

Abenteuer Quantenkosmos

Pioniere aus Jülich bauen Computer, die den Regeln dieser bizarren Welt gehorchen

LICHTBLICK

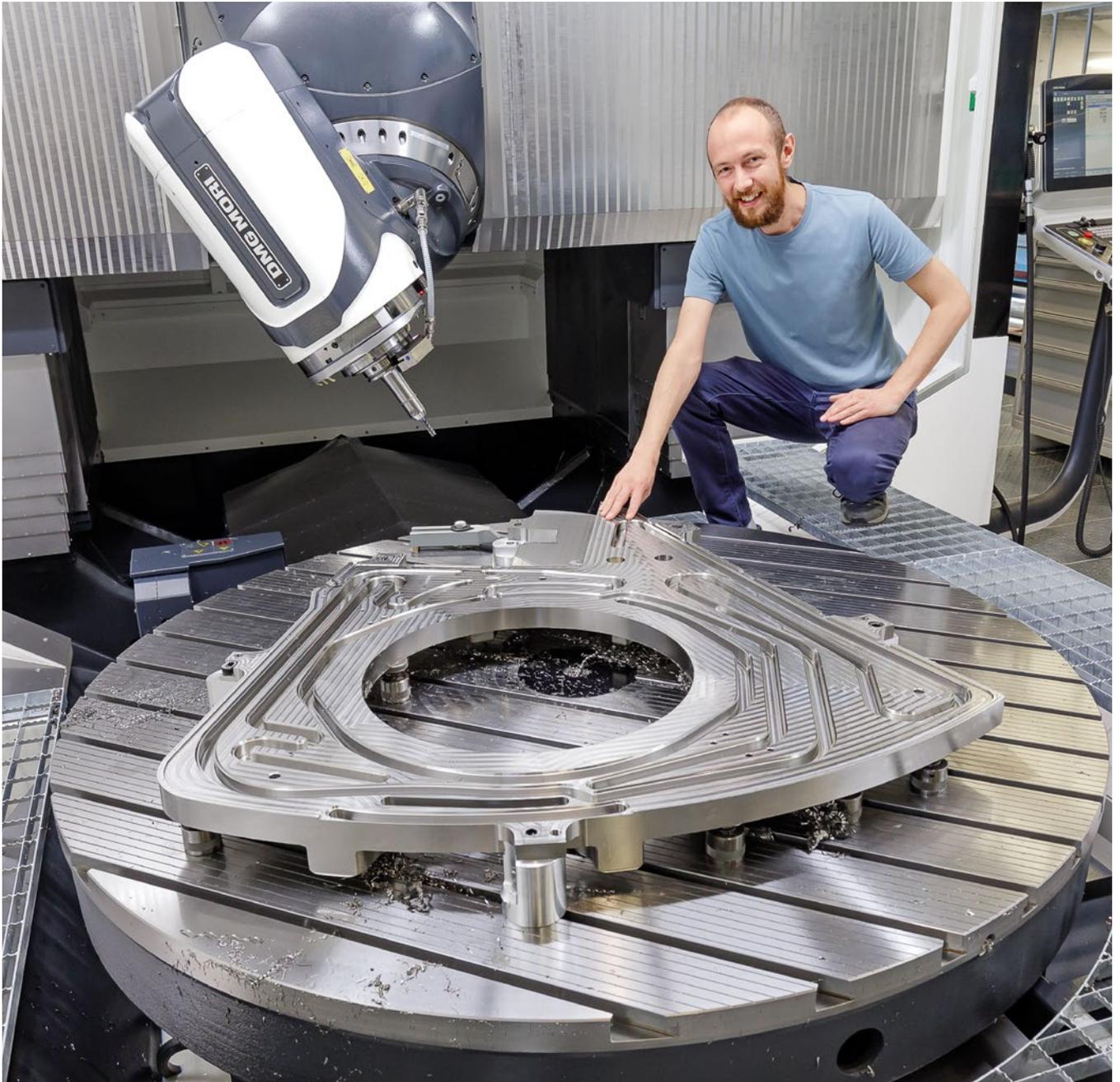
Wieso Europas Solarbranche neue Hoffnung schöpft

SCHLAUKOPF

Weshalb einige Vögel komplex denken können

WUNDERWERK

Warum die Natur Vorbild für Stromnetze sein kann



Präzisionswunder

So sieht Hightech aus! Gemeint ist das auf den ersten Blick unscheinbar wirkende, grau-weiße Etwas, das aus der Wand ragt. Das Gerät hat es aber in sich: Es ist eine der besten Hochpräzisionsfräsen der Welt. Sechs Achsen sorgen dafür, dass sie Materialien aus allen Richtungen und Winkeln bearbeiten und so selbst komplizierteste Bauteile exakt formen kann – in einer Größe von wenigen Millimetern bis zu zwei Metern. Ein Team um Dr. Yannick Beßler vom Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik (ZEA-1) fertigt damit etwa komplexe Bauteile für die Neutronenquelle der European Spallation Source, die derzeit im schwedischen Lund gebaut wird.

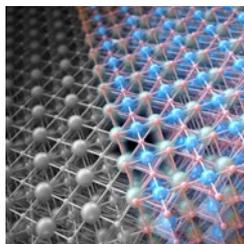
Link auf Blog: fzj.de/fraese

NACHRICHTEN**5****TITELTHEMA****In Superposition**

Jülicher Fachleute sind den Geheimnissen des Quantenkosmos auf der Spur. Denn diese sind die Basis für die Rechenmaschinen von morgen.

8**FORSCHUNG****Bestätigt:
Vorhersage von
1939**

Neutrinos liefern Livia Ludhova Daten zu einem speziellen Fusionsprozess in der Sonne.

18**Mehr Wasserstoff
durch ultradünne
Schicht**

Atomare Unterschiede am Katalysator erhöhen die Produktion des Energieträgers.

19**Gut versorgt**

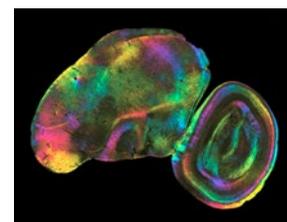
Stromnetze optimal planen – mithilfe eines neuen Modells, das von Netzwerken aus der Natur inspiriert wurde.

20**Forschen in Zeiten
von Corona**

Mathematik, Physik und Supercomputer helfen, das Virus besser zu verstehen und gezielt zu bekämpfen.

22**Comeback
für Europas
Solarindustrie?**

Photovoltaik-Experte Uwe Rau erläutert im Interview, warum neue Technologien Hoffnung machen.

24**Von wegen
Spatzenhirn!**

Einige Vögel verhalten sich erstaunlich pfiffig. Ein neuer Blick auf das Vogelhirn enthüllt Strukturen, die das erklären könnten.

26**RUBRIKEN****Aus der Redaktion**

4

Impressum

4

**Woran forschen
Sie gerade?**

29

Besserwissen

30

Gefällt uns

31

**Forschung in einem
Tweet**

32

Die Zeit der Pioniere

Vor 70 Jahren erlebte die Welt eine Premiere: Konrad Zuse stellte am 12. Mai 1941 mit der Z3 einen funktionsfähigen Digitalrechner vor. Er war nicht der einzige Pionier seiner Zeit. Da gab es etwa Howard Hathaway Aiken, John Atanasoff oder Thomas Harold Flowers. Sie alle entwickelten oder konstruierten im Laufe der 1940er Jahre frühe Computer wie Mark I oder Colossus.

Heute haben sich erneut kluge Köpfe aufgemacht, um eine neue Generation von Rechenmaschinen zu entwickeln. Sie beschäftigen sich aber nicht mehr mit Lochstreifen, Relais und Elektronenröhren, sondern mit der bizarren Welt der Quanten. In Jülich haben sich zahlreiche Expertinnen und Experten zusammengetan, um dem Quantencomputer zum Durchbruch zu verhelfen. Welche Herausforderungen es dabei zu bewältigen gilt und warum gerade das Forschungszentrum ein optimales Umfeld dafür bietet, erzählen sechs Jülicher Pionierinnen und Pioniere in unserer Titelgeschichte.

Auch auf anderen Gebieten gibt es Neuland zu entdecken: Lesen Sie, was wir von der Natur für den Aufbau von Stromnetzen lernen können, warum das Vogelhirn komplexer ist als bislang vermutet und weshalb neue Technologien zu einer Renaissance der europäischen Photovoltaik führen könnten.

Viel Spaß dabei
wünscht Ihre effzett-Redaktion

Noch
mehr drin!

Jetzt das
Online-Magazin
lesen



↑ Die effzett können Sie auf allen Endgeräten lesen – vom Smartphone bis zum PC. Einfach online aufrufen: effzett.fz-juelich.de

Impressum

effzett Magazin des Forschungszentrums Jülich, ISSN 1433-7371

Herausgeber: Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich

Konzeption und Redaktion: Annette Stettien, Dr. Barbara Schunk, Christian Hohlfeld, Dr. Anne Rother (V.i.S.d.P.)

Autoren: Marcel Bülow, Dr. Janosch Deeg, Dr. Frank Frick, Christian Hohlfeld, Anke Krüger, Dr. Jens Kube, Katja Lüers, Dr. Regine Panknin, Dr. Arndt Reuning, Dr. Barbara Schunk, Brigitte Stahl-Busse, Angela Wenzik, Erhard Zeiss.

Grafik und Layout: SeitenPlan GmbH, Dortmund

Bildnachweise: Forschungszentrum Jülich (5 u., 7); Forschungszentrum Jülich und ETH Zürich (5 o.); Forschungszentrum Jülich/Markus Axer, Katrin Amunts (28 u.); Forschungszentrum Jülich, FIAS/Jan Fuhrmann (22 u. (Grafiken)); Forschungszentrum Jülich/Sascha Kreklau (19 o., 21 u., 24-25, 29, 32); Forschungszentrum Jülich/Ralf-Uwe Limbach (2, 3 li. u., 21 o., 23 o., 27 u.); Axer et al., Forschungszentrum Jülich (3 re.); CUBE3D Graphic (3 Mitte o.); Deutsches Museum (31 re.); Helmholtz (31 li.); John Gerrard Keulemans (26 (gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CorvusMoneduloidesKeulemans.jpg?uselang=de>)); Diana Köhne (30 (Illustration)); Christian Marchionna (Titel, 3 li. o., 8-16 (Illustrationen)); Lisa Reitering (6 li.); SeitenPlan (18-19 und 20 (Illustrationen)); alle im Folgenden genannten Motive sind von Shutterstock.com: j.chizhe (6 re.); DRAWaDREAM (27 o.); jopelka (20 li. (Ginkgo-Blatt)); Piotr Krzesiak (28 o.); Kzenon (22 o.); Iryna Linnyk (3 Mitte, 20 re. (Pappel-Blatt)); Matteo Migliorati (3 Mitte u., 23 u.); sdx15 (4 (Montage: SeitenPlan)); spacezerocom (30 (Hinterlegung))

Kontakt: Geschäftsbereich Unternehmenskommunikation, Tel.: 02461 61-4661, Fax: 02461 61-4666, E-Mail: info@fz-juelich.de

Druck: Schloemer Gruppe GmbH

Auflage: 3.000

Alle in der effzett verwendeten Bezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen. Auf eine Nennung verschiedener Varianten der Bezeichnungen wird allein aus Gründen der besseren Lesbarkeit verzichtet.



BIOPHYSIK

Künstliche Zellen

Sie sehen aus wie Schmuckstücke aus einer Glasbläserei: synthetische Zellen, im Computer simuliert und künstlerisch dargestellt. Sie dienen als Modellsystem für biologische Zellen, die unterschiedlichste Formen annehmen können, wenn sie sich fortbewegen oder Nährstoffe aufnehmen. Forschende aus Jülich und Zürich haben an dem Modell untersucht, wie physikalische Kräfte zu der natürlichen Vielfalt von Zellformen und Zellbewegungen führen – die Jülicher mit Simulationen, die Züricher im Labor. Die Erkenntnisse sollen helfen, künftig synthetische Zellen als Miniaturfabriken oder Mikroroboter einzusetzen.

Video im Web-Magazin:
effzett.fz-juelich.de

- INSTITUT FÜR BIOLOGISCHE
INFORMATIONSPROZESSE -

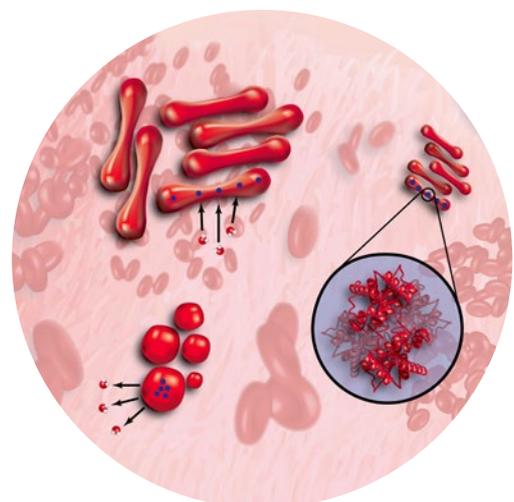
LEBENSWISSENSCHAFTEN

Eine Frage der Form

Rote Blutkörperchen in unserem Körper transportieren Sauerstoff in das Gewebe. Sie sind mit dem Protein Hämoglobin gefüllt, das Sauerstoff bindet und wieder freisetzt. Forschende aus Australien, Schweden und Jülich haben mit Neutronenstreu-Experimenten herausgefunden:

Die Form der Blutkörperchen beeinflusst die Eigenschaften des Hämoglobins, etwa die Beweglichkeit in der Zelle, die wichtig für den effizienten Sauerstoffaustausch ist.

- JÜLICH CENTRE FOR NEUTRON SCIENCE -





NACHGEFRAGT

Mit Daten Blackout vermeiden

Am 8. Januar 2021 stand Mitteleuropa kurz vor einem großflächigen Stromausfall. Leonardo Rydin Gorjão vom Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-STE) analysiert Daten, die helfen sollen, solche Situationen zu verhindern.

Sie haben eine Datenbank mit weltweiten Frequenzmessungen in Stromnetzen mit aufgebaut. Was bringt diese?

Im Stromnetz kommt es dauernd zu kleinen Frequenzabweichungen. Diese können wir dank unserer Datenbank analysieren. So lassen sich Risiken identifizieren und Regelungsmechanismen verbessern, um zu große Frequenzstörungen und somit einen Blackout zu verhindern.

Eine erste Analyse der Daten liegt vor. Was zeigt sie?

