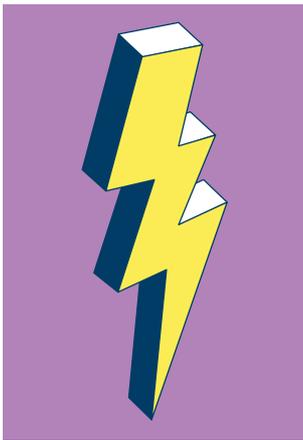


## Forschen im realen Maßstab

Leuchtend bunt strahlt das neue Prunkstück auf dem Jülicher Campus: Mithilfe des Teststands sollen leistungsfähigere und kostengünstigere Elektrolyseure für die Wasserstoffproduktion entwickelt werden. Die entscheidende Farbe schimmert im Hintergrund: Grün. Denn grün ist auch der Wasserstoff, um den es geht. Das heißt, er wird nur mit Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt. Die Elektrolyseure, die erforscht werden, sind dank einer speziellen Polymermembran besonders gut dafür geeignet. Das Besondere:

Die Elektrolyseure laufen im Teststand nicht im Labor-, sondern im Industriemaßstab. Die Anlage gehört zum Projekt DERIEL, einem Teil des nationalen Wasserstoff-Leitprojekts H<sub>2</sub>Giga.

**NACHRICHTEN****5****TITELTHEMA****Einer für alles**

Mit JUPITER muss gerechnet werden. Der schnellste Computer Europas eröffnet neue Möglichkeiten für viele Bereiche – von KI über Hirnforschung bis zur Klimasimulation.

**8****FORSCHUNG****„Stresst mich nicht!“**

Die Fähigkeit, mit Belastungen umzugehen, spiegelt sich auch in der Hirnstruktur wider.

**16****Energie fürs Hirn**

Bei Schlafmangel verbessert Kreatin kurzfristig das Denkvermögen.

**18****CO<sub>2</sub> wieder einfangen**

Forscher:innen entwickeln Konzepte und Technologien, um CO<sub>2</sub> der Atmosphäre zu entziehen.

**20****Energie auf dem Chip zurückgewinnen**

Eine neue Legierung könnte helfen, die Abwärme von Mikrochips in Elektrizität umzuwandeln.

**23****Blick in die Zukunft**

In einer einzigartigen Anlage lässt sich simulieren, wie Pflanzen auf den Klimawandel reagieren.

**24****Der Atem der Wälder**

Hitze und Dürre verändern den Mix von Duftstoffen, die Bäume abgeben. Was macht das mit Klima und Luftqualität?

**26****Wie die Zeit vergeht**

Für das Erleben von Zeit gibt es kein Sinnesorgan – offenbar aber ein Muster im Gehirn.

**28****Auf in die winzige Welt der Atome**

Ein neuer Quantensensor misst Magnetfelder mit bisher unerreichter Präzision.

**31****Recycling immer schon mitdenken**

Interview mit Christoph Brabec über organische Elektronik und Konzepte, um sie nachhaltig herzustellen.

**32****RUBRIKEN****Aus der Redaktion**

4

**Impressum**

4

**Woran forschen Sie gerade?**

19

**Besserwissen**

34

**Gefällt uns**

35

**Forschung in einem Tröt**

36

# Zeit für Historisches



Fortschritt hängt nicht zwangsläufig davon ab, wie viele Personen an einem Vorhaben arbeiten. Im August 1963 stellte die Firma Control Data Corporation ihre neue Hochleistungsrechenmaschine vor: Die CDC 6600 konnte dreimal so schnell rechnen wie der damalige Platzhirsch, der IBM 7030 Stretch. Bei IBM klingelten die Alarmglocken. In einem hausinternen Brief machte der Vorstandsvorsitzende Thomas Watson jr. seinem Unmut darüber Luft, dass IBM seine Führungsposition an ein Unternehmen mit gerade einmal 34 Angestellten inklusive Hausmeister verloren hatte. Bei IBM arbeiteten damals mehr als 170.000 Menschen. Der sogenannte Hausmeister-Brief ist heute im Computer History Museum in San José, USA, zu sehen.

Historisches bahnt sich auch in Jülich an. Hier wird Europas erster Exascale-Supercomputer aufgebaut – sozusagen ein Urururenkel der CDC 6600. In unserer Titelgeschichte stellen wir vor, welche neuen Möglichkeiten das Multitalent künftig zum Beispiel für Klimaforschung, Künstliche Intelligenz und Quantencomputing eröffnet. Und in die Zukunft blicken wir auch in weiteren Beiträgen: So geht es etwa um die Notwendigkeit von Recyclingkonzepten für die aufstrebende organische Elektronik und um Technologien für das Entnehmen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre. Wenn Sie sich noch mehr Zeit nehmen wollen, können Sie auch etwas über unser Zeitempfinden lernen. Offenbar gibt es dafür im menschlichen Gehirn ein spezielles neuronales Muster.

Wir wünschen eine entspannte Zeit beim Lesen!  
Ihre effzett-Redaktion

## 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.)

**Autor:innen:** Marcel Bülow, Janosch Deeg, Dr.-Ing. Katja Engel, Dr. Frank Frick, Christopher Groth, Christian Hohlfeld, Lisa Maiburg, Dr. Regine Panknin, Dr. Arndt Reuning, Dr. Barbara Schunk, Tobias Schlößer, Brigitte Stahl-Busse, Annette Stettien, Anna Tipping, Janine van Ackeren

**Grafik und Layout:** SeitenPlan GmbH, Dortmund

**Bildnachweise:** Forschungszentrum Jülich (5 o.); Forschungszentrum Jülich/Sascha Kreklau (7 o. re., 10 li. u., 12 o., 14 u., 15 li., 18 Mitte, 19, 26, 31); Forschungszentrum Jülich/Ralf-Uwe Limbach (23 o.); Forschungszentrum Jülich/Bernd Nörig (2, 7 li. o., 13 li.); Forschungszentrum Jülich/teXplain (14 o.); 2024 Climeworks AG (20-21, 22 u.); ACS Appl. Energy Mater. 2024, Volume 7, Issue 13 (CC-BY 4.0) (23 u.); Jitze Couperus, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons (4); fotostudio-juenger.de (22 o.); HHU/Paul Schwaderer/Midjourney (6 o.); Diana

Köhne (34 (Illustration)); Martin Leclaire (33); Stefan Liebermann (35); Lufthansa Group (36); MPI CBS (17 beide re.); Klaus Schmidt/MFK (Medizinische Fakultät der Universität zu Köln) (29 li. o., 30 o.); SeitenPlan (3 Mitte, 6 u., 24-25); SeitenPlan mit Material von Shutterstock.com (Titel, 3. li. o., 8-15 (Illustrationen)); Christian Wittke/Uniklinik Köln (5 u.); alle im Folgenden genannten Motive sind von Shutterstock.com: Basicdog (29 re.); Cast Of Thousands (18 (Hintergrund)); Hryshchysen Serhii (3 li. u., 16-17 o.); New Africa(3. re., 28-30 (Hintergrund)); spacezerocom (34 (Hintergrund)); Yeti studio (7 u. (Endgeräte, Montage SeitenPlan));

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

**Druck:** Schloemer Gruppe GmbH

**Auflage:** 2.800

**Alle in der effzett verwendeten Bezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen. Wird auf eine Nennung verschiedener Varianten der Bezeichnungen verzichtet, geschieht das allein aus Gründen der besseren Lesbarkeit.**



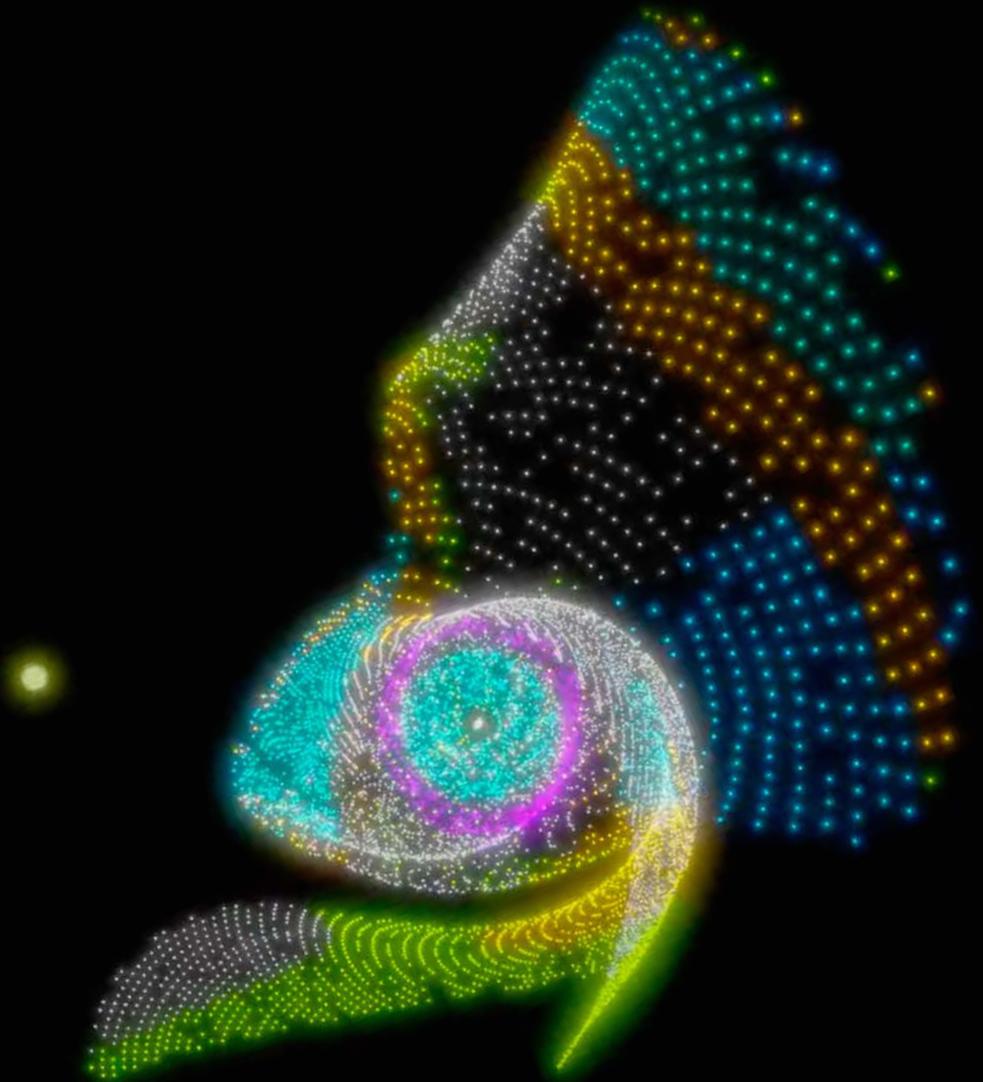
ASTROPHYSIK

## Abgelenkt

Merkwürdige Dinge geschehen am Rande unseres Sonnensystems. Einige Zwergplaneten und kleinere Objekte umkreisen die Sonne nicht auf den üblichen kreisförmigen Bahnen. Stattdessen bewegen sie sich auf geneigten, länglichen Bahnen. Bisher gab es dafür keine Erklärung. Computersimulationen von Astrophysiker:innen aus Jülich und dem niederländischen Leiden deuten darauf hin, dass vor Milliarden Jahren ein Stern sehr nahe an unserem Sonnensystem vorbeigeflogen sein könnte und einige Himmelskörper auf eine andere Bahn ablenkte.

- JÜLICH SUPERCOMPUTING CENTRE -

**Zum Video:**  
[go.fzj.de/effzett-Astromeldung](https://go.fzj.de/effzett-Astromeldung)



AUSZEICHNUNG

## In Leopoldina aufgenommen

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina hat den Neurologen und Neurowissenschaftler Prof. Gereon R. Fink als neues Mitglied aufgenommen. Fink, Direktor am Jülicher Institut für Neurowissenschaften und Medizin sowie Professor für Neurologie an der Universität zu Köln, erforscht neurologische Erkrankungen wie Schlaganfall, Morbus Parkinson oder Demenz mit dem Ziel, Diagnostik und Therapie zu verbessern.

- INSTITUT FÜR NEUROWISSENSCHAFTEN UND MEDIZIN -



HIRNFORSCHUNG

# Neues altert stärker

Beim Menschen altern die Hirnregionen am stärksten, die sich im Laufe der Evolution zuletzt vergrößert haben. Das zeigen Vergleiche mit der Gehirnalterung bei unseren nächsten Verwandten, den Schimpansen. Besonders stark altern Bereiche, die für höhere kognitive Funktionen verantwortlich sind. Dazu zählen das Arbeitsgedächtnis und Fähigkeiten der Langzeitplanung und Selbstregulation. Für die Studie nutzten die Jülicher und Düsseldorfer Forscher:innen bereits vorhandene Hirnscans, die sie mit einer neuen Methode zum Erkennen von Mustern in Gehirnen analysierten.

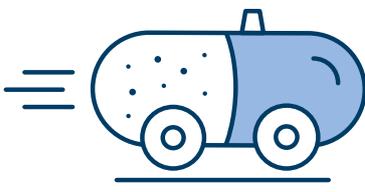
- INSTITUT FÜR NEUROWISSENSCHAFTEN UND MEDIZIN -

MEDIZIN

## Taxi, bitte!

Medikamente werden häufig als Tabletten oder über Spritzen verabreicht. Der Wirkstoff muss dann oft einen langen Weg bis zum Einsatzort im Körper zurücklegen. Dabei kann er Nebenwirkungen hervorrufen. Jülicher Wissenschaftler:innen haben ein Wirkstoff-taxi entwickelt, das eine Substanz gut verpackt genau an die gewünschte Stelle bringt und erst dort freisetzt. Verpackung und Transportmittel zugleich sind winzige Nanopartikel, die den Wirkstoff auf ein Signal hin freigeben – etwa einen bestimmten Sauerstoffgehalt oder pH-Wert. In Labortests mit Insulin hat das Taxi funktioniert. Tests mit Blut- und Gewebeprobe stehen noch aus.

- JÜLICH CENTRE FOR NEUTRON SCIENCE -



# 5,8

## Millionen Euro

stellt die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für weitere drei Jahre dem Schwerpunktprogramm SPP 2330 zur Verfügung. In dem seit 2021 laufenden Programm erforschen Wissenschaftler:innen Bakteriophagen. Das sind Viren, die Bakterien infizieren und im Kampf gegen multiresistente Keime als mögliche Alternative zu Antibiotika gelten. Die Jülicher Mikrobiologin Prof. Julia Frunzke koordiniert das Programm.

