

# MAX PLANCK

## *Forschung*

**BIOLOGIE**  
Die Wächter der Erbguts

**ROBOTIK**  
Auf fruchtbarem Boden

**TECHNOLOGIETRANSFER**  
Rechnen mit Atomen



HAB ICH DIE WAHL?



FOTO: MOREN HSU/UNSPASH

**O**b wir eine freie Wahl haben, erscheint vor diesen Türen banal. Aber einmal abgesehen davon, dass ein Spind verfügbar sein muss: Wovon hängt ab, wie wir uns in dieser und anderen Situationen entscheiden? Der Frage gehen wir in dieser Ausgabe nach.

# EDITORIAL

---

Liebe Leserinnen und Leser

Das Leben ist die Summe all unserer Entscheidungen. Diese Aussage wird Albert Camus zugeschrieben, und in der Tat: Wir entscheiden. Jeden Tag und ständig. Vorm Kleiderschrank, beim Frühstück, bei der Arbeit, über die Freizeitgestaltung. Von den großen Entscheidungen in Sachen Karriere, Partnerwahl und Familienleben ganz zu schweigen. Doch wie bewusst treffen wir diese Entscheidungen? Wie viel ist Zufall, was ist vorgegeben, und was können wir gestalten? In dieser Ausgabe, in der es um Wahlfreiheit geht, beleuchten wir genau diese Fragen. Ob es einen freien Willen gibt und, falls ja, was ihn ausmachen könnte, beschäftigt Philosophie und Naturwissenschaften gleichermaßen. Die Neurobiologie findet immer wieder neue Ansätze, die Prozesse, die unseren Entscheidungen zugrunde liegen, zu untersuchen – und dem freien Willen nachzuspüren.

3

Bei der Frage, mit wem wir durchs Leben gehen, könnte man meinen, haben wir heute weitgehend freie Wahl – zumindest suggerieren das Dating-Apps. Mit ihnen versuchen manche Menschen dem Zufall nachzuhelfen, der bei der Partnerwahl eine Rolle spielt. Doch auch unsere Erfahrungen und Eigenschaften beeinflussen die Partnersuche. Und so zeigen sich dabei Muster, die sich demografisch belegen lassen.

Vom Zufall hängt es auch ab, wo und in welche Familie wir geboren werden. Unsere Herkunft prägt unseren Lebensweg, vor allem unsere Gesundheit, mehr als uns vielleicht bewusst ist. Epigenetische Forschung zeigt, wie sich Lebensumstände – im Mutterleib, in der Kindheit, aber auch im reiferen Alter – auf die Aktivität unserer Gene und damit auf unsere Gesundheit auswirken.

Trotz der Macht der äußeren Umstände liegt es auch an uns, dass sich unsere Entscheidungen zu einem guten Leben summieren. Nicht wenige haben wahrscheinlich einen Neujahrsvorsatz noch im Kopf. Ob wir den umsetzen, ist eine Entscheidung, die wir fällen. Bewusst und willentlich.

In diesem Sinn wünschen wir Ihnen bestärkende Lektüre und ein gutes neues Jahr!

Ihr Redaktionsteam



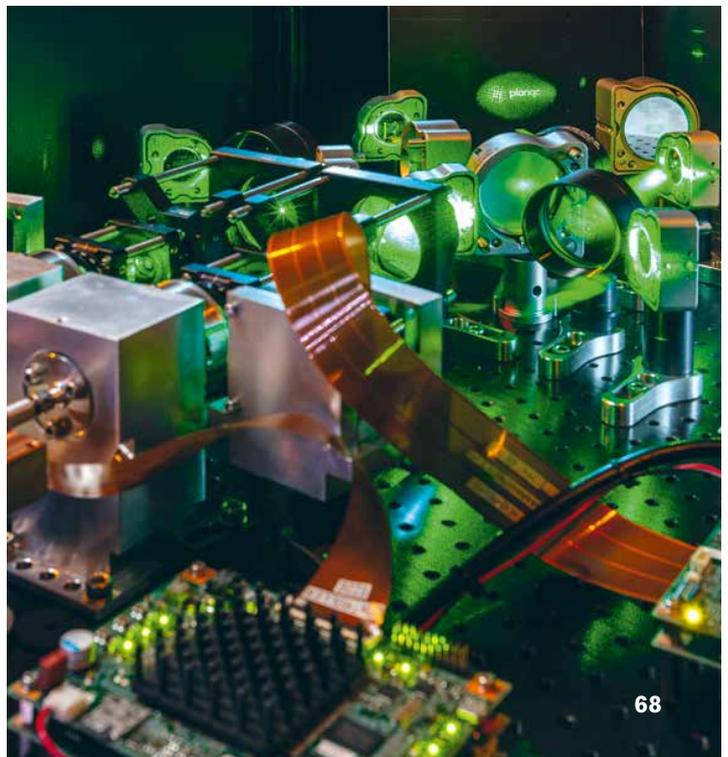
36



42



50



68

BILDER: ADOBESTOCK (LINKS OBEN), MPI FÜR SICHERHEIT UND PRIVATSPHÄRE (RECHTS OBEN),  
LOUISE DÜVER, SHAU CHUNG SHIN / MPI FÜR BIOPHYSIK (LINKS UNTEN), PLANQC (RECHTS UNTEN)

**36 | VERSPIELT**

Ein Flipper simuliert, wie genetische und soziale Faktoren die Entwicklung beeinflussen.

**42 | VERNETZT**

Mia Cha forscht an der Grenze von Informatik und Sozialwissenschaft.

**50 | VERSTECKT**

Das Zusammenspiel der Zellkomponenten wird aus dem Kern gesteuert.

**68 | VERZWEIGT**

Mit Laserlicht kontrollieren Forschende die Atome eines Quantenrechners.

## 3 | EDITORIAL

## 6 | ORTE DER FORSCHUNG

Conques, Frankreich

## 8 | KURZ NOTIERT

## 16 | ZUR SACHE

Biodiversität: Viele Abkommen,  
wenig Klarheit

## 22 | INFOGRAFIK

Das bleibt in der Familie

## IM FOKUS

Hab ich die Wahl?