Frequenzstörungen im selben Netz an weit auseinanderliegenden Orten wie Istanbul, Karlsruhe und Lissabon beeinflussen sich gegenseitig. Wir haben festgestellt, wie schnell diese Störungen abklingen. Außerdem zeigt die Analyse, dass es vor allem in Kleinst- und Inselnetzen zu bedrohlichen Schwankungen kommen kann.

Warum ist es wichtig, dass Ihre Daten öffentlich zugänglich sind?

Besonders in gesellschaftlich bedeutsamen Forschungsgebieten ist es wichtig, dass alle Forschenden Daten vergleichen und überprüfen können. Offene Daten erleichtern zudem die Zusammenarbeit über Fächer- und Ländergrenzen hinweg.

DIE FRAGEN STELLTE FRANK FRICK.

LEBENSWISSENSCHAFTEN

Stickstoff-Speicher

Ein internationales Forscherteam unter Jülicher Leitung hat herausgefunden, dass Mikroalgen lebensnotwendigen Stickstoff in Form winziger Kristalle speichern, als Guanin. Von dieser Reserve können sie dann in „schlechten Zeiten“ zehren. Zugleich beugt diese spezielle Speicherform einem schädlichen Stickstoff-Überschuss im Organismus vor. Das Stickstoff-Gleichgewicht der Mikroalgen ist unter anderem wesentlich dafür, dass das Phytoplankton enorme Mengen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen kann. Mindestens die Hälfte des CO₂, das weltweit durch Photosynthese aufgenommen wird, geht auf das Konto dieser winzigen Pflanzen.

- INSTITUT FÜR BIO- UND GEOWISSENSCHAFTEN -



1.170.000

Tonnen

Biomasse könnten pro Jahr potenziell im Rheinischen Revier zu höherwertigen Produkten weiterverarbeitet werden. Diese Umwandlung von Biomüll, Grünabfällen oder Resten aus der Lebensmittelwirtschaft könnte ein wichtiger Standortvorteil für die Region zwischen Aachen und Köln werden, so das Ergebnis einer Studie der Prognos AG im Auftrag der Initiative BioökonomieREVIER, die vom Forschungszentrum Jülich koordiniert wird.

- INITIATIVE BIOÖKONOMIEREVIER RHEINLAND/
INSTITUT FÜR BIO- UND GEOWISSENSCHAFTEN -

Transfer beschleunigen

Die Sieger des Ideenwettbewerbs Clusters4Future gelten als neue Flaggschiffe der nationalen Hightech-Strategie 2025. An zwei der sieben ausgewählten Zukunftskluster ist das Forschungszentrum Jülich beteiligt: Bei dem einen dreht sich alles um den Energieträger Wasserstoff, bei dem anderen Cluster namens Neurosys geht es um biologisch inspirierte Chips für die künstliche Intelligenz. Die regionalen Netzwerke sollen dafür sorgen, dass Innovationen schneller im Alltag ankommen.

- INSTITUT FÜR ENERGIE- UND KLIMAFORSCHUNG /
PETER GRÜNBERG INSTITUT -



SICHERHEITSFORSCHUNG

Referenz für die Nukleardetektive

Die Internationale Atomenergie-Organisation IAEO soll sicherstellen, dass Staaten nicht heimlich nukleares Material für Atomwaffen abzuweigen. Proben, die Inspektoren in kerntechnischen Anlagen vor Ort nehmen, untersucht die IAEO mithilfe eines weltweiten Labor-Netzwerks (Network of Analytical Laboratories, NWAL). Neues Mitglied in dem Netzwerk ist das Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-6). Es liefert als einziges der beteiligten Labore Uranoxid-Referenzpartikel, mit denen die Qualität der NWAL-Analysen von Wischproben überprüft wird (im Bild: Dr. Philip Kegler (l.) und Dr. Stefan Neumeier).

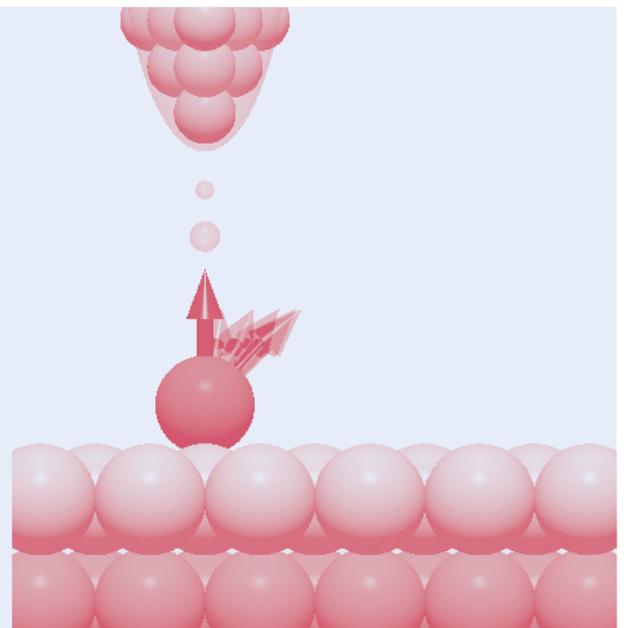
- INSTITUT FÜR ENERGIE- UND KLIMAFORSCHUNG -

PHYSIK

Effekt mit trügerischem Fingerabdruck

Der Kondo-Effekt beeinflusst den elektrischen Widerstand von Metallen bei tiefen Temperaturen. Er ist für neuartige Konzepte zur Datenverarbeitung bedeutsam, etwa mittels Quantenpunkten. Nach der bisherigen Theorie lässt sich der Effekt mithilfe eines Rastertunnelmikroskops zweifelsfrei nachweisen (rechts: schematische Darstellung), weil er einen charakteristischen spektroskopischen Fingerabdruck erzeugt. Nun aber konnten Jülicher Forschende zeigen: Womöglich geht dieses „Erkennungsmerkmal“ auf ein anderes Phänomen zurück. Ihr Fazit: Viele Erkenntnisse zum Kondo-Effekt müssen noch einmal neu untersucht werden.

- PETER GRÜNBERG INSTITUT -





David DiVincenzo formulierte →
vor über 20 Jahren fünf
grundlegende Kriterien,
die ein Quantencomputer
erfüllen muss.

In Superposition

Das Rechnen mit Computern neu erfinden – dieser Vision folgen Forschende weltweit. Dazu konstruieren sie Maschinen, die den mitunter bizarren Regeln des Quantenkosmos gehorchen. Solche Quantencomputer dürften für bestimmte Aufgaben herkömmlichen Rechnern deutlich überlegen sein. In Jülich finden die Fachleute auf diesem Gebiet eine exzellente Forschungsumgebung vor.

Tief im Inneren der Materie verbirgt sich eine rätselhafte Welt – der Quantenkosmos. Beherrscht wird er von schwer durchschaubaren Gesetzen. Die Dinge dort können über spukhafte Fernwirkungen miteinander in Verbindung stehen, sind gleichzeitig tot und lebendig.

Jülicher Forschende haben sich aufgemacht, dem Quantenkosmos seine Geheimnisse zu entreißen. Ein ambitioniertes Ziel vereint sie alle: Sie wollen lernen, die kleinsten Teilchen zu kontrollieren – um damit eine Rechenmaschine zu konstruieren, wie sie die Welt noch nie gesehen hat: einen leistungsstarken Quantencomputer. Er könnte Pharmazeuten und Materialforschern bei der Suche nach neuen Wirkstoffen und Katalysatoren helfen, indem er komplexe Moleküle simuliert. Er könnte Logistikprobleme und Produktionsabläufe in Fabriken im Handumdrehen optimieren – schneller als jeder Hochleistungsrechner.

So fahnden die Jülicher Experten nach exotischen Materialien, entwerfen daraus neuartige Schaltkreise, die sie zu ersten Prototypen zusammensetzen. Sie schreiben einzigartige Algorithmen und lassen ihre Rechner antreten gegen die schnellsten Superrechner der Welt. Das Forschungszentrum bietet ihnen dafür ein optimales Umfeld: moderne Labore und leistungsfähige Geräte; darüber hinaus Partner aus der Industrie und eine lokale Service-Infrastruktur. Doch was den Erfolg des Standorts am Ende ausmacht, sind die Köpfe hinter der Forschung: ein Team aus hochspezialisierten Fachleuten, die ihre Ideen, ihr Wissen, ihre Erfahrungen, ihren Pioniergeist und ihre Beharrlichkeit einbringen, um das gemeinsame Ziel zu erreichen. Wer sie sind, was sie bisher geleistet haben und welche Visionen sie verfolgen, möchten wir hier vorstellen.

Am Anfang steht die Idee: Kleinste Teilchen wie Atome, Elektronen oder Photonen können Informationen tragen. Koppelt man mehrere dieser Quantenbits, kurz Qubits (s. Kasten), aneinander, lassen sich damit unzählige Rechnungen parallel ausführen. Bestimmte

Algorithmen benötigen damit auf Quantencomputern nur einen winzigen Bruchteil der Zeit, die sie auf konventionellen Rechnern brauchen. Einer der ersten, der dieses Konzept ausformuliert hat, ist David DiVincenzo.

DAVID DIVINCENZO

Der Quantenversther

„Anfang der Neunzigerjahre begann ich, mich für das Rechnen mit Quanten zu interessieren. Damals war die Szene noch überschaubar“, erinnert sich Prof. David DiVincenzo. Doch schon 1994 kam ein Durchbruch. Mathematiker konnten erstmals zeigen: Mit schnellen Quanten-Algorithmen lassen sich tatsächlich relevante Probleme lösen. „Deshalb kamen sie zu uns Physikern und fragten, ob man die dafür notwendigen Quantenprozessoren tatsächlich bauen könnte.“

Zwei Jahre später definierte DiVincenzo das grundlegende Konzept hinter allen Rechnern dieser Art – festgehalten in den fünf nach ihm benannten Kriterien. Das erste beschreibt die Grundvoraussetzung eines jeden Computers dieser Art: Er rechnet mit Qubits anstelle von Bits. „Heutzutage hören sich diese Sätze so an, als wolle man einem Kindergartenkind erklären, wie ein Computer funktioniert. Aber damals hatten wir keine genaue Vorstellung davon, wie ein Quantenrechner aussehen könnte“, erklärt der Physiker, der als einer der wichtigen Vordenker auf dem Gebiet der Quantencomputer gilt. Einen großen Teil seiner Karriere hat er in einem Forschungslabor des IT-Riesen IBM verbracht. Im Jahr 2010 wechselte er dann als JARA-Professor ans Jülicher Peter Grünberg Institut (PGI-2 und PGI-11) und die RWTH Aachen. „Hier besitze ich die Ressourcen und die Freiheit, meinen eigenen Forschungsinteressen nachzugehen“, sagt der Physiker. „Und ich schätze das Umfeld: die Vielfalt an Themen und Köpfen.“

Quantenbits

– oder Qubits – sind das Pendant zu klassischen Computerbits: Das können zum Beispiel Atome oder Ionen sein, die wie die Perlen einer Kette in einer Reihe in einer optischen Falle schweben. Oder supraleitende Schleifen, durch die Kreisströme fließen. Oder auch einzelne Elektronen, gefangen in Käfigen aus Halbleitermaterialien, sogenannten Quantenpunkten. Entscheidend ist: Alle diese Systeme können in zwei Zuständen vorliegen, die den binären Werten eines klassischen Computers entsprechen: null oder eins. Und sie alle besitzen die Eigenschaften von Wellen. Sie können sich daher selbst überlagern. Diesen Zustand nennt man „in Superposition“ sein. Sie sind damit in der Lage, auch alle Zustände zwischen null und eins anzunehmen. Die Herausforderung besteht allerdings darin, den fragilen Quantenzustand vor äußeren Störfaktoren zu schützen. Die Überlagerung muss lange genug bestehen, um mit den Qubits rechnen zu können.

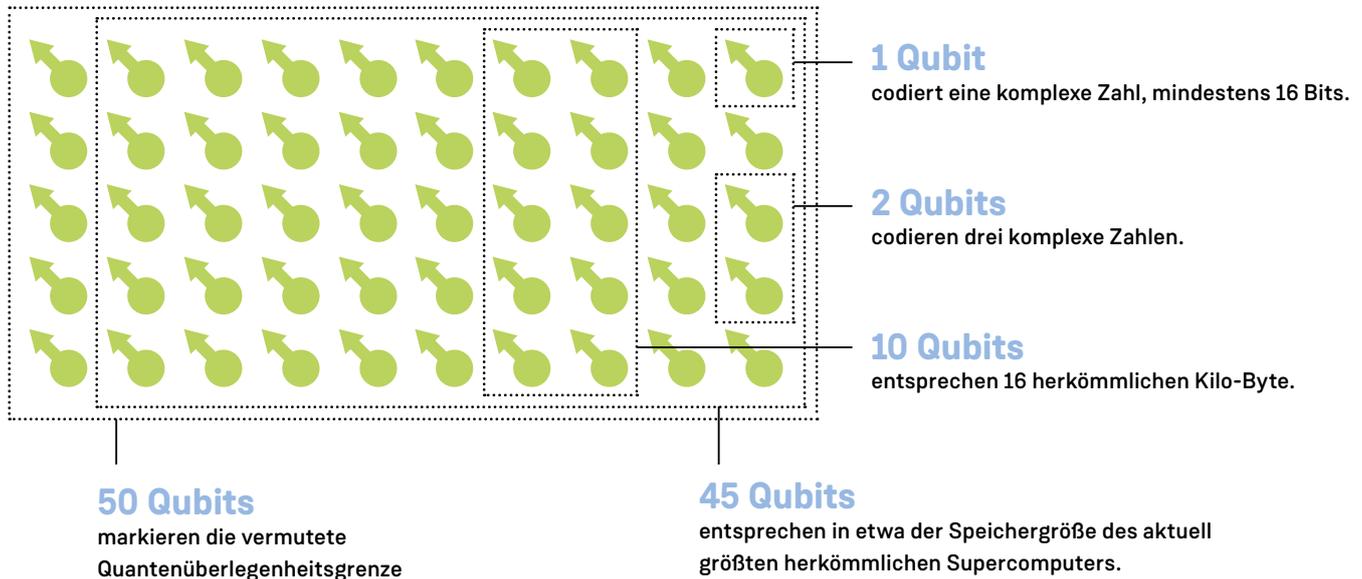
In Jülich widmet er sich der Fehlerkorrektur: Die instabile Natur des Quantenzustandes führt immer wieder dazu, dass sich Fehler in die Rechnungen einschleichen. Die möchte der Physiker beheben: „Wir verfolgen gerade die Idee, ein Qubit auf drei Elektronen, die in einem Halbleiterkäfig sitzen, aufzuteilen“, erklärt DiVincenzo. Sollte sich bei einem Teilchen des Trios ein Fehler einschleichen, so ließe sich das leicht an den anderen beiden überprüfen.