- INSTITUT FÜR BIO- UND GEOWISSENSCHAFTEN -

## KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

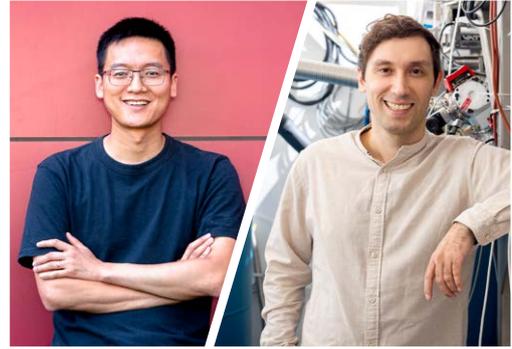
# Probleme mit logischem Denken

KI-Sprachmodelle – auch als Large Language Models (LLM) bekannt – scheitern häufig bei logischen Fragestellungen. Jülicher und englische Forscher:innen vom KI-Labor LAION und vom Open- $\Psi$  (Open-Sci) Collective hatten verschiedenen aktuellen LLMs einfache Aufgaben gestellt – zum Beispiel „Alice hat vier Brüder und auch eine Schwester. Wie viele Schwestern hat der Bruder von Alice?“

Richtig ist zwei. Diese und ähnlich einfache Fragen beantworteten die Modelle in mehr als der Hälfte der Fälle falsch. Außerdem schwankten die Leistungen schon bei nur geringfügig veränderten Aufgabenstellungen stark. Für die Autor:innen der Studie deutet das darauf hin, dass die LLMs grundlegende Defizite bei Verallgemeinerungen haben.

Sie sprechen sich daher dafür aus, die Fähigkeiten der aktuellen LLM-Generation korrekt zu messen und neu zu bewerten. Auch sollten einheitliche Standards entwickelt werden, um Schwächen von Sprachmodellen bezüglich ihrer Argumentationsfähigkeit aufzudecken.

- JÜLICH SUPERCOMPUTING CENTRE -



FORSCHUNGSPREIS

## ERC Grants an Jülicher Forscher

Dr. Jun Huang und Dr. Taner Esat haben jeweils einen mit bis zu 1,5 Millionen Euro dotierten Starting Grant des Europäischen Forschungsrats (ERC) erhalten. Jun Huang vom Institute of Energy Technologies, zugleich Juniorprofessor an der RWTH Aachen, erforscht Nanopartikel-Katalysatoren, die bei der Energiewende für die schnelle und wirtschaftliche Umwandlung von Elektrizität in chemische Energie benötigt werden. Taner Esat vom Peter Grünberg Institut entwickelt ein mobiles Quantensystem, das etwa als Quantensensor physikalische Größen auf atomarer Skala messen kann (siehe auch S. 31).



## Bleiben Sie auf dem Laufenden!

In unseren Jülich News gibt es monatlich Neuigkeiten aus dem Forschungszentrum per E-Mail. Jetzt Newsletter abonnieren!

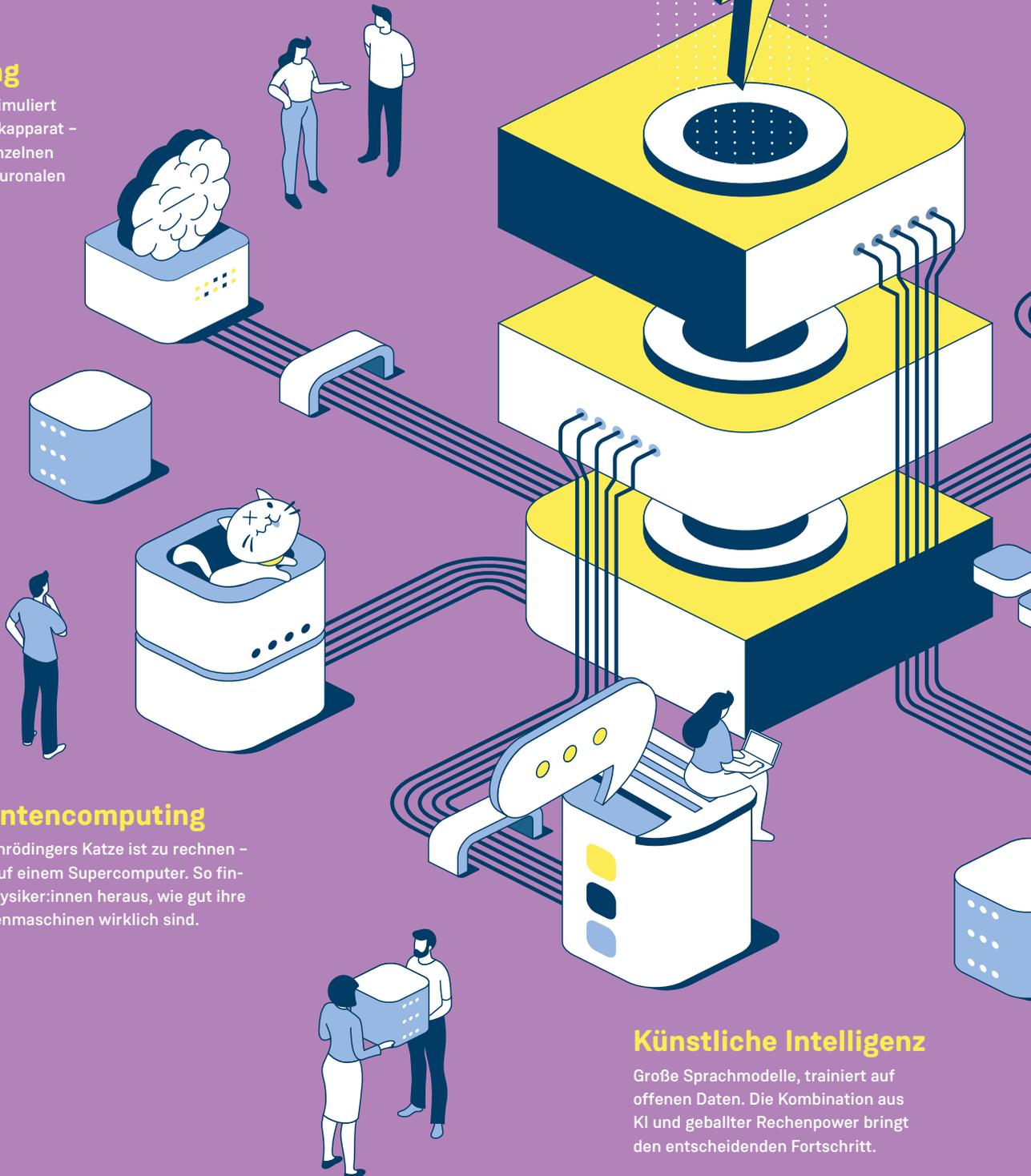


[go.fzj.de/effzett-newsletter](https://go.fzj.de/effzett-newsletter)

# Einer für alles

## Hirnforschung

Geballte Rechenkraft simuliert den menschlichen Denkapparat – detailgetreu von der einzelnen Nervenzelle bis zum neuronalen Netzwerk.

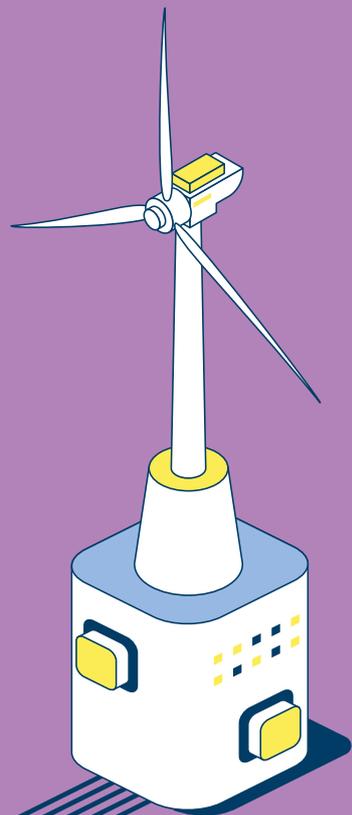


## Quantencomputing

Mit Schrödingers Katze ist zu rechnen – auch auf einem Supercomputer. So finden Physiker:innen heraus, wie gut ihre Quantenmaschinen wirklich sind.

## Künstliche Intelligenz

Große Sprachmodelle, trainiert auf offenen Daten. Die Kombination aus KI und geballter Rechenpower bringt den entscheidenden Fortschritt.



## Energieforschung

Ob Windrad, Wasserstoffturbine oder Batteriepack: Im exakten Strömungsmodell des Hochleistungsrechners darf es auch turbulent zugehen.



## Klimaforschung

So genau wie die Wettervorhersage für morgen: Wohin entwickelt sich das weltweite Klima in 20, 30 Jahren?



Mehr Informationen zu JUPITER:  
[go.fzj.de/effzett-jupiter](http://go.fzj.de/effzett-jupiter)



In Jülich geht Europas erster Exascale-Rechner an den Start: JUPITER. Der vielseitige Supercomputer wird eine der weltweit stärksten KI-Maschinen sein und eröffnet neue Möglichkeiten für die Simulation komplexer Systeme. Die Anwendungen reichen vom Quantenkosmos bis zu Fragestellungen der Energiewende.

Im Jahr 1965 hielt der erste Supercomputer Einzug in Europa. Der CDC 6600 am Forschungszentrum CERN konnte pro Sekunde drei Millionen Rechenoperationen durchführen. Jedes Smartphone würde diese Leistung heutzutage um unzählige Größenordnungen übertreffen. Und nun, 60 Jahre später, geht am Jülich Supercomputing Centre (JSC) der Ururenkel des CDC 6600 an den Start: JUPITER. Er wird als erster Rechner in Europa die magische Grenze von einer Trillion Rechenoperationen brechen – das ist eine 1 mit 18 Nullen. Das entspricht etwa einer Million moderner Smartphones oder rund einer Billion Exemplaren des CDC 6600. JUPITER stößt damit in die Klasse der Exascale-Rechner vor.

Doch JUPITERs Rekordgeschwindigkeit ist kein Selbstzweck: Die Simulationen, die auf dem Giganten laufen, ermöglichen Einblicke, die rein experimentell oder theoretisch nicht zu erlangen sind. Als computertechnisches Multitalent bewältigt JUPITER eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungsfälle. Dabei geht es um die großen Herausforderungen der Zukunft, vom Kleinsten bis zum Größten: vom Verhalten einzelner Quanten bis hin zu globalen Klimamodellen, von molekularen Vorgängen in Nervenzellen bis zu großen Sprachmodellen.

*Die flexible Architektur von JUPITER ermöglicht eine große Bandbreite von Anwendungen. Das Boostermodul des Superrechners arbeitet auf Basis von Grafikprozessoren (GPUs), die besonders geeignet sind für eine Vielzahl hochparalleler Anwendungen, wie hier vorgestellt. Das Clustermodul hingegen eignet sich für variable Aufgabenstellungen mit komplexen Ausführungsmustern, wie zum Beispiel für manche Physiksimulationen zu Wechselwirkungen von Elementarteilchen in Atomkernen. Mit dem Ansatz ist JUPITER gut aufgestellt und kann sowohl klassische HPC-Simulationen (High Performance Computing) als auch fortschrittliche Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) bedienen.*

# Von der Wettervorhersage zur Klimasimulation

**E**ine typische Anwendung, die schon seit Jahrzehnten ohne die Rechenleistung von Supercomputern nicht denkbar wäre, ist die Wettervorhersage. Der Deutsche Wetterdienst benutzt dafür das Atmosphärenmodell ICON, eine modular aufgebaute Open-Source-Software. Mit ihr lassen sich kurze Zeiträume mit einer hohen räumlichen Auflösung berechnen und so – ausgehend von aktuellen Messwerten und Beobachtungen – eine Prognose für das Wetter der kommenden Tage stellen. Es ist zudem möglich, mit einer niedrigeren Auflösung zu arbeiten und dann über Jahrzehnte hinweg die globale Klimaentwicklung zu simulieren. „Wir wollen damit allerdings sehr viel weiter und präziser in die Zukunft schauen, also detaillierte, langfristige Klimavorhersagen erstellen“, erklärt die Meteorologin Dr. Sabine Grießbach (JSC).

Wie wird sich die weltweite Durchschnittstemperatur verändern, wenn wir weiter CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre pumpen? Und wie sieht es aus mit Extremwetterereignissen? Werden Hitzewellen in Zukunft häufiger über uns hereinbrechen? Und mit welcher Intensität?

Dank der Rechenleistung von JUPITER kann ICON diese Fragen künftig so genau wie nie zuvor beantworten. Der entscheidende Vorteil, den JUPITER dem Modell bietet, heißt geringere Maschenweite: ICON legt ein Gitternetz aus Dreiecken um den Erdball. Für jede dieser Zellen berechnet es die relevanten Größen wie Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit. Die Maschenweite des Netzes gibt in etwa an, wie breit ein einzelnes Dreieck ist. Bei den derzeitigen Wettervorhersagen mit ICON liegt sie bei etwa 13 Kilometern. Phänomene mit einer kleineren Ausdehnung – wie etwa Wolken – können dann im wahrsten Sinn des Wortes durch das Raster fallen.



← Sabine Grießbach möchte mit JUPITER detaillierte Klimaprognosen erstellen.

„Mit JUPITER können wir das ändern und die Klimazukunft mit der räumlichen Auflösung von etwa einem Kilometer simulieren“, erklärt Dr. Lars Hoffmann (JSC), Experte für Atmosphärenforschung und Modellierung: „Damit ist ein Brückenschlag zwischen Wetter- und Klimamodellierung möglich. Und extreme Ereignisse wie heftige Gewitter und Starkregen dürften sich deutlich realistischer im Computer abbilden lassen als heutzutage.“ Erste Arbeiten dafür haben schon auf dem Testsystem JEDI begonnen.



*JEDI ist der erste Baustein von JUPITER, der bereits über die Hardware verfügt, die für das Boostermodul von JUPITER vorgesehen ist. Wie auch im JUPITER Booster kommen besonders effiziente GPUs des weltweit führenden Chipherstellers NVIDIA zum Einsatz.*

Ein wichtiger Punkt wird sein, wie die Wetter- und Klimamodelle mit der neuesten Generation von Grafikkarten, die bei JUPITER zum Einsatz kommt, funktionieren. „Zum Beispiel müssen auch viele Software-Bibliotheken installiert werden. Wir sind gerade dabei, sie zu konfigurieren, zu testen und so weit zu optimieren, dass wir die Rechnerarchitektur möglichst effizient nutzen können“, berichtet Grießbach.