## 24 | Ist das freiwillig?

Haben wir einen freien Willen? Diese Frage ist bis heute nicht endgültig geklärt. Die Antwort hängt nicht zuletzt davon ab, was wir unter Freiheit verstehen.

## 30 | Willst du mit mir gehen?

Dank Internet ist die Auswahl bei der Partnersuche heute so groß wie nie. Aber wie frei sind wir in unserer Wahl tatsächlich?

## 36 | Highscore des Lebens

Das Zusammenspiel von Genetik, Umwelt und Gesellschaft bestimmt, wie wir uns entwickeln. Forschende untersuchen, wie sich genetische Einflüsse und soziale Benachteiligung im Jugendalter auf das Leben auswirken.

## 42 | BESUCH BEI

Meeyoung Cha

## 48 | ZWEITER BLICK

## WISSEN AUS

## 50 | Wächter des Erbguts

Wie Türsteher schützen Kernporen den Zellkern vor unerwünschten Eindringlingen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben die Struktur des Kernporenkomplexes aufgeklärt.

## 56 | KI gibt Stoff

Materialien müssen heute mit ihren Eigenschaften, aber auch in Sachen Nachhaltigkeit überzeugen. Das macht ihre Entwicklung schwierig. Forschende setzen daher nun auf künstliche Intelligenz.

## 62 | Auf fruchtbarem Boden

Max-Planck-Forschende wollen in der Landwirtschaft gleichzeitig Wachstum und Nachhaltigkeit ermöglichen – mit einem intelligenten Farmroboter.

## 68 | Rechnen mit Atomen

Manche komplizierten Berechnungen könnten Quantencomputer künftig schneller ausführen als heutige Rechner. Das Garchinger Start-up planqc plant, im Jahr 2027 einen frei programmierbaren Quantenrechner zu präsentieren.

## 74 | POST AUS

Joensuu, Finnland

## 76 | NEU ERSCIENEN

## 78 | FÜNF FRAGEN

Zur Kompensation von CO<sub>2</sub>-Emissionen

## 79 | IMPRESSUM

5

## TECHMAX

Mit Quanten rechnen –  
auf dem Weg zu  
Quantencomputer und  
Quanteninternet

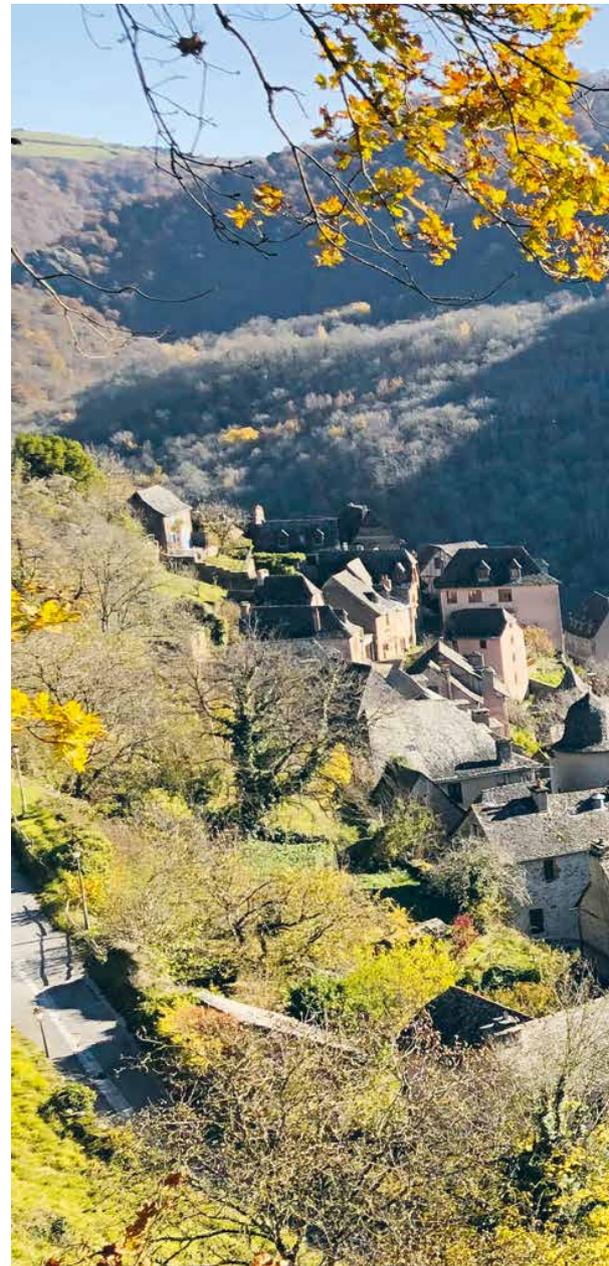


*AUF GOTTES  
WEGEN*

6 **D**er Name des Städtchens ist Programm – wie in eine Muschelschale gebettet liegt Conques an den Hängen des Flüsschens Ouche im Süden Frankreichs. Jakobsmuscheln hefteten auch die mittelalterlichen Pilger, die zum Grab des Apostels Jakob nach Santiago de Compostela wanderten, an ihre Hüte. Auf dem Weg dorthin war Conques eine wichtige Station. Mit der Reliquienfigur der heiligen Fides zog der Ort zudem selbst Gläubige aus ganz Europa an, was vom 9. Jahrhundert an zu einer ortsspezifischen Pilgertradition führte, die – touristisch überformt – bis in die Gegenwart hineinreicht.

Doch Conques fasziniert auch Forschende aus der ganzen Welt. Seit 2020 ist die Stadt Gegenstand eines groß angelegten interdisziplinären Projekts des Centre for Early Medieval Studies der tschechischen Masaryk-Universität in Kooperation mit der Bibliotheca Hertziana – Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte in Rom und anderen Forschungsinstituten und Universitäten in Frankreich und den USA. Mit Methoden der Kunstgeschichte, der Anthropologie, Geschichte, Musik-, Theater- und Kulturwissenschaft, Archäologie, Archäometrie sowie digitalen Techniken untersucht das Projekt Conques sowohl räumlich als auch in seiner zeitlichen Entwicklung über ein Jahrtausend.