Von der Idee zur Umsetzung: Zunächst einmal müssen Quantensysteme gefunden werden, die sich leicht von außen steuern lassen. Sie bilden die Grundlage, die kleinste Einheit eines Quantencomputers. Jemand, der solche Materialien sucht, ist Stefan Tautz.

Stefan Tautz baut das →
Helmholtz Quantum
Center mit auf: Dort
sollen alle Aspekte des
Quantencomputings
erforscht werden.



Bits und Qubits



Quelle: www.quantencomputer-info.de/quantencomputer/quantencomputer-einfach-erklart

STEFAN TAUTZ

Der Molekülmanipulator

Mit bloßen Händen kann Prof. Stefan Tautz einzelne Moleküle bewegen. Mit einem Wisch durch die Luft dirigiert er die winzigen Gebilde. Er löst sie aus ihrem Verbund heraus, verschiebt sie, richtet sie hochkant auf oder ordnet sie auf einer Oberfläche beliebig an. Zugegeben: Die eigentliche Arbeit verrichtet dabei ein Rastersondenmikroskop, dessen feine Sondenspitze die Moleküle manipuliert. Infrarotkameras nehmen die Handbewegung im dreidimensionalen Raum auf und übertragen sie auf die Spitze.

An sich ist diese Technik des Molekülschubsens nicht neu. Aber die Forschenden am Peter Grünberg Institut (PGI-3) nutzen sie mittlerweile, um nach neuen Materialien für zukünftige Quantencomputer zu suchen.

Denn einzelne Moleküle mit den passenden elektronischen Eigenschaften lassen sich als Qubits nutzen. „Wir können mit unseren Mikroskopen sehr schnell und zielgerichtet maßgeschneiderte Strukturen aufbauen, eine Art molekularer 3D-Druck“, erklärt Tautz. „Anschließend überprüfen wir sie auf ihre Eignung als Qubits.“

„Bei all dem hilft uns unsere ausgezeichnete Infrastruktur, die wir noch weiter ausbauen, wie etwa im Helmholtz Quantum Center (s. Kasten)“, sagt Tautz. Viel wichtiger seien jedoch die Menschen, die hier zusammenkommen, um an einem gemeinsamen Ziel zu

arbeiten. „Niemand baut einen Quantencomputer ganz alleine“, so der Forscher, „es gehören unzählige Fachleute mit einer Vielfalt an Kompetenzen und akademischen Hintergründen dazu. Dafür bietet Jülich die besten Voraussetzungen.“

Helmholtz Quantum Center

Ob Atomfallen, Supraleiter, Halbleiter, Majorana-Teilchen oder ganz andere Arten von Qubits: Es ist noch nicht entschieden, welche Technologie am besten abschneiden wird. Dementsprechend vielseitig wird auch ein zentrales Technologielabor ausgelegt, das gerade in Jülich aufgebaut wird: Das Helmholtz Quantum Center (HQC). „Es deckt den gesamten Entwicklungsbogen ab von den Materialien bis zum Quantenrechner und den Algorithmen, die darauf laufen werden“, sagt Stefan Tautz, Vertreter der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am HQC. „Es soll ein reiches Ökosystem bieten, in dem alle Aspekte des Quantencomputings erforscht werden.“ Daher wird das HQC-Gebäude Platz für unzählige Speziallabore mit einer reichhaltigen Infrastruktur bieten. Wegen der fragilen Natur der Qubits ist es notwendig, die Experimente nur knapp über dem absoluten Nullpunkt durchzuführen. Die Räumlichkeiten müssen gegen störende Einflüsse durch Magnetfelder, Hochfrequenzfelder und Vibrationen isoliert werden.

Sind Materialien gefunden, um die Qubits zu erzeugen, müssen mehrere Qubits zu kleinen schaltbaren Einheiten verbunden werden. Im klassischen Computer übernehmen Transistoren aus Halbleitermaterialien diese Aufgabe. Beim Quantenrechner sind neue Konzepte gefragt. Mit ihnen beschäftigt sich Hendrik Bluhm.

HENDRIK BLUHM

Der Elektronenschieber

„Es ist diese Pionierarbeit, die mich reizt, dieser Mondlandungscharakter der Forschung“, sagt Prof. Hendrik Bluhm. „Auf einer komplett neuen Grundlage, die in der klassischen Datenverarbeitung keinen Vergleich kennt, entwickeln wir eine Technologie mit wirklich handfestem Nutzen.“

Der Physiker entwirft elementare Bauelemente für einen zukünftigen Quantencomputer und untersucht deren Eigenschaften. Damit die Quantenprozessoren ihren Vorteil gegenüber klassischen Hochleistungsrechnern überhaupt ausspielen können, müssen sie über eine ausreichende Kapazität von Qubits verfügen. „Für viele der geplanten Anwendungen braucht man Millionen von Qubits. Bis dahin ist es noch ein weiter Weg“, erläutert Bluhm. Wichtig sei es daher, Architekturen zu entwickeln, die sich leicht in großem Maßstab umsetzen lassen. Dafür setzt der Forscher auf sogenannte Halbleiter-Spin-Qubits, die Informationen im Eigendrehimpuls einzelner Elektronen speichern.

QUASAR und QLSI

Das Prinzip des Elektronen-Shuttles soll im QUASAR-Projekt in die Entwicklung eines deutschen Halbleiter-Quantenprozessors münden. Die im Labor bereits erfolgreich getesteten Schaltungen werden dafür hochskaliert – sodass am Ende ein Demonstrator mit 25 gekoppelten Qubits verwirklicht wird. Über ein Verbindungselement, einen sogenannten Quantenbus, können einzelne Elektronen auf einem Chip kontrolliert über größere Distanzen transportiert werden. Mit an Bord von QUASAR sind weitere Partner aus dem akademischen und industriellen Umfeld. So wird der Halbleiterhersteller Infineon untersuchen, wie sich die Quantenchips mit herkömmlicher Siliziumtechnologie verwirklichen und im großen Maßstab industriell fertigen lassen. Außerdem beteiligt sich Jülich am QLSI-Projekt des europäischen Quantenflaggschiffs, in dem ähnliche Quantenchips auf Siliziumbasis entwickelt werden.

„Für viele der geplanten Anwendungen braucht man Millionen von Qubits. Bis dahin ist es noch ein weiter Weg.“

HENDRIK BLUHM

Die haben aus Sicht von Hendrik Bluhm wichtige Vorteile: Im Vergleich zu den supraleitenden Systemen ließen sich mit den Halbleiter-Qubits langfristig sehr viel mächtigere Prozessoren erschaffen. Und um sie herzustellen, lassen sich die üblichen Verfahren aus der etablierten Halbleiterfertigung nutzen. „Außerdem sind sie im Vergleich zu supraleitenden Qubits weniger anfällig gegenüber Störungen von außen, wie etwa Wärmestrahlung oder die kosmische Hintergrundstrahlung“, erläutert der JARA-Professor, der in Jülich am Peter Grünberg Institut (PGI-11) und an der RWTH Aachen forscht.

Um mit Halbleiter-Qubits zu rechnen, werden mehrere Elektronen aneinandergeschnitten, also ihre Elektronenspins miteinander verschränkt. Dafür müssen die winzigen Teilchen nah aneinander gebracht werden. Das fällt aber umso schwerer, je mehr Elektronen miteinander verbunden werden sollen. Denn dann steigt auch die Distanz unweigerlich an. Das Team um Hendrik Bluhm arbeitet daher an einer Möglichkeit, die verschränkten Elektronen als Informationsträger über den Chip hin- und herzuschieben. Mit solch einem Elektronen-Shuttle könnte es gelingen, eine große Zahl gleichzeitig miteinander zu verbinden (s. Kasten QUASAR).

Solche alternativen Konzepte böten Europa die Möglichkeit, leichter gegenüber den Marktführern aufzuholen. Jülich käme dabei eine Schlüsselrolle zu: „Das Forschungszentrum hat seine Kompetenzen auf dem Gebiet der Quantentechnologie in den vergangenen Jahren kontinuierlich ausgebaut. Die Gruppe von Fachleuten ist beständig größer und vielfältiger geworden.“



Einen Überblick über die Jülicher Quantenforschung finden Sie online in unserem Dossier „Quantentechnologie“: fzj.de/quanten





← Hendrik Bluhm möchte mit Halbleiter-Qubits Prozessoren erschaffen, die leistungsstärker sind als die mit supra-leitenden Qubits.

Der Prozessor eines Computers besitzt Milliarden kleinster elektronischer Schalter – die Transistoren –, um die zahlreichen Rechnungen durchzuführen. Bei Quantencomputern stellt das Skalieren von einigen wenigen Qubits bis hin zu integrierten Schaltkreisen noch eine Herausforderung dar. Frank Wilhelm-Mauch möchte sich dieser Herausforderung stellen.

FRANK WILHELM-MAUCH

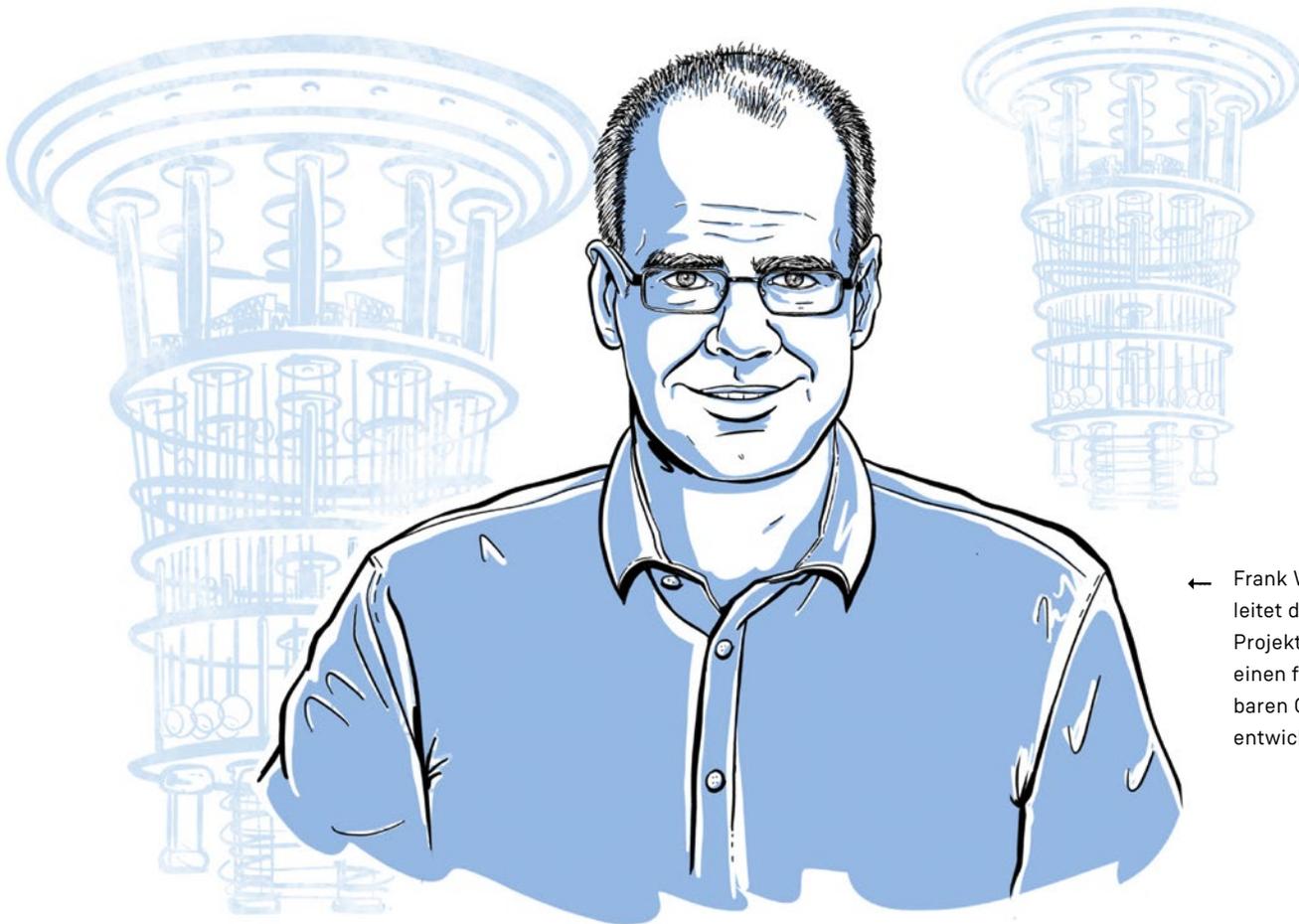
Der Baumeister

Handwerkliches Geschick gehöre nicht zu seinen Vorzügen, gibt Prof. Frank Wilhelm-Mauch zu: „Wenn ein Nagel in die Wand geschlagen werden muss, erledigt das immer meine Frau.“ Und so habe es nahegelegen, dass er sich im Studium der Theoretischen Physik zugewandt habe. Diese erlaubte es ihm, sich mit verblüffenden Gedankengebäuden auseinanderzusetzen. „Andererseits befand ich

mich auch im Zwiespalt, dass ich die Welt nicht nur erklären wollte. Ich wollte etwas bauen. Und dafür stellt Quantencomputing das ideale Gebiet dar.“

In Jülich arbeitet der Forscher vom Peter Grünberg Institut (PGI-12) daran, einzelne Quantensysteme zu Schaltkreisen zu verbinden, so wie sie auch auf konventionellen Computerchips zu finden sind. Dort bestehen sie aus einzelnen Transistoren, die so miteinander verschaltet sind, dass sie fundamentale Rechenoperationen ausführen können. Für die Quantenrechner konzentriert Frank Wilhelm-Mauch sich auf Qubits in supraleitenden Kontakten, die der Technologie von Google oder IBM ähneln. „Sie bilden die Basis für unsere Quantenchips“, erläutert Frank Wilhelm-Mauch. „Wir entwickeln auf dieser Grundlage neue Bauelemente und beschäftigen uns mit Strategien, wie man bereits existierende Hardware einfacher, robuster und kleiner machen kann.“

Dabei erinnert er sich gerne an seinen ersten Computer, einen Sinclair ZX-81. Die britische Rechenmaschine war einer der ersten



← Frank Wilhelm-Mauch leitet das europäische Projekt OpenSuperQ, das einen frei programmierbaren Quantenrechner entwickelt.