## Künstliche Intelligenz auf dem Supercomputer

**E**ine weitere Anwendung, die von JUPITER mit seinen Nvidia-GPUs profitieren kann, ist das maschinelle Lernen. Gerade die generative KI, die zum Beispiel Bilder und Texte erzeugt, hat in den vergangenen Jahren mit Sprachprogrammen wie ChatGPT eindrücklich bewiesen, dass diese Algorithmen menschlicher Sprache verblüffend nahekommen.

Große Sprachmodelle werden mit einer Unzahl von Texten trainiert. Dabei erschließen sie sich selbst, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Wort auf ein anderes folgt – um damit selbst Wort für Wort einen sinnvollen Satz bilden zu können. Das Modell muss sich also riesige Datenmengen an sprachlichen Bausteinen und ihrer Verbindung zueinander merken.

„Zu einem Sprung in der Qualität dieser Sprachmodelle kam es erst, als sie mit vielen Parametern auf gewaltigen Datenmengen trainiert wurden. Und das war nur möglich, weil dafür Hochleistungsrechner benutzt wurden“, erklärt Chelsea Maria John (JSC). In einem Team mit Fokus auf Algorithmen und Methoden für Rechenbeschleuniger, hierzu gehören beispielsweise die JUPITER GPUs von Nvidia, beschäftigt sie sich mit der Schnittstelle von KI und Superrechnern.

Ihr Hauptaugenmerk liegt auf einem Open-Source-Sprachmodell, das sie im OpenGPT-X-Projekt mitentwickelt: „Dahinter steht ein deutscher Verbund aus zehn Projektpartnern. Die kommen aus der Forschung, aber auch aus der Industrie und den Medien. OpenGPT-X-Modelle sollen verschiedene europäische Sprachen beherrschen, aber vor allem Deutsch.“ Die Software zum Trainieren solcher Large Language Models soll auch auf

JUPITER laufen. Dessen Prozessoren sind für KI maßgeschneidert.

*Die 24.000 GPUs des Boostermoduls sind darauf ausgelegt, dass sie Daten hochgradig parallel verarbeiten. Klassische Prozessoren (CPUs) dagegen können besonders gut komplexe Berechnungen sehr schnell hintereinander abarbeiten. Dafür besitzen sie wenige, aber leistungsstarke Rechenkerne. GPUs hingegen verfügen über mehr Rechenkerne, die zwar nicht ganz so rechenstark sind, dafür aber Hand in Hand gleichzeitig arbeiten. Durch dieses parallele Rechnen führen sie die relativ einfachen Einzeloperationen, die zum Beispiel für die KI angestellt werden, schneller durch als klassische Prozessoren.*

„Dadurch lassen sich große Sprachmodelle sehr viel schneller und effizienter trainieren. Wir müssen allerdings auch dafür sorgen, dass die Aufgaben gleichmäßig auf alle Prozessoren verteilt werden“, sagt John.





← Chelsea Maria John braucht die Rechenpower von JUPITER, um Open-Source-Sprachmodelle zu entwickeln.

„Eine weitere Herausforderung wird sein, den Energieverbrauch zu minimieren. Denn das Trainieren von Sprachmodellen verschlingt sehr viel Strom.“ Auch aus diesem Grund wurde JUPITER als besonders energieeffizient konzipiert (siehe Kasten).

### Energieeffizienz

JEDI, der erste bereits fertiggestellte Baustein von JUPITER, führt die Green500-Liste der energieeffizientesten Supercomputer an. Er schafft 72 Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde pro Watt. Der vorherige Spitzenreiter kam im Vergleich dazu auf rund 65 Milliarden. Vor allem die effizient arbeitenden Nvidia-Superchips haben daran einen Anteil. Aber auch die Energieversorgung mit Ökostrom und die Warmwasserkühlung tragen langfristig dazu bei. Denn diese Art der Kühlung benötigt weniger Energie als eine herkömmliche Luftkühlung. Die Abwärme wird zur weiteren Verwendung ausgekoppelt, beispielsweise zum Heizen auf dem Gelände des Forschungszentrums.

## Gehirnzellen, im Elektronenhirn simuliert



**G**roße Sprachmodelle arbeiten mit künstlichen neuronalen Netzwerken, die von der Arbeitsweise des Gehirns inspiriert sind. Mit deren natürlichen Vorbildern beschäftigt sich Dr. Thorsten Hater (JSC): mit Nervenzellen, die im menschlichen Denkparat miteinander kommunizieren. Er möchte den Exascale-Rechner JUPITER nutzen, um das Verhalten einzelner Neuronen noch realistischer zu simulieren. Viele Modelle behandeln eine Nervenzelle nur als Punkt, der mit anderen Punkten in Verbindung steht. Über diese Verbindungen laufen die Spikes, die elektrischen Signale. „Das ist natürlich stark vereinfacht“, sagt Hater. „In unserem Modell besitzen die Neuronen eine räumliche Ausdehnung, wie in der Realität. So lassen sich viele Vorgänge auf molekularer Ebene detailliert beschreiben: Wir können das elektrische Feld entlang der gesamten Zelle berechnen. Und damit zeigen, wie die Reizweiterleitung an einem einzelnen Neuron variiert. Wir erhalten ein sehr viel realistischeres Bild dieser Prozesse.“

Für die Simulation benutzt Hater ein Programm namens Arbor. Damit lassen sich mehr als zwei Millionen einzelne Zellen rechnerisch miteinander verschalten. Nützlich sind solche Modelle von natürlichen neuronalen Netzwerken zum Beispiel für die Entwicklung von Medikamenten gegen neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer.

Die Veränderungen, die dabei an den Nervenzellen im Gehirn stattfinden, möchte der Physiker und Softwareentwickler auf dem Exascale-Rechner simulieren und untersuchen.

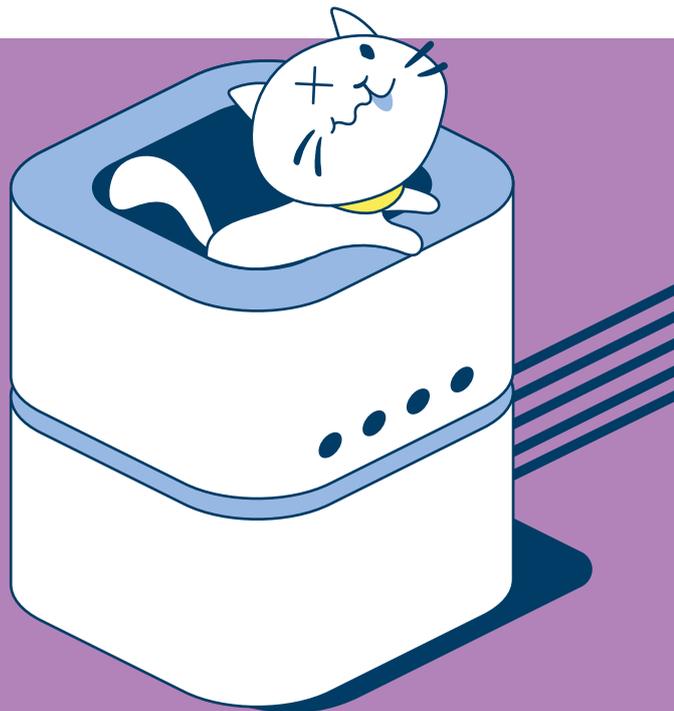
Ganz andere Veränderungen steuern Vorgänge des Lernens und Vergessens. Auch diese möchte Hater mit Simulationen besser verstehen: „Das Faszinierende an unserem Gehirn ist, dass es kein statisches Gebilde ist. Die Idee, dass wir es simulieren können als ein Netzwerk mit einer fixen Konnektivität, ist daher falsch. Unser Gehirn ist plastisch, das heißt, es verändert sich binnen Minuten, Stunden oder sogar Tagen, indem es beispielsweise Verbindungen zwischen Nervenzellen stärkt oder schwächt. Und genau diese Prozesse wollen wir künftig im Rechner nachstellen.“



← Thorsten Hater will den Exascale-Rechner nutzen, um Prozesse im menschlichen Gehirn realistischer zu simulieren.



*Die Simulations-Software Arbor ist auf die Hardware des JUPITER-Boostermoduls bereits angepasst. Die Nvidia GH200 Superchips stellen eine Kombination aus CPU und GPU dar, ein sogenanntes System-on-a-Chip. In dieser Form arbeiten die beiden Prozessortypen besonders effizient zusammen, weil sie auch räumlich eng aneinandergelockt sind. Das äußert sich in einer hohen Bandbreite und damit in einem schnellen Datenfluss.*



## Quantencomputer, simuliert auf dem Supercomputer

**M**it welchen Prozessoren JUPITER rechnet, spielt für Dr. Dennis Willsch (JSC) nur eine untergeordnete Rolle: „Unsere Simulationen können auf jedem Rechner laufen, auf dem ein Fortran-Compiler installiert ist – auch auf einem handelsüblichen Laptop.“

Trotzdem nutzt der Physiker üblicherweise Hochleistungscomputer, um darauf JUQCS

laufen zu lassen. Das ist eine Software, mit der sich universale Quantencomputer simulieren lassen. Diese Maschinen nutzen die exotischen Regeln der Quantenwelt, um damit bestimmte Aufgabenstellungen schneller lösen zu können als ein Supercomputer – zumindest theoretisch. So zum Beispiel dürfte der Shor-Algorithmus, mit dem sich bestimmte Verschlüsselungssysteme knacken lassen, von einem Quantencomputer in Windeseile berechnet werden.



## JUPITER

Beschafft wurde der Exascale-Rechner JUPITER – hier in einem Computer-Rendering – von der europäischen Supercomputing-Initiative EuroHPC Joint Undertaking (EuroHPC JU), die den Supercomputer mit 250 Millionen Euro fördert. Jeweils weitere 125 Millionen Euro steuern das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MKW-NRW) bei. Das deutsch-französische Konsortium ParTec-Eviden installiert JUPITER. Das Rechenzentrum, das ihn beherbergt, besteht aus rund 50 Container-Modulen auf über 2.300 Quadratmetern – das entspricht in etwa der Fläche eines halben Fußballplatzes.

Doch in der Praxis existiert noch keine Maschine, die dafür genug Qubits besitzt. Ein Qubit ist für einen Quantencomputer das, was ein Bit für einen konventionellen Rechner ist.

Ein weiteres Problem: „In den bereits existierenden Prototypen von Quantencomputern treten viele Fehler in den Qubits auf. Deshalb simulieren wir diese Quantenrechner unter Idealbedingungen auf normalen Computersystemen. Wir erhalten so das Ergebnis, wie es in der Theorie aussehen würde, und können damit die Qualität des realen Ergebnisses beurteilen“, sagt der Physiker. Doch bei der Simulation gibt es einen begrenzenden Faktor: Das ist der Speicher des Rechners, auf dem die Simulation läuft. „Der Speicher ist wirklich die Engstelle“, so Dennis Willsch. „Und der Speicherbedarf wächst exponentiell: Er verdoppelt sich für jedes weitere Qubit, das hinzukommt.“

Ein Laptop schafft mit seinem Speicher ungefähr 32 Qubits. Der Rekord auf einem Supercomputer liegt bei 48 Qubits. JUPITER bringt genug



← Dennis Willsch blickt mit dem Supercomputer in die Welt der Quanten und simuliert universale Quantencomputer.

Speicher mit, um noch ein paar Qubits in der Simulation zulegen zu können, sagt der Forscher: „Auf einem Exascale-Rechner könnten wir über die Schwelle von 50 Qubits kommen. Das wäre dann ein neuer Weltrekord.“

*Der Nvidia GH200 Superchip vereint schnellen GPU-seitigen Speicher mit energieeffizientem CPU-Hauptspeicher. Dank der integrierten Architektur ist es möglich, beide Speicherbereiche homogen zu nutzen. Das Boostermodul kommt so auf über 5 Petabyte Speicher, der durch Anwendungen genutzt werden kann. Das entspricht knapp 650.000 handelsüblichen Laptops.*

# Wasserstoffturbinen und Windparks

**W**eitaus alltäglicher sind die Anwendungen, mit denen sich Mathis Bode (JSC) beschäftigt: Er untersucht Strömungsphänomene von Flüssigkeiten und Gasen: „Da geht es zum Beispiel um die Aerodynamik von Autos und Flugzeugen, aber auch um die Vorgänge im Inneren von Turbinen und Motoren.“

Auch für viele Aspekte der Energiewende spielt die Simulation von Strömungen eine wichtige Rolle: Wie können Batteriepacks effizient gekühlt werden? Wie müssen Klimaanlage ausgelegt werden, um sparsam ein Gebäude auf konstanter Temperatur zu halten? Wie müssen die Rotorblätter von Windkraftanlagen geformt werden, damit sie optimal die Energie aus der Luft ernten? Und auch in Hinblick auf den künftigen Energieträger Wasserstoff sieht Mathis Bode Anwendungspotenzial: „In einer Wasserstoffwirtschaft brauchen wir zeitnah Wasserstoffkraftwerke. Und für deren Entwicklung ist es nötig, die Prozesse in ihrem Inneren zu simulieren, etwa an den Turbinen. JUPITER erlaubt es uns erstmals, die realen, industriell relevanten Bedingungen auf einem Supercomputer abzubilden. Dabei liefert er die Simulationsresultate auch noch in viel kürzerer Zeit.“

Strömungsphänomene werden von den Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben. Diese zu lösen, ist aber alles andere als alltäglich: Die Differentialgleichungen sind in der Regel so komplex, dass sie sich auch mit Supercomputern nur näherungsweise lösen lassen. Mathis Bode nutzt dazu unter anderem das Software-Paket nekRS, mit dem sich neben der reinen Strömungsmechanik weitere Vorgänge berücksichtigen lassen, wie etwa chemische Prozesse, die bei

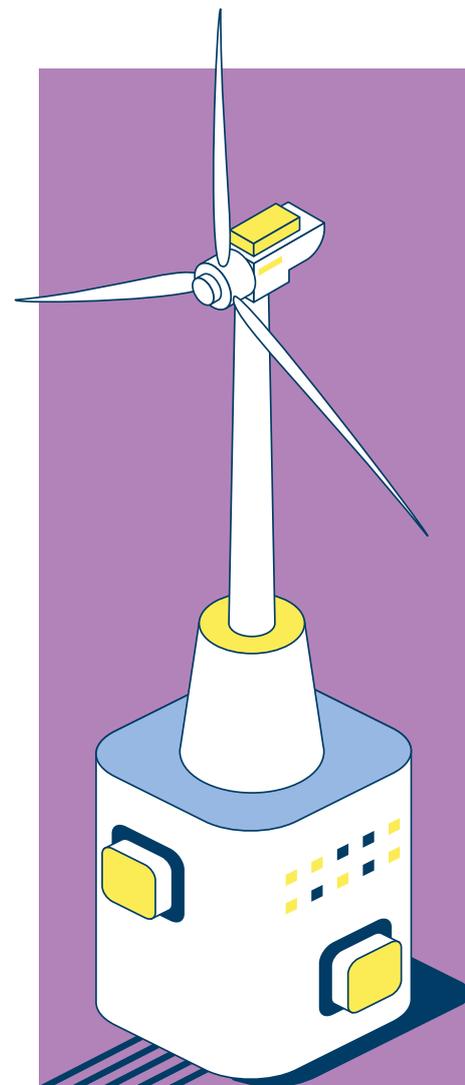
einer Verbrennung in einem Motor ablaufen.

„Dazu muss das Programm die im Motor herrschenden extremen Bedingungen berücksichtigen, die die Strömung beeinflussen, wie hohe Temperaturen, hohe Drücke und starke Verwirbelung“, erklärt der Strömungsexperte. Zusätzlich kann nekRS alle relevanten Größen von Strömungsphänomenen gleichzeitig simulieren, ohne wichtige Informationen abzuschneiden: zum Beispiel sowohl die geometriegeführte Strömung als auch kleinste turbulente Wirbel. „All diese Daten bei der Strömung zu berücksichtigen, das stellt schon hohe Herausforderungen an eine Simulation und resultiert in einem enorm großen Rechen- und Memorybedarf.“

Mit JUPITER ändert sich das. „nekRS ist bereits dahin optimiert, auf Grafikkarten zu arbeiten, wie sie in JUPITERs Boostermodul zum Einsatz kommen. Durch die schiere Anzahl der Prozessoren ergibt sich ein enormer Zeitgewinn“, sagt Bode: „Was früher zwei Wochen gedauert hat, wird auf JUPITER nur noch einen Tag in Anspruch nehmen.“

Das Multitalent JUPITER lässt für eine Vielzahl von Forschungsfeldern gewaltige Fortschritte erwarten. Durch seine modulare Hardware-Architektur deckt er ein breites Spektrum an Anwendungen ab. Welche Erkenntnisse im Einzelnen auf die Fachleute in Jülich warten, lässt sich momentan noch nicht sagen. Das Exascale-Zeitalter in Europa hat gerade erst begonnen.

ARNDT REUNING



← Mathis Bode kann mit JUPITER schneller und genauer komplizierte Strömungsphänomene berechnen – das ist für viele Bereiche der Energieversorgung relevant.

# „Stresst mich nicht!“

Wie gut Jugendliche mit psychischen Problemen umgehen können, hängt unter anderem mit der Struktur ihres Gehirns zusammen – genau genommen mit einer gut ausgeprägten Schutzschicht für Nervenzellen, der Myelinstruktur.

**M**obbing in der Schule, ständige Konflikte zu Hause, traumatische Erfahrungen: Während einige Jugendliche solche Belastungen gut meistern können, bereiten sie anderen enorme Probleme. Das kann sogar zu psychischen Krankheiten führen. Woran liegt dieser Unterschied?

Eine Vermutung: Es könnte Zusammenhänge zwischen der Hirnstruktur und der Resilienz von Teenagern geben – also ihrer Fähigkeit, mit belastenden Situationen umzugehen. Sofie Valk und Meike Hettwer vom Jülicher Institut für Neurowissenschaften und Medizin (INM-7) und dem Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig sind gemeinsam dieser Frage nachgegangen.

„Uns hat vor allem interessiert, wie sich Änderungen im Stresslevel oder traumatische Erfahrungen – wie etwa der Tod der Großmutter – auf die mentale Gesundheit von Jugendlichen beziehungsweise deren Anpassungsfähigkeit auswirken. Und wie das wiederum mit der Gehirnstruktur der Jugendlichen zusammenhängt“, erläutert Valk.

Der Hintergrund: Im jugendlichen Alter wird das Gehirn stark umgebaut, insbesondere die kognitiven Netzwerke werden neu strukturiert

und ausgebildet. Das Denken wird komplexer, die Fähigkeit, sich in das soziale Umfeld einzufügen, verbessert sich. Doch gehen diese Veränderungen meist auch mit einer höheren Verletzlichkeit einher. So können Jugendliche auf negative Umwelteinflüsse instabiler und anfälliger reagieren.

Für die Untersuchungen nutzten die Wissenschaftlerinnen einen öffentlich zugänglichen Datensatz aus Cambridge und London. Dieser umfasst zum einen die Ergebnisse einer zweimaligen Befragung von 14- bis 24-Jährigen hinsichtlich ihrer Situation daheim, ihrem Freundeskreis sowie bisher erlebten Traumata – durchgeführt im Abstand von ein bis zwei Jahren. Zum anderen enthalten die Daten je Proband zwei Magnetresonanztomographie-Scans, kurz MRT-Scans, vom Gehirn, die jeweils zur Zeit der Befragungen erstellt wurden.

„Bei besserer Myelinisierung steckt man Stress besser weg.“

SOFIE VALK

## HIRNSCANS ANALYSIERT

„Während einige Jugendliche trotz schwieriger Umstände angaben, sich gut zu fühlen, sprachen andere von großer Belastung durch äußere Faktoren“, berichtet Valk. Um herauszufinden, wie die mentale Gesundheit der Testpersonen mit dem Gehirn zusammenhängt, haben die Forscherinnen einen Teil des Datensatzes genauer analysiert. Und zwar die MRT-Aufnahmen von 141 Proband:innen, die mit der Zeit besser oder schlechter mit psychosozialen Stress umgehen konnten – also mit dem Alter resilienter oder anfälliger wurden.

Konkret haben sich die Forscherinnen einen bestimmten Teil des Gehirns näher angeschaut: die Myelinstruktur. Myelin besteht aus Proteinen und Fetten und legt sich als schützende Schicht um die Ausläufer der Nervenzellen. Es stabilisiert und isoliert die Netzwerkverbindungen – und sorgt somit dafür, dass die Nervensignale ungehindert,





### Immer mehr Jugendliche betroffen

Depressionen, Essstörungen, Angstzustände – solche psychischen Erkrankungen treten oft erstmals in der Pubertät und im jungen Erwachsenenalter auf. Die Zahlen steigen bedenklich: 2022 ging fast jeder fünfte Krankenhausaufenthalt (19 Prozent) der 10- bis 17-Jährigen auf psychische Erkrankungen zurück, im Jahr 2012 waren es nur 13 Prozent. Am häufigsten wurden die Jugendlichen wegen Depressionen behandelt.

schnell und effizient von Zelle zu Zelle wandern können.

In der Pubertät befindet sich diese Myelinstruktur noch im Aufbau. Die Forscherinnen entdeckten einen interessanten Zusammenhang zwischen dieser Struktur und der Fähigkeit, sich an schwierige Umstände anzupassen. Bei Jugendlichen, die im Laufe der Zeit besser mit schwierigen Umständen umgehen konnten, hatte sich die Myelinstruktur in bestimmten Hirnregionen schneller aufgebaut. „Resilienz und Myelinstruktur stehen offenbar in einem Zusammenhang“, sagt Valk. „Wie resilient und anpassungsfähig Jugendliche gegenüber psychosozialen Stress sind, scheint einen direkten Einfluss auf die Gehirnentwicklung zu haben. Das gilt auch umgekehrt: Bei besserer Myelinisierung steckt man Stress besser weg.“

Neben der Myelinstruktur haben die Wissenschaftlerinnen mithilfe der MRT-Daten auch die funktionellen Netzwerke im Gehirn untersucht – genauer gesagt, welche Hirnstrukturen und -regionen eng miteinander verbunden waren, als die Probanden in Ruhe in der MRT-Röhre lagen. Die Ergebnisse: Jugendliche, die mit der Zeit resilienter wurden, zeigten nicht nur eine stärkere regionale Myelinisierung. Auch die kognitiven Netzwerke in den betreffenden Bereichen blieben stabiler. Das heißt, die Verbindungen zwischen den Gehirnregionen veränderten sich nur wenig.

Dagegen waren die Netzwerke bei Jugendlichen, die mit der Zeit anfälliger für Stress wurden und eine schwächere Myelinisierung zeigten, weniger stabil und veränderten sich mehr. Anders ausgedrückt: Dies könnte bedeuten,

dass ihre Gehirne anfälliger für negative äußere Einflüsse und die Jugendlichen nicht so belastbar waren.

### NOCH OFFENE FRAGEN

Inwieweit die Ergebnisse helfen, die Resilienz von Jugendlichen zu stärken, muss noch untersucht werden. „Für uns ist es eine wichtige Erkenntnis, dass sich der unterschiedliche Umgang mit belastenden Situationen bei Jugendlichen auch in der Entwicklung des Gehirns widerspiegelt“, sagt Valk. „Möglicherweise lassen sich Myelinisierung und Stabilisierung der Netzwerke im Gehirn durch psychosoziale Hilfsangebote wie Gesprächstherapien oder Sportangebote verbessern. Auch das muss geprüft werden.“

JANINE VAN ACKEREN



↑ Leitet Forschungsgruppen in Jülich und in Leipzig:  
Dr. Sofie Valk



↑ Meike Hettwer ist Doktorandin an der Max Planck School of Cognition.

# Energie fürs Hirn

Kreatin macht offenbar müde Menschen munter – zumindest kurzfristig. Das legt eine Studie zu Folgen von Schlafentzug auf das Gehirn nahe.

**W**enn tagsüber die Konzentration nachlässt, hilft vielen ein Kaffee. Doch das beliebte koffeinhaltige Heißgetränk könnte Konkurrenz bekommen. Eine Studie zu Schlafentzug zeigt, dass das Stoffwechselprodukt Kreatin (siehe Kasten) dem Gehirn kurzfristig einen Energieschub verleihen kann.

Wissenschaftler:innen um Dr. Ali Gordjinejad vom Institut für Neurowissenschaften und Medizin (INM-2) haben für die Untersuchung 15 Proband:innen über Nacht wach gehalten und währenddessen kognitive Aufgaben lösen lassen. Zu Beginn des Versuchs erhielten alle eine hohe Einzeldosis Kreatin. „Bei Schlafentzug leiden etwa Konzentration, Aufmerksamkeit und Gedächtnis. Das Kreatin hat die Denkleistung aller Proband:innen verbessert, insbesondere die Verarbeitungsleistung und das Kurzzeitgedächtnis“, berichtet Gordjinejad.

Normalerweise können Gehirnzellen Kreatin nur in geringen Maßen aufnehmen. Doch der Schlafentzug verursacht Stoffwechselveränderungen im Hirn, welche die Aufnahme begünstigen.

## KREATIN

... ist eine Kohlenstoff-Stickstoff-Verbindung, die unser Körper selbst produziert. Wir nehmen Kreatin aber auch über die Nahrung auf, insbesondere über Fleisch und Fisch. Der Stoff hilft, die Muskulatur mit Energie zu versorgen. In einigen Sportarten sind Nahrungsergänzungsmittel mit Kreatin sehr beliebt, denn unter bestimmten Voraussetzungen kann zusätzliches Kreatin Aufbau und Leistungsfähigkeit von Muskeln verbessern. In der Medizin wird es eingesetzt, um etwa Patient:innen mit Muskelschwund, mit eingeschränkter Herzmuskelfunktion oder nach Herzinfarkten zu behandeln.



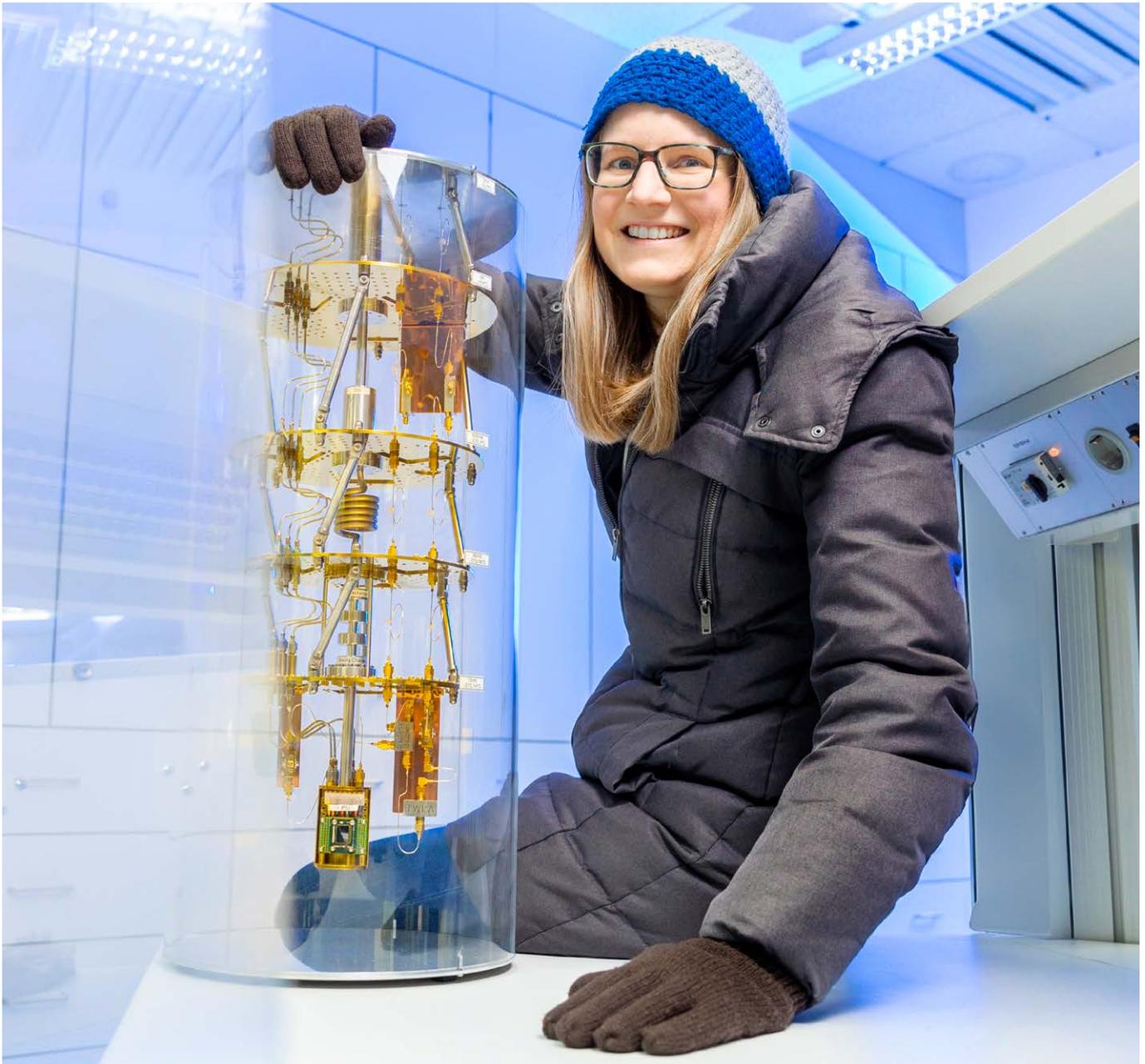
↑ Ali Gordjinejad hat untersucht, wie Kreatin bei Schlafmangel auf das Gehirn wirkt.

„So konnte das Kreatin die Energievorräte des Gehirns verändern und damit die Leistungsfähigkeit des Hirns verbessern“, erläutert der Forscher. Der positive Effekt auf den Gehirnstoffwechsel stellte sich ab drei Stunden nach der Einnahme ein, erreichte nach vier Stunden seinen Höhepunkt und dauerte bis zu neun Stunden an.

„Zuvor gab es bereits verschiedene Arbeiten, die von einer verbesserten kognitiven Leistungsfähigkeit nach einer langen Kreatin-Diät berichten. Uns ist es erstmals gelungen, einen kurzfristigen Effekt nachzuweisen“, hebt Gordjinejad hervor. Er rät aber dringend davon ab, Kreatin schon heute als Muntermacher zu verwenden. „Hohe Dosen belasten stark die Nieren und können gesundheitliche Risiken hervorrufen“, warnt er. Sollte sich jedoch herausstellen, dass auch geringere Dosen die Leistung steigern, könne Kreatin in langen Arbeitsnächten durchaus ein ernsthafter Konkurrent zum Kaffee werden.

ANNA TIPPING





## Woran forschen Sie gerade, Frau Geck?

**Prof. Dr.-Ing. Lotte Geck, Head of System Modelling am Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik (ZEA-2) und Juniorprofessorin für System Engineering for Quantum Computing an der RWTH Aachen**

„Ich suche Lösungen, um mit extremer Kälte klarzukommen – und zwar für elektronische Schaltungen. Sie sollen die Recheneinheiten von Quantencomputern steuern, die Qubits. Fehlerfrei funktionieren Qubits oft nur bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt von -273 Grad Celsius. Standard-Elektronik ist dafür nicht ausgelegt. Sie kann die Qubits durch die von ihr erzeugte Wärme sogar stören. Mittels Simulationen entwickeln wir Schaltungen, die nicht nur für wenige Qubits geeignet sind, sondern auch für künftige Rechner mit Millionen Qubits.“



# CO<sub>2</sub> wieder einfangen

Um die Klimaerwärmung zu begrenzen, müssen wir künftig weniger Kohlendioxid ausstoßen und der Atmosphäre auch große Mengen CO<sub>2</sub> entziehen. Nur so lässt sich ein Temperaturanstieg von mehr als zwei Grad verhindern. Forscher:innen des Projekts DACStorE treiben eine entsprechende Technologie voran.

## So funktioniert's

Die isländische DACS-Anlage Mammoth arbeitet nach dem Adsorptionsverfahren: Ventilatoren leiten Umgebungsluft in ein spezielles Modul, den Kollektor. Dort bindet das CO<sub>2</sub> chemisch an ein festes Filtermaterial. Sobald der Filter kein CO<sub>2</sub> mehr aufnehmen kann, wird das Modul geschlossen und der Filter auf rund 100 Grad Celsius erhitzt. Dadurch löst sich das CO<sub>2</sub> vom Filter. Das CO<sub>2</sub> wird gesammelt und der Filter kann wieder verwendet werden. Andere DACS-Verfahren nutzen Flüssigkeiten zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung oder setzen Strom statt Wärme ein, um das Gas vom Filter zu entfernen.



Die Mammoth-Anlage aus der Luft. Sie liegt nahe einem Geothermie-Kraftwerk, das die nötige Energie für den Prozess liefert. →

Im Mai 2024 nahm in Island die Anlage „Mammoth“ (Mammut) eines Schweizer Unternehmens den Betrieb auf. Sie soll jährlich bis zu 36.000 Tonnen CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernen, die dann dauerhaft unterirdisch gespeichert werden. Es ist die bisher größte von weltweit rund 20 „Direct Air Capture and Storage“ (DACs)-Anlagen.

Das Treibhausgas CO<sub>2</sub> ist eine wesentliche Ursache für den Klimawandel. Es aus der Atmosphäre zu holen und im Untergrund verschwinden zu lassen, erscheint auf den ersten Blick wie eine Patentreue gegen den Klimawandel. „Diese Einschätzung ist überzogen“, so die Jülicher Wissenschaft-

lerin Dr. Freia Harzendorf vom Institute of Climate and Energy Systems (ICE-2): „Die DACS-Technologie ist keine Lösung, damit die Menschheit ohne Energiewende und ohne Umstellung ihrer Lebensweise weitermachen kann wie bisher.“ Sie nennt drei Gründe: Erstens benötigen DACS-Anlagen viel Energie. Nutzen sie Energie aus fossilen Quellen statt aus erneuerbaren, ist für den Klimaschutz nichts gewonnen – im Gegenteil. Zweitens sind die Anlagen und ihr Betrieb sehr teuer. Es ist meist günstiger und sinnvoller, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß in die Atmosphäre von vornherein zu vermeiden. Drittens ist ungewiss, inwieweit es genug geeigneten Speicherplatz für enorme Mengen CO<sub>2</sub> gibt.

## NOTWENDIGE MASSNAHME

Trotz dieser Einschränkungen sind DACS-Anlagen ein wichtiger Baustein im Kampf gegen den Klimawandel. Laut dem Weltklimarat IPCC wird es ohne die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre nicht möglich sein, den menschengemachten globalen Temperaturanstieg mittelfristig auf unter 2 Grad gegenüber der vorindustriellen Zeit einzudämmen.

Die meisten Staaten haben sich im Pariser Klimaabkommen verpflichtet, die globale Erwärmung sogar auf 1,5 Grad zu begrenzen. Deutschland möchte mit seinem Klimaschutzgesetz dazu beitragen, dass dieses Ziel erreicht wird. Es sieht vor, dass Deutschland ab dem Jahr 2045 treibhausgasneutral ist: Die Bundesrepublik soll dann nicht mehr zu einem Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre beitragen. Das lässt sich auf zweierlei Weisen erreichen: Entweder werden gar keine Treibhausgase mehr ausgestoßen oder schwer vermeidbare Emissionen werden durch Maßnahmen ausgeglichen, die der Atmosphäre Treibhausgas entziehen, also durch sogenannte „negative Emissionen“.





← Freia Harzendorf ist wissenschaftliche Leiterin des interdisziplinären Forschungsprojekts DACStorE, das den Ausbau der DACs-Technologie untersucht.

### VERSCHIEDENE ANSÄTZE ERKUNDEN

Bisher nicht oder besonders schwer vermeidbar sind CO<sub>2</sub>-Emissionen beispielsweise in einigen Bereichen der Landwirtschaft, Keramik-, Chemie- und Glasindustrie. „Unsere Analysen haben gezeigt, dass DACs-Verfahren schon ab dem Jahr 2035 eine Möglichkeit bieten, solche CO<sub>2</sub>-Emissionen auszugleichen“, sagt Harzendorf. Im Jahr 2045 müssen nach den Studien der Jülicher Systemforschung in Deutschland rund 57 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernt und gespeichert werden, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Die Abscheidungskosten für jede Tonne CO<sub>2</sub> mittels des DACs-Verfahrens, das zum Beispiel von der isländischen Anlage Mammoth genutzt wird, liegen dann nach den Jülicher Berechnungen in Deutschland bei durchschnittlich 290 Euro pro Tonne Gas. „Trotzdem sind DACs-Verfahren eine vielversprechende Option“, ist Harzendorf überzeugt.

Allerdings: Um 2045 die errechnete Menge aus der Atmosphäre zu holen, wären mehr als 1.500 Anlagen mit der Kapazität der Mammoth-Anlage nötig. Im Projekt DACStorE arbeiten das Forschungszentrum Jülich, fünf weitere Helmholtz-Zentren und die TU Berlin daher an einem schnellen, ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Hochlauf der DACs-Technologie. Freia Harzendorf ist wissenschaftliche Leiterin des Projekts. Ziel von DACStorE ist es, die Technologie weiterzuentwickeln und verschiedene Ansätze zu erkunden, die den Energieverbrauch und die Kosten senken sollen. Darüber hinaus analysieren die Wissenschaftler:innen auch die gesellschaftliche Akzeptanz und erarbeiten Empfehlungen für rechtliche Regelungen und politische Maßnahmen.

In Jülich ermitteln die Forscher:innen derzeit die weltweit besten DACs-Standorte und entwerfen Anlagen, die optimal an die jeweiligen Bedingungen angepasst sind. Dabei beachtet das Team um Harzendorf nicht nur eine möglichst effiziente und verlässliche Versorgung mit erneuerbarer Energie, die Verfügbarkeit von Lagerstätten und die Transportwege dahin. „Auch die regional unterschiedlichen Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit spielen eine Rolle“, sagt Harzendorf. Erste Analysen zeigen bereits, dass sich der Energiebedarf von DACs-Anlagen in verschiedenen deutschen Regionen allein aufgrund der jeweiligen Wetterverhältnisse um bis zu 15 Prozent unterscheidet.

FRANK FRICK



← Die Kollektoren, welche das CO<sub>2</sub> aus der Luft filtern, stecken bei der Mammoth-Anlage in großen Containern. Im Vollbetrieb wird es 72 Container geben.

# Energie auf dem Chip zurückgewinnen

Elektronische Geräte geben Energie als Wärme ab. Diese Abwärme wieder in Strom umzuwandeln, gelingt nur mit besonderen Materialien. Eine neue Legierung könnte das direkt auf Mikrochips ermöglichen.

**A**llein in Europa gehen durch ungenutzte Abwärme elektronischer Geräte jährlich etwa 1,2 Exajoule Energie verloren. Dies entspricht in etwa dem Primärenergieverbrauch von Österreich oder Rumänien. Doch Materialien, die Wärme in elektrische Energie umwandeln können sind rar – und keines dieser sogenannten Thermoelektrika ist mit der aktuellen Technologie bei der Halbleiterfertigung kompatibel. Das könnte sich ändern. Fünf Partner aus Deutschland, Italien und England haben eine vielversprechende Legierung aus Germanium und Zinn erstellt, die sich auch für die Chipfertigung eignet. Die Legierung könnte bei der Herstellung direkt in siliziumbasierte Mikrochips integriert werden und die Abwärme aus Computerprozessoren in Elektrizität umwandeln.

„Das Hinzufügen von Zinn zu Germanium reduziert die thermische Leitfähigkeit erheblich, während die elektrischen Eigenschaften beibehalten werden – eine ideale Kombination für thermoelektrische Anwendungen“, erklärt Dr. Dan Buca, Forschungsgruppenleiter am Jülicher Peter Grünberg Institut (PGI-9), das die Legierung zusammen mit dem IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik sowie den Universitäten Pisa, Bologna und Leeds entwickelt hat. Um die passende Legierung zu finden, hatten die Forscher:innen Proben in unterschiedlichen Zusammensetzungen und Dicken mit verschiedenen experimentellen Techniken untersucht.

Durch das Nutzen der Abwärme ließe sich der Bedarf der Prozessoren an Strom sowie externer Kühlung deutlich reduzieren und so die Effizienz elektronischer Geräte steigern. Die gemeinsame Forschung könne daher erhebliche Auswirkungen auf den Bereich der Green IT-Infrastrukturen haben, so Prof. Giovanni Capellini, Projektleiter am IHP.

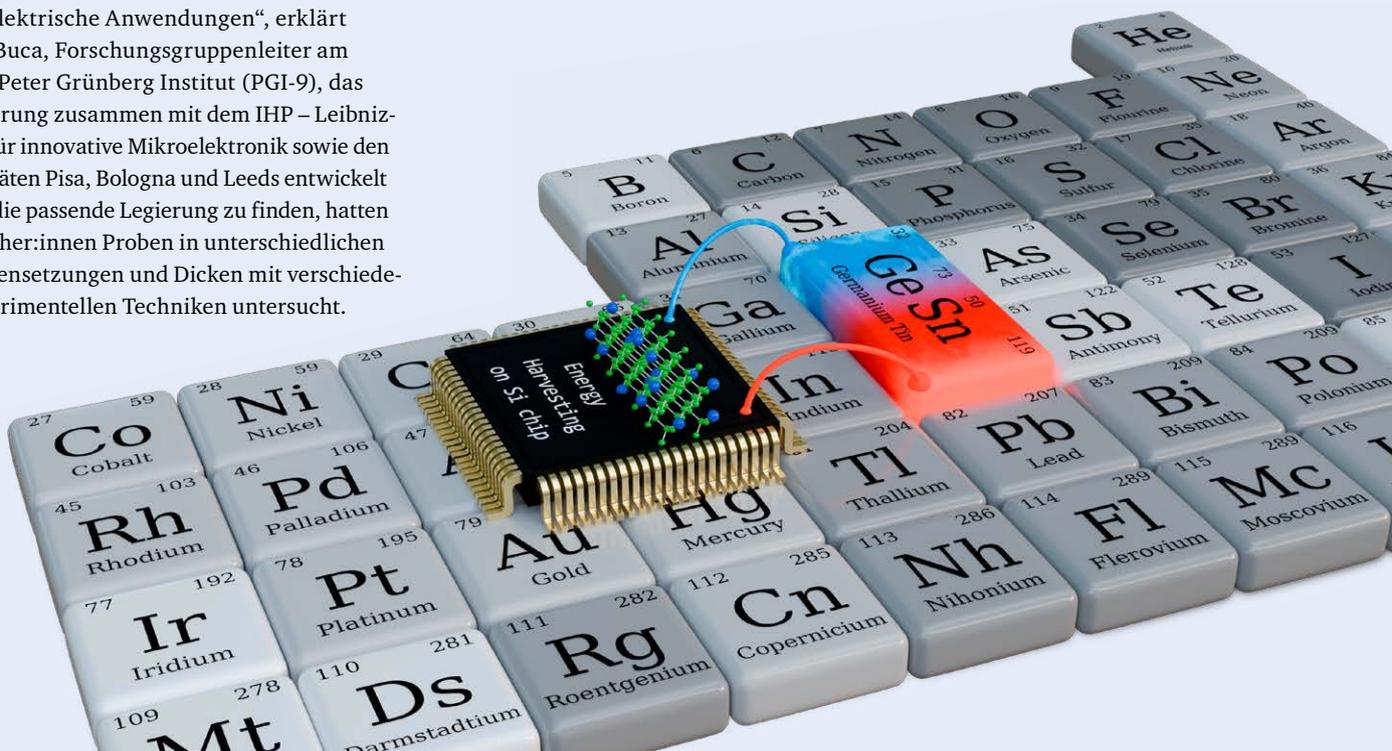
## WEITERE ELEMENTE BEMISCHEN

Jülich und IHP wollen das Material nun weiterentwickeln und die Germanium-Zinn-Legierung zunächst um Silizium und anschließend um Kohlenstoff erweitern – alles Elemente der IV. Hauptgruppe des chemischen Periodensystems, welche die Grundlage der meisten elektronischen Geräte bilden. Ziel ist ein thermoelektrisches Gerät, mit dem sich das Potenzial der Energierückgewinnung durch diese Gruppe-IV-Legierungen demonstrieren lässt.

TOBIAS SCHLÖSSER



↑ Dan Buca leitet die Forschungsgruppe Siliziumbasierte Epitaxie und Photonik.



# Blick in die Zukunft

Was wächst künftig noch auf unseren Feldern? Der steigende CO<sub>2</sub>-Gehalt und zunehmende Wetterextreme wie Starkregen, Hitzewellen und Dürren verändern die Lebensbedingungen für Weizen, Gerste und Co. Forscher:innen wollen herausfinden, wie Pflanzen auf den Klimawandel reagieren und wie sich die Landwirtschaft anpassen muss. Dabei hilft AgraSim, eine einzigartige Simulationsanlage für Pflanzen, Böden und Klima.



1

## Pflanzenkammern

In sechs garagengroßen Klimakammern befinden sich von der Außenwelt abgeschlossene Ökosysteme. Wichtige Umweltbedingungen können je nach Wunsch eingestellt werden. So lässt sich in Langzeitversuchen parallel testen, wie sich unterschiedliche Klimaszenarien und Anpassungsmaßnahmen auf Pflanzen, Boden und Atmosphäre auswirken. Die Forscher:innen untersuchen bestehende Kulturpflanzen, erproben aber auch neue Pflanzensorten.

### Was lässt sich einstellen?

- Lichteinstrahlung (Wellenlänge und Intensität)
- Temperatur von Luft und Boden
- Feuchtigkeit
- CO<sub>2</sub>-Gehalt
- Ozongehalt



Mehr Infos unter  
[go.fzj.de/effzett-agrasim](https://go.fzj.de/effzett-agrasim)

### Daten & Fakten

- Fläche: 18 mal 11 Meter über drei Etagen
- Entwicklungs- und Bauzeit: 9 Jahre
- gefördert im Programm „Changing Earth – Sustaining our Future“ der Helmholtz-Gemeinschaft, außerdem durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung



2

## Analyse-Ebene

Echtzeit-Analyse verschiedener Daten, mit deren Hilfe der Austausch von Stoffen wie etwa  $\text{CO}_2$  zwischen Boden, Pflanzen und Atmosphäre erfasst werden kann.

### Was lässt sich messen?

- Temperatur von Luft und Boden
- Feuchtigkeit der Luft
- Wasseranteil im Boden
- Verschiedene Gase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ )
- Gas- und Wasserisotope (um Wege und Prozesse der markierten Substanzen nachzuvollziehen)
- Blattfluoreszenz (liefert Info über Photosyntheseaktivität der Pflanzen und ihren Biostress)



2

3

## Lysimeter

- Metallzylinder mit 3 Tonnen intaktem Boden für die Pflanzen in den Pflanzenkammern
- Realen Systemen entnommen (Ackerboden)
- Vollständige Kontrolle von Temperatur und Bodenfeuchte

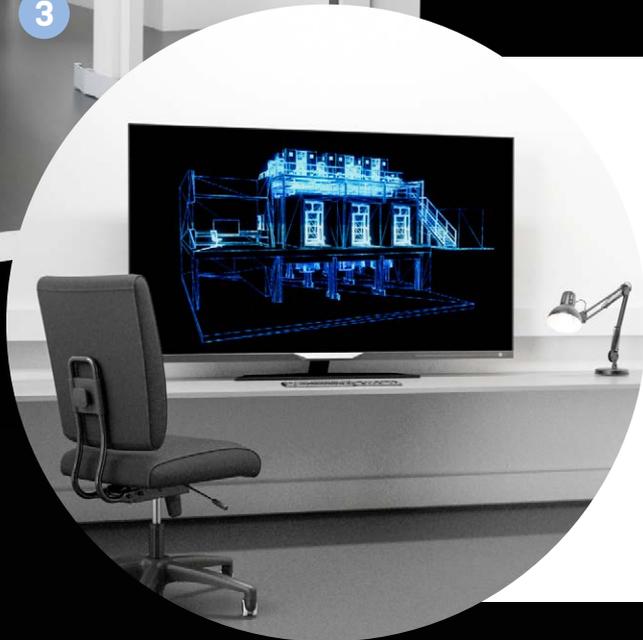
3

4

## Digitaler Zwilling

Eine Besonderheit der Kammern: Die gesamte Anlage wird einen sogenannten digitalen Zwilling („digital twin“) bekommen. Dieser bekommt alle gemessenen Daten, um die in den Klimakammern ablaufenden Prozesse mithilfe von Computermodellen nachzuvollziehen. Umgekehrt lassen sich von den Modellen vorhergesagte Veränderungen experimentell in den Kammern überprüfen oder Versuche mit dem Feedback aus den Modellen anpassen. Die Erkenntnisse helfen zum einen, bestehende Modelle zu verbessern, und zum anderen, neue Klima- und landwirtschaftliche Modelle zu entwickeln, etwa mit Daten für Multiskalenmodelle. Diese berücksichtigen Prozesse in verschiedenen Zeitskalen und/oder Größenordnungen, vom Molekül bis hin zum ganzen Feld.

Die Kombination aus Experimentierkammern dieser Größe gekoppelt mit einem digital twin ist ein Alleinstellungsmerkmal der Anlage.



← Aus den USA ans  
Forschungszentrum  
gewechselt: Eva  
Pfanerstill

Hitze, Dürre und  
Schädlinge lösen bei  
Pflanzen Stress aus. Die  
Zusammensetzung ihres  
„Atems“ ändert sich – das  
wirkt sich auch auf  
Luftqualität und Klima aus.  
Eva Pfannerstill ist den  
Veränderungen mit einer  
neuen Messmethode  
auf der Spur.

**D**er bunte Bildschirmschoner  
im Büro von Dr. Eva Pfannerstill zeigt den berühmten  
Felsbogen „Mesa Arch“ in  
Utah. Eine kleine Erinnerung an ihre  
drei Jahre als Postdoc in Berkeley  
(USA). Dort vermaß sie die Luft über  
Los Angeles, bevor sie im Oktober  
2023 als Nachwuchsgruppenleiterin  
ans Jülicher Institute of Climate and  
Energy Systems (ICE-3) wechselte.

In Deutschland untersucht sie nun  
statt der Luft über Städten die Luft  
über Wäldern. Wichtigstes Werkzeug:  
Eine von ihr in Berkeley neu entwi-  
ckelte Messmethode. Die Kombination  
aus einem hochmodernem Massen-  
spektrometer und einem speziellen  
Rechenverfahren liefert eine Fülle an  
Messdaten von über 400 Substanzen  
in der Atmosphäre: neben typischen  
pflanzlichen Stoffen auch Fahrzeug-  
emissionen, Lösungsmittel sowie  
Reinigungs- und Körperpflegeproduk-  
te. „Das Besondere ist, dass wir die  
Stoffe nicht nur messen, sondern auch  
nachvollziehen können, aus welchen  
Quellen sie stammen“, freut sich Pfannerstill. Pro Sekunde lassen sich zehn  
Messwerte für die Stoffkonzentration  
erfassen und gleichzeitig mit dersel-  
ben Messfrequenz der Wind in drei

# Der Atem der Wälder

Dimensionen analysieren. „So können wir genau quantifizieren, welche Mengen der gemessenen Substanzen an welchem Ort emittiert werden – ob sie zum Beispiel seitlich eingeweht werden oder von der Landoberfläche stammen“, beschreibt die Forscherin.

### URSACHE ERKANNT

Ihre Methode hatte geholfen herauszufinden, warum die Feinstaub- und Ozonbelastung in Los Angeles bei steigender Temperatur zunimmt. „Eine der Ursachen sind die temperaturabhängigen Emissionen, die den ‚Atem‘ der Metropolregion dominieren“, so die Expertin. Haupttreiber des Geschehens bei hohen Temperaturen sind Terpene aus Pflanzen, gefolgt von Verdunstungen aus Lösungsmitteln. Beide reagieren mit den Stickoxiden von Abgasen zu Ozon und Feinstaub (siehe Kasten).



## Stress verändert Duftstoffe

Pflanzen geben gasförmige Duftstoffe in die Luft ab. Die Stressreaktionen, die Hitze, Dürre und Schädlinge bei Pflanzen auslösen, verändern unter anderem die Menge und Zusammensetzung der Duftstoffe. Dazu zählen flüchtige Kohlenwasserstoffe und Terpene wie etwa Isopren. Wie genau dieser Molekülmix bei verschiedenen Stressarten variiert, ist Gegenstand intensiver Forschung. Die Menge der Substanzen ist wichtig, weil einige mit Stickoxiden aus Autoabgasen oder anderen Emissionen zu Ozon reagieren und zur Bildung von Aerosolen beitragen. Aerosole können auf das Klima kühlend wirken, aber auch zu schädlichem Feinstaub werden.

## „Mit unserer Methode können wir die Stoffe nicht nur messen, sondern auch nachvollziehen, aus welchen Quellen sie stammen.“

EVA PFANNERSTILL

Wie viele Terpene von deutschen Wäldern abgegeben werden, möchte Eva Pfannerstill bei kommenden Messkampagnen herausfinden – diesmal allerdings nicht vom Flugzeug aus, sondern vom Zeppelin-NT. Das hat Vor- und Nachteile: „Wir können deutlich tiefer, bis hinunter auf 100 Meter über dem Boden fliegen, aber wir haben weniger Platz in der Zeppelin-Kabine“, berichtet die Forscherin. Eine Herausforderung wird es sein, das Spektrometer an die beengten Verhältnisse anzupassen. „Hier profitieren wir von der Erfahrung aus bisherigen Jülicher Zeppelin-Kampagnen und dem Geschick der Jülicher Ingenieure“, betont Pfannerstill, die nicht die einzige Jülicherin ist, die bei den Messkampagnen mit dem Zeppelin Daten sammelt.

Dr. Georgios Gkatzelis etwa erfasst mit dem gleichen Massenspektrometer organische Spurengase in der Luftzusammensetzung städtischer Regionen. Ein Gerät von Prof. Hendrik Fuchs und Dr. Anna Novelli misst, wie reaktiv die erfassten Gase sind. Und das Team von Prof. Uwe Rascher steuert ein Instrument bei, das die Fluoreszenz von Pflanzen erkennt. Diese zeigt an, ob die Pflanzen unter Stress stehen, noch bevor das menschliche Auge Veränderungen wahrnimmt.

Auch mit lokalen Forstbehörden werden die Forscher:innen zusammenarbeiten. „Sie können uns sagen, ob beispielsweise ein massiver Insektenbefall die Wälder plagt, die wir überfliegen. Pflanzen emittieren unterschiedliche Stoffe, je nachdem ob sie unter Dürre oder Insektenbefall leiden“, so Eva Pfannerstill.

Vorversuche startete die Chemikerin bereits in der Jülicher Atmosphärenkammer SAPHIR und der angeschlossenen Pflanzenkammer SAPHIR-PLUS. Junge Buchen und Eichen mussten dort bis zu 40 Grad Celsius und erhöhte Ozonwerte aushalten: „Das ist den Bäumchen nicht gut bekommen“, resümiert Pfannerstill. Geplant ist zusätzlich ein kontrollierter Insektenbefall in der Kammer.

### MUSTER FINDEN

„Die Versuche an SAPHIR-PLUS zeigen uns, ob es ein bestimmtes ‚Antwortmuster‘ der Bäume auf die unterschiedlichen Reize gibt. Nach diesen Signalen halten wir später während der Zeppelin-Kampagne Ausschau“, erklärt sie. Die Daten der Kampagne seien eine wichtige Ergänzung für bestehende Klimamodelle, da sich bisherige Berechnungen zur Stressantwort von Wäldern oft nur auf Labormessungen mit wenigen kleinen Bäumen stützen.

„Das ist das Besondere an der Jülicher Forschung: Wir können Daten im kleinen Maßstab kontrolliert im Labor erheben und sie dann mit den Daten der großen Messkampagnen in der realen Welt vergleichen. Damit wollen wir Wege aufzeigen, wie sich die Luftqualität in den Städten und die Gesundheit der Wälder in einem sich wandelnden Erdsystem verbessern lässt“, fasst Pfannerstill zusammen.

BRIGITTE STAHL-BUSSE

# Wie die Zeit vergeht

Sekunden und Minuten verstreichen auf einer Uhr immer gleich schnell. Dennoch nehmen wir je nach Situation unterschiedlich wahr, wie rasch Zeit vergangen ist. Jülicher Forscher haben im Gehirn mithilfe von KI eine erste Spur eines neuronalen Musters für das Erleben von Zeit gefunden.

**M**anchmal will die Zeit einfach nicht vergehen: im Wartezimmer beim Arzt, bei einer stupiden Arbeit oder wenn der Zug sich verspätet. Andererseits verfliegt die Zeit auch mal rasend schnell: im Sommerurlaub, beim Joggen durch einen Wald oder bei einem anregenden Gespräch mit einem Freund. Je nach Geschehen erleben Menschen das Verstreichen der Zeit unterschiedlich. Wir haben zwar Sinnesorgane für verschiedene Wahrnehmungen wie Hören, Fühlen oder Schmecken, nicht aber für das Empfinden von Zeit. Irgendetwas muss daher in unserem Gehirn passieren. Was genau, ist bislang unbekannt.

## GIBT ES EINE INNERE UHR?

Einen ersten Hinweis auf ein neuronales Muster für das Zeitempfinden haben jetzt der Neurowissenschaftler und Psychiater Prof. Kai Vogeley und sein Mitarbeiter Dr. Mathis Jording gefunden. Die Jülicher Zeitforscher untersuchen schon seit Jahren, wie Menschen Zeit wahrnehmen. Haben wir ein internes Gefühl für Zeit und wenn ja, wie funktioniert es? Gibt es eine Art Zeitregister für die innere Uhr im Kopf? Und lässt sich das eigene Zeiterleben steuern und verändern, um zum Beispiel das persönliche Wohlbefinden zu steigern?

Vogeley und Jording interessieren diese Fragen nicht nur aus der Sicht der Grundlagenforschung. Sie wollen Zeiterlebensstörungen bei psychischen Erkrankungen verstehen, um neue Therapien zu entwickeln. Denn depressiv erkrankte Menschen etwa haben ein verändertes und oft negativ empfundenes Zeiterleben (siehe Kasten). „Sie fühlen sich von der äußeren Welt entkoppelt, weil die eigene innere Zeit immer langsamer und zäher





**„Für depressiv erkrankte Menschen vergeht die eigene innere Zeit immer langsamer und zäher.“**

KAI VOGLEY

vergeht. Die Zeit scheint für sie manchmal sogar stillzustehen, und im Extremfall fühlen sie sich wie tot“, berichtet Kai Vogeley aus seiner psychiatrischen Praxis.

### **EIN ZEITLABOR ENTWICKELT**

Doch wie entsteht das Zeitgefühl? Heiß oder kalt spüren wir etwa über die Haut, mit der Nase können wir Gerüche als blumig oder muffig wahrnehmen. „Dies sind direkte Sinne. Ich muss nicht nachdenken, ob ich mir den Finger verbrannt habe. Beim Erleben von Zeit aber spekulieren wir hinterher und rekonstruieren aus Erfahrungen, wie lange etwas gedauert hat, etwa indem ich überlege, wie oft ich beim Warten auf die Uhr geschaut habe“, erklärt Mathis Jording. Dies seien bewusste kognitive Vorgänge. Jording aber möchte wissen, was direkt in der Situation passiert, während die Zeit vergeht. Laufen dabei bestimmte neuronale Prozesse im Kopf ab? Gibt es überhaupt ein Zeiterleben während der Situation, ein subjektives Gefühl für Zeit?

Um diese Fragen zu beantworten, entwickelten Wissenschaftler:innen im von Jülich koordinierten EU-Forschungsprojekt VIRTUALTIMES ein innovatives Konzept. In dessen Mittelpunkt: ein neues Zeitlabor, in dem das Zeitempfinden so weit wie möglich losgelöst von äußeren Einflüssen



### **Zeiterleben bei psychischen Krankheiten**

Depressive Menschen empfinden Zeit oft als verlangsammt. Das kann so weit gehen, dass ein Patient denkt, er sei tot, weil die Zeit für ihn gefühlt nicht mehr vergeht. Einige Menschen mit Autismus empfinden Zeit nicht als stetig fließend, sondern eher in einzelnen Momenten, die sich wie Perlen aneinanderreihen. Gerät diese Reihenfolge aus den Fugen, etwa wenn gewohnte Abläufe unterbrochen werden, verändert sich auch das Zeitgefühl: Die Zukunft wird dann weniger gut erfahrbar. Manche der Betroffenen berichten, dass sie überhaupt kein Zeitgefühl mehr haben. Viele Menschen mit Schizophrenie können nicht mehr verlässlich unterscheiden, ob etwas in der Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft liegt. Das kann so weit gehen, dass Patienten ihr gegenwärtiges Ich nicht als das Gleiche wie in einem vorigen Moment erleben.





## „Beim Erleben von Zeit rekonstruieren wir hinterher aus Erfahrungen, wie lange etwas gedauert hat.“

MATHIS JORDING

oder Ablenkungen untersucht werden kann. Möglich macht dies eine hochrealistische, KI-basierte Virtual-Reality-Technologie.

Wer das Zeitlabor betritt, sieht nüchterne Tische, fahle Wände und einen gewöhnlichen Bürostuhl. Doch sobald die Proband:innen eine VR-Brille aufgesetzt haben, befinden sie sich im virtuellen Maschinenraum aus Stahl inmitten eines Raumschiffes. Direkt vor ihnen sehen sie durch ein Fenster ins All. Unzählige Sterne fliegen auf die Testpersonen zu. Deren Aufgabe ist es, nach jeweils 20 Sekunden immer wieder zu berichten, wie schnell oder langsam ihnen die Zeit vorkam. Dabei variieren die Forscher die Anzahl der Sterne und die Geschwindigkeit, mit der sie fliegen. „Es sind also einfache visuelle Reize, mit denen wir das Erleben von Zeit in kurzen Intervallen beeinflussen“, sagt Jording. Parallel messen die Forscher die Hirnaktivität mit einem Elektroenzephalogramm (EEG). Mehr als 200 Personen haben bislang unterschiedliche Experimente in dem Sternenfeld absolviert.

Mit einem Teil der Messungen haben die Forscher einen Machine-Learning-Algorithmus trainiert, der einen Zusammenhang zwischen den Hirn-

aktivitäten und dem berichteten Zeitempfinden aufspüren sollte. Anschließend haben die Forscher der KI den restlichen Teil der Daten gegeben und die jeweilige Prognose der KI zum Zeitempfinden mit der Aussage der Probanden verglichen. Die KI lag erstaunlich gut.

### KI ERKENNT EIN MUSTER

Offensichtlich hatte der Algorithmus tatsächlich einen neuronalen Prozess entdeckt, ein Muster aus den EEG-Messungen, mit dem er das Zeitempfinden des Probanden korrekt vorher-sagen konnte. „Wir haben unseren Ergebnissen ein halbes Jahr lang selbst nicht getraut“, sagt Jording. Um die Genauigkeit der KI zu erhöhen und um sicher zu sein, dass die Prognosen nicht nur Zufall waren, haben die Forscher weitere Untersuchungen durchgeführt – ihr Ergebnis wurde bestätigt.

Mithilfe der Erkenntnisse wollen die Forscher eine Theorie des Zeiterlebens entwickeln. Sie möchten außerdem untersuchen, welche Rolle das Zeiterleben für das menschliche Wohlbefinden spielt und welche Zusammenhänge es zwischen Hirnaktivität und Zeiterleben bei psychischen Erkrankungen gibt. Am Ende könnte vielleicht sogar ein Therapiekonzept stehen, eine Art „Zeitkur“. Aber bis dahin dürfte noch viel Zeit vergehen, schätzt Vogeley. Doch er und Jording haben dafür mit ihrem Zeitlabor und dem virtuellen Sternenfeld eine Grundlage geschaffen.

KATJA ENGEL



# Auf in die winzige Welt der Atome

Präziser als je zuvor: Ein neuer Quantensensor vermisst magnetische Felder mit einer räumlichen Auflösung von weniger als einem Atomdurchmesser. Das Werkzeug soll bei der Materialforschung und beim Entwickeln von Quantencomputern helfen.

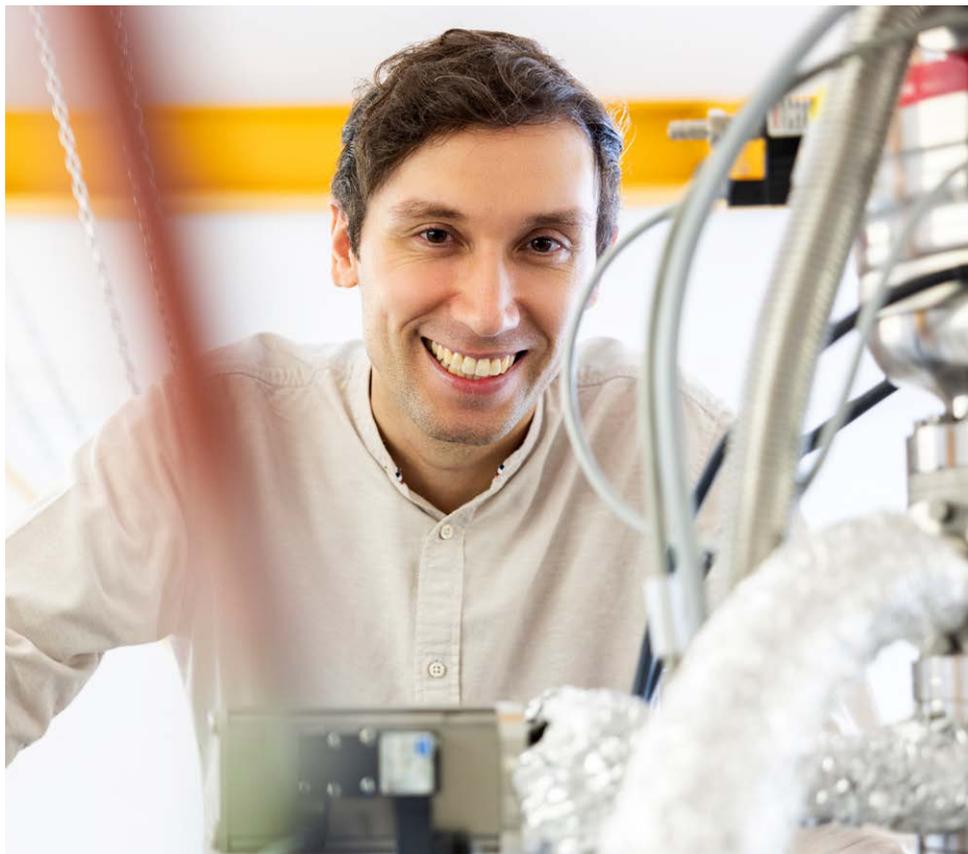
**M**it Quantensensoren lassen sich kleinste Änderungen bei physikalischen Größen wie zum Beispiel der Schwerkraft oder elektrischen und magnetischen Feldern präzise messen – oftmals genauer als mit konventionellen Sensoren. Quantensensoren nutzen quantenmechanische Effekte wie den Spin eines Elektrons. Doch bislang gab es eine Grenze. Mit Quantensensoren war es nicht möglich, physikalische Größen auf der atomaren Skala exakt zu messen. Der Grund: die Größe der Sensoren.

„Die Welt der Atome ist winzig. Deren Durchmesser beträgt üblicherweise 1 Ångström, ist also rund eine Million Mal kleiner als der eines menschlichen Haars. Bislang waren Quantensensoren zu groß und sperrig, um dicht genug an einzelne Atomen heranzukommen“, sagt Dr. Taner Esat vom Peter Grünberg Institut (PGI-3).

## MOLEKÜL ALS SENSOR

Gemeinsam mit Prof. Ruslan Temirov und Prof. Stefan Tautz aus Jülich und Kolleg:innen vom koreanischen IBS Center for Quantum Nanoscience (QNS) hat er eine Lösung gefunden. Die Wissenschaftler:innen haben ein Molekül, in dem ein Elektronenspin gefangen ist, auf die Spitze eines Rastertunnelmikroskops positioniert und erfolgreich als Sensor eingesetzt.

„Unsere Methode ermöglicht es, den Sensor bis auf wenige Atomabstände an einzelne Atome heranzuführen und Veränderungen in magnetischen Feldern mit einer räumlichen Auflösung von rund einem Zehntel Ångström zu erkennen. Die vom Sensor gelieferten Daten sind so detailreich wie Aufnahmen von Magnetresonanztomographen (MRT), die in der Medizin eingesetzt werden, um Gewebe und Organe zu untersuchen“, so Esat.



Der kleine, mobile Sensor soll helfen, Materialien besser zu erforschen und zu verstehen und damit neue Quantenmaterialien sowie Katalysatoren zu entwickeln. Auch die Diagnose und Realisierung neuartiger Quantencomputer soll er voranbringen. Die Experimente mit den Quantensensoren wird Taner Esat in Jülich fortführen.

Dabei hilft ein Starting Grant des Europäischen Forschungsrates ERC, den er im September 2024 erhalten hat. Diese Grants sind mit bis zu 1,5 Millionen Euro dotiert.

↑ Etappensieg: Der Quantenphysiker Taner Esat verfolgt die Idee zu dem molekularen Quantensensor schon seit mehreren Jahren.

# Recycling immer schon mitdenken

Aufrollbare Displays und Photovoltaikfolien für Fassaden – die organische Elektronik bietet viel Potenzial. Doch bevor die neue Technik zum Massenprodukt wird, sollten Recyclingkonzepte vorliegen, empfiehlt Materialforscher Christoph Brabec.

**Herr Brabec, Sie haben mit Kolleg:innen aus Deutschland, Großbritannien und den USA dafür geworben, organische Elektronik nachhaltig zu entwickeln. Was steckt dahinter?**

Die Technik kommt in immer mehr Produkten zum Einsatz. Aktuell sind Displays der größte Markt, bekannt als AMOLED oder OLED bei Fernsehern oder Smartphones. Und es werden weitere Anwendungen hinzukommen. Um künftig unnötigen Elektromüll zu vermeiden, müssen wir schon heute nachhaltige Lösungen entwerfen – etwa für Erstellung und Recycling. Wenn sich in 20 Jahren möglicherweise ein Massenmarkt entwickelt hat, ist es zu spät.

**Was fällt überhaupt unter organische Elektronik?**

Das ist ein Sammelbegriff für elektronische Schaltungen aus organischen Polymeren oder kleineren organischen Molekülen. In erster Linie geht es dabei um Halbleiter, also die zentralen Bausteine aller digitalen Geräte. Herkömmliche Varianten basieren großteils auf Silizium, die organischen dagegen hauptsächlich auf Kohlenstoff.

**Worin unterscheiden sich Halbleiter aus Silizium und Kohlenstoff?**

Im Unterschied zu Silizium, das als Einkristall gezüchtet wird, werden die organischen Verbindungen chemisch synthetisiert. Organische Elektronik lässt sich vergleichsweise energieeffizient produzieren und das Verfahren eignet sich gut, um großformatige, dünne elektronische Schichten herzustellen – etwa flexible Polymerfolien. Auch für die Photovoltaik bietet organische Elektronik Vorteile.

**Die da wären?**

Organische Halbleiter kann man sehr einfach transparent gestalten. Sie absorbieren dann das infrarote Licht, also die Wärmestrahlung, aber nicht das sichtbare Licht. Anders als klassische Siliziumhalbleiter können sie, auch wenn sie so dünn sind, noch eine hohe Leistungseffizienz erreichen.

Damit eignen sie sich beispielsweise besonders gut für integrierte PV-Systeme in Fassaden, Fenstern oder Photovoltaik über landwirtschaftlich genutzten Flächen. Ein weiterer Markt, der sich abzeichnet, sind Geräte, die mit dem Internet of Things zu tun haben, etwa kleine elektronische Gadgets und Sensoren, die man ohne Batterien betreiben will.

**Und wie sieht es mit der Umweltbilanz aus?**

Wenn man die gesamte Wertschöpfungskette bei Solarzellen betrachtet, wird bei organisch basierten Halbleitern zwei bis drei Mal weniger CO<sub>2</sub> frei als bei siliziumbasierten: Die Herstellung verbraucht wenig Energie und das geringe Gewicht der Folien macht die Technik sehr attraktiv für Transport und Montage. Man bekommt am Ende deutlich mehr Watt pro Gramm.

**Aber noch ist organische Elektronik relativ teuer?**

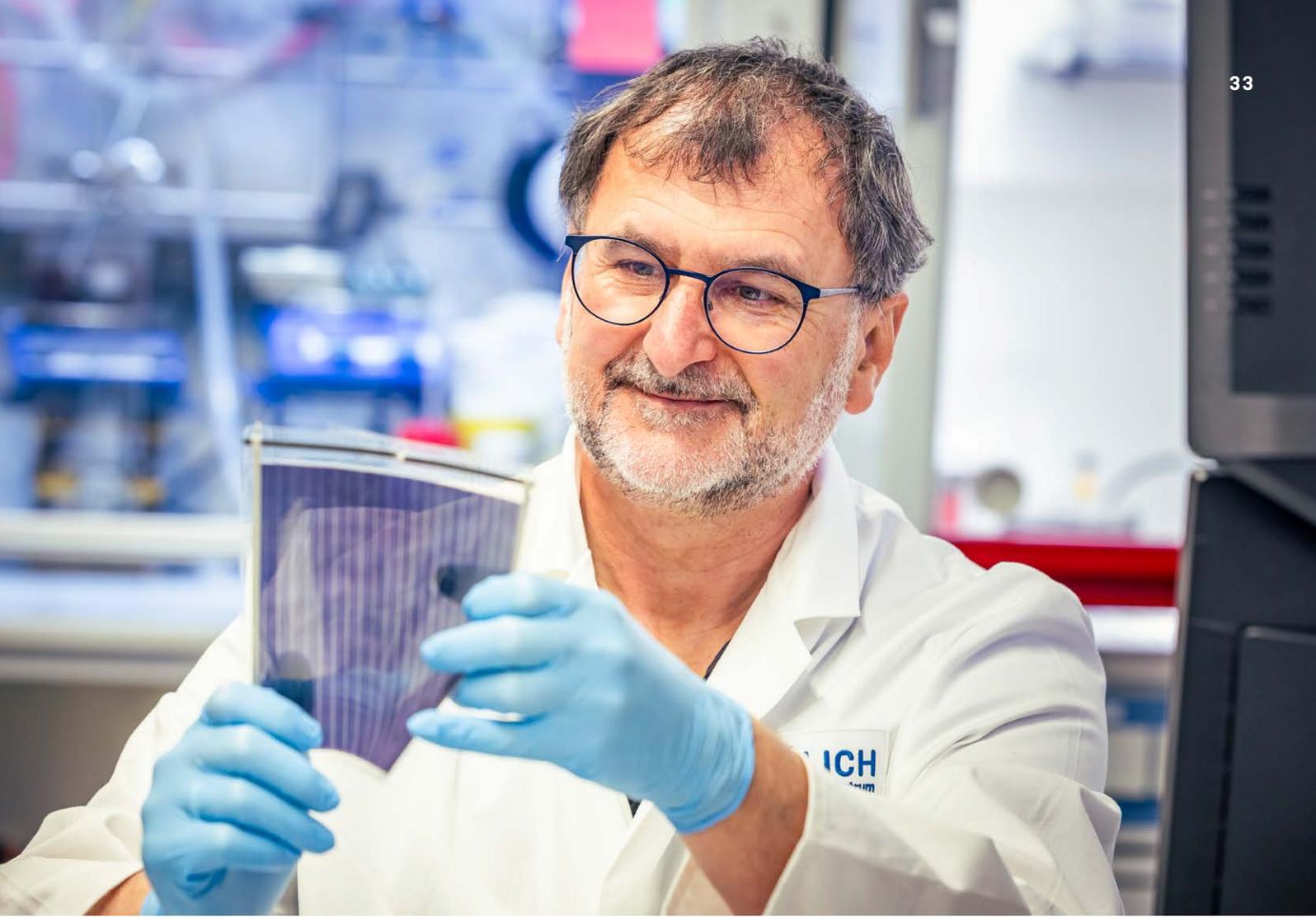
Ja, das liegt daran, dass es Millionen unterschiedliche organische Halbleiter gibt. In der Praxis hat sich noch kein Standardmaterial durchgesetzt und keine Wertschöpfungskette konsolidiert. Das macht die Herstellung teuer. Aber wir erwarten, dass sich das ändern wird. Daher ist es wichtig, schon heute den gesamten Lebenszyklus der Bau-



Umweltfreundliche, flexible Solarzellen aus dem Drucker stehen auch im Fokus der Innovationsplattform Solar TAP, die Christoph Brabec mit koordiniert: Mehr dazu hier: [go.fzj.de/endeavours-solartap](https://go.fzj.de/endeavours-solartap)

Eine längere Version des Interviews finden Sie unter: [go.fzj.de/effzett-brabec-interview](https://go.fzj.de/effzett-brabec-interview)





teile zu berücksichtigen, um den ökologischen Fußabdruck zu minimieren.

#### **Was gilt es also zu tun?**

Viele Elektronikbauteile lassen sich nur schwer wieder auseinandernehmen. Organische Elektronik sollte so gestaltet werden, dass sie einfach und wirtschaftlich recycelbar ist. Der Energie- und Kostenaufwand für die Wiederverwertung darf also nicht höher sein als für die Produktion. Das müssen wir bereits in der Entwicklung berücksichtigen. Das Ziel wäre eine Kreislaufwirtschaft.

#### **Und wie geht das?**

Unter anderem mit sogenannten Multilayer-Designs, bei denen die Bauteile aus leicht voneinander trennbaren Schichten bestehen. So lassen sich verschiedene Materialien am Ende ihres Produktlebens gut recyceln. Organische Halbleiter eignen sich dafür sehr gut, weil man sie im Vergleich zu siliziumbasierten Halbleitern einfach wieder auflösen kann. Wir sollten außerdem gut wiederverwertbare oder leicht abbaubare Substrate verwenden und sicherstellen, dass bei der Produktion keine toxischen Stoffe verwendet werden.

#### **Was tragen Sie mit Ihrer Forschung dazu bei?**

An unserem Institut beschäftigen wir uns mit den Herstellungsprozessen. Einerseits untersuchen wir, wie die Produktion das Endergebnis beeinflusst – also einen fertigen organischen Halbleiter –, andererseits optimieren wir den Prozess so, dass der Halbleiter die bestmögliche Performance liefert.

#### **Wie gehen Sie dabei vor?**

Wir bauen Forschungs- und Entwicklungsanlagen, die von künstlichen Intelligenzen gesteuert werden. Die KI hilft uns, die „einfachsten“, aber am besten geeigneten Materialien zu finden und deren Herstellungsprozess zu optimieren – zum Beispiel Materialien für organische Solarzellen, die leistungsstark sind, lange halten und sich gut recyceln lassen. So wollen wir die erneuerbaren Energien in Zukunft noch nachhaltiger und attraktiver machen.

DAS INTERVIEW FÜHRTE JANOSCH DEEG.

## **Zur Person**

Prof. Christoph Brabec ist Direktor des Helmholtz-Instituts Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien (IET-2), einer Außenstelle des Forschungszentrums Jülich. Am IET-2 leitet er die Forschungsabteilung „Hochdurchsatzverfahren in der Photovoltaik“. Gleichzeitig hat er an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg den Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften (Materialien der Elektronik und der Energietechnologie) inne. Der Materialforscher taucht regelmäßig in der Liste der weltweit am häufigsten zitierten Wissenschaftler:innen auf.



## BESSERWISSEN

# EEG

Mit der Elektroenzephalographie, kurz EEG, lassen sich elektrische Ströme im Gehirn erfassen. Damit wird die Gehirnaktivität überprüft – etwa bei Verdacht auf Erkrankungen.

## WIE GEHT'S?

Bis zu 64 Elektroden werden nach einem festen Schema außen am Kopf platziert. Sie messen die Summe der Aktivitäten von Nervenzellen in einzelnen Hirnregionen.



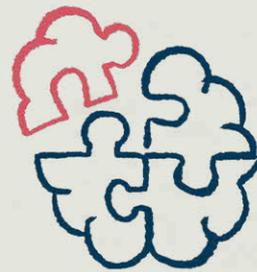
Nervenzellen im Gehirn leiten Informationen als kleine elektrische Impulse weiter – viele Impulse bedeuten hohe Aktivität.



Die Aktivitäten werden als Wellen dargestellt. Der Verlauf der Wellen zeigt, ob jemand etwa schläft, müde ist oder konzentriert.

## WOBEI HILFT EIN EEG?

Bestimmte Wellenmuster weisen auf Erkrankungen wie Epilepsie oder Hirnschädigungen hin. Mit einem EEG kann man Schlaf untersuchen, Narkosen überwachen und den Hirntod feststellen.



## EINZIGARTIG

Jeder Mensch hat ein für ihn typisches EEG-Bild. Es kann sich deutlich von dem anderer unterscheiden.



## WAS MACHT JÜLICH?

Hirnforscher:innen nutzen EEG in der Schlafforschung und um neurologische Hirnerkrankungen besser zu verstehen. Oft kombiniert mit anderen Methoden wie der Kernspintomographie (MRT).



# GEFÄLLT UNS

WISSENSCHAFTSVIDEOS AUS ALLER WELT

## Forschung kreativ und kompakt

Was hilft kranken Pflanzen?

Zu welcher Jahreszeit schlagen besonders häufig Meteoriten ein? In den „Science in Shorts“-Videos teilen Forscher:innen aus aller Welt ihr Wissen mit uns. In knapp einer Minute erklären sie, woran sie arbeiten. Die Themen sind abwechslungsreich, die Umsetzungen kreativ, und sie bringen Komplexes oft spielerisch auf den Punkt. Der Verlag Springer Nature und das Unternehmen Merck haben die besten 10 von insgesamt 250 Kurzfilmen des Jahres 2024 mit den „Nature Awards“ ausgezeichnet. Die Top Ten und viele weitere pfiffige Videos gibt es auf:

- [NATURE.COM/IMMERSIVE/SCIENCEINSHORTS/WATCH/INDEX.HTML](https://nature.com/immersive/scienceinshorts/watch/index.html) -

EXPERTEN-VORTRÄGE ONLINE

## Wissenschaft ins Wohnzimmer holen

Haben Sie schon von Supercomputern gehört, die in Sekunden mehrere Milliarden Rechenoperationen ausführen? Oder möchten Sie wissen, wie Wasserstoff die Energiewende vorantreiben soll? In der Vortragsreihe „Wissenschaft online“ des Forschungszentrums geben Jülicher Expert:innen Antworten auf spannende Fragen unserer Zeit. Jeden Donnerstag präsentieren sie ihre Projekte – live und direkt in Ihr Wohnzimmer gestreamt. Neugierig? Nehmen Sie am Live-Event teil und diskutieren Sie mit. Termin verpasst?

Auch kein Problem! Viele der Vorträge gibt es auch als Aufzeichnung.

- [FZ-JUELICH.DE/DE/UEBER-UNS/KONTAKT/BESUCH/WISSENSCHAFT-ONLINE](https://fz-juelich.de/de/ueber-uns/kontakt/besuch/wissenschaft-online) -



ASTRONOMIE-FOTOWETTBEWERB

## Strahlende Schönheiten

Nordlichter, die aussehen wie ein Drache, ungewöhnliche Aufnahmen von der Oberfläche der Sonne, die leuchtende Milchstraße am Nachthimmel über der Wüste Namib – viele beeindruckende Fotos sind beim Wettbewerb „Astronomy Photographer of the Year 2024“ zusammengekommen. Ein Teil der Bilder kann auf der Homepage der Royal Museums Greenwich, die den weltweiten Wettbewerb bereits zum 16. Mal ausgelobt haben, bestaunt werden. Wer gerne reist, kann noch mehr der außergewöhnlichen Aufnahmen sehen: Bis Sommer 2025 zeigt das National Maritime Museum in London noch mehr als 100 der eingereichten Fotos.

- [RMG.CO.UK/WHATS-ON/ASTRONOMY-PHOTOGRAPHER-YEAR/GALLERIES/2024-SHORTLIST](https://rmg.co.uk/whats-on/astronomy-photographer-year/galleries/2024-shortlist) -

# FORSCHUNG IN EINEM TRÖT

Herzlichen Glückwunsch, IAGOS!  
Und danke: Seit 30 Jahren liefern Deine  
Messgeräte in Passagierflugzeugen  
Klimadaten aus der Erdatmosphäre.



IAGOS steht für In-service Aircraft for a Global Observing System. Die europäische Forschungsinfrastruktur erfasst diverse Klimavariablen – von Ozon über Kohlenstoffverbindungen bis hin zu Wasserdampf, Aerosolen und Wolkenpartikeln. Die Daten helfen, neue Erkenntnisse über das Klima zu gewinnen – zum Beispiel, wie es sich langfristig verändert. Mit ihnen lassen sich zudem Klimamodelle und Wettervorhersagen verbessern. Mehr als 300 Organisationen nutzen den Datenschatz. Jülich koordiniert IAGOS zusammen mit dem französischen Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Mehr zu IAGOS und der Entstehung künstlicher Eiswolken durch den Flugverkehr im Podcast Forschungsquartett:  
<https://detektor.fm/wissen/forschungsquartett-eiswolken>