Das Projekt widmet sich auch dem immateriellen Erbe, etwa in Form der religiösen Praktiken und ihrer Veränderungen durch die Zeiten. An Conques, das über Jahrhunderte ein wichtiger Knoten im Netz der sakralen Landschaft des europäischen Mittelalters war, lassen sich so auch politische und gesellschaftliche Dynamiken in nuce studieren. Die Abtei verstand es beispielsweise – nicht zuletzt mithilfe kunstvoll gearbeiteter Sakralgegenstände –, ihren Ort symbolisch mit den heiligen Städten Jerusalem und Rom zu verknüpfen und Conques damit eine nach damaligem Maßstab global-politische Bedeutung zu verleihen.



# ORTE DER FORSCHUNG

---



FOTO: ADRIAN BREMENKAMP / BIBLIOTHECA HERTZIANA / MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KUNSTGESCHICHTE

# MAX-PLANCK IN ISRAEL

Die Max-Planck-Gesellschaft hat in Israel ein Büro eröffnet. Es wird von der Wissenschaftsmanagerin Hila Elroy geführt und soll gerade angesichts der schwierigen Lage in Israel die Beziehungen zwischen der Max-Planck-Gesellschaft und israelischen Forschenden aufrechterhalten und ausbauen. An der Eröffnungsfeier Ende November nahmen neben Max-Planck-Präsident Patrick Cramer der israelische Staatspräsident Isaac Herzog, zahlreiche Vertreterinnen und Vertreter israelischer Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie eine kleine Max-Planck-Delegation teil. Wissenschaftliche Exzellenz, Innovation und eine demokratisch-pluralistische Ausrichtung verbinden die Max-Planck-Gesellschaft und das Van Leer Jerusalem Institute, an dem das Büro angesiedelt ist.

[www.mpg.de/23817374](http://www.mpg.de/23817374)



FOTO: YONI KELBERMANN / MPG

CAS-Präsident Jian-guo Hou überreicht Max-Planck-Generalsekretärin Simone Schwanitz und Patrick Cramer ein Modell des Weltraumteleskops „Einstein Probe“, mit dem auch das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik forscht.

## 50 JAHRE KOOPERATION MIT CHINA

Seit 1974 arbeitet die Max-Planck-Gesellschaft mit der Chinesischen Akademie der Wissenschaften (CAS) zusammen. Das feierten Vertreterinnen und Vertreter beider Organisationen Ende Oktober mit einem Festakt in Berlin. Max-Planck-Forschende profitieren von der historisch gewachsenen Zusammenarbeit, indem sie beispielsweise bevorzugten Zugang zu der zum Teil weltweit einzigartigen Infrastruktur der CAS genießen. Dazu gehört etwa das Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope im Südwesten Chinas, das größte Radioteleskop der Welt. Auch aus diesem Grund hält Max-Planck an der Zusammenarbeit mit der chinesischen Wissenschaftsorganisation fest – trotz zunehmender China-Skepsis und unter Wahrung der Wissenschaftsfreiheit und Gewährleistung eines freien Datenaustauschs. „Gerade in schwierigen Zeiten wie diesen müssen wir in der Wissenschaft zusammenstehen, bestehende Brücken aufrechterhalten und neue bauen – ohne dabei Risiken einzugehen“, sagte Max-Planck-Präsident Patrick Cramer bei der Jubiläumsveranstaltung. „Schließlich können wir viele der globalen Herausforderungen, mit denen wir konfrontiert sind, nur gemeinsam bewältigen.“

[www.mpg.de/23669224](http://www.mpg.de/23669224)

## AUSGEZEICHNET ★

BETTINA VALESKA  
LOTSCH



Die Direktorin am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung erhält einen der Gottfried Wilhelm Leibniz-Preise 2025, die jeweils mit 2,5 Millionen Euro dotiert sind. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft zeichnet die Chemikerin für ihre

Forschung an Nanomaterialien aus, die für die Nutzung regenerativer Energie eingesetzt werden könnten. So hat sie etwa Fotokatalysatoren entwickelt, die es ermöglichen, mit Sonnenlicht aus Wasser Wasserstoff zu erzeugen – und das sogar zeitverzögert. Da das Material die Energie des Sonnenlichts mithin speichern kann, lässt es sich möglicherweise als Solarbatterie nutzen, die direkt durch Licht geladen werden kann.

FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE / MPG

# KURZ NOTIERT

---

## KI FÜR DIE GESUNDHEIT

Mit künstlicher Intelligenz die biomedizinische Forschung voranzutreiben, ist das Ziel des Forschungsprogramms BioAI Dresden. Einen entsprechenden Vertrag unterzeichneten Vertreterinnen und Vertreter der Max-Planck-Gesellschaft, der Boehringer Ingelheim Stiftung und der Technischen Universität Dresden im Beisein von Ministerpräsident Michael Kretschmer und Wissenschaftsminister Sebastian Gemkow in der Sächsischen Staatskanzlei. Die Projektpartner und der Freistaat Sachsen vereinbarten darin die gemeinsame Finanzierung von 40 Millionen Euro. Das Programm soll durch die Kombination von KI mit biochemischem und physikalischem Wissen das wissenschaftliche Verständnis der Gesundheit verbessern.

[www.mpg.de/23772626](http://www.mpg.de/23772626)



BILD: NATROT/ADOBESTOCK

Aufschlussreiche Gensequenzen:  
Künstliche Intelligenz kann unter  
anderem deren Analyse unterstützen.