Homecomputer, die vor 40 Jahren auf den Markt gekommen waren – noch vor dem berühmten Commodore 64. „Vom Entwicklungsstand sind heutige Quantencomputer noch nicht ganz so weit wie der ZX-81 damals. Aber das Gefühl beim Programmieren ist doch vergleichbar. Es geht darum, das Beste aus einer limitierten Hardware herauszuholen.“

Apropos Hardware: Der Theoretiker hat tatsächlich auch die Gelegenheit zum Bauen eines einzigartigen Prototyps bekommen: Im Projekt OpenSuperQ soll ein frei programmierbarer Quantenrechner verwirklicht werden, der für alle Forscher Europas zugänglich ist. Wilhelm-Mauch koordiniert das Vorhaben (s. Kasten).

„Wir müssen erst die Fehlerwahrscheinlichkeit in den Quantencomputern verringern und dann die Zahl der Qubits erhöhen.“

FRANK WILHELM-MAUCH

im Interview unter fzj.de/interview-wilhelm-mauch

OpenSuperQ

Das Projekt OpenSuperQ soll den ersten frei programmierbaren europäischen Quantencomputer hervorbringen, der konventionellen Hochleistungsrechnern überlegen ist. Dafür müssten mindestens 50 Qubits miteinander verschränkt werden. Der Jülicher Forscher Frank Wilhelm-Mauch koordiniert den Bau des Rechners, der auf supraleitenden Quantenschaltkreisen basiert: Zehn Partner aus Wissenschaft und Industrie arbeiten im Projekt OpenSuperQ zusammen. Der Rechner mit einer offenen Architektur soll dann im Rahmen der Jülicher Quanten-Infrastruktur JUNIQ am Jülich Supercomputing Centre Fachleuten auf der ganzen Welt per Fernzugriff zur Verfügung stehen. OpenSuperQ ist Teil des EU-Flagships zum Quantencomputing. Jülicher Forschende sind auch an weiteren Projekten des Flagships beteiligt.

Quantencomputer können ihren Vorteil des parallelen Rechnens nur bei bestimmten Algorithmen ausspielen: etwa, wenn große Datenmengen durchforstet oder die Eigenschaften von Molekülen und Materialien kalkuliert werden sollen. Damit entsprechende Programme reibungslos auf den derzeit noch fehleranfälligen Rechnern laufen, brauchen die Maschinen eine ausgereifte Firmware. Mit dieser Programmebene, die zwischen der Hardware und den darauf arbeitenden Anwendungen vermittelt, beschäftigt sich Tommaso Calarco.

TOMMASO CALARCO

Der Netzwerker

Tommaso Calarco hat viele Talente. Unter anderem besitzt er einen Bachelorabschluss in klassischer Gitarre. Dass er der Quantenphysik den Vorzug gegeben hat, dürfte als Glücksfall für die gesamte europäische Quantenforschung gewertet werden. Denn der Physik-Professor gilt als der Initiator des Quantenmanifests, das in das milliardenschwere EU-Flaggschiffprogramm mündete. Darin bekleidet er das Amt des Vorsitzenden des Quantum Community Network (QCN), das Wissenschaft und Wirtschaft zusammenbringt (s. Kasten)

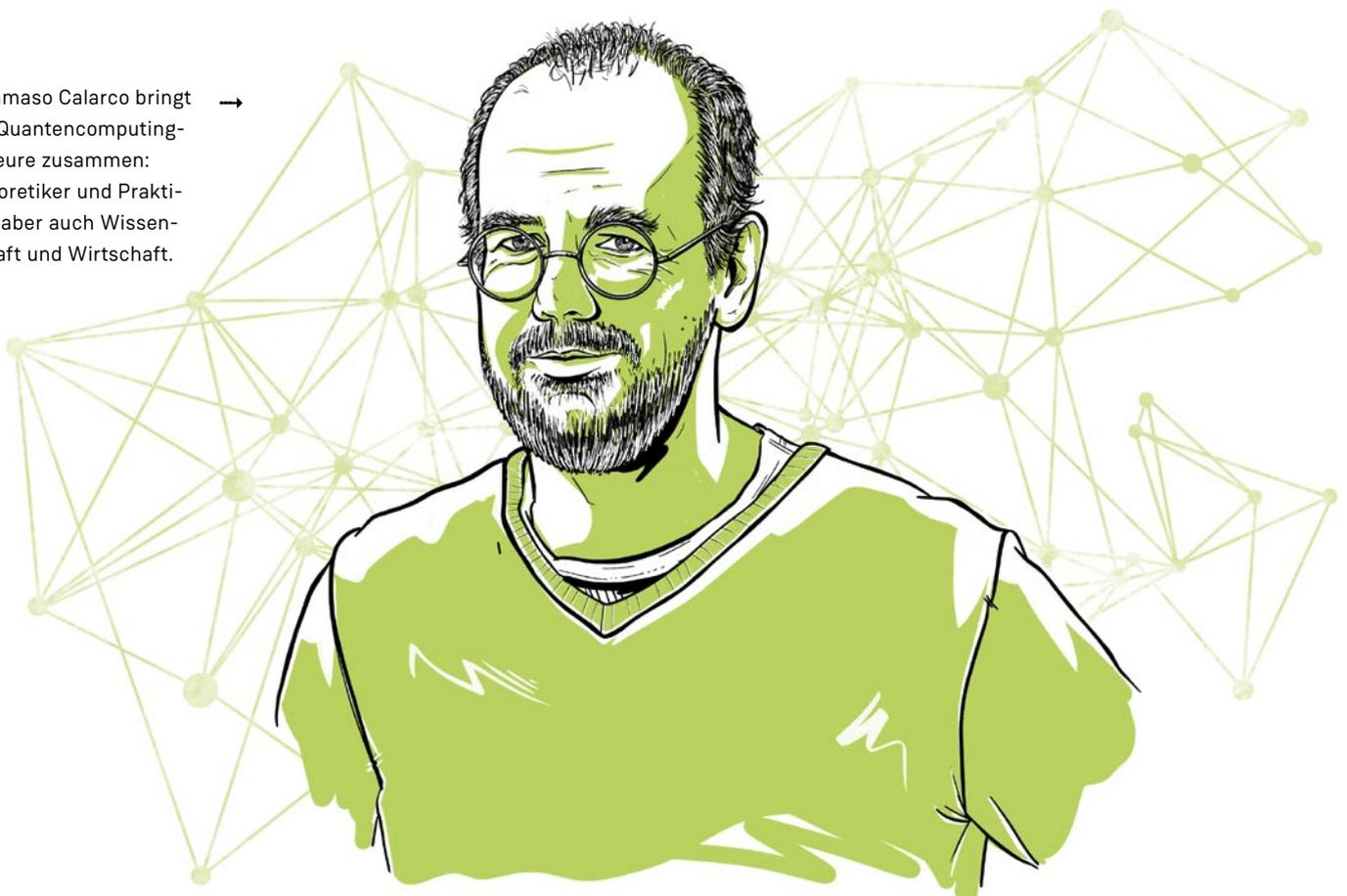
In seiner Forschung sucht er nach Möglichkeiten, die grundlegenden Prozesse und damit die Rechengenauigkeit beim Quantencomputing zu verbessern – und zwar für alle Arten von Qubits. „Wir nutzen in der Quantenwelt kleinste Teilchen wie Atome und Elektronen. Wir manipulieren sie aber mit makroskopischen Werkzeugen. Das ist etwa so, als würde ich Gitarre spielen mit Boxhandschuhen“, erklärt Calarco. Das nötige Fingerspitzengefühl liefert eine mathematische Methode, die Kontrolltheorie. Sie spielt zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt eine wichtige Rolle, aber auch beim Optimieren von Produktionsprozessen. „Wir haben diese Theorie in den Bereich der Quantentechnologien übertragen, um Quantenprozesse gezielt zu beeinflussen und die beste Leistung aus einem bestehenden System herauszuholen“, sagt der Wissenschaftler vom Peter Grünberg Institut (PGI-8).

Tommaso Calarco bringt →
die Quantencomputing-
Akteure zusammen:
Theoretiker und Prakti-
ker, aber auch Wissen-
schaft und Wirtschaft.

Bei einem Arbeitsschritt in einem Quantencomputer werden verschränkte Qubits von einem in einen anderen definierten Zustand überführt. Der Physiker und sein Team entwickeln Methoden, die dafür sorgen, dass auf diesem Weg mögliche Hindernisse und Fehler vermieden werden. Das geschieht auf einer Ebene zwischen den eigentlichen Quantenrechnern und den Quantenalgorithmien, die darauf laufen. „Es ist sozusagen die Firmware für Quantencomputer. Sie steht genau zwischen Hard- und Software“, erklärt Tommaso Calarco. Die Firmware übernimmt grundlegende Aufgaben in einem Rechner oder einem anderen elektronischen Gerät. Sie passt etwa die Quantenrechner so an, dass sie neue Algorithmen abarbeiten können.

Quantum Community Network

Im Quantum Community Network (QCN) des EU Quantum Flagships wird jeder Mitgliedstaat durch zwei Personen vertreten: eine aus der Forschung und eine aus der Industrie. „Das QCN ist ein wichtiges Instrument für die internationale Vernetzung – nicht nur, damit Theoretiker und Experimentalgruppen zusammenkommen, sondern auch Wissenschaft und Wirtschaft“, erklärt der QCN-Vorsitzende, der Jülicher Forscher Tommaso Calarco. Den Austausch mit der Industrie treibt er auch über das Quantum Industry Consortium (QuIC) voran, das auf Initiative vom QCN entstanden ist und Firmen aus Europa zusammenbringt.



Anwendungen für Quantencomputer, die Algorithmen, können bereits jetzt entwickelt und erprobt werden, auch ohne dass es fertige Quantencomputer gibt. Denn auf konventionellen Hochleistungsrechnern lassen sich diese Prozesse simulieren. Wie das funktioniert, weiß Kristel Michielsens.

KRISTEL MICHELSEN

Die Rechenkünstlerin

Beim Pionierflug des Quantencomputings waren ihre Rechenkünste gefragt: Prof. Kristel Michielsens und ihr Team vom Jülicher Supercomputing Centre trugen 2019 mit Simulationen auf dem Jülicher Supercomputer JUWELS zum Beweis der sogenannten Quantenüberlegenheit durch Google bei. Die Quantenüberlegenheit bezeichnet den Zeitpunkt, ab dem ein Quantencomputer erstmals einem herkömmlichen Rechner bei einer bestimmten Aufgabe überlegen ist. Das nachzuweisen, galt als große Herausforderung.

Mit dem Jülicher Hochleistungsrechner JUWELS testet Kristel Michielsens Quanten-Algorithmen, also Programme, die künftig auf Quantenrechnern laufen sollen. JUWELS schafft 85 Petaflops, das

sind 85 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde. Diese Rechenleistung übersteigt die von 300.000 modernen PCs. „Im Grunde genommen können die Quantenalgorithmen auch auf konventionellen Rechenmaschinen laufen. Erst ab einem Schwellenwert von ungefähr 50 Qubits kommen die Bit-basierten Computer an ihre Grenzen“, erklärt die Forscherin.

Ein großer Vorteil der Simulationen ist laut Michielsens, dass die simulierten Quantenbits alle hundertprozentig zuverlässig arbeiten – im Gegensatz zu den realen Schaltungen auf echten Quantenprozessoren. Durch den Vergleich zwischen Simulation und Realität lässt sich damit auch die Rechenqualität eines Quantencomputers beurteilen.

Allerdings kommen Supercomputer an ihre Grenzen, wenn es darum geht, einen Quantencomputer zu simulieren, wie er heutzutage schon bei Firmen wie IBM oder Google steht. „Im Jahr 2018 hatten wir einen Prozess mit 48 verschränkten Qubits simuliert“, sagt die Physikerin. „Das war der Weltrekord. Es dürfte schwierig sein, den einzustellen. Denn mit jedem Qubit, das darüber hinaus dazu kommt, verdoppelt sich der Speicherbedarf des Rechners, auf dem die Simulation läuft.“

ARNDT REUNING



Kristel Michielsens war am →
Nachweis der Quanten-
überlegenheit beteiligt:
Ein Quantencomputer war
erstmals einem herkömm-
lichen Rechner überlegen.

JUNIQ

Simulationen von Quantencomputern auf Hochleistungsrechnern bilden eine wichtige Komponente der Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing, kurz JUNIQ. Das ist eine Art Maschinenpark für Quantencomputer, der Geräte auf unterschiedlichem technologischem Reifegrad an einem Ort versammelt. Ein 5.000+ Qubit Advantage System, ein Quantenannealer der kanadischen Firma D-Wave Systems, wird ab Mitte 2021 im JUNIQ-Zentrum betrieben. Ab Ende 2022 wird ein Quantensimulator von Pasqal hinzukommen, der tief in die modulare Supercomputer-Architektur des JSC integriert sein wird. Außerdem bietet das Zentrum ab Herbst 2021 den Fernzugriff auf den europäischen Quantencomputer des EU-Flaggschiff-Projektes OpenSuperQ, welcher im HQC betrieben wird.

Ab 2024 kommt der Fernzugriff auf einen digital-analogen Quantencomputer hinzu, der im Projekt DAQC (s. Quanten-Ticker) entwickelt wird. Darüber hinaus ist der Zugriff auf eine Vielzahl weiterer Systeme geplant, darunter auch Hybrid-systeme. Es gibt außerdem Support, Trainings- und Kooperationsmöglichkeiten, und es werden Softwaretools, Modellierungskonzepte und Algorithmen sowie Prototyp-Anwendungen entwickelt. „Jedem Nutzer dieser Infrastruktur wird dann eine ganze Palette von Systemen zur Verfügung stehen, aus der er sich aussuchen kann, was am besten für ihn geeignet ist“, sagt die Jülicher Physikerin Kristel Michielsen, eine der Initiatoren von JUNIQ.

+++ Quanten-Ticker +++ Quanten-Ticker +++ Quanten-Ticker +++

DIGITAL UND ANALOG ARBEITEN HAND IN HAND

Jülicher Forschende sind am Verbundprojekt DAQC beteiligt. Es hat das Ziel, einen digital-analogen Quantencomputer zu bauen und zu betreiben. Analoge Quantenrechner, bei denen die Qubits kontinuierlich miteinander in Wechselwirkung stehen, sind weniger fehleranfällig. Allerdings sind sie nicht universell programmierbar. Ihre Robustheit soll nun kombiniert werden mit der flexiblen Rechenkraft digitaler Schaltkreise.

YIN-UND-YANG-QUBITS HARMONISIEREN PERFEKT MITEINANDER

Einem internationalen Team unter Beteiligung von Jülicher Forschenden ist es gelungen, zwei Qubits auf vollkommene Weise miteinander zu verschränken. Diese Verschränkung ist notwendig, damit die beiden Informationsträger überhaupt miteinander interagieren können. Üblicherweise werden die Qubits dabei aber stets von einer parasitären Wechselwirkung behindert, die auf gegenseitiger Abstoßung beruht. Beim Rechnen kommt es dadurch zu Fehlern. Die Wissenschaftler haben nun zwei komplementäre Arten von supraleitenden Qubits aneinander gekoppelt: Die beiden unterscheiden sich im Vorzeichen der sogenannten Anharmonizität. Dadurch

kam es nicht zur gegenseitigen Abstoßung. Wie im fernöstlichen Yin-und-Yang-Symbol glichen sich die beiden entgegengesetzten Eigenschaften aus. Für den winzigen Quantenschaltkreis konnten die Forscher zeigen, dass sich die Genauigkeit der Rechenoperation auf diese Weise deutlich verbessern ließ.

IONENFALLEN UND SUPERCOMPUTER RECHNEN GEMEINSAM

Auch zum Verbundprojekt IQuAn leistet das Forschungszentrum einen Beitrag. Im Mittelpunkt stehen Quantencomputer, die mit Ionen in Fallen arbeiten. Ihr Vorteil: Sie bewahren ihren Quantenzustand relativ lange. Im IQuAn-Projekt werden neuartige Architekturen für solche Systeme erprobt, die bis zu 100 Qubits miteinander rechnen lassen. Geplant ist ein hybrides System, bei dem ein Quantenprozessor an einen Hochleistungsrechner angebunden wird.

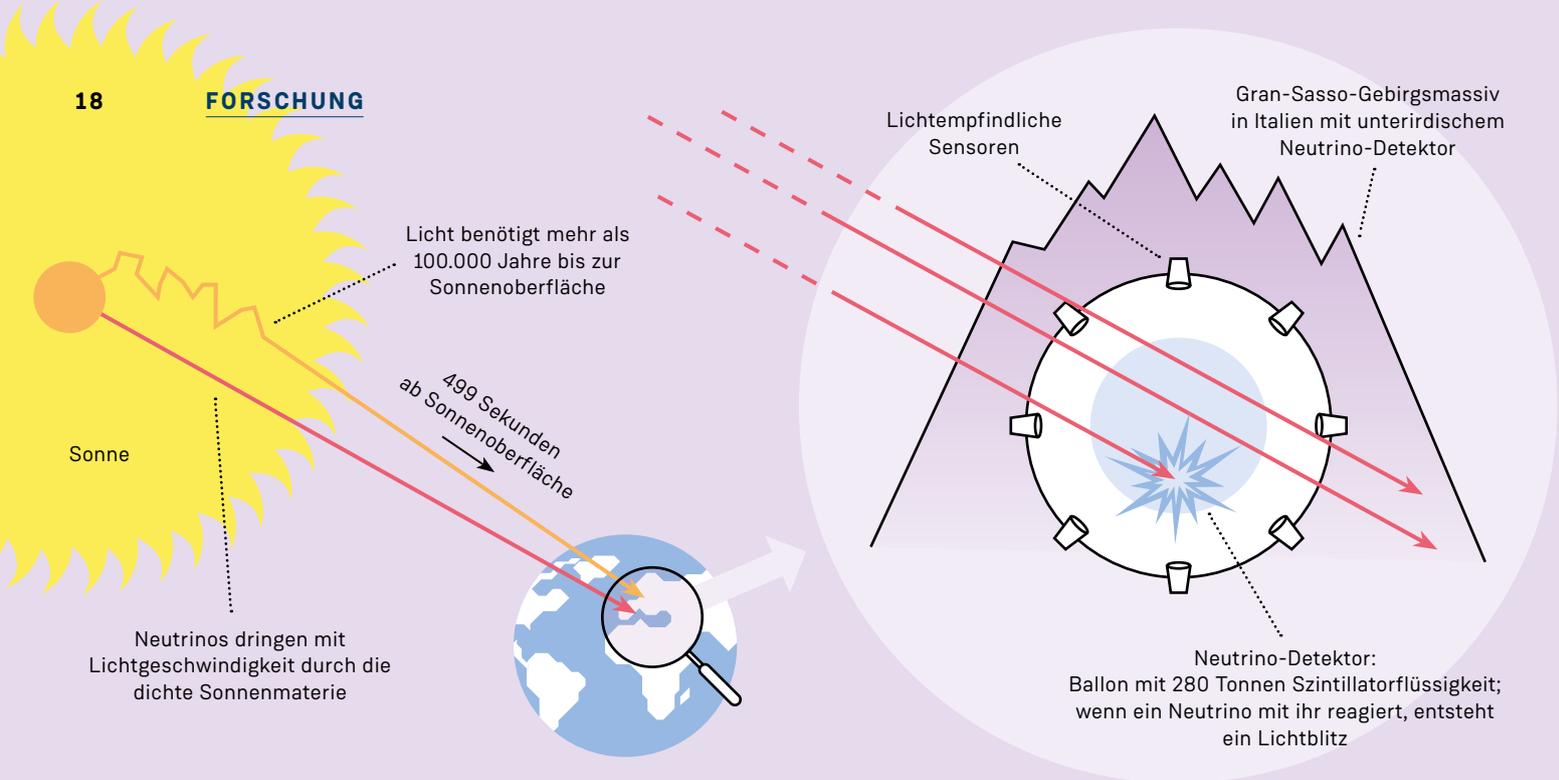
PRÄZISE KONTROLLE VERBESSERT QUBIT-QUALITÄT

Quantenprozessoren mit supraleitenden Qubits grundlegend zu verbessern, dieses Ziel hat sich das Projekt GeQCoS auf die Fahnen geschrieben. Das zentrale Bauelement soll aus nur wenigen Rechenzellen bestehen, die aber stärker miteinander

verbunden werden als in bisherigen Modellen. Besonderer Wert wird dabei auf eine Verbesserung der Qualität der Qubits gelegt. Jülicher Forschende steuern unter anderem Methoden für die präzise Kontrolle der Qubits zu GeQCoS bei.

EIN GYRATOR SORGT FÜR QUANTENBALANCE

Forschende aus Jülich, Aachen, Basel und Delft haben einen Quantenschaltkreis mit eingebauter, passiver Fehlerkorrektur entworfen. Er basiert auf Qubits in supraleitenden Schleifen. Üblicherweise müssen Fehler hier durch aktives Eingreifen korrigiert werden: Mehrere instabile Qubits werden dabei zu einem logischen Qubit kombiniert. Dadurch wird es möglich, Fehler zu erkennen und durch eine korrigierende Operation zu beseitigen. Im neuartigen Schaltkreis macht ein sogenannter Gyrator dieses Eingreifen überflüssig. Das elektrische Bauelement besitzt zwei Anschlüsse und koppelt Strom an dem einen Anschluss mit Spannung an dem anderen. Er wird zwischen zwei supraleitenden Qubit-Schleifen geschaltet und stabilisiert die gespeicherte Information. Dieses Prinzip könnte in Zukunft den Bau eines Quantencomputers mit einer großen Zahl von Qubits erheblich vereinfachen.



Bestätigt: Vorhersage von 1939

Die Sonne erzeugt nicht nur Licht und Wärme, sondern auch Neutrinos. Mithilfe dieser Teilchen haben Forschende erstmals einen speziellen Fusionsprozess in der Sonne nachgewiesen.

Sie bringt die Sterne zum Leuchten: die Kernfusion, bei der im Inneren der Sterne unter enorm hohen Temperaturen Atomkerne verschmelzen und Wasserstoff in Helium umgewandelt wird. Bei Sternen, die noch massereicher sind als die Sonne, soll dafür vor allem der sogenannte CNO-Zyklus verantwortlich sein, ein Prozess aus mehreren Schritten, an denen Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) beteiligt sind. So sagten es in den 1930er Jahren Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker vorher. Beobachtet wurde der CNO-Zyklus allerdings noch nie direkt – bis jetzt. Der Borexino-Kollaboration gelang es 2020 erstmals, Neutrinos aus dem CNO-Zyklus der Sonne nachzuweisen. Zum Borexino-Team gehört die Jülicher Arbeitsgruppe des Instituts für Kernphysik unter der Leitung von Prof. Livia Ludhova, die die Analyse zum CNO-Zyklus mitkoordiniert hat.

Neutrinos entstehen in unserer Sonne als eines der Produkte der Kernfusion. Doch anders als das Licht, das für den Weg durch die heiße und dichte Sternmaterie mehrere 100.000 Jahre benötigt, dringen die Neutrinos ungehindert nach draußen. Sie sind fast nicht nachzuweisen, weil sie nur schwach mit Materie in Wechselwirkung treten. Physikerinnen und Physiker versuchen diese Teilchen mithilfe des Borexino-Experiments zu erfassen, das in der Nähe von Rom im größten unterirdischen Versuchslabor der Welt durchgeführt wird.

„Schon vor mehr als zehn Jahren konnten wir Neutrinos aus dem Inneren der Sonne erstmals nachweisen“, sagt Ludhova. Dabei kann Borexino nicht nur die Menge der Neutrinos zuverlässig bestimmen, sondern auch deren Energie. „Mit seiner Energie trägt jedes Neutrino einen Fingerabdruck der Reaktion mit sich, bei der es entstanden ist“, erklärt Ludhova.

2020 konnten die Forschenden in den seit Juli 2016 von Borexino gewonnenen Daten Neutrinos aus dem CNO-Prozess in der Sonne identifizieren. Dort spielt der Prozess eine untergeordnete Rolle, da die Sonne als sogenannter leichter Stern im Gegensatz zu schweren Sternen nur etwa ein Prozent ihrer Energie aus diesem Prozess erzeugt. Wissenschaftlich ist die Entdeckung dennoch ein großer Erfolg, da sie die Existenz des CNO-Zyklus belegt: Das Fachblatt „Physics World“ zählt sie zu den zehn wichtigsten Durchbrüchen in der Physik im Jahr 2020.

Der Nachweis des CNO-Prozesses in der Sonne kann noch mehr über das Sonneninnere verraten, etwa wie hoch der Anteil der Elemente ist, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium. Livia Ludhova ist zuversichtlich: „Mit den Auswertungen der Messungen werden wir die Sonne und auch andere Sterne besser verstehen.“

Mehr Wasserstoff durch ultradünne Schicht

Ein unerwarteter Effekt könnte helfen, Wasserstoff künftig deutlich kostengünstiger herzustellen.

Wird Wasser in einer Elektrolyse-Anlage mithilfe von Strom aus erneuerbaren Quellen klimaneutral gespalten, entsteht sogenannter „grüner Wasserstoff“. Dieser gilt als wichtiger Baustein der Energiewende, unter anderem, weil darin Wind- oder Sonnenenergie gespeichert und bei Bedarf wieder freigesetzt werden kann. Wasserstoff herzustellen, ist allerdings teuer. Das behindert dessen breite Verwendung. Forschende aus Jülich, Aachen, Stanford und Berkeley haben einen Effekt entdeckt, mit dessen Hilfe die Menge des erzeugten Wasserstoffs in einem Modellsystem verdoppelt werden kann – ohne dass sich dabei Energiebedarf und Kosten erhöhen. Ursache ist eine gerade mal 200 milliardstel Millimeter dünne Schicht.

AUF DIE OBERFLÄCHE ACHTEN

Dabei handelt es sich um die oberste Schicht einer Elektrode: Wasserstoff entsteht bei der Elektrolyse an der negativ geladenen Elektrode (Kathode), während sich an ihrem positiven Gegenstück (Anode) Sauerstoff bildet. Beide Vorgänge können nur gemeinsam ablaufen, sodass eine erleichterte Bildung von Sauerstoff die Wasserstoffproduktion vermehrt.

Lanthannickelat (LaNiO_3) ist ein etablierter Katalysator, der diese elektrolytische Bildung von Sauerstoff begünstigt. In seiner Kristallstruktur wechseln sich Nickeloxid- und Lanthanoxid-Schichten ab. Normalerweise ist es Zufall, welche Schicht die Oberfläche der Anode bildet. Das deutsch-amerikanische Forscherteam hat ein Verfahren entwickelt, mit dem es genau einstellen kann, ob eine Schicht aus Lanthanoxid oben liegt oder eine Schicht aus Nickeloxid.

„Überraschenderweise macht das einen gewaltigen Unterschied“, sagt der Physiker Dr. Christoph Bäumler vom Peter Grünberg Institut (PGI-7), der sowohl in Jülich und Aachen als auch in den USA



↑ Christoph Bäumler entwickelt Katalysatoren für die Wasserstoffherzeugung. Dazu benötigt er sieben Schritte, wie er in unserem Jülich-Blog erklärt: [fzj.de/woran-forscht-baeumer](https://www.fzj.de/woran-forscht-baeumer)

an den Forschungsarbeiten wesentlich beteiligt war. Die Forschenden stellten fest, dass eine Anode mit Nickeloxid-Oberfläche in der gleichen Zeit doppelt so viel Sauerstoff produziert wie die andere Variante. Der Grund: Während der Elektrolyse entsteht nur bei ihr eine ungeordnete, katalytisch sehr aktive Schicht, die die Sauerstoffbildung begünstigt.

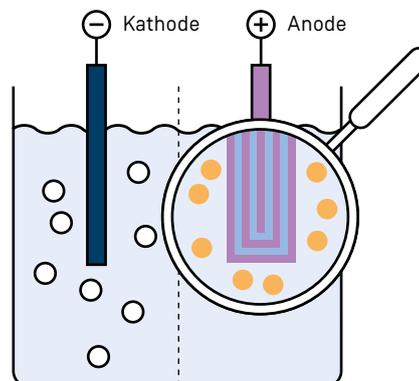
„Unsere Ergebnisse sind erst einmal Grundlagenforschung. Aber sie deuten darauf hin, dass man bei der Entwicklung von besseren Katalysatoren auch bei anderen Materialien beachten muss, dass die oberste atomare Lage entscheidend für die elektrochemischen Prozesse sein kann, die unter Betriebsbedingungen ablaufen“, so Bäumler.

FRANK FRICK

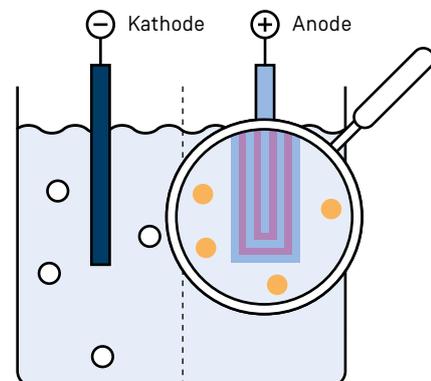
Blick in die Elektrolysezelle

— Nickeloxid-Schicht — Lanthanoxid-Schicht ○ Wasserstoff ● Sauerstoff

Oberfläche der Anode: Nickeloxid



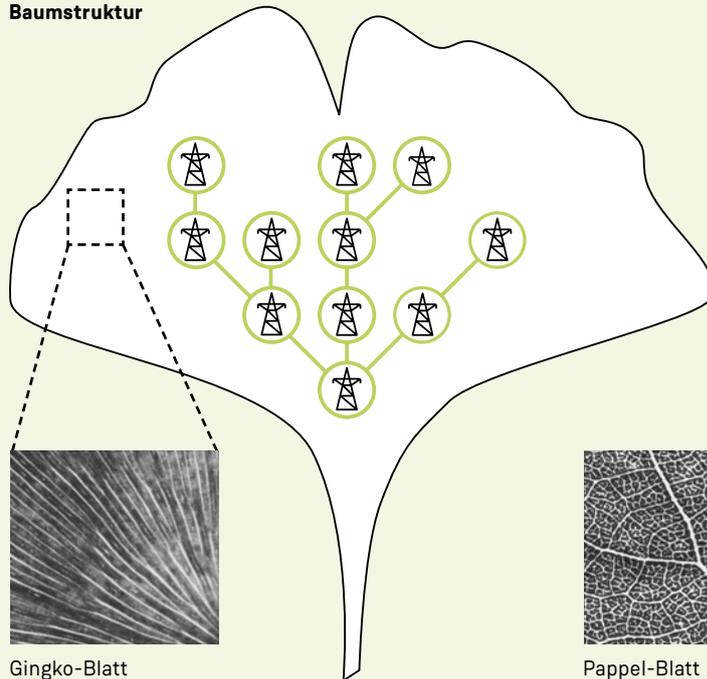
Oberfläche der Anode: Lanthanoxid



An der Anode mit Nickeloxid-Oberfläche (links) entsteht doppelt so viel Sauerstoff wie an der Lanthanoxid-Variante (rechts). Es bildet sich auch mehr Wasserstoff an der Kathode, da die Prozesse gekoppelt sind.

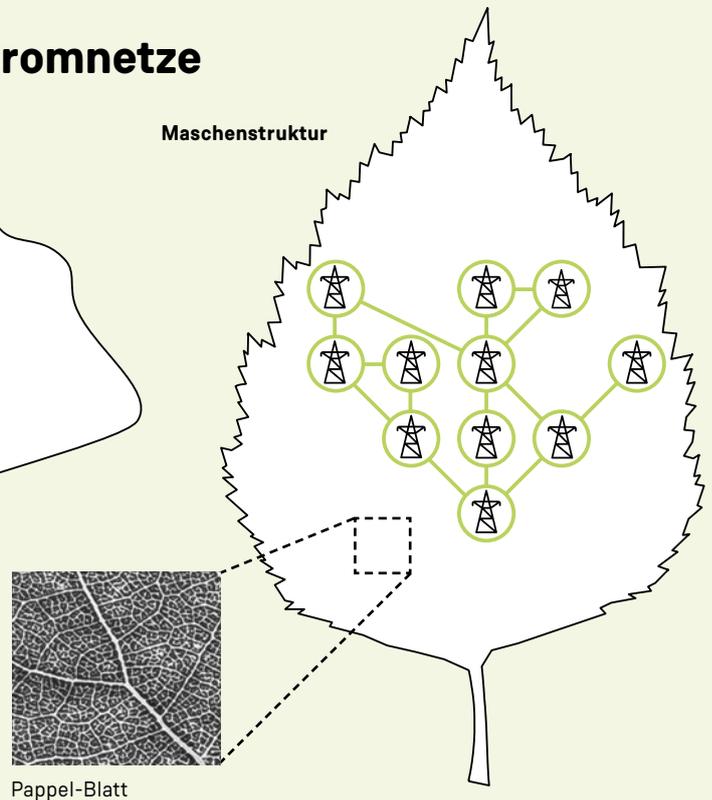
Die Natur als Vorbild für Stromnetze

Baumstruktur



Gingko-Blatt

Maschenstruktur



Pappel-Blatt

Gut versorgt

Stromnetze sollen uns auch bei Schwankungen und Störungen in den Leitungen zuverlässig mit Energie beliefern. Vorbilder, wie man technische Versorgungsnetzwerke noch besser planen kann, liefern Netzwerke in der Natur.

Davon ausgehend haben Jülicher Forschende ein Modell entwickelt, mit dem sie künftig optimale Netzwerke berechnen wollen.

Ein totaler Stromausfall würde die Infrastruktur eines Landes in kürzester Zeit lahmlegen. Daher sind Stromnetze in der Regel so aufgebaut, dass sie Schwankungen und Schäden an einzelnen Leitungen ausgleichen können. Das gelingt, indem von der Quelle mehrere Wege zum Verbraucher führen. Wenn nötig, kann der Strom so einzelne Unterbrechungen im Netzwerk umgehen. Diese sogenannte Maschen-Architektur ist daher deutlich weniger störanfällig als eine Baumstruktur, die sich zunehmend verästelt, aber bei der immer nur ein Pfad Quelle und Verbraucher verbindet. Die Maschen-Architektur erfordert jedoch mehr Leitungen in einem Stromnetz und verursacht höhere Kosten.

Größere Regionen, ganze Länder zum Beispiel, werden üblicherweise mittels Maschenstromnetzen versorgt. Bei

kleineren Gebieten, etwa einzelnen Kommunen, kommen eher die günstigeren Baumstrukturen zum Einsatz. Auch bei anderen technischen Netzwerken, unter anderem der Wasserversorgung oder der Telekommunikation, finden beide Typen Verwendung. Franz Kaiser und Prof. Dirk Witthaut vom Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-STE) untersuchen mithilfe von Modellen, wie Energienetzwerke am besten aufgebaut werden sollten.

Beim Austausch mit ihrem Kollegen Dr. Henrik Ronellenfitch – ehemals Massachusetts Institute of Technology, jetzt Williams College in den USA –, der sich viel mit biologischen Netzwerken beschäftigt, haben sie erstaunliche Parallelen festgestellt. „Für die Modellierung unserer technischen Netzwerke verwenden wir dieselben mathematischen Gleichungen

← Bei maschenlosen Versorgungsnetzen (links) gibt es nur einen möglichen Pfad von der Quelle zum Verbraucher. Diese Art von Netzwerk ist technisch einfacher und im Aufbau und Unterhalt preiswerter, aber auch störanfälliger als jene mit Maschen. Fällt in Letzteren eine Verbindung aus, kann das durch andere Pfade kompensiert werden. Ein Beispiel für maschenlose Versorgungsnetze ist das Gefäßsystem des Ginkgos. Das Blatt der Pappel weist hingegen etliche Maschen auf (rechts). Mit dem Modell der Jülicher Forschenden lässt sich der Übergang von baumartiger zu maschenartiger Struktur modellieren. Das hilft bei der Planung, wann und wo der Einbau von Maschen sinnvoll ist.

wie er für biologische Netzwerke“, berichtet Franz Kaiser. Auch biologische Systeme sind oft aus maschigen Netzen aufgebaut, wie etwa die feinen Gefäßkanäle in Blättern von Pflanzen, die für den Wassertransport zuständig sind, oder unsere Blutgefäße. Eine typische Baumstruktur weisen nur noch einzelne Pflanzenarten auf, die vergleichsweise früh in der Evolution entstanden, zum Beispiel die Baumart Ginkgo.

Die Ähnlichkeiten haben die Forschenden inspiriert, ein mathematisches Modell zu entwerfen, mit dem sich vorher sagen lässt, wie sich prinzipiell aus einer Baumstruktur eine Maschenstruktur entwickelt und wie zusätzliche Maschen entstehen. „Wenn wir diese Zusammenhänge besser verstehen, können wir Rückschlüsse ziehen, was wir beim Aufbau von technischen Versorgungsnetzen verbessern können“, so Franz Kaiser.

DIE NATUR BEVORZUGT MASCHEN

Analysen anderer Forschender hatten bereits gezeigt, dass in der Natur Schwankungen und Störungen in den Netzwerken zur Bildung von Maschen führen. Offenbar hat sich die Maschenstruktur bewährt, um Unterbrechungen im System auszugleichen – wenn zum Beispiel Insekten ein Blatt anknabbern, kann die Pflanze andere Wege im bestehenden Versorgungsnetzwerk nutzen, um die beschädigte Stelle zu umgehen.

Dieses Netzwerkverhalten lässt sich modellieren: „Mit unseren Simulationen sehen wir, dass sich zum Beispiel ein Netzwerk, das mehr Beschädigungen ausgesetzt ist, anders entwickelt als eines, das weitgehend ‚störungsfrei‘ ist“, erklärt Kaiser. Die Wissenschaftler können außerdem nachvollziehen, wann und an welcher Stelle die erste Masche im Netzwerk entsteht, wenn sich bestimmte Parameter ändern. Das überraschende

Ergebnis: Der Wechsel passiert sprunghaft. „Man könnte ja denken, dass die erste Masche sich langsam bildet, wenn sich Einflüsse wie Einspeiseschwankungen oder Stärke der Beschädigungen geringfügig ändern“, sagt Kaiser. Das sei aber nicht der Fall. Mathematisch betrachtet, können bereits sehr kleine Änderungen dazu führen, dass das Modell ein neues ideales Netzwerk liefert, in dem plötzlich eine Masche vorhanden ist, wo vorher keine war – also ein neuer Weg innerhalb des Netzwerks.

Ihre theoretischen Erkenntnisse über die Entwicklung von Netzwerken wollen die Forschenden auf konkrete technische Systeme wie das Stromnetz übertragen und mit ihrem Modell berechnen, wie man solche Systeme effizient gestaltet. An welchen Stellen sind etwa Maschen in einem regionalen Stromnetz sinnvoll, um mögliche Störungen auszugleichen, und welche Kosten entstehen dadurch? „Wenn wir dann noch das Ausmaß der Kosten von Stromausfällen abschätzen, können wir auch veranschlagen, welche Einsparungen durch ein Maschennetzwerk möglich sind“, ergänzt Kaiser.

„Die Arbeit ist ein gutes Beispiel dafür, wie interdisziplinäre Zusammenarbeit die Forschung voranbringt und wie auf den ersten Blick sehr theoretische Ergebnisse helfen können, alltägliche Fragen zu beantworten – in diesem Fall die nach der optimalen Struktur von Strom- und anderen Versorgungsnetzen“, freut sich Dirk Witthaut.

JANOSCH DEEG



← Franz Kaiser möchte mit dem neuen Netzwerkmodell die Grundlagen liefern, um ein effizientes Stromnetzwerk aufzubauen.



← Dirk Witthaut untersucht und modelliert Energiesysteme. Die Stabilität und Dynamik von Netzwerken steht dabei besonders im Fokus.

Forschen in Zeiten von Corona

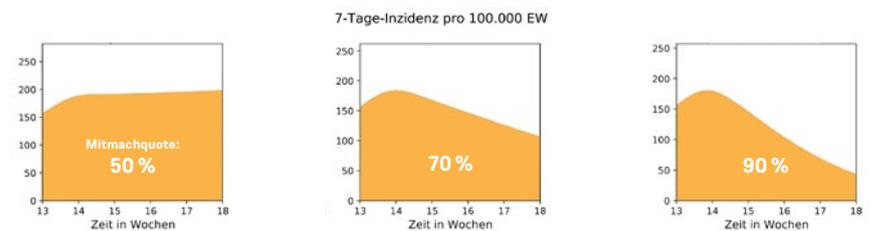
Über ein Jahr nach Beginn der Pandemie liegt das Virus im Rennen gegen den Menschen immer noch vorn. Mit Mutationen hat SARS-CoV-2 sein Tempo erhöht, aber die Wissenschaft ist ihm dicht auf den Fersen. Mathematik, Physik und Supercomputer helfen, die Ausbreitung und Eigenschaften des Virus besser zu verstehen, um es dann auszubremsen.



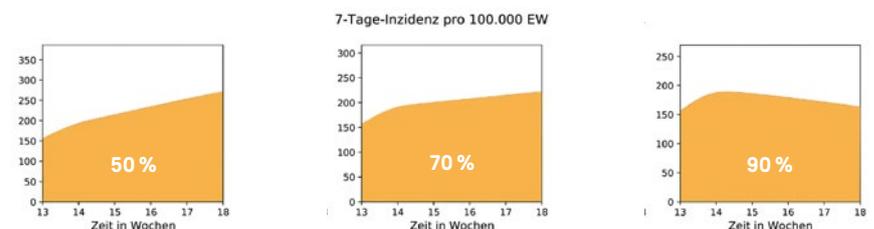
Mitmachen hilft!

Solange weite Teile der Bevölkerung nicht geimpft sind, bleibt der Grundsatz, Kontakte zu vermeiden, die schärfste Waffe im Kampf gegen die Pandemie. Wie stark sich die „Mitmachquote“ auf das Infektionsgeschehen auswirkt, zeigen Berechnungen des Jülich Supercomputing Centre und des Frankfurter Institute for Advanced Studies:

Nur wenn die Kontakte stärker reduziert werden und sich die Bevölkerung an die Regeln hält, lassen sich die Infektionszahlen innerhalb weniger Wochen deutlich senken. Bei ihren Simulationen sind die Forschenden von einem R-Wert von 1,5 und einer 7-Tage-Inzidenz von 150 als Startwert ausgegangen – angelehnt an Werte aus dem Herbst 2020 in Deutschland.



Szenario 1: Ein Teil der Bevölkerung reduziert seine Kontakte um 75 Prozent, während der andere Teil sein Verhalten nicht ändert – im ersten Bild machen 50 Prozent mit, im zweiten 70 und im dritten 90. Nur in der letzten Variante gelingt es, die Infektionszahlen innerhalb von Wochen deutlich zu senken.



Szenario 2: Kontakte um 50 Prozent reduziert. Selbst bei einer Mitmachquote von 90 Prozent ist das Infektionsgeschehen nur schwer einzudämmen.

Geballte Rechenpower gegen SARS-CoV-2

Das Impfen läuft. Was jedoch noch fehlt, ist ein Heilmittel. Jülicher Forschende fahnden in einem internationalen Gemeinschaftsprojekt mit 18 Institutionen aus sieben europäischen Ländern (Exscalate4Coronavirus) nach Molekülen, die zentrale Proteine des Coronavirus und so dessen Vermehrung blocken.

Hierzu nutzen sie die Rechenpower der größten Supercomputerzentren Europas, darunter das Jülich Supercomputing Centre: Innerhalb von Wochen überprüfen sie die Wirkung von Millionen von Molekülen. Dabei haben die Forschenden einen Weg gefunden, um genauer vorherzusagen, welche Moleküle die Haupt-3CL-Protease von SARS-CoV-2 im Computermodell hemmen.



Die 3CL-Protease ist ein Enzym, das die Vermehrung des Virus ermöglicht.

Das Team hat dabei die äußerst flexible 3D-Struktur des aktiven Enzym-Zentrums berücksichtigt – den entscheidenden Bereich für dessen Funktion. Es hat berechnet, welche zahlreichen Formationen das Zentrum einnehmen kann und wie mögliche Hemmstoffe aussehen müssten, um es zu blockieren. Prof. Giulia Rossetti vom Institut für Neurowissenschaften und Medizin (INM-9) und Jülich Supercomputing Centre (JSC) sagt: „So ist es uns gelungen, zwei neue 3CL-Protease-Hemmer zu identifizieren. Die Methode lässt sich auch auf andere Proteine übertragen, die ähnlich flexible Eigenschaften besitzen.“

3 Fragen an ...

... Prof. Jörg Labahn und Dr. Aurel Radulescu. Beide arbeiten an Jülicher Außenstellen: Jörg Labahn vom Centre for Structural Systems Biology entschlüsselt mithilfe von Deutschlands brilliantesten Röntgenquellen am Forschungszentrum DESY in Hamburg etwa Strukturen zentraler Proteine des Virus. Aurel Radulescu, Mitarbeiter am Jülich Centre for Neutron Science in Garching, untersucht mit den Neutronenstreulinstrumenten am Heinz Maier-Leibnitz Zentrum Nanopartikel, welche die neuartigen Boten-RNA-Impfstoffe umhüllen.



Was genau erforschen Sie?

Jörg Labahn: Wir untersuchen drei Proteine: das Spike-Protein, mit dessen Hilfe das Virus in die Zelle eindringt, ein weiteres, das für die Vermehrung essenziell ist, und ein drittes namens NSP6, über das wir aber noch wenig wissen.

Aurel Radulescu: Ohne Hülle aus Nanopartikeln würde die Boten-RNA des Impfstoffs direkt von körpereigenen Enzymen zerstört, noch bevor sie von Zellen aufgenommen und ihre Information abgelesen werden kann. Wir wollen wissen, wie man diese Verpackung verbessern kann.

Welche Fragen beantworten hierbei die Röntgen- und Neutronenquellen?

Jörg Labahn: Mithilfe der Röntgenstrukturanalyse klären wir auf, wie das Spike-Protein an die Zelle andockt. Und wir

untersuchen damit die Struktur anderer Corona-Proteine, um herauszufinden, wie man sie blockieren und so die Vermehrung des Virus verhindern kann.

Aurel Radulescu: Die Neutronenstreuung charakterisiert die innere Organisation der Nanopartikel. Mit diesem Wissen können wir beurteilen, ob sich ein Nanopartikel eignet, um Boten-RNA-Impfstoffe oder andere Therapeutika in die Zelle einzuschleusen.

Was sind die nächsten Ziele?

RNA-Impfstoffe

Diese Impfstoffe enthalten keine Viren, sondern die Bauanleitung für einen Teil des Virus in Form von Boten-RNA. Diese veranlasst die Zellen das Spike-Protein herzustellen, das vom Körper dann als „fremd“ erkannt und vom Immunsystem attackiert wird.

Jörg Labahn: Wir möchten für therapeutische Anwendungen bereits zugelassene Substanzen identifizieren, welche die Funktionen der viralen Zielproteine hemmen. Im Falle des Membranproteins NSP6 gilt es auch herauszufinden, ob es sich als Angriffspunkt für Medikamente eignet.

Aurel Radulescu: Unsere Ergebnisse zeigen, dass Nanopartikel aus einer Kombination von Lipiden und Polymeren den Transfer der Boten-RNA in die Zelle deutlich verbessern. Das kann helfen, die weitere Entwicklung maßgeschneiderter Therapeutika und RNA-Impfstoffe voranzubringen.

TEXTE: BRIGITTE STAHL-BUSSE



Mehr zur Jülicher Corona-Forschung unter: fz-juelich.de/corona

Comeback für Europas Solarindustrie?

2012 kamen acht der zehn weltweit größten Photovoltaik-Unternehmen aus Deutschland. Heute findet sich kein deutscher Solarzellen-Produzent unter den Top 30. Vor allem die Konkurrenz aus China hat sich im Preiskampf durchgesetzt. Doch nun gibt es in Europa Hoffnung auf eine Renaissance. Photovoltaik-Experte Prof. Uwe Rau erläutert im Interview die Hintergründe.

Herr Prof. Rau, was macht Hoffnung auf eine Renaissance der europäischen Photovoltaik-Produktion?

Wir stehen vor dem Übergang zu einer neuen Technologiestufe. Einige vergleichen dies mit dem Übergang von 4G zu 5G im Mobilfunk. Neue Typen von Solarzellen sollen demnächst auf den Markt kommen – etwa die Silizium-Heterojunction-Solarzellen, kurz SHJ-Solarzellen (s. Kasten), oder eine Variante davon, die IBC-SHJ. Deren Vorteil: Sie bieten einen höheren Wirkungsgrad. Und Europa hat hier die Nase vorn. Im EU-Projekt NEXTBASE, das unser Institut koordiniert hat, wurde eine IBC-SHJ-Solarzelle entwickelt, die eine Effizienz von bis zu 25,4 Prozent erreicht. Das sind knapp 3 Prozent mehr als handelsübliche PERC-Zellen, die das Sonnenlicht mit einem Wirkungsgrad von rund 22,5 Prozent in Strom umwandeln. Am Forschungszentrum haben wir außerdem eine industriell produzierbare SHJ-Solarzelle entwickelt, die auf 24,5 Prozent kommt.

Warum machen rund 3 Prozent Wirkungsgrad einen großen Unterschied?

Bei Solarzellen dreht sich alles darum, wie viel Strom sie pro Fläche erzeugen. Denn gerade in Deutschland sind die Flächen, die man für die Module benötigt, begrenzt und sehr teuer. Zudem lassen sich mit hocheffizienten Zellen die Kosten für den erzeugten Strom erheblich senken.

Gibt es denn konkrete Pläne, die neuen Technologien einzusetzen?

Im Projekt NEXTBASE haben die Partner auch Herstellungsprozesse für die neue Solarzelle entwickelt, die für eine industrielle Massenproduktion geeignet sind. Das Schweizer Unternehmen Meyer Burger – einer der Industriepartner in NEXTBASE – hat angekündigt, noch in diesem Jahr an seinen deutschen Standorten in Freiberg und dem Stadtteil Thalheim von Bitterfeld-Wolfen mit der Produktion von SHJ-Solarzellen und -Solarmodulen „Made in Europe“ zu beginnen. Das Unternehmen entwickelt außerdem bereits die Produktionstechnologie für IBC-SHJ-Zellen. Auch eine weitere, noch effizientere Technologie steht in den Startlöchern: die Tandem-Solarzelle. Dabei stapelt man eine zweite Zelle – beispielsweise aus

Perowskit – auf die Siliziumzelle. Das Unternehmen Oxford PV baut gerade eine entsprechende Produktionslinie in Brandenburg auf, die Anfang 2023 ihren vollen Betrieb aufnehmen soll. Die Produktionstechnik für die Herstellung der Tandem-Solarzelle sowie die darunterliegende Siliziumzelle stammt dabei auch von Meyer Burger.

Können die neuen Module aus Europa denn auch preislich mithalten?

Die Kosten einer industriellen Produktion der neuen Module werden vermutlich ähnlich sein wie die Produktionskosten für die heute handelsüblichen PERC-Module, die hauptsächlich in Asien gefertigt werden. Europa könnte hier also wieder in die Herstellung einsteigen. Das wäre auch aus wirtschaftspolitischer Sicht sinnvoll.

Warum?

Wenn hier wieder Produktionslinien in einem relevanten Maßstab stehen, kann die Forschung in Europa verstärkt weitere Entwicklungen in diesem Bereich vorantreiben. Außerdem würde eine eigenständige europäische Wertschöpfungskette Abhängigkeiten und Risiken minimieren.

Spielt es denn eine Rolle, ob Strom etwa in Deutschland von Modulen aus China oder aus Europa erzeugt wird?

In der Tat dominiert China mit günstigen Modulen derzeit den Weltmarkt. Der Strom, den diese Module erzeugen, ist natürlich derselbe wie bei einem Modul aus Europa. Doch für die Energiewende müssen künftig allein in Deutschland jährlich Solaranlagen mit einer Gesamtleistung von mehreren Gigawatt installiert werden. Die Technologie ist also sehr wichtig und beinhaltet riesige Investitionen. Eine europäische Produktion würde sicherstellen, dass jederzeit Alternativen auf dem Weltmarkt verfügbar sind. Die Corona-Pandemie hat sich zum Beispiel auch auf die Lieferketten der Solarbranche ausgewirkt: Lieferungen verzögerten sich und wurden teurer. Politische oder wirtschaftspolitische Konflikte könnten ebenfalls zu Engpässen führen.



Uwe Rau ist Direktor ↑
des Instituts für
Energie- und Klimafor-
schung, Bereich Pho-
tovoltaik und Professor
an der RWTH Aachen.
Er forscht seit über 25
Jahren an Solarzellen.



Solarzellen-Typen

PERC

„Passivated Emitter and Rear Cells“ sind der derzeitige Standard bei Solarzellen aus kristallinem Silizium. Eine spezielle Schicht an der Rückseite des Moduls reflektiert vor allem rotes Licht, das in früheren Modulen ungenutzt blieb. Das Licht kann so in einem zweiten Durchlauf Strom erzeugen und verbessert den Wirkungsgrad.

SHJ

Bei der Silizium-Heterojunction-Solarzelle ist ein monokristalliner Siliziumwafer von ultradünnen Schichten aus ungeordneten Silizium-Atomen umhüllt. Diese Schichten hemmen an den Oberflächen des Wafers die schnelle Wiedervereinigung von negativen und positiven Ladungsträgern, die durch die Sonnenenergie getrennt wurden.

IBC-SHJ

Während bei Siliziumzellen – auch bei der SHJ – normalerweise der erzeugte Strom durch elektrische Kontakte auf Vor- und Rückseite abgeführt wird, hat die IBC-SHJ-Zelle alle Leiterbahnen auf der Rückseite. Dadurch wird die Vorderseite weniger verschattet und die gesamte Fläche kann genutzt werden, um Sonnenlicht aufzunehmen.

Silizium-Perowskit-Tandemzelle

Während Silizium Licht vor allem im roten und infraroten Bereich einfängt, sind Perowskit-Materialien vor allem für das blaue und grüne Licht empfänglich. Bei einem Zellen-Tandem aus Silizium und Perowskit wird also das gesamte Sonnenspektrum genutzt, was den Wirkungsgrad erhöht (Weltrekord derzeit: 29,5 Prozent).

Von wegen Spatzenhirn!

Das Vogelhirn galt bislang als unstrukturiert. Eine in Jülich entwickelte Methode belegt nun das Gegenteil, was das pfiffige Verhalten einiger Vogelarten erklären könnte. Die Erkenntnis zählt laut Fachzeitschrift „Science“ zu den zehn wichtigsten Durchbrüchen im Jahr 2020.

Geschickte Handwerker: →
Geradschnabelkrähen
bauen Werkzeuge, mit
denen sie Leckerbissen
aus morschen Baum-
stämmen angeln.



Sie ist ihren europäischen Verwandten eine Stöckchenlänge voraus: die Geradschnabelkrähe der Pazifikinsel Neukaledonien. Sie baut sich aus Ästen und Zweigen Werkzeuge, um damit an ihre Leibspeise zu gelangen – Larven und Maden im morschen Holz. Und noch erstaunlicher: Die Krähe baut sich das Werkzeug nicht nur, um ans Futter zu kommen, sondern auch, um sich noch besseres Baumaterial für Werkzeuge zu angeln. Die Wissenschaft sieht in dem Gebrauch von Werkzeugen, die nicht direkt der Futterbeschaffung dienen, ein typisches Merkmal der Intelligenz. Kein Wunder also, dass Verhaltensforschende die Geradschnabelkrähe für einen der intelligentesten Vögel halten. Aber auch andere Artgenossen gelten als schlau und raffiniert: Rabenvögel beispielsweise führen ihre Konkurrenz beim Futtermal verstecken und -klauen hinter Licht. Graupapageien besitzen ein Talent dafür, die menschliche Sprache nachzuahmen, Elstern erkennen ihr eigenes Spiegelbild – alles erstaunlich intelligente Leistungen.

Nur wie gelingt es den gefiederten Freunden, derart komplex zu denken? Schließlich ist ihr Gehirn maximal so groß wie eine Walnuss. Und eine strukturierte Großhirnrinde, wie Säugetiere sie besitzen, suchten Forschende bisher vergeblich. Ein Teil der Großhirnrinde, der sogenannte Neocortex, ist gewissermaßen die Schaltzentrale menschlicher Intelligenz. Diese spezielle Struktur ist dafür verantwortlich, dass wir träumen, sprechen oder komplex denken können.

„Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass Gehirne von Vögeln und Primaten im hochaufgelösten Detail starke Ähnlichkeiten aufweisen.“

MARKUS AXER



↑ Graupapageien sind sehr sprachbegabt und helfen ihren Artgenossen ohne sofortige Gegenleistung.

Eine Antwort fand nun ein Team um Prof. Katrin Amunts und Prof. Markus Axer vom Institut für Neurowissenschaften und Medizin (INM-1) in Zusammenarbeit mit Forschenden der Universitäten Düsseldorf, Aachen und Bochum: Sie entdeckten im Vogelhirn erstmals Strukturen, die der Großhirnrinde der Säugetiere ähneln. Die Nervenzellen der Vögel sind dort – wie im Neocortex – in horizontalen Schichten und vertikalen Säulen vernetzt. Seine Erkenntnisse veröffentlichte das Team im Fachmagazin *Science* – und landete damit in der Top-10-Liste des Magazins zu den wichtigsten Erkenntnissen im Jahr 2020.

HIRNSTRUKTUR SICHTBAR MACHEN

Um größere Bereiche des Vogelgehirns sichtbar zu machen, setzten die Jülicher auf eine spezielle Art von Lichtmikroskopie (s. Kasten): „Wir haben die Techniken der Polarisationsmikroskopie mit der effizienten Datenanalyse des Supercomputings zusammengebracht – daraus entstanden ist die sogenannte ‚3D Polarized Light Imaging-Methode‘, kurz 3D-PLI“, erklärt Axer, der am Forschungszentrum eine Arbeitsgruppe zu der Methode leitet. Die mit 3D-PLI gemachten Aufnahmen zeigen, wie Gehirnregionen über Nervenfasern verbunden sind. Sie machen Lage, Verlauf und Ausrichtung der Nervenfasern sichtbar, also auf welchen Wegen Signale weitergeleitet werden. „Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass Gehirne von Vögeln und Primaten trotz aller offensichtlichen Unterschiede starke Ähnlichkeiten im hochaufgelösten Detail aufweisen – was auch ähnliche Denkfähigkeiten nahelegt“, resümiert Axer.



↑ Markus Axer macht mit der 3D-PLI-Methode Nervennetze im Gehirn sichtbar.



↑ Elstern erkennen sich selbst im Spiegel.

Schon seit 2006 arbeitet Axer in Jülich an der bildgebenden Polarisationsmikroskopie. Der Physiker hat die 3D-PLI-Methode am Forschungszentrum etabliert und kontinuierlich weiterentwickelt. Übernommen hatte er sie zuvor von seinem älteren Bruder Hubertus, der Facharzt für Neurologie und Anatomie ist. „Die Methode ist schon irgendwie zu einer Familiensache geworden“, sagt Axer. Aber dem großen Bruder fehlten damals die Möglichkeiten, die Technik zu verbessern.

Mit der Methode haben die Forschenden bereits drei komplette Taubengehirne in einer Auflösung von 1,3 tausendstel Millimetern analysiert. Jeweils 250 hauchdünne Schnitte wurden dabei hochauflösend gescannt und dreidimensional rekonstruiert. In naher Zukunft sollen daraus die ersten Vogelhirn-Atlanten entstehen, die

Axer und sein Team der Community über die Hirnforschungsplattform EBRAINS des Human Brain Project zur Verfügung stellen wollen. Auch Prof. Katrin Amunts, Direktorin der beteiligten Institute in Jülich und Düsseldorf, ist begeistert: „3D-PLI trägt wesentlich zu einem tieferen Verständnis der Verbindungsstruktur des Gehirns bei. Die Methode ermöglicht es außerdem, über die verschiedenen Spezies hinweg Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Struktur der Nerven-Netzwerke zu erfassen.“

Axer geht davon aus, dass die Methode noch weitere Hirnregionen ins „rechte Polarisationslicht“ rücken wird. Fest steht: „Fürs Vogelhirn hat sie tatsächlich den Durchbruch gebracht.“

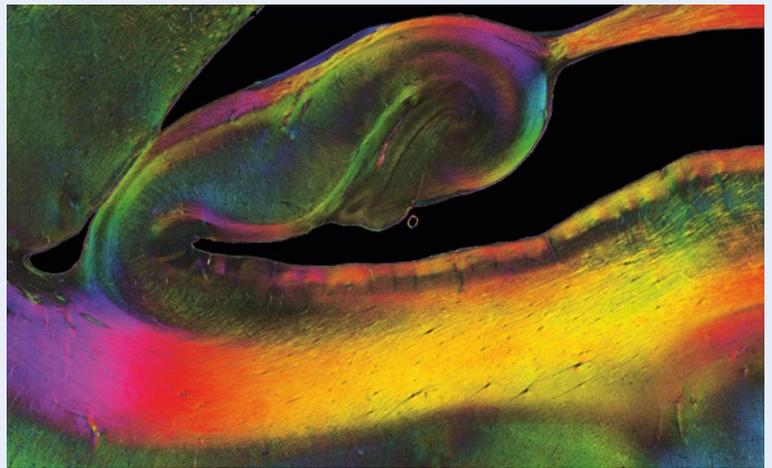
KATJA LÜERS

Was ist 3D-PLI?

Schon der berühmte deutsche Neuroanatom und Hirnkartierer Korbinian Brodmann (1868–1918) beobachtete, dass sich das Licht im Hirngewebe anders bricht als im restlichen Körpergewebe. Die Wissenschaft spricht von Doppelbrechung. Ursache ist die sogenannte Myelinscheide, die viele Nervenfasern wie eine Isolierung umhüllt. Forschende messen diese Doppelbrechung mit einem besonderen Verfahren der Lichtmikroskopie: der Polarisationsmikroskopie. Ein entsprechendes Mikroskop besitzt spezielle Filter, die nur bestimmtes Licht durchlassen – sogenanntes polarisiertes Licht.

„Wir messen, wie sich dieses polarisierte Licht verändert, wenn wir es durchs Gehirngewebe schicken. Mithilfe von Supercomputer und effizienter Datenanalyse berechnen wir daraus, wie Nervenfasern verlaufen“, erklärt Axer. Mit dieser „3D Polarized-Light-Imaging“-Methode, kurz 3D-PLI, schaffen es die Forschenden, Ausrichtung, Lage und Verlauf von Nervenfasern für das gesamte Gehirn darzustellen.

Und sie füllt eine Lücke: Denn andere Methoden liefern entweder einen sehr detaillierten, aber zeitaufwendigen Blick aufs Gehirn anhand von Gewebeproben, die einzelne Zellen und ihre Verbindungen zeigen. Oder sie machen wie bei



MRT-Bildern schnell – aber „grob“ aufgelöst – ganze Gehirnregionen sichtbar.

„Die 3D-PLI ist ein Zwischending“, sagt der stellvertretende Direktor des INM-1. Genau das sei ihr Vorteil. „Wir können uns das ganze Gehirn angucken, nicht jede einzelne Zelle, aber mehr Details als im MRT – und das in einer überschaubaren Zeitspanne. Das ist ein guter Kompromiss!“, ist Axer überzeugt. Ein Kompromiss, der so bahnbrechende Erkenntnisse ermöglicht wie jetzt beim Vogelhirn.

↑ Farbenfroh: Die 3D-PLI-Aufnahme zeigt den Verlauf der Nervenfasern, hier im menschlichen Hippocampus, dem Sitz des Gedächtnisses.



Wie die 3D-PLI Nervenbahnen sichtbar macht, zeigt ein Video: fzj.de/3d-pli



Woran forschen Sie gerade, Frau Frunzke?

**Prof. Julia Frunzke, Institut für Bio- und Geowissenschaften
(IBG-1: Biotechnologie) und Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

„Wir beschäftigen uns mit Phagen. Diese Viren sehen ein wenig aus wie winzige Mondlandefähren. In Wirklichkeit sind sie aber nicht blauviolett und messen nur etwa 50 bis 200 Nanometer. Die Phagen sind Meister im Manipulieren von Bakterien, ihren Wirten. Damit sie sich in diesen optimal vermehren können, ändern sie gezielt den Stoffwechsel der Bakterien. Die Tricks, die sie dabei einsetzen, möchten wir uns anschauen und für industrielle Prozesse nutzen, um Bakterien zum Beispiel medizinische Wirkstoffe oder Feinchemikalien herstellen zu lassen.“



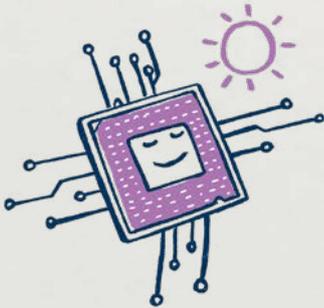
BESSERWISSEN

HALBLEITER

Halbleiter sind Feststoffe. Ihre elektrische Leitfähigkeit liegt zwischen der von Isolatoren und der von elektrischen Leitern wie Kupfer.

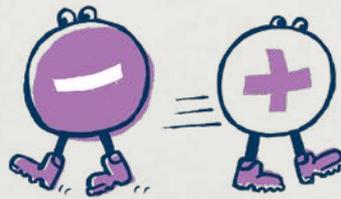
Aber: Sie lässt sich gezielt verändern.

DAS ZEICHNET HALBLEITER AUS



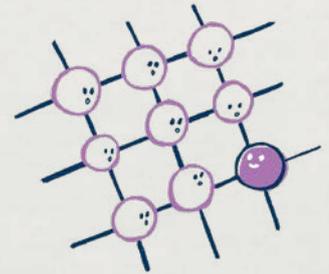
WÄRMELIEBEND

Bei Temperaturen nah des absoluten Nullpunkts von $-273,15$ Grad Celsius leiten Halbleiter keinen Strom. Steigt die Temperatur an, nimmt ihre Leitfähigkeit - anders als bei Metallen - zu.



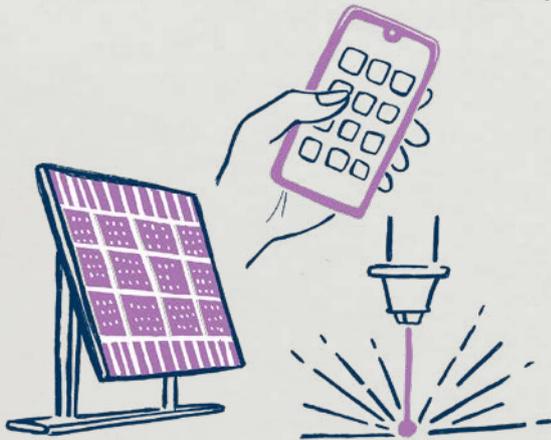
WANDERLUSTIG

Im Gegensatz zu Metallen wandern in Halbleitern nicht nur negativ geladene Elektronen. Die Elektronen hinterlassen positive Leerstellen, sogenannte Löcher, die sich ebenfalls bewegen.



WANDELBAR

Die Eigenschaften wie die Leitfähigkeit eines Halbleiters lassen sich durch Wärme und Licht gezielt beeinflussen - aber auch, indem Fremdatome eingelagert werden (dotieren).



ÜBERALL IM EINSATZ

Halbleiter haben den Siegeszug der Mikroelektronik ermöglicht. Sie stecken in Computerchips, Smartphones, Fernsehgeräten, Autos, Solarzellen und Lasern. Auch für Quantencomputer sind sie interessant.

VERSCHIEDENE ARTEN

Es gibt Halbleiter aus einem Element - insbesondere Silizium -, aus der Kombination verschiedener Stoffe wie Galliumarsenid und aus organischen, also kohlenstoffhaltigen Materialien.

WAS MACHT JÜLICH?

Forschende beschäftigen sich mit grundlegenden Fragen der Halbleiterphysik, mit Materialien und Technologien. Sie entwickeln Geräte sowie Bauelemente - für Nanoelektronik, Lasertechnik, Photovoltaik und Quantencomputing.



GEFÄLLT UNS

JUBILÄUMSJAHR

200 Jahre Hermann von Helmholtz

Er widmete sich der Optik und Akustik, erforschte Fragen der Geologie, Meteorologie und Wärmelehre:

Hermann von Helmholtz (1821–1894) gilt als einer der letzten Universalgelehrten. Sein Antrieb, den Phänomenen unserer Welt auf den Grund zu gehen, ist bis heute ein Vorbild für viele Forschende. Nicht ohne Grund hat sich die Helmholtz-Gemeinschaft, zu der auch das Forschungszentrum Jülich gehört, nach diesem Ausnahme-Naturwissenschaftler benannt. In diesem Jahr feiert ihr Namenspatron ein besonderes Jubiläum: Am 31. August würde er 200 Jahre alt.

Herzlichen Glückwunsch!

- HELMHOLTZ200.DE -

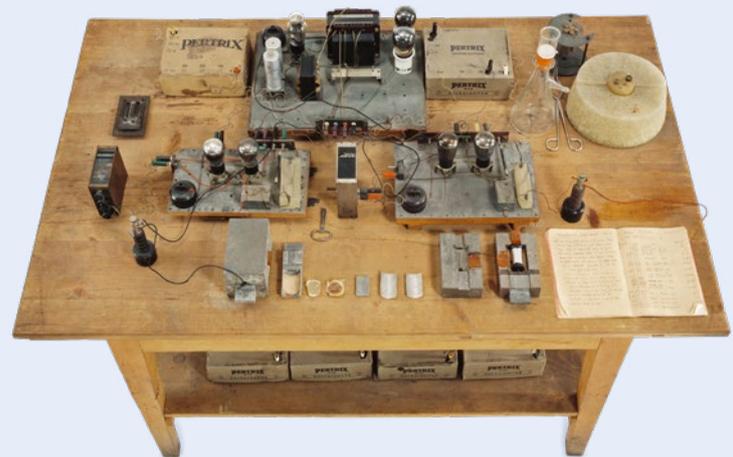


EXPERIMENTE FÜR ZU HAUSE

Geht ab wie Rakete

„Was passiert, wenn die Polkappen schmelzen?“ oder „Bauen wir einen Raketenantrieb“: Mit verschiedensten Versuchen zeigen die 30 Helmholtz-Schülerlabore, wie Kinder und Jugendliche durch selbstständiges Experimentieren Forschungsluft schnuppern und wissenschaftliche Zusammenhänge verstehen können. In Videos, Comics und Broschüren sind die Experimente so aufbereitet, dass jeder sein Zuhause kurzerhand zum Forschungslabor machen kann – nicht nur in Pandemiezeiten.

- HELMHOLTZ.DE/FORSCHUNG/AKTUELLES/
EXPERIMENTE-FUER-ZUHAUSE -



VIRTUELLER RUNDGANG

Vom Wohnzimmer ins Museum

Corona hat das öffentliche Leben stark eingeschränkt – auch Museen sind davon betroffen. Einige Einrichtungen öffnen jedoch virtuell ihre Türen und locken Besuchende zum interaktiven Rundgang. So können Kultur- und Technikbegeisterte vom Wohnzimmer aus etwa das Deutsche Museum in München erkunden und in einer Highlight-Tour Dauerausstellungen wie das Fernrohr des Bayerischen Optikers Fraunhofer bestaunen oder den Tisch, auf dem mit der ersten Kernspaltung 1938 das Atomzeitalter begann.

- VIRTUALTOUR.DEUTSCHES-MUSEUM.DE -

FORSCHUNG IN EINEM TWEET

Nächste Phase: Der in Jülich entwickelte #Alzheimer-Wirkstoffkandidat PRI-002 kann nun seine Wirksamkeit an Alzheimer-Patienten zeigen.



Die sogenannte klinische Phase-II-Studie soll 2022 starten und zeigen, dass PRI-002 positiv auf Gedächtnis und Kognition von Alzheimerpatienten wirkt. Ergebnisse werden bis spätestens 2026 erwartet. Sicherheit und Verträglichkeit bei täglicher Anwendung über vier Wochen hatte der von Prof. Dieter Willbold (Bild) und seinem Team entwickelte Wirkstoffkandidat bereits unter Beweis gestellt. Die Bundesagentur für Sprunginnovationen SPRIND unterstützt das Vorhaben.

fzj.de/alzheimer-therapie-wirkstoff