und dieses Flohvolk ist so intelligent, dass es Erfindungen gemacht hat, die die Menschen noch gar nicht kennen. Die Flöhe haben beispielsweise ein optisches Wunderwerk konstruiert, mit dem man Gedanken lesen kann!

Wer hätte sich das nicht schon mal gewünscht!

Da ist Hoffmann einfach unschlagbar, indem er solche eigentlich naheliegenden Ideen tatsächlich konsequent umsetzt und sagt: Warum soll es das nicht geben, ein Gedankenmikroskop, eine Art Mikrolinse, allerdings eine Kontaktlinse mit

»Nußknacker und Mausekönig«:
In seiner märchenhaften Weihnachtserzählung lässt Hoffmann Mäuse und Spielzeugsoldaten gegeneinander antreten.

Zusatzfunktion. So geraten diese beiden gänzlich unterschiedlichen Wesen in eine enge und freundschaftliche Beziehung zueinander. Und der Leser erfährt, dass man im Reich der Flöhe auch politisch schon weiter ist: Obwohl es einen König gibt, ist das Flohvolk im Wesentlichen republikanisch organisiert.

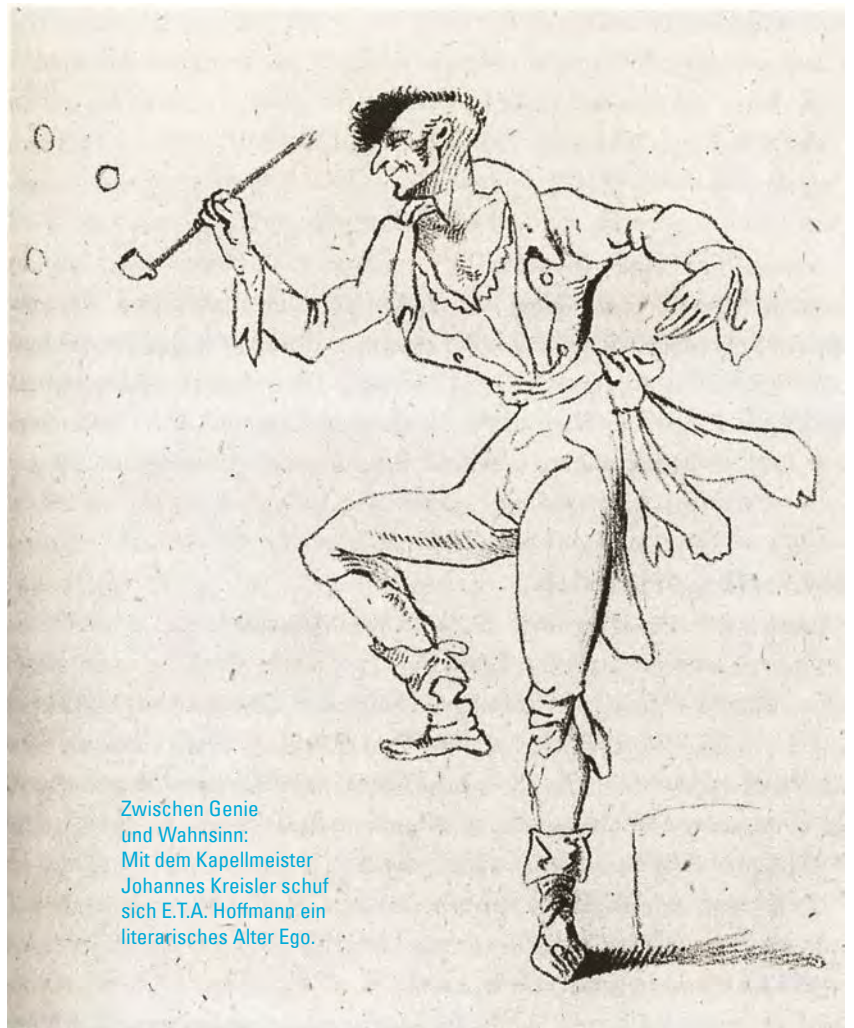
Eine leise Kritik an der damaligen politischen Situation?

Ja, ein mehr als reizvoller Kontrast. 1815 hat der preußische König Friedrich Wilhelm III. ein Verfassungsversprechen abgegeben, das er nie einlöste. E.T.A.

Hoffmann als gewiefter Autor und Staatsbeamter bringt somit eine weitere Dimension in diese Geschichte: Sowohl in gesellschaftlich-politischer als auch in wissenschaftlicher Hinsicht erweisen sich die Flöhe eben nicht als primitive Spezies, sondern als dem Menschen überlegen.

Greift Hoffmann hier zur Fantastik, weil er bestimmte Dinge nicht direkt aussprechen konnte?

Natürlich lassen sich mithilfe von Tierfiguren Dinge artikulieren, die unter den damaligen Bedingungen von Öffentlichkeit – und das bedeutet das Vorhandensein von Zensur – nicht ohne Weiteres oder auch gar nicht sagbar waren. Aber E.T.A. Hoffmann geht noch weiter, das Tier ist nicht nur ein Vehikel für den Autor. Er will auch sagen: Liebe Menschen, vergesst mal Euren eingebildeten Stolz: Ihr seid nicht die Krone der Schöpfung und nicht allen anderen



Zwischen Genie und Wahnsinn: Mit dem Kapellmeister Johannes Kreisler schuf sich E.T.A. Hoffmann ein literarisches Alter Ego.

ROMANTIK IM FOKUS

Ein neuer kulturwissenschaftlicher Forschungsschwerpunkt an der Goethe-Universität

Die Ideen und Denkformen der Romantik, ihre ästhetischen Auffassungen – vieles davon wirkt bis heute fort«, sagt die Literaturwissenschaftlerin Frederike Middelhoff. Sie selbst befasst sich in einem Projekt, das am Forschungskolleg Humanwissenschaften gefördert wird, mit dem Verhältnis von Romantik und Migration. Denn ähnlich wie heute haben sich auch vor dem und im 18. Jahrhundert viele Menschen auf den Weg gemacht, ihre Heimat verlassen – etwa im Zusammenhang mit der Französischen Revolution. Das hat sich auch in den literarischen Texten jener Zeit niedergeschlagen. Die Selbstbespiegelung des modernen Menschen, der Blick auf psychische Phänomene, alternative Formen des Zusammenlebens – auch diese Themen haben ihren Ursprung in der Geistes- und Kulturgeschichte der Romantik. Und längst sind nicht alle wichtigen Texte allgemein bekannt, auch außerhalb des Kanons warten interessante Entdeckungen. Zum Beispiel die vielen Texte und künstlerischen Praktiken von Autorinnen, die auch in der Forschung lange Zeit »unterm Radar« liefen und ein größeres Publikum verdienen. Ihnen widmete sich seit dem Pandemiejahr 2021 eine Workshop-Reihe unter dem Namen »Kalathiskos – Autorinnen der Romantik«, die Middelhoff gemeinsam mit Privatdozentin Dr. Martina Wernli an der Goethe-Universität organisiert und die 2023 bereits in die vierte Runde geht.

Frederike Middelhoff, Jahrgang 1987, arbeitet seit 2020 als W1-Professorin für Neuere Deutsche Literatur mit dem Schwerpunkt Romantikforschung an der Goethe-Universität. Die Denomination ihrer Professur war eine wichtige Entscheidung für die Hochschule – und für die deutsche Romantikforschung: Keine andere literaturwissenschaftliche Professur in Deutschland ist explizit der Romantik gewidmet. Ein klares Zeichen für Frankfurt als Standort der Romantikforschung. Die Stadt am Main hat in der Romantik ihre Rolle gespielt – nicht zuletzt als Heimat von Clemens und Bettina Brentano oder Karoline von Günderrode.

Der Frankfurter Romantik-Schwerpunkt hängt aber auch stark zusammen mit der engen Kooperation mit dem Freien Deutschen Hochstift. Das Hochstift, eines der ältesten Kulturinstitute Deutschlands, ist nicht nur Träger des Frankfurter Goethe-Hauses, sondern auch des im Jahr 2021 eröffneten Deutschen Romantik-Museums und – gemeinsam mit der Stadt Oestrich-Winkel – Betreiber des Brentano-Hauses. Seit Jahren gibt es personelle Anknüpfungspunkte zwischen Hochstift und Uni: Prof. Anne Bohnenkamp-Renken, die das Hochstift seit 2003 leitet und 2023 den Hessischen Kulturpreis erhielt, ist seit 2004 Honorarprofessorin und seit 2010 Professorin an der Goethe-Universität. Prof. Wolfgang Bunzel, Leiter der Romantikforschung am Hochstift, ist ebenfalls Honorarprofessor an der Goethe-Universität. Weiter gestärkt wurde die Romantikforschung auch durch die Berufung des Literaturwissenschaftlers Prof. Roland Borgards im Jahr 2018, der sich nicht nur in sei-

nem Forschungsschwerpunkt zu den Tieren in der Literatur mit der Epoche der Romantik befasst.

Im Jahr 2021 hat auch das DFG-Netzwerk »Aktuelle Perspektiven der Romantikforschung« die Arbeit aufgenommen, das noch bis 2024 gefördert wird. Hier sind junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler versammelt, die aktuell erprobte Ansätze der Romantikforschung diskutieren und ihre eigenen Forschungsprojekte im Austausch mit international renommierten Romantikforschern weiterentwickeln können. Im Rahmen des Netzwerks entsteht ein Sammelband, der einen Überblick über die neuere Romantikforschung seit der Jahrtausendwende geben soll. Außerdem wird eine virtuelle Datenbank mit Texten der europäischen Romantik erstellt sowie eine digitale Forschungsbibliografie.

Auch das ökologische Denken hat sich in der Romantik, die unter anderem auf die Industrialisierung in Europa kritisch reagierte, erstmals herausgebildet – und es war zum Teil weitaus weniger auf den Menschen als Mittelpunkt der Umwelt fixiert als heute. Fragen aus diesem Spektrum widmet sich die Initiative

»Romantische Ökologien«, die von Prof. Roland Borgards und Prof. Frederike Middelhoff gemeinsam mit der Mainzer Literaturwissenschaftlerin Prof. Barbara Thums als Projekt der Rhein-Main-Universitäten betrieben wird. 2022 startete außerdem eine Publikationsreihe mit dem Titel »Neue Romantikforschung«, die im J.B. Metzler-Verlag erscheint und von der Frankfurter Romantikforschung herausgegeben wird. Auch ein Preis für herausragende Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Romantik ist ins Leben gerufen worden: Der Klaus Heyne-Preis zur Erforschung der Deutschen Romantik wird in diesem Jahr zum zweiten Mal vergeben. Der Wissenschaftspreis, den der Kinderarzt und Romantikkenner Prof. Klaus Heyne (1937–2017) aus Kiel der Goethe-Universität für die Erforschung zur Deutschen Romantik stiftete, ist mit insgesamt 15000 Euro dotiert.

Dass das Interesse an der Epoche der Romantik auch bei jungen Menschen groß ist, merkt Frederike Middelhoff an ihren Veranstaltungen: »Seminare und Vorlesungen, die der Romantik gewidmet sind – zum Beispiel dem Thema »Romantische Ökologien«, »Mehrsprachigkeit in der Romantik« oder den »Hoffmannesken Heimsuchungen« von E.T.A. Hoffmann in der gleichnamigen Vorlesung des Wintersemesters 2022/23 – sind außerordentlich gefragt«, freut sie sich. Ein weiterer Beweis dafür, dass die Romantik auch zu aktuellen Themen so einiges zu sagen hat. **asa**

Einen Überblick über die Romantikforschung an der Goethe-Universität finden Sie auf der Seite
<https://romantikforschung.uni-frankfurt.de>

Ansprechpartnerin
Frederike Middelhoff (middelhoff@em.uni-frankfurt.de)



Der Wald gilt seit der Romantik symbolisch und ästhetisch als Inbegriff von Natur. Hier der Scherenschnitt »Jagdszene« von Bettina Brentano.

Lebewesen überlegen. Ihr solltet nicht über andere Kreaturen verfügen und sie geringerschätzen.

E.T.A. Hoffmann als ein Urahn der Tierethik?

Unbedingt, er war auch hier überraschend modern. Natürlich fällt bei ihm das Wort Tierethik nicht, aber eigentlich geht es genau darum: ein Neudenken des Verhältnisses zwischen Mensch und Tier. Viele seiner Erzählungen haben Tiere als Protagonisten, den Hund Berganza, den Kater Murr oder eben den Meister Floh. In dieser sehr raffinierten Geschichte wird das bis dahin völlig abgewertete Insekt, der Schädling, das Ekeltier, in einer Weise nobilitiert, wie man es noch nicht erlebt hat.

Kater Murr wird als ein etwas aufgeblasener Ich-Erzähler eingeführt, ist also nicht unbedingt durchweg sympathisch.

Er ist Parodie und Persiflage auf vielen Ebenen. Der »Kater Murr« parodiert den

Bildungsroman und die selbstgewisse Autobiografie. Für beides stand Goethe Modell mit seinem »Wilhelm Meister« und »Dichtung und Wahrheit«. Es ist eine augenzwinkernde Auseinandersetzung mit Goethe. Hoffmann will Goethe nicht denunzieren, sondern auf eine überraschende, witzige und verfremdete Art und Weise die Schwächen dieser Genres zeigen. Und er hat durchaus Sympathien für den Kater, der seinem eigenen Kater namens Murr nachempfunden ist.

Warum hat sich E.T.A. Hoffmann eigentlich nicht mit der Beschreibung der Wirklichkeit begnügt?

Weil die Wirklichkeit beschränkt, unfertig und damit in jeder Hinsicht verbesserungswürdig ist. Die Realität ist für ihn eine Mangelsituation. Warum soll man davon ein weiteres Mal erzählen? Fantasie und Fiktion bieten die Möglichkeit, Gegenwelten zu schaffen. Das ist bei Hoffmann ein zentraler Impuls, darin lässt sich natürlich auch ein utopisches

Element erkennen. Vor allem zeigt sich Hoffmann hier als Vertreter der Romantik: Die Poetisierung der Wirklichkeit und des Lebens soll zu einem vollkommeneren Zustand führen. Dass dies vorstellbar wird, leistet die Produktivkraft Fantasie.

Liegt hierin auch der Grund, warum Hoffmanns Erzählungen so oft in der Literatur und in anderen Medien aufgegriffen wurden? Weil darin so viel Raum für die Fantasie des Lesers bleibt?

Kriterium der literarischen Fantastik ist ja, dass es letztlich unentschieden bleibt, wie sich die Dinge wirklich verhalten. Handelt es sich beim Erzählten um Fantasie, einen Fiebertraum oder eine Wahnvorstellung? Das erzeugt eine beständige Spannung, weil die Leserinnen und Leser immer wieder aufgefordert werden, das Rätsel zu lösen – und doch daran scheitern. Die damit verbundene Faszination hat sich erhalten. Deshalb wird diese Darstellungsform bis heute so stark von den unterschiedlichen Künsten und Medienformaten genutzt.

Eine weitere Tür aus der Realität ist der Wahnsinn. Das manifestiert sich vor allem in der Figur des Kapellmeisters Johannes Kreisler, bei dem Genie und Wahnsinn eng zusammenliegen. Enthält diese Figur autobiografische Züge Hoffmanns?

Kreisler ist so etwas wie das Alter Ego E.T.A. Hoffmanns, das in mehreren seiner Texte auftritt. Hoffmann hat kein Interesse daran, sich gemäß psychoanalytischer Lehre an Traumata abzuarbeiten, sondern er nutzt diese Kunstfigur, die nah genug an ihm dran, aber nicht mit ihm identisch ist, um an ihr vieles auszuagieren, was ihn selbst betrifft.

Der Wahnsinn ist hier eher eine Art Daseinszustand und nicht unbedingt pathologisch?

Wir neigen dazu, den Wahnsinn von vornherein mit dem Etikett »pathologisch« zu versehen, das tut E.T.A. Hoffmann nicht. Bei ihm bleibt der Wahnsinn eine Art Kippfigur: Ähnlich wie Rausch und Traum ist der Wahnsinn produktiv, weil er Wahrnehmungs-



ZUR PERSON

Wolfgang Bunzel, Jahrgang 1960, leitet am Freien Deutschen Hochstift in Frankfurt am Main die Abteilung Romantik-Forschung. Seit 2013 hat er an der Goethe-Universität eine außerplanmäßige Professur für Neuere deutsche Literaturwissenschaft inne. Er ist einer der Kuratoren der Gedenkausstellung »Unheimlich fantastisch – E.T.A. Hoffmann 2022«, die in Bamberg, Berlin und Frankfurt am Main zu sehen war.

wbunzel@freies-deutsches-hochstift.de

Haustier mit Handschrift:
E.T.A. Hoffmanns Kater
namens Murr stand nicht
nur Pate für seinen Roman,
sondern konnte auch
selbst signieren.

blockaden löst und es ermöglicht, Verbindungen herzustellen zwischen Dingen, die man sonst überhaupt nicht miteinander in Zusammenhang bringen würde. Doch der Wahn kann auch zwanghaft sein und das Risiko bergen, die Wirklichkeit tatsächlich zu verkennen, dann wird es problematisch. Aber an sich sind diese Ausnahmezustände – Wahnsinn, Rausch, Traum, ungezügelter Vorstellungskraft – produktiv. Derjenige, der ganz ohne Wahnsinn und ohne Rausch auskommt, ist der Philister, die große Negativfigur der Romantik.

Könnte man sagen, dass E.T.A. Hoffmann von vielen Aspekten der menschlichen Natur gewissermaßen das Tuch weggezogen hat?

Die Romantik gilt nicht umsonst als Entdeckerin des Unbewussten, der Sphäre jenseits der Rationalität, jenseits des Verstandes, wo Dinge allenfalls assoziativ zusammenhängen. E.T.A. Hoffmann geht genau diesen Weg, lotet das Unbewusste, das Unerkannte in der Psyche aus und scheucht damit auch vieles auf, was Ängste hervorrufen kann. Er beschreibt diese Phänomene auf faszinierende Weise und geht auch bis zu dem Punkt, wo das Ganze in fixe Ideen, in Wahnvorstellungen abkippt und dann eben problematisch wird. Zum Beispiel in der Erzählung »Der Sandmann«: Die Hauptfigur Nathanael bildet sich Dinge klar ein und schafft sich damit wahnhaft eine selbstkonstruierte Realität; Nathanael wird Gefangener der eigenen Vorstellungskraft.

Im »Sandmann« verliebt sich Nathanael unsterblich in die »Automate« Olimpia, eine eher unterkomplexe Figur, die immer nur »ach« sagt. Heute haben wir ChatGPT und Saugroboter, und in »Ich bin dein Mensch« setzt sich Maria Schrader mit einem Androiden auf Augenhöhe auseinander. Was fasziniert uns immer noch am »Sandmann«?



»Der Sandmann« ist eine sehr vielschichtige Erzählung, die uns vor Augen führt, wie leicht wir Selbsttäuschungen auf den Leim gehen. E.T.A. Hoffmann macht von Anfang an für den Leser transparent, dass es sich bei Olimpia um einen Maschinenmenschen handelt. Die perfekt erzogene junge Frau mit den tadellosesten Umgangsformen und einer bewunderungswürdigen Ausstrahlung ist ein Projektionsphänomen. Aber Nathanael ist so verblendet, dass er darüber die Vorzüge der menschlichen Clara übersieht, die natürlich in vielem nicht so perfekt ist wie Olimpia, aber viel authentischer als dieses Kunstwesen. Hoffmann zeigt, wie rasch eine lebhaftere Phantasie, wenn man sie übersteigert, in Zwangsvorstellungen, Realitätsverlust und falsche Wahrnehmungen führt.

Dass sich Menschen in einer fixen Idee verheddern, das gibt es ja auch in unserer Gegenwart.

Ja, vor einigen Jahren hätte man es doch nicht für möglich gehalten, dass Verschwörungstheorien salonfähig werden, dass auch intelligente Menschen ernsthaft darüber diskutieren, sich jedem Gegenargument versperren. Den

Einspruch nehmen sie als Beleg für die Verblendung der anderen, so kommt jegliches Gespräch zum Erliegen. Es entsteht ein völlig hermetisches Selbstbild, ein selbstgeschaffener Vorstellungskäfig, in den man sich bewusst einschließt.

Und darüber lässt einen der »Sandmann« nachdenken?

Natürlich sind Hoffmanns Werke historische Texte, die nicht auf eine naive Art aktuell werden. Aber es ist doch spannend, dass bestimmte Problemfelder schon vor langer Zeit erkannt und dargestellt wurden. So können wir Dinge in unserer Gegenwart genauer erkennen, das Funktionieren bestimmter Mechanismen besser begreifen, wofür uns sonst die Distanz fehlt. Wir können über Neurosen, Zwangsvorstellungen und Verschwörungstheorien intelligente Aufsätze und Abhandlungen lesen, aber durch die Literatur erfahren wir solche Phänomene sehr viel anschaulicher und damit auch unmittelbarer.

Dr. Anke Sauter arbeitet als Referentin für Wissenschaftskommunikation an der Goethe-Universität.
sauter@pww.uni-frankfurt.de

Die Luft über dem Amazonasregenwald

Im deutsch-brasilianischen Forschungsprojekt CAFE Brazil (Chemistry of the Atmosphere: Field Experiment in Brazil) hat ein internationales Forschungsteam von Dezember 2022 an rund 60 Tage lang Daten zu den chemischen Prozessen in der weitgehend sauberen Atmosphäre über dem Amazonasregenwald in Brasilien gesammelt. Das Verständnis dieser natürlichen chemischen Prozesse soll erklären helfen, wie sich zum Beispiel Luftverschmutzung auf die Atmosphäre auswirkt.

Start- und Landepunkt für die rund 20 Messflüge mit dem Forschungsflugzeug HALO war der Flughafen der Hauptstadt Manaus des brasilianischen Bundesstaates Amazonas. HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben und ist für große Höhen und lange Flugdistanzen geeignet. Für die CAFE-Brazil-Mission hat das Forschungsteam HALO mit 19 Instrumenten bestückt, die dutzende Parameter gemessen haben, darunter Aerosole, flüchtige organische Verbindungen (VOCs), Schwefel- und Stickoxide, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Ozon, freie Radikale und Wasser.

»Wir erwarten neue Erkenntnisse zu den chemischen Abläufen in der Atmosphäre über dem tropischen Regenwald und auch über die Wechselwirkungen zwischen der Biosphäre und der Atmosphäre, um so die grundlegende Rolle des Regenwaldes im Erdsystem besser zu erklären«, sagte Prof. Jos Lelieveld, wissenschaftlicher Leiter der Forschungsexpedition und Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie. Mit Spannung sieht auch Joachim Curtius, experimenteller Atmosphärenforscher und Professor an der Goethe-Universität in Frankfurt, den Ergebnissen aus den Forschungsflügen entgegen: »Unser Fokus liegt auf der Entstehung von Partikeln aus Spurengasen, die der Wald ausstößt.«

Die Flüge über dem Regenwald folgten festgelegten Mustern, um vertikale und hori-



Vor dem Abflug:
das Forschungsflugzeug HALO
Anfang Dezember im Hangar in
Manaus.

Foto: Uwe Parchatka

zontale Profile zu vermessen. Auf dem Plan standen auch sogenannte Helixflüge, bei denen sich HALO aus niedrigen Höhen bis auf 15 Kilometer Höhe schraubt. Mit der Auswertung der Daten aus den Flugzeugmessungen wollen die Forschenden herausfinden, wie die atmosphärischen Oxidationsprozesse in der Troposphäre über dem Amazonasregenwald ablaufen und wie sie die Bildung und das Wachstum von Aerosolpartikeln steuern, die als Wolkenkondensationskerne von zentraler Bedeutung sind.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wollen auch herausfinden, warum die Eigenschaft der Atmosphäre, sich selbst zu reinigen, über dem Regenwald nicht leidet,

obwohl ständig riesige Mengen an Hydroxyl-Radikalen verbraucht werden. Die chemische Verbindung gilt als Waschmittel für die Atmosphäre, da sie Schadstoffe wie Methan oxidiert und wasserlösliche Reaktionsprodukte erzeugt, die mit dem Regen aus der Luft ausgewaschen werden.

Untersuchungen an der Forschungsstation ATTO (Amazon Tall Tower Observatory), einem 325 Meter hohen Turm aus Stahl mitten im nördlichen brasilianischen Amazonasregenwald und circa 150 Kilometer von Manaus entfernt, werden die Messungen mit HALO komplettieren.

<https://tinygu.de/CafeBrazil>

Ausstellung zur Paläoklimaforschung an Goethe-Universität und Senckenberg

Wie erforschen Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler das Klima der Vergangenheit? Und wie kann dieses Wissen helfen, unsere Klimazukunft besser zu verstehen? Diesen Fragen geht die Sonderausstellung »Klimawissen schaffen – Was die Vergangenheit über die Zukunft weiß« im Senckenberg Naturmuseum nach. Klimaforschende der Goethe-Universität um Prof. Wolfgang Müller und Prof. Silke Voigt sowie der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung begeben sich im Forschungskonsortium VeWA gemeinsam auf die Spurensuche in zwei Erdzeitaltern – der späten Kreidezeit und dem Eozän – vor vielen Millionen Jahren. Beide Zeiten waren von einem hohen CO₂-Gehalt in der Atmosphäre und von hohen Temperaturen geprägt. Ziel der Forschenden ist es, die Klimavorgänge dieser vergangenen natürlichen Warmzeiten zu rekonstruieren, um zukünftige Entwicklungen genauer vorherzusagen zu können.

Hierfür analysieren die Forschenden sogenannte Klimaarchive: versteinerte Über-

reste von Tieren und Pflanzen oder auch Ablagerungen im Eis oder Gestein. Darin verbergen sich Informationen zum Klima der Vergangenheit. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen von chemischen Elementen dieser Archive können Auskunft über die damaligen Klimabedingungen geben. Mithilfe dieser Daten können Klimamodelle verbessert werden.



Die Ausstellungsgestaltung von »Klimawissen schaffen« im Senckenberg Museum setzt auf Nachhaltigkeit, mit mehrfach verwendbaren Architekturelementen und recycelbaren Materialien.

Foto: Sven Tränckner, Senckenberg

»Der Blick in die Vergangenheit liefert wissenschaftliche Erkenntnisse, die auch in den Bericht des Weltklimarats IPCC eingeflossen sind«, betont Projektinitiator Prof. Wolfgang Müller von der Goethe-Universität. »Mit den Ergebnissen unserer Paläoklimaforschung können wir Klimamodelle testen, die uns helfen, unsere Klimaszenarien in der Zukunft zu beurteilen – je nachdem, wie gut es uns gelingt, den weltweiten CO₂-Ausstoß zu verringern.«

Das Forschungskonsortium VeWA – Vergangene Warmzeiten als natürliche Analoge unserer »hoch-CO₂« Klimazukunft – ist ein LOEWE-Schwerpunkt des Hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Kunst. Die Projektkoordination haben Prof. Wolfgang Müller und Prof. Silke Voigt von der Goethe-Universität. Prof. Andreas Mulch ist Ansprechpartner aufseiten der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung.

Die Sonderausstellung ist noch bis 16. Juli 2023 im Senckenberg Naturmuseum Frankfurt zu sehen.

<https://tinygu.de/Klimawissen>

Römische Militärlager schützten Silbermine

Auf der Suche nach Silbererz haben die Römer im 1. Jahrhundert nach Christus in der Gegend von Bad Ems zwei Militärlager errichtet. Das ergaben Forschungen im Rahmen einer mehrjährigen Lehrgrabung des Fachs Archäologie und Geschichte der römischen Provinzen der Goethe-Universität in Kooperation mit dem Land Rheinland-Pfalz. Forschende um den Archäologen Prof. Markus Scholz und seinen Mitarbeiter Frederic Auth entdeckten erstmals Reste einer hölzernen Abwehrkonstruktion, ein »Annäherungshindernis«, bestehend aus zugespitzten Holzpfählen.

Das größere der beiden Lager mit einer Fläche von acht Hektar wurde nie fertiggestellt. Auch das kleinere Lager wurde nach wenigen Jahren aufgegeben. Grund dafür war offenbar die gescheiterte Suche nach größeren Silbererzvorkommen – wobei sich der aufgegebenen Stollen nur wenige Meter oberhalb eines ergiebigen Silbererzlagers befand.

<https://tinygu.de/Roemerlager>

100 Jahre Institut für Sozialforschung

Am 23. Januar 2023 hat sich der Erlass des preußischen Kultusministers zur »Errichtung eines Instituts für Sozialforschung [IfS] an der Universität Frankfurt als einer wissenschaftlichen Anstalt, die zugleich Lehrzwecken der Universität dient«, zum hundertsten Mal gejhrt. Der heutige Direktor des IfS, Prof. Stephan Lessenich, verwies in seiner Festrede auf die gegenwärtig stattfindende Entwicklung eines neuen Forschungsprogramms. Für die kritische Gegenwartsanalyse im Lichte einhundertjähriger Bemühungen um eine Gesellschaftskritik auf der Höhe der Zeit gelte es »mit dem konzeptionellen Fundus der Kritischen Theorie zu operieren, ohne seiner historischen Schwerkraft zu erliegen; mit der Dynamik der neuen Zeit zu gehen, ohne die kritische Distanz zu ihr zu verlieren.« Die Tradition kritischer Theoriebildung und Sozialforschung verändernd fortschreiben sei die Aufgabe, vor der sich das IfS heute sehe.

<https://tinygu.de/Sozialforschung100>

Paul Ehrlich- und Ludwig Darmstaedter-Preis

Die Immunologen Frederick W. Alt und David G. Schatz sind am 14. März in der Frankfurter Paulskirche mit dem mit 120 000 Euro dotierten Paul Ehrlich- und Ludwig Darmstaedter-Preis 2023 ausgezeichnet worden. Sie haben entdeckt, welche Moleküle und Mechanismen unser Immunsystem zu der erstaunlichen Leistung befähigen, Milliarden verschiedener Antigene von Bakterien, Viren und anderen Eindringlingen schon beim ersten Kontakt zu erkennen. Den Nachwuchspreis, der mit einem Preisgeld von 60 000 Euro verbunden ist, erhielt der Biochemiker und Arzt Leif S. Ludwig für ein von ihm erfundenes Verfahren zur Analyse der Abstammung und Entwicklung menschlicher Blutzellen, zu denen auch die Zellen des Immunsystems gehören. Die Paul Ehrlich-Stiftung ist eine rechtlich unselbstständige Stiftung, die treuhänderisch von der Vereinigung von Freunden und Förderern der Goethe-Universität verwaltet wird.

www.paul-ehrlich-stiftung.de

Kulturpreis für Anne Bohnenkamp-Renken

Anne Bohnenkamp-Renken, Professorin für Neuere deutsche Literaturwissenschaft an der Goethe-Universität und Direktorin des Freien Deutschen Hochstifts in Frankfurt, ist mit dem Hessischen Kulturpreis 2022 ausgezeichnet worden. Damit würdigte das Land Hessen die Verdienste der Leiterin des Goethehauses und des Deutschen Romantik-Museums in Frankfurt um Literatur und Forschung. Insbesondere lobte der Hessische Ministerpräsident Boris Rhein das »unermüdliche Engagement« der Literaturwissenschaftlerin für Kunst, Kultur und Bildung. Damit habe sie nicht nur der Stadt Frankfurt, sondern ganz Hessen große Dienste erwiesen.



Foto: Bohnenkamp-Renken

»Die Goethe-Universität gratuliert Frau Prof. Anne Bohnenkamp-Renken sehr herzlich zum Hessischen Kulturpreis«, kommentierte Prof. Enrico Schleiff, Präsident der Goethe-Universität, die Wahl der Preisträgerin. »Frau Bohnenkamp-Renken bereichert mit ihren Arbeiten die Forschung und Lehre an der Goethe-Universität in ganz besonderer Weise. So schafft sie zum Beispiel für unsere Studierenden immer wieder praxisnahe Zugänge zur literaturwissenschaftlichen Forschung und füllt die enge Kooperation mit dem altherwürdigen Frankfurter Hochstift in großartiger Art und Weise mit Leben.«

<https://tinygu.de/Bohnenkamp>

IWAK-Studie: Bis 2028 fehlen 200 000 Fachkräfte in Hessen



Foto: kazoka/Shutterstock

Besonders in Sozialberufen fehlen Fachkräfte.

Die Generation der Babyboomer geht nach und nach in Rente. Sie hinterlässt große Lücken im Arbeitsmarkt, die nur teilweise durch jüngere Arbeitskräfte geschlossen werden können. Das Institut für Wirtschaft, Arbeit und Kultur (IWAK) der Goethe-Universität hat im Auftrag des Hessischen Sozialministeriums Prognosen erstellt, welche Zahlen bis 2028 in den unterschiedlichen Regionen und Berufsfeldern zu erwarten sind. Gegenmaßnahmen sind möglich – und offenbar dringend geboten.

Den Prognosen zufolge fehlen in Hessen im Zeitraum von 2021 bis 2028 insgesamt

200 000 Fachkräfte – gut 130 000 Fachkräfte mit Berufsabschluss und knapp 70 000 Fachkräfte mit Hochschulabschluss. Das Potenzial von Personen ohne Abschluss, die nach einer Nachqualifizierung möglicherweise Fachkraftaufgaben übernehmen können, ist demgegenüber mit rund 20 000 Personen denkbar gering. Die Option der Nachqualifizierung besteht ohnehin nur in den Großstädten, denn in den ländlich geprägten Regionen des Landes fehlt es auch an Personen ohne Berufsabschluss. Grundsätzlich gilt, je weiter man sich von urbanen Gebieten entfernt, desto größer ist der Mangel an Arbeits- und Fachkräften.

Besonders stark trifft der Fachkräftemangel die Sozialberufe. Den Prognosen zufolge werden bis 2028 im Bereich Gesundheit 13 000 und im Bereich Erziehung mehr als 16 000 Beschäftigte fehlen. Auch bei Handwerks- und IT-Berufen hat Fachkräftegewinnung und -sicherung Priorität, in Zusammenhang mit Energiewende und Digitalisierung ist auch dort ein wachsender Bedarf zu erwarten.

<https://tinygu.de/Fachkraefte>

Eisentod von Zellen als Schlüssel für Krebstherapie

Der Eisentod (Ferroptose) ist eine Form des gesteuerten Zellsterbens, mit dem der Körper kranke, defekte oder überflüssige Zellen abtötet. Dieser Prozess lässt sich nutzen, um die Wirkung einer Immuntherapie gegen Leberkrebs zu verstärken. Dies haben Forschende des Georg-Speyer-Hauses, des Universitätsklinikums Frankfurt und der Goethe-Universität bei Mäusen zeigen können, die an Leberkrebs erkrankt waren. Die Kombinationstherapie wirkte auch gegen Darmkrebsmetastasen, die sich in der Leber angesiedelt hatten.

Forschende von Georg-Speyer-Haus, Universitätsklinikum und Goethe-Universität haben an Mäusen, die an Darmkrebs erkrankt waren, beobachtet, dass eine Substanz zur Auslösung der Ferroptose zur Aktivierung bestimmter Immunzellen (T-Zellen) führt. Solche T-Zellen können Krebszellen gezielt töten. Das Problem: Die Aktivität der T-Zellen wurde durch mehrere Mechanismen sofort wieder gestoppt, die die Wissenschaftler allerdings durch Verabreichung einer Dreierkombination von Substanzen aushebeln konnten. Prof. Fabian Finkelmeier, einer der

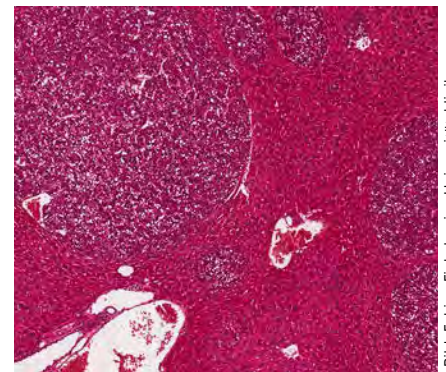


Bild: Fabian Finkelmeier, Universitätsklinikum Frankfurt

Leber einer kranken Maus, in der sich viele Tumoren gebildet haben (dunkler und rund abgegrenzt vom gesundem Gewebe). Die neue Triple-Therapie reduzierte diese Tumoren sehr deutlich.

beiden Erstautoren der Studie, sagt: »Offenbar ist die Kombinationstherapie von der Mikroumgebung der Leber abhängig und hängt nicht vom Ursprung des Krebses ab. Dies deutet darauf hin, dass unsere Kombinationstherapie bei Lebermetastasen jeder Krebsart wirksam sein könnte.«

<https://tinygu.de/Eisentod>

Lebensgeschichte von Frühmenschen

Wie haben sich unsere Vorfahren der Art *Homo erectus* vor Hundertausenden von Jahren auf der Insel Java in Südostasien ernährt? Das konnte ein interdisziplinäres Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, koordiniert von der Goethe-Universität und dem Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt, anhand von Zahnanalysen herausfinden: Im Laufe eines Jahres wechselten die Frühmenschen von pflanzlicher Nahrung zu Mischkost, waren dabei aber weit weniger vom saisonalen Nahrungsangebot abhängig als zum Beispiel Orang-Utans, die ebenfalls die Insel bewohnten. Dafür verglichen die Forschenden die Zähne der Frühmenschen mit denen von Orang-Utans sowie weiteren Tieren, die im Pleistozän vor 1,4 Millionen bis 700 000 Jahren auf Java lebten, auf der es damals Regionen mit Monsun-Regenwäldern sowie offene Baumlandschaften und grasbewachsene Savannen gab.

<https://tinygu.de/Fruehmensch>

Holderdiepolter: die Rolle von Ideophonen in der Sprache

Natürliche Sprachen gelten als »arbiträr«: Die sprachlichen Zeichen und deren Bedeutung stehen in einem freien Verhältnis zueinander und beruhen nicht auf Ähnlichkeit. Wer zum Beispiel das Wort »Buch« nicht kennt, kann sich die Bedeutung nicht aus der Form und Beschaffenheit des Wortes erschließen. Wörter wie »ratzfatz«, »ruck-zuck« oder »pillepalle« nennt man dagegen Ideophone. Sie kommen vor allem in der gesprochenen Sprache vor. Es handelt sich um Wörter, die das Gemeinte klangmalerisch beschreiben; meist handelt es sich um Geräusche oder Bewegungen. Ein Ideophon kann ein Verb, ein Adjektiv oder ein Adverb sein, es beschreibt Art und Weise, Farbe, Geräusch, Geruch, Handlung, Zustand oder Intensität. In afrikanischen Sprachen sind Ideophone besonders häufig, im Deutschen gibt es sie weit seltener.

Ideophone sind das Forschungsthema der Linguistin und Doktorandin Kathryn Barnes. Betreut wird ihre Arbeit von der Linguistin Prof. Cornelia Ebert, die auch das hochschulübergreifende DFG-Schwerpunkt-



Foto: Anke Sautter

Kathryn Barnes forscht zu ikonischen Wörtern im Deutschen und deren Wirkung.

programm »Visuelle Kommunikation. Theoretische, empirische und angewandte Perspektiven (ViCom)« koordiniert. Ebert hat in Bezug auf Gesten herausgefunden, dass diese auf einer anderen Ebene Bedeutung vermitteln als arbiträre Zeichen. Sie werden vom kommunikativen Gegenüber weniger infrage gestellt. Barnes zufolge lässt sich das auf Ideophone übertragen. Ob Ideophone (ebenso wie Gesten) eine höhere Glaubwürdigkeit besitzen, weil sie womöglich Bilder im Kopf erzeugen, also auf einer anderen Verständnisebene wahrgenommen werden, das will sie in ihrer weiteren Forschung herausfinden. <https://tinygu.de/Holderdiepolter>

Darmkrebszellen helfen sich gegenseitig

Wenn Chemotherapeutika Darmkrebszellen zum Absterben bringen, stoßen diese Moleküle der zellulären Energiewährung ATP (Adenosintriphosphat) als Botenstoff aus. Dies haben jetzt Forschende um Prof. Florian Greten vom Georg-Speyer-Haus in Experimenten nachgewiesen. Das ATP bindet an bestimmte Rezeptoren (P2X4 Purinorezeptoren) auf der Oberfläche umliegender Tumorzellen. Dadurch wird in diesen Nachbarzellen ein wichtiger Überlebenssignalweg aktiviert, der sie vor dem Zelltod schützt und den Tumor resistent gegenüber der Therapie macht.

Die durch die Chemotherapie getöteten Zellen »warnen« sozusagen ihre Nachbarzellen und liefern ihnen gleichzeitig eine Überlebensstrategie. Wenn die Kommunikation zwischen den sterbenden Tumorzellen und ihren Nachbarzellen jedoch unterbrochen wird – dies konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in präklinischen Modellen zeigen – erhöht das die Effizienz der Chemotherapie um ein Vielfaches, und ursprünglich resistente Tumore sprechen sehr gut auf die Chemotherapie an.



Foto: Peterschreiber/media/Shutterstock

Gefährliche Kommunikation: Sterbende Darmkrebszellen versorgen Nachbar-Tumorzellen mit Anleitung zum Überleben.

Dr. Mark Schmitt, Erstautor der Studie, erläutert: »Unsere Forschungsergebnisse zeigen, dass trotz jahrelanger erfolgreicher Forschung immer noch unbekannte Mechanismen entdeckt werden, die uns zeigen, wie perfide sich Tumorzellen einer therapeutischen Kontrolle entziehen. Unsere Ergebnisse liefern nun einen neuen vielversprechenden Ansatzpunkt, mittels Kombinationstherapie die Ansprechrate fortgeschrittener kolorek-

taler Karzinome auf gängige Chemotherapeutika erheblich zu verbessern.«

Prof. Florian Greten, Direktor des Georg-Speyer-Hauses und Sprecher des hessischen LOEWE-Zentrums Frankfurt Cancer Institute, erläutert: »Wir waren überrascht zu sehen, dass Tumorzellen Mechanismen der Kommunikation entwickelt haben, die so weit gehen, dass selbst noch die sterbenden Tumorzellen aktiv daran mitwirken, bei einem therapeutischen »Angriff« das Überleben ihrer Nachbarn zu gewährleisten. Wir haben große Hoffnung, dass wir durch die Unterbrechung der Kommunikation zwischen den Zellen auch in Patientinnen und Patienten diese enorme Steigerung in der Wirkung der Standardtherapie erzielen können.« Das Team möchte nun gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen des Frankfurt Cancer Institutes das neue Therapiekonzept an Patienten testen.

<https://tinygu.de/Darmkrebszellen>

Partnerschaft mit kanadischer Universität Saskatchewan

Manchmal ist es Interesse an einem Studierendenaustausch, oft ein gemeinsames Forschungsprojekt, das den Anstoß für eine internationale Hochschulpartnerschaft gibt. Im Fall der neuen Partnerschaft zwischen der Universität Saskatchewan aus der gleichnamigen Provinz im Südwesten Kanadas und der Goethe-Universität war es das gemeinsame Interesse an Wasserforschung: Biologe Prof. Henner Hollert vom Institut für Ökologie, Evolution und Diversität der Goethe-Universität und seine kanadischen Kollegen Prof. Markus Brinkmann und Prof. Markus Hecker, beide am Toxicology Centre an der School of Environment and Sustainability der Universität Saskatchewan, forschen seit vielen Jahren gemeinsam. Inzwischen haben die Naturwissenschaftler ein transnationales Kolleg für Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler zu Wassersicherheit und der Gesundheit eines Frischwasser-Ökosystems geplant – und ihre Universitäten haben eine umfassende Partnerschaft beschlossen, die beide Institutionen über die Nachhaltigkeitsforschung hinaus verbinden soll.

Die weitere Zusammenarbeit umfasst unter anderem den Austausch und Praktika von Studierenden, Dozierenden und Mitar-



Foto: Jürgen Lecher/Goethe-Universität

Haben eine langjährige Partnerschaft beschlossen: Vertreterinnen und Vertreter der kanadischen Universität Saskatchewan (u. a. der Vizepräsident für Forschung Prof. Baljit Singh, 4. v. r.) und der Goethe-Universität, repräsentiert durch Präsident Prof. Enrico Schleiff (3. v. r.).

beiterenden; vorgesehen sind außerdem der Ausbau von Forschungsprojekten und die Entwicklung gemeinsamer akademischer Programme. Schwerpunkte der Vereinbarung sind weitere Projekte in der Wasserforschung, insbesondere der Wassersicherheit und Wassergesundheit, Projekte zu Wechselwirkungen zwischen chemischer Verschmutzung und Biodiversitätsverlust sowie weitere inter- und transdisziplinäre Forschung in den Bereichen Nachhaltigkeit, Biodiversität und planetare Gesundheit.

Die Universität Saskatchewan mit Sitz in Saskatoon, der größten Stadt der Provinz,

gehört zu den Top-Forschungsuniversitäten in Kanada und zählt mit etwa 25 000 Studierenden zu den größten Hochschulen des Landes. Sie ist Mitglied der U15-Gruppe kanadischer Forschungsuniversitäten und bietet Bachelor- und Masterprogramme in mehr als 150 Studienrichtungen an. Zudem gehört sie der Universität der Arktis an, einem Netzwerk aus Universitäten und Instituten im Nordpolargebiet. Die Goethe-Universität ist neben Greifswald und der TU Darmstadt die dritte deutsche Partneruniversität der kanadischen Universität.

<https://tinygu.de/Saskatchewan>

Erfolgreiche Rückenschmerz-Therapie

Geht eine Therapie gegen chronische Rückenschmerzen gezielt auf die persönlichen Bedürfnisse der Patienten ein, sind die Erfolgschancen deutlich größer als bei Standardbehandlungen. Kommt ergänzend ein psychotherapeutisches Verfahren dazu, die kognitive Verhaltenstherapie, lassen sich die Schmerzen sogar noch effektiver lindern. Dies ist das Ergebnis einer Metastudie eines Teams um Privatdozent Dr. Johannes Fleckenstein vom Institut für Sportwissenschaften der Goethe-Universität. Bei der Studie wurden die Daten von mehr als 10 000 Patienten kombiniert ausgewertet. Die Schlussfolgerung: Entsprechend den Vorgaben der Nationalen Versorgungsleitlinie sollten multimodale Therapien im deutschen Gesundheitswesen stärker gefördert werden. Fleckenstein sieht in der Studie »den dringenden gesundheitspolitischen Appell«, kombinierte Angebote in der Versorgung und Vergütung zu stärken.

<https://tinygu.de/Rueckenschmerz>

Meteoritenkrater in Weingut

Um eine attraktive Weinmarke zu schaffen, verweist das Weingut »Domaine du Météore« nahe der südfranzösischen Stadt Béziers mit seinem Namen auf eine lokale Besonderheit: Eines der Weinfelder befindet sich in einer runden Senke mit 200 Metern Durchmesser, die einem Einschlagkrater ähnelt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um den Kosmochemiker Prof. Frank Brenker von der Goethe-Universität stellten jetzt durch Gesteins- und Bodenanalysen fest, dass der Krater einst tatsächlich durch den Einschlag eines Eisen-Nickel-Meteoriten entstanden ist. Damit widerlegten sie eine knapp 60 Jahre alte wissenschaftliche Einschätzung, derentwegen der Krater nie näher geologisch untersucht wurde. Die Frankfurter Wissenschaftler fanden bei der Analyse von Gesteinsproben viele Hinweise auf einen Einschlag und stellten fest, dass das Erdmagnetfeld im Krater etwas schwächer ist als in der Umgebung.

<https://tinygu.de/Meteoritenkrater>

Schmieröle verursachen Ultrafeinstaub

Messungen des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) haben in den vergangenen Jahren gezeigt, dass der Frankfurter Flughafen eine bedeutende Quelle ultrafeiner Partikel ist und sich diese weit über das Stadtgebiet verbreiten können. Forschende der Goethe-Universität haben jetzt zusammen mit dem HLNUG herausgefunden, dass die ultrafeinen Partikel zu einem Teil aus synthetischen Turbinenschmierölen bestehen. Neben chemischen Analysen wurde im Labor ein gängiges Turbinenschmieröl in einem heißen Gaststrom, der die Turbinenabgase simulierte, zunächst verdampft, dann abgekühlt. Anschließend wurde die Anzahl-Größen-Verteilung der gebildeten Partikel gemessen. Die Forschenden folgern, dass zur Verbesserung der Luftqualität neben den Emissionen durch Kerosin auch die durch Schmieröl reduziert werden müssen, damit die Ultrafeinstaubkonzentration abnimmt.

<https://tinygu.de/Schmieroel>

Berufsfeld Islam: Was nach dem Studium kommt

Fast die Hälfte der Absolventinnen und Absolventen der islamischen Theologie oder Religionspädagogik ist in der Sozialen Arbeit oder verwandten Berufsfeldern beschäftigt. Weitere 40 Prozent arbeiten in pädagogischen Berufen. Kaum ein Studienteilnehmer war hingegen hauptberuflich als Imam beschäftigt. Dies zeigt die Verbleibstudie »Berufsfeld Islam« der Akademie für Islam in Wissenschaft und Gesellschaft (AIWG) an der Goethe-Universität, die gemeinsam mit den Universitäten Gießen und Mainz erstellt wurde. Für die Studie sind mehr als 200 Absolventinnen und Absolventen der islamisch-theologischen Studien an Universitäten in fünf Bundesländern befragt worden: Welche Berufe haben sie nach dem Islam-Studium ergriffen? Wie gut fühlen sie sich durch ihr Studium auf die Arbeitswelt vorbereitet? Und welche Faktoren begünstigen den Berufseinstieg?

Rückblickend sehen die meisten Befragten das Studium der islamischen Theologie oder Religionspädagogik als eine Phase der intellektuellen und persönlichen Entfaltung. Allerdings wurde auch häufig geäußert, dass man sich eine fachlich passendere Vorbereitung auf die späteren Tätigkeiten gewünscht hätte.



Eine neue Studie der Akademie für Islam in Wissenschaft und Gesellschaft (AIWG) befasst sich mit dem Berufseinstieg von Absolventinnen und Absolventen der islamischen Theologie und Religionspädagogik.

Grundsätzlich, so belegt die Studie, bringen sich die Absolventinnen und Absolventen überdurchschnittlich in die Gesellschaft ein. Mehr als die Hälfte von ihnen engagiert sich ehrenamtlich. Insbesondere diejenigen mit theologischem Schwerpunkt übernehmen häufig Verantwortung in religiösen und sozialen Einrichtungen. Bis zu 2500 junge Menschen studieren an deutschen Universitäten islamische Theologie oder Religionspädagogik.

<https://tinygu.de/Islamstudium>

Beitritt zu Cybersicherheitszentrum

Die Cybersicherheit von Gesellschaft, Wirtschaft und Staat schützen und Bedrohungen abwehren – das ist das Ziel von ATHENE, dem Nationalen Forschungszentrum für angewandte Cybersicherheit, das bereits die Cybersecurity-Aktivitäten verschiedener Spitzenforschungseinrichtungen bündelt. Nun wirkt die Goethe-Universität durch ihre Forschung und Entwicklung an Europas größtem Forschungszentrum für Cybersicherheit mit. Im ATHENE-Board wird die Goethe-Universität vertreten durch Prof. Haya Shulman, die 2022 auf eine LOEWE-Spitzenprofessur für Cybersicherheit an das Institut für Informatik der Goethe-Universität berufen worden ist. Sie leitet die Abteilung Cybersecurity Analytics and Defenses am Fraunhofer-Institut SIT in Darmstadt und koordiniert den Forschungsbereich Analytics Based Cybersecurity am Nationalen Forschungszentrum für angewandte Cybersicherheit ATHENE.

<https://tinygu.de/Athene>

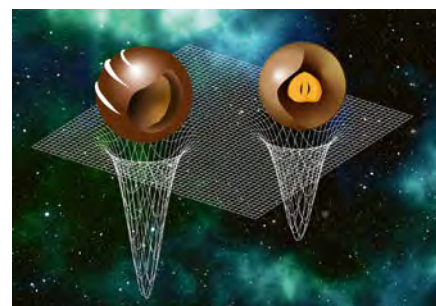
Innerer Aufbau von Neutronensternen

Bislang ist wenig über das Innere von Neutronensternen bekannt, jene extrem kompakten Objekte, die nach dem Tod eines Sterns entstehen können: Die Masse unserer Sonne oder sogar mehr ist zusammengeschoben auf eine Kugel mit dem Durchmesser einer Großstadt. Physikern der Goethe-Universität ist es nun gelungen, dem Puzzle um das Innere dieser Sterne ein wichtiges Teil hinzuzufügen. Im Arbeitskreis von Prof. Luciano Rezzolla am Institut für Theoretische Physik haben Forscher mehr als eine Million Zustandsgleichungen konstruiert, von denen jede einzelne mit allen astrophysikalischen Messungen von Neutronensternen und bekannten Ergebnissen aus der Kernphysik übereinstimmt.

Bei der Analyse dieser riesigen Anzahl von Zustandsgleichungen machten die Wissenschaftler eine erstaunliche Entdeckung: »Leichte« Neutronensterne (mit einer Masse kleiner als die 1,7-fache Sonnenmasse) haben eine weiche äußere Hülle und einen harten Kern, wohingegen »schwere« Sterne (mit einer Masse größer als die 1,7-

fache Sonnenmasse) eine harte Hülle, aber einen weichen Kern besitzen. »Das ist ein außerordentlich interessantes Ergebnis, weil es darüber Aufschluss gibt, wie komprimierbar der Kern eines Neutronensterns sein kann«, sagt Prof. Luciano Rezzolla. »Neutronensterne verhalten sich anscheinend ähnlich wie Schokopralinen: Leichte Sterne ähneln dabei Pralinen mit einer harten Nuss umhüllt von weicher Schokolade«, führt er weiter aus. »Schwere Sterne sind hingegen eher wie Pralinen mit einer harten Hülle aus Schokolade und einer cremig-weichen Füllung.«

Den Physikern ist es außerdem gelungen, weitere bis dato unbekannte Eigenschaften von Neutronensternen zu enthüllen. Sie konnten zum Beispiel zeigen, dass Neutronensterne mit hoher Wahrscheinlichkeit und unabhängig von ihrer Masse einen Radius von nur zwölf Kilometern besitzen. Autor Dr. Christian Ecker erklärt: »Unsere allumfassende numerische Studie hat uns nicht nur ermöglicht, präzise Vorhersagen für die Radien und die maximale Masse von Neutro-



Die Untersuchung der Schallgeschwindigkeit hat ergeben, dass schwere Neutronensterne eine harte Hülle und einen weichen Kern haben, während leichte Neutronensterne eine weiche Hülle und einen harten Kern haben – so wie unterschiedliche Schokopralinen

nensternen zu machen, sondern auch neue Grenzwerte für deren Verformbarkeit durch Gezeitenkräfte in Binärsystemen zu berechnen. Diese Erkenntnisse werden eine besonders wichtige Rolle dabei spielen, die zurzeit unbekannte Zustandsgleichung mit zukünftigen Gravitationswellenmessungen von Neutronensternkollisionen genauer zu bestimmen.«

<https://tinygu.de/Schokopralinen>

IMPRESSUM

FORSCHUNG FRANKFURT
Das Wissenschaftsmagazin der Goethe-Universität



IMPRESSUM

Herausgeber Der Präsident der Goethe-Universität Frankfurt am Main
Vi.S.d.P. Dr. Olaf Kaltenborn, Leiter PR und Kommunikation
Theodor-W.-Adorno-Platz 1, Campus Westend, PA-Gebäude, 60323 Frankfurt

Redaktion Dr. Anke Sauter (asa), Referentin für Wissenschaftskommunikation
(Geistes- und Sozialwissenschaften), Telefon (069) 798-13066, E-Mail: sauter@pww.uni-frankfurt.de
Dr. Markus Bernards (mbe), Referent für Wissenschaftskommunikation
(Naturwissenschaften und Medizin), Telefon (069) 798-12498, E-Mail: bernards@em.uni-frankfurt.de

Grafisches Konzept und Layout Nina Ludwig, M.A., Visuelle Kommunikation,
Telefon (069) 798-13819, E-Mail: ludwig@pww.uni-frankfurt.de

Satz Nina Ludwig, Goethe-Universität Frankfurt und MEDIENwerkstatt Jung-Zulauf, Niddatal

Litho Peter Kiefer Mediendesign, Frankfurt

Bildrecherche Natalia Zajic, Goethe-Universität Frankfurt

Lektorat Astrid Hainich, Bonn, und Ariane Stech, Meckenheim

Bezug Helga Ott, Theodor-W.-Adorno-Platz 1, Campus Westend, PA-Gebäude,
Raum 4.P52, 60323 Frankfurt, Telefon (069) 798-12472, Telefax (069) 798-763-12531,
E-Mail: ott@pww.uni-frankfurt.de, www.forschung-frankfurt.de

Forschung Frankfurt im Internet www.forschung-frankfurt.de

Druck Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG,
Sontraer Straße 6, 60386 Frankfurt am Main

Hinweise

Hinweis für Bezieher von »Forschung Frankfurt« (gem. Hess. Datenschutzgesetz): Für Vertrieb und Abonnementverwaltung von »Forschung Frankfurt« werden die erforderlichen Daten der Bezieher in einer automatisierten Datei gespeichert, die folgende Angaben enthält: Name, Vorname, Anschrift und Bezugszeitraum. Die Daten werden nach Beendigung des Bezugs gelöscht.

Die Beiträge geben die Meinung der Autoren wieder. Der Nachdruck von Beiträgen ist nach Absprache möglich.

Bildnachweis

Wir haben uns bemüht, die Urheber- und Nutzungsrechte für die Abbildungen zu ermitteln und deren Veröffentlichungsgenehmigung einzuholen. Falls dies in einzelnen Fällen nicht gelungen sein sollte, bitten wir die Inhaber der Rechte, sich an die Goethe-Universität, PR und Kommunikation, zu wenden. Berechtigte Ansprüche werden selbstverständlich abgegolten.



DAS NÄCHSTE MAL



Ordnung und Unordnung

»Order! Order!« – Der durchdringende Ruf des britischen Unterhausprechers John Bercow klingt vielen noch lebhaft im Ohr. Bercow wusste: Ohne Ordnung läuft in der Demokratie nichts, nicht einmal der Brexit. Als Boris Johnson das Parlament auflöste, wurde Bercow zur Galionsfigur der Demonstranten (hier am 31. August 2019 in Nottingham). In der nächsten Ausgabe von »Forschung Frankfurt« gehen wir der Frage nach, warum Ordnung so wichtig ist in Staat und Gesellschaft, aber auch in Kunst und Architektur, in der Pädagogik wie in der Chemie, in der Mathematik oder in den Zellen und Strukturen unseres Körpers – und wo ein bisschen Unordnung trotzdem manchmal weiterführt.

Erscheinungstermin: Oktober 2023



FREUNDE
DER UNIVERSITÄT

«Ich möchte unserer
Bürgergesellschaft das
breite Tätigkeitsfeld der
Universität näherbringen
und den gegenseitigen
Austausch fördern.»

JULIA HERAEUS-RINNERT

STELLVERTRETENDE VORSITZENDE
DER FREUNDESVEREINIGUNG

Foto: Uwe Dettmar

Freunde kann man nie genug haben. Machen Sie mit!

VEREINIGUNG VON FREUNDEN UND FÖRDERERN
DER JOHANN WOLFGANG GOETHE-UNIVERSITÄT
FRANKFURT AM MAIN E.V.

THEODOR-W.-ADORNO-PLATZ 1, 60629 FRANKFURT AM MAIN

www.vff.uni-frankfurt.de

Beitrittserklärung

Ich möchte Mitglied werden und die Freunde und Förderer der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main e.V. unterstützen.

PRIVATE MITGLIEDSCHAFT (Jahresbeitrag)

- 125 EURO ALS FREUND
 250 EURO ALS FÖRDERER
 500 EURO ALS DONATOR
 _____ EURO JÄHRLICHE ZUSATZSPENDE

FIRMENMITGLIEDSCHAFT (Jahresbeitrag)

- 500 EURO ALS FIRMENMITGLIED
 900 EURO ALS FIRMENMITGLIED (FÖRDERND)
 _____ EURO JÄHRLICHE ZUSATZSPENDE

Einwilligung in die Datennutzung zu weiteren Zwecken:

Ich erkläre mich durch meine Unterschrift damit einverstanden, dass meine Daten zu Vereinszwecken gespeichert und verarbeitet werden. Ich stimme ebenfalls zu, dass ich von der Vereinigung von Freunden und Förderern und der Goethe-Universität zu Vereinszwecken postalisch und per E-Mail kontaktiert werde. Rechte: Ich kann jederzeit ohne Angabe von Gründen von meinem Widerspruchsrecht Gebrauch machen und die erteilte Einwilligungserklärung mit Wirkung für die Zukunft abändern oder gänzlich widerrufen. Ich bin jederzeit berechtigt, gegenüber dem Verein um umfangreiche Auskunftserteilung zu den zu meiner Person gespeicherten Daten zu ersuchen.

Einzugsermächtigung

Bitte buchen Sie den Jahresbeitrag von meinem Konto ab.

NAME, VORNAME

E-MAIL

ADRESSE (STRASSE)

ADRESSE (PLZ, ORT)

BANKINSTITUT

IBAN

BIC/SWIFT-CODE

DATUM

UNTERSCHRIFT