## EUROPAWEIT SPITZE

Forschende der Max-Planck-Gesellschaft sichern sich in der jüngsten Ausschreibung des Europäischen Forschungsrats (ERC) zwölf Synergy Grants, die Projekte für bis zu sechs Jahre mit maximal 14 Millionen Euro fördern. Damit liegt Max-Planck vor dem französischen Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) mit zehn Grants und der Universität

Cambridge mit fünf erfolgreichen Projekten. Insgesamt hat der ERC in dieser Förderlinie 57 von 548 eingereichten Projekten ausgewählt. Bei den Consolidator Grants, mit denen der ERC für einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren bis zu zwei Millionen Euro vergibt, belegt die Max-Planck-Gesellschaft mit neun erfolgreichen Anträgen Platz zwei hinter dem

CNRS. Insgesamt werden 328 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gefördert. Auch bei den für fünf Jahre durchschnittlich mit 1,5 Millionen Euro dotierten Starting Grants belegt Max-Planck Platz zwei hinter dem CNRS: In dieser Förderlinie haben Max-Planck-Forschende 16 der insgesamt 98 Förderungen gewonnen.

[www.mpg.de/23705070](http://www.mpg.de/23705070)

## GESCHICHTE AUS DER ASCHE

Im Jahr 79 ereignete sich einer der schwersten bekannten Ausbrüche des Vesuvs, bei dem die römische Stadt Pompeji und ihre Bewohner unter einer dicken Schicht aus kleinen Steinen und Asche begraben wurden. Ein Forschungsteam hat nun DNA aus den Skelettresten von 14 Menschen extrahiert und untersucht. Auf diese Weise konnten sie die Verwandtschaftsver-

hältnisse, das Geschlecht und die Abstammung der Verschütteten feststellen. Eine besonders interessante Entdeckung betrifft die Überreste einer erwachsenen Person mit einem Kind auf dem Arm. Dabei handelt es sich nicht, wie bis jetzt angenommen, um eine Mutter und ihr Kind, sondern um einen Mann und ein nicht mit ihm verwandtes Kind. Zudem war mindes-

tens eines von zwei Individuen, die bisher als Schwestern oder Mutter und Tochter galten, ein Mann. Es stellte sich auch heraus, dass die Einwohner Pompejis hauptsächlich von Einwanderern aus dem östlichen Mittelmeerraum abstammten. Die Stadt war also wie das gesamte Römische Reich sehr kosmopolitisch.

[www.mpg.de/23701587](http://www.mpg.de/23701587)



FOTO: COURTESY OF ARCHAEOLOGICAL PARK OF POMPEII

10

Gipsabgüsse einer vermeintlichen Familie, die vom Vesuv im „Haus des Goldenen Armbands“ in Pompeji verschüttet worden war. Genetische Analysen zeigen nun, dass alle vier männlichen Geschlechts und miteinander nicht verwandt waren. Vermutlich waren die zwei Erwachsenen und das Kind auf dem Schoß auf der Flucht zum Hafen, sie mussten aber im Treppenhaus des Hauses Schutz suchen. Hier wurden sie von der einstürzenden Treppe erschlagen. Das vorn im Bild liegende Kind, ein vierjähriger Junge, wurde bei den Ausgrabungen einige Meter von der Gruppe entfernt gefunden.

Künstlerische Darstellung der Gas- und Staubscheibe um einen jungen Stern, aus der in einer konischen Form Winde aus Gas und Staub in den Welt- raum wehen.



BILD: NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN (NAOJ)

## VOM WINDE VERWEHT, EIN PLANET ENTSTEHT

Statistisch entsteht um jeden Stern der Milchstraße nach seiner Geburt mindestens ein Planet in einer Gas- und Staubscheibe, die sich um den jungen Stern dreht. Das Gas und der Staub strömen dabei in Form von Winden auch aus der Scheibe heraus. Es wird vermutet, dass die Winde eine wichtige Rolle bei der Sternentstehung spielen, da frisches Baumaterial für Stern und Planeten erst dadurch nach innen strömen kann. Ein Forschungsteam, an dem auch das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidel-

berg beteiligt war, hat mit dem James-Webb-Weltraumteleskop in einem planetenbildenden System nun erstmals ein kompliziertes Windsystem nachgewiesen. Die Astronomen und Astronomen planen nun, mit dem Teleskop weitere junge Systeme zu untersuchen, in denen die Planetenentstehung unterschiedlich weit fortgeschritten ist. So wollen sie herausfinden, wie genau Gasströme das Wachstum von Sternen und Planeten beeinflussen.

[www.mpg.de/23446111](http://www.mpg.de/23446111)

# ORGANSPENDEN NEHMEN NICHT ZU

Mehr als 8000 Menschen warten in Deutschland auf ein Spenderorgan, doch die Spendebereitschaft ist gering: Eine Reform, wie sie im Sommer der Bundesrat initiiert hat, sieht daher vor, dass alle als Spender infrage kommen, die der Organentnahme nicht aktiv widersprochen haben (Opt-out-Modell). Bislang gilt, dass man einer Organspende aktiv zustimmen muss. Eine Studie unter Leitung des Berliner Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung zeigt jedoch: In Argentinien, Chile, Schweden, Uruguay und Wales, wo das Opt-out-Modell eingeführt wurde, hat

dies die Zahl der Organspenden nicht erhöht. Wenn eine Umstellung auf eine Widerspruchslösung nicht durch Investitionen in das Gesundheitswesen, Aufklärungskampagnen und Bemühungen, auf die Bedenken der Angehörigen eines Verstorbenen einzugehen, flankiert wird, ist es unwahrscheinlich, dass die Zahl der Organspenden steigt, so die Forschenden. Alternativ könnte eine verpflichtende Entscheidung für oder gegen die Organspende etwa bei der Beantragung eines Ausweises die Zahl der Spenden erhöhen.

[www.mpg.de/23725156](http://www.mpg.de/23725156)

# SONNENFEUER MIT LICHT UND SCHATTEN

Am 11. Mai 2024 traf ein Sonnensturm höchster Stufe die Erde frontal, gefolgt von Polarlichtern, die auch in Deutschland sichtbar waren. Auch im Oktober wurde das Erdmagnetfeld durchgeschüttelt, als ein weiterer starker Ausbruch der Sonne die Erde streifte. So faszinierend die Himmelschauspiele auch waren, solche Sonnenstürme können auf der Erde gehörigen Schaden anrichten. Die geladenen Teilchen, die dabei von der Sonne bei uns ankommen, werden von Magnetfeldern der Sonne zu regelrechten Paketen gebündelt. Treffen die Teilchen auf das Erdmagnetfeld, können sie die Elektronik oder die Kommunikation mit Satelliten und damit das GPS-Signal stören oder

Stromnetze zusammenbrechen lassen, wie etwa im Jahr 2003 geschehen, als in Teilen Schwedens das Licht ausging. Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung untersucht daher die Aktivität der Sonne sehr genau, was bessere Vorhersagen ermöglicht. Eine Forschungsfrage ist, warum die Sonne alle elf Jahre besonders aktiv ist. Zur Analyse nutzt das Institut unter anderem Daten des 2020 gestarteten Sonnenobservatoriums Solar Orbiter, das die gesamte Scheibe der Sonne detailliert abbildet. Die Instrumente beobachten auch das Sonnenmagnetfeld und sein Verhalten sehr genau.

[www.mpg.de/21927472](http://www.mpg.de/21927472)  
[www.mpg.de/23746472](http://www.mpg.de/23746472)



FOTO: SAMI SOLANKI (MPS)

Ungewöhnliches Phänomen: Dieses Polarlicht wurde am 11. Mai 2024 in der Nähe von Göttingen aufgenommen.

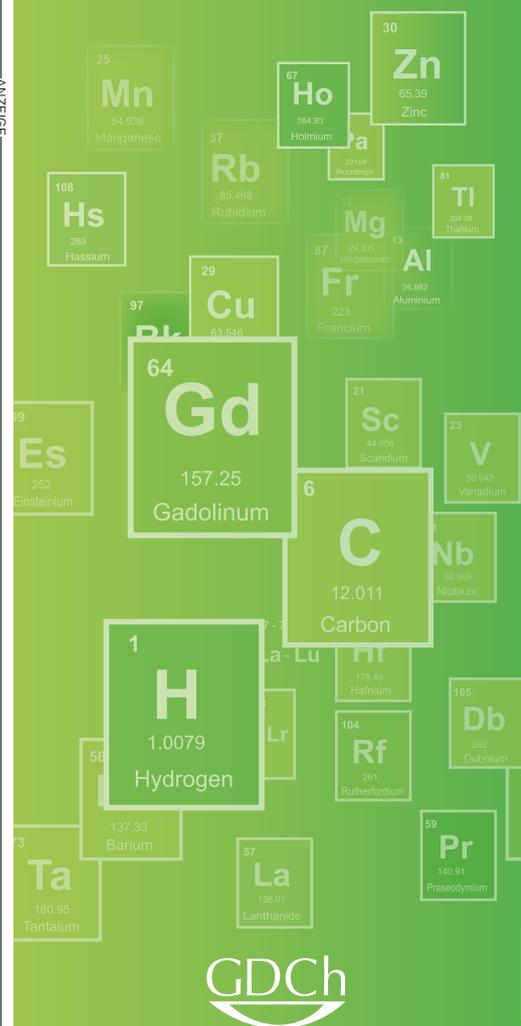
D A S  
K A R R I E R E  
P O R T A L

## für Chemie und Life Sciences

Von Chemikern für Chemiker –  
Nutzen Sie das Netzwerk  
der GDCh:

- ➔ Stellenmarkt – Online und in den *Nachrichten aus der Chemie*
- ➔ CheMento – das GDCh-Mentoringprogramm für chemische Nachwuchskräfte
- ➔ Publikationen rund um die Karriere
- ➔ Coachings und Workshops
- ➔ Jobbörsen und Vorträge
- ➔ Einkommensumfrage

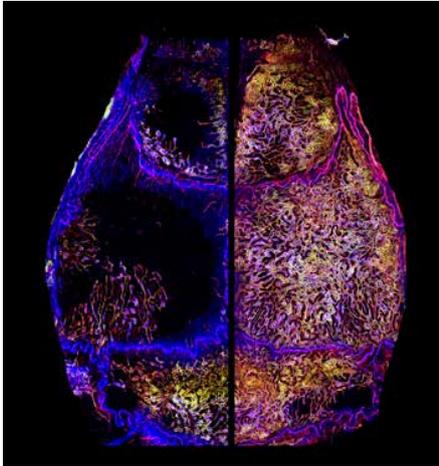
ANZEIGE



GDCh

GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER

[www.gdch.de/karriere](http://www.gdch.de/karriere)



Blutgefäße im Schädelknochenmark (rot) einer jungen (links) und einer alten (rechts) Maus.

## DICKSCHÄDEL

Im Knochenmark befinden sich die Stammzellen, aus denen alle Blutzellen unseres Körpers hervorgehen. Mit zunehmendem Alter sinkt im Mark die Anzahl der Blutgefäße und -zellen. Eine Ausnahme bilden neuen Erkenntnissen zufolge das Knochenmark im Schädel: Ein Forschungsteam des Max-Planck-Instituts für molekulare Biomedizin hat entdeckt, dass darin die Bildung von Blutzellen im Laufe des Lebens zunimmt. Die Schädel junger Mäuse enthalten nur wenig Knochenmark, das jedoch, zusammen mit der Anzahl der

Blutgefäße, lebenslang weiterwächst. Dies scheint im Organismus einzigartig zu sein. Infolge des kontinuierlichen Wachstums dehnt sich das Knochenmark stark aus und füllt das Schädeldach immer mehr aus. Computertomografie-Aufnahmen zeigen, dass das Schädelknochenmark auch beim Menschen mit dem Alter wächst. Die Forschenden hoffen nun, dass ihr Wissen dazu beiträgt, das Mark in anderen Knochen zukünftig ähnlich widerstandsfähig gegen den Alterungsprozess zu machen.

[www.mpg.de/23724010](http://www.mpg.de/23724010)

## FLOWER-POWER

- 12 Lavendelöl könnte Natrium-Schwefel-Batterien leistungsfähiger und dazu langlebiger machen. Solche Batterien eignen sich als stationäre Energiespeicher für Wind- und Sonnenstrom besser als Lithiumbatterien, unter anderem weil sich Natrium leichter und umweltverträglicher gewinnen lässt als Lithium. Natrium-Schwefel-Batterien speichern jedoch, auf ihr Gewicht bezogen, weniger Energie als Lithium-Akkus und sind auch nicht so langlebig. Die Speicherkapazität und die Lebensdauer lassen sich aber erhöhen, wenn ein Pol des Akkus aus einem Nanomaterial aus Kohlenstoff und Schwefel besteht, wie ein Team des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung gezeigt hat. Das Nanomaterial haben die Forschenden aus Linalool, dem Hauptbestandteil von Lavendelöl, und Schwefel hergestellt. Nicht nur hindert es Polysulfidionen, die beim Entladen von Natrium-Schwefel-Batterien am Pluspol entstehen, daran, zum Minuspol zu wandern, was die Batterie letztlich unbrauchbar macht; vielmehr steigert das Nanomaterial zudem den Anteil des Schwefels, der für die elektrochemische Reaktion zur Verfügung steht, und erhöht so die Speicherkapazität der Batterie.

[www.mpikg.mpg.de/6841711](http://www.mpikg.mpg.de/6841711)

## VIEL PROTEIN, WENIG ZUCKER

Reis ist ein Grundnahrungsmittel für mehr als vier Milliarden Menschen. Von Natur aus enthält er viele Kohlenhydrate, jedoch nur wenig Protein. Ein Forschungsteam des Internationalen Reisforschungsinstituts auf den Philippinen und des Max-Planck-Instituts für Molekulare Pflanzenphysiologie in Potsdam hat nun die Gene identifiziert, die die Kohlenhydratzusammensetzung und den Proteingehalt von Reis bestimmen. Das Team hat sowohl mit klassischer Züchtung als auch mit Genomeditierung Reissorten mit niedrigem Zucker- und hohem Proteingehalt erzeugt. Dieser sogenannte HAHP-Reis (*high amylose, high protein*) enthält 16 Prozent Protein. Der Proteingehalt herkömmlicher Reissorten liegt dagegen lediglich zwischen

zwei und acht Prozent. Gleichzeitig weist der Reis durch den hohen Amylose- und Proteingehalt einen niedrigen glykämischen Index auf. Dadurch steigen die Zuckerwerte im Blut weniger stark an. Er enthält darüber hinaus viele essenzielle, nicht vom Körper gebildete Aminosäuren. Mit HAHP-Reis lassen sich zudem vergleichbare Erträge wie mit den derzeit auf dem Markt erhältlichen Hochertragssorten erzielen. In Ländern außerhalb der EU ist der neue Reis bereits erhältlich. Da Sorten, die aus klassischer Züchtung hervorgegangen sind, nicht als genetisch verändert eingestuft werden, könnte HAHP-Reis auch in der EU angebaut und verkauft werden.

[www.mpg.de/23543648](http://www.mpg.de/23543648)

Reisfelder des Internationalen Reisforschungsinstituts, auf denen unterschiedliche Sorten angebaut werden.



## OHNE TESTOSTERON KRÄHT KEIN HAHN

Obwohl Testosteron auch beim weiblichen Geschlecht vorkommt, wird es klassischerweise als „Männerhormon“ bezeichnet: Es ist maßgeblich an der Geschlechtsentwicklung, am Aussehen und am Aggressionsverhalten des männlichen Geschlechts beteiligt. Ohne Testosteron kräht ein Hahn zum Beispiel nicht. Forschende des Max-Planck-Instituts für biologische Intelligenz haben genetisch veränderte Hühner gezüchtet

und untersucht, denen der sogenannte Androgenrezeptor fehlt. Dadurch kann das Sexualhormon keine Wirkung mehr entfalten. Wie erwartet waren Hähne dann unfruchtbar. Zudem fehlten ihnen unter anderem der Kamm sowie die Kehllappen und die Ohrläppchen. Hingegen waren die Schwanzfedern und der Sporn ähnlich ausgeprägt wie bei normalen Hähnen. Offenbar wird also das äußere Erscheinungsbild der Hähne

nicht nur durch den Androgen-Signalweg bestimmt. Auf die Hennen wirkte sich ein fehlender Androgenrezeptor ganz ähnlich aus: Auch sie waren unfruchtbar, und die typischen Hautlappen am Kopf waren kleiner als normal. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass Testosteron kein reines Männerhormon ist, sondern in beiden Geschlechtern wichtige Aufgaben übernimmt.

[www.mpg.de/23614748](http://www.mpg.de/23614748)



FOTO: SABINE GLOAGUEN

Der Hess-Teleskopverbund im Khomas-Hochland von Namibia.

## REKORD-ELEKTRONEN AUS DEM ALL

Die Erde unterliegt ständigem Beschuss von kleinsten, hochenergetischen Teilchen wie Atomkernen oder Elektronen. Forschende, unter anderem des Max-Planck-Instituts für Kernphysik, haben nun die energiereichsten Elektronen aus dem Weltall gemessen, die jemals ein Messgerät nachgewiesen hat. Sie nutzten dazu das Hess-Observatorium im Hochland von Namibia, das die Teilchen nicht direkt aufspürt, sondern über Lichtsignale, die diese beim Eintritt in die dichte Erdatmosphäre auslösen. Die Forschenden interessieren vor allem, welche astronomischen Objekte die Elektronen auf so hohe Energien beschleunigt haben. Da Teilchen auf-

grund ihrer Ladung und ihrer geringen Masse vom Magnetfeld der Milchstraße leicht abgelenkt werden und auf ihrem Irrweg schnell an Energie verlieren, wird die Quelle recht nah bei der Erde vermutet – innerhalb von Tausenden Lichtjahren Entfernung. Zum Vergleich: Die Milchstraße hat einen Radius von 100 000 Lichtjahren. Die Energieverteilung der gemessenen Elektronen deutet zudem auf wenige Pulsarsterne – möglicherweise nur einen – als Ursprung hin. Pulsare sind Sternleichen, die Elektronen in ihren starken Magnetfeldern beschleunigen. Die genauen Positionen der Quellen ließen sich aber nicht ermitteln.

[www.mpg.de/23743511](http://www.mpg.de/23743511)

## HILFE GEGEN GEWALT

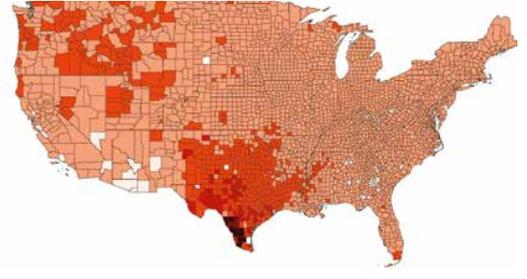
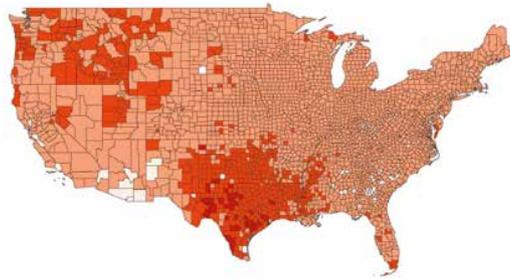
Mehr als ein Drittel aller Frauen in Deutschland werden mindestens einmal in ihrem Leben Opfer von physischer und/oder sexueller Gewalt, wie eine Studie der Agentur der EU für Grundrechte bereits im Jahr 2014 ergab. Das Gewalthilfegesetz, dessen Entwurf Anfang Dezember im Bundestag debattiert, aber nicht verabschiedet wurde, sieht vor, den Zugang zu Schutz und Beratung für von Gewalt betroffene Personen rechtlich abzusichern. Wie wichtig dies ist, zeigt eine Studie des Max-Planck-Instituts zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht in Freiburg. Demnach hat die häusliche Gewalt vor allem gegen Frauen und Mädchen während der Lockdowns in der Corona-Pandemie deutlich zugenommen. In der Untersuchung befragten die Forschenden auch Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Hilfseinrichtungen. Diese gaben an, dass mit Beginn des ersten Lockdowns die Anfragen in den Einrichtungen schlagartig zurückgingen. Die Befragten sagten, dass Betroffene in dieser Zeit weniger Möglichkeiten hatten, mit den Beratungsstellen in Kontakt zu treten, da sie wesentlich mehr Zeit etwa mit ihrem gewalttätigen Partner verbringen mussten.

[www.mpg.de/23756687](http://www.mpg.de/23756687)

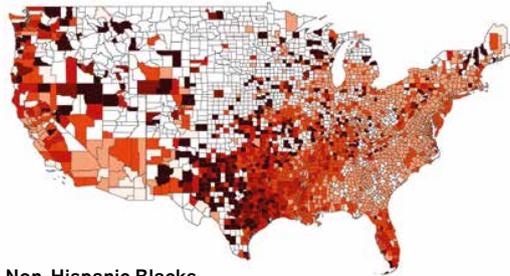
Die Karten zeigen die modellierte temperaturbedingte Übersterblichkeitsrate pro 100 000 Einwohner nach Landkreisen, basierend auf den Temperaturen des besonders heißen Jahres 2022.

Demnach wären vor allem unter den Non-Hispanic Blacks mehr Todesfälle zu erwarten gewesen, wenn die Temperaturen zwischen 1993 und 2005 denen von 2022 entsprächen hätten.

„Was-wäre-wenn“-Annahme für 2022



Gesamt

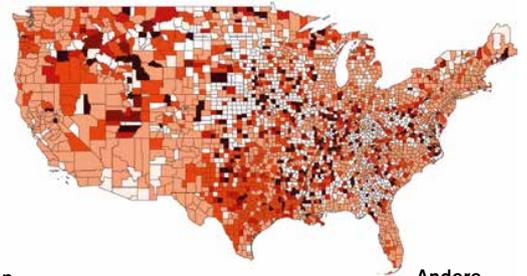


Non-Hispanic Blacks



keine Angaben

Weiße Menschen



Andere

GRAFIK: GCO NACH MPI FÜR DEMOGRAPHISCHE FORSCHUNG

## HITZE TRIFFT NICHT ALLE GLEICH

Extreme Temperaturen sind nicht nur unangenehm, sie erhöhen auch die Sterblichkeit – aber nicht bei allen Menschen gleich. Forschende des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung haben herausgefunden, dass ethnische Minderheiten in den USA von Hitze überproportional betroffen sind. Untersucht wurden Daten von 3000 US-Bezirken aus dem Zeitraum zwischen 1993 und 2005, für den detaillierte Sterberegister mit meteorologischen Angaben vorliegen. Daraus errechneten die Forschenden, wie die hitzebedingte Sterblichkeit von der ethnischen Zugehörigkeit abhängt. Mit den entsprechenden Faktoren ermittelten sie Szenarien für die Übersterblichkeit in den Jahren 2006

bis 2023, in denen der Klimawandel bereits zu deutlich mehr Hitzetagen führte als vorher. Demnach kam es in diesem Zeitraum zu zusätzlichen Todesfällen pro 100 000 Einwohner – das Maß für die Übersterblichkeitsrate; bei „Non-Hispanic Blacks“ waren es mehr als 26, bei weißen Menschen etwas mehr als 15. Allerdings fehlen individuelle sozioökonomische Daten, die für das Verständnis der Übersterblichkeit wichtig sind. Doch die Studie zeigt, dass gefährdete Bevölkerungsgruppen – insbesondere ethnische Minderheiten – durch gezielte Maßnahmen vor extremen Temperaturen besser geschützt werden müssen. Denn extreme Hitze wird zunehmen.

[www.mpg.de/23502750](http://www.mpg.de/23502750)

14

## KORALLEN IN URALTER SYMBIOSE

Schon vor knapp 400 Millionen Jahren lebten Korallen in Symbiose mit Algen. In dieser Lebensgemeinschaft produzieren die Algen mit der Energie aus dem Sonnenlicht Kohlenhydrate und stellen diese den Korallen zur Verfügung. Das haben Forschende unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz festgestellt, als sie Stickstoffisotope in fossilen Korallen aus dem Zeitalter des Devons in der Eifel und dem Sauerland analysierten. Ihre Methode ist so sensitiv, dass ihnen die winzige Menge organischen Materials genügte, die in wenigen Milligramm fossiler Korallen enthalten ist. Darin fanden sie dasselbe Verhältnis von schwerem zu leichtem Stickstoff, das für heutige symbiontisch lebende Korallen typisch ist. Damit haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die bislang älteste Symbiose in Korallen nachgewiesen. Die Lebensgemeinschaft mit Algen könnte der Grund sein, warum prähistorische Korallenriffe auch in einer nährstoffarmen Umgebung enorme Ausmaße erreichten.

[www.mpg.de/23635547](http://www.mpg.de/23635547)

FOTO: SIMON FELIX ZOPPE, 2021



1 cm

Fossil einer Bödenkoralle aus dem Devon, das im Hönnetal im Sauerland gefunden wurde.



FORWARD.  
VISION.  
FUTURE.

---

€ 25,000

---

Apply until  
**15<sup>th</sup> February 2025**

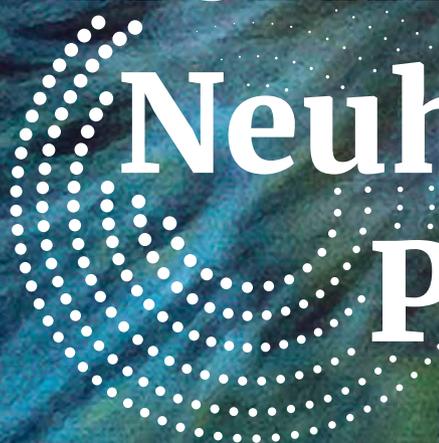
---

The Hermann Neuhaus Prize recognizes excellent postdocs and group leaders in the Biology & Medicine Section (**BMS**) and the Chemistry, Physics & Technology Section (**CPTS**). The prize will enable the successful applicant to further develop the application potential of his or her research.

---

For more information visit  
[www.mpg.de/hermann-neuhaus-prize](http://www.mpg.de/hermann-neuhaus-prize)

*Hermann Meißner's*  
**Hermann  
Neuhaus  
Prize**



---

# BIODIVERSITÄT: VIELE ABKOMMEN, WENIG KLARHEIT

16

Impfstoffe, Medikamente, Lebensmittel, Mode: Genetische Ressourcen und das kulturelle Erbe indigener Völker sind in der Industrie begehrt. Doch wem gehören sie, wer darf sie verwerten und zu welchem Preis? Das ist trotz vieler Abkommen und einer UN-Konferenz in Cali nicht klar. Welche Regelungen es bereits gibt und worin deren Schwächen bestehen, analysiert der Rechtswissenschaftler Pedro Henrique D. Batista.

Umsatzstarke Produkte basieren immer häufiger auf genetischen Ressourcen und daraus gewonnenen Informationen oder auf dem kulturellen Erbe indigener Völker. So wird das Erbgut von – oft von indigenem Land entnommenen – Organismen beispielsweise zur Entwicklung von Impfstoffen, Medikamenten und Lebensmitteln verwendet. In der Mode basieren Designs zum Teil auf der Kunst indigener Völker. Diese Anwendungen werden von einer alten Frage begleitet: Inwieweit dürfen sie ohne die Zustimmung der Herkunftsländer oder der indigenen Völker erfolgen, denen die Ressourcen und Kulturgüter gehören?

Über Fälle von „Biopiraterie“, „kultureller Aneignung“ und „Diebstahl des kulturellen Erbes“ wurde in den vergangenen Jahren oft berichtet. Sie spiegeln die Forderung von Ländern mit hoher Biodiversität und indigenen Völkern nach einer Teilhabe an den Vorteilen wider, die sich aus der Nutzung ihrer Biodiversität und ihrer Kultur ergeben. Dementsprechend haben viele dieser Länder – insbesondere in Lateinamerika, Afrika und Asien – ihre genetischen Ressourcen (wie etwa Gene und deren Sequenzen) →

# ZUR SACHE

PEDRO HENRIQUE  
D. BATISTA



Pedro Henrique D. Batista ist wissenschaftlicher Referent am Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb im Bereich des gewerblichen Rechtsschutzes. Schwerpunkte seiner Forschung sind unter anderem geistiges Eigentum, Biotechnologie und Ethik. Er untersucht, wie effektiver Schutz von genetischen Ressourcen und indigenem Wissen in der Praxis zu erreichen ist. Er ist Teilnehmer des Intergovernmental Committee on Genetic Resources, Traditional Knowledge and Folklore der Weltorganisation für geistiges Eigentum (Wipo) und der Working Group on Benefit-sharing from the Use of Digital Sequence Information on Genetic Resources des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (Convention on Biological Diversity – CBD).

ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FOR MPFG

17

---

und das traditionelle Wissen ihrer indigenen Völker rechtlich geschützt. Allerdings reicht der Schutz auf nationaler Ebene oft nicht, um den Vorteilsausgleich sicherzustellen. Denn die Ressourcen und Kenntnisse werden normalerweise in Ländern mit starker Industrie genutzt, wie etwa in den USA, in Japan und in der Europäischen Union. Diese Länder haben meist jedoch kein großes Interesse am starken Rechtsschutz genetischer Ressourcen und des kulturellen Erbes Dritter. Insbesondere möchten sie nicht, dass die bürokratischen Auflagen Rechtsunsicherheit und Hindernisse für Innovation und kreative Freiheit schaffen.

## LÄNDER MIT GROSSER BIOLOGISCHER VIELFALT FORDERN EINEN ANTEIL AN DEN VORTEILEN AUS DER NUTZUNG

Um die gegensätzlichen Interessen aufeinander abzustimmen, wurden in den letzten Jahrzehnten internationale Verträge verabschiedet. Das Übereinkommen über die biologische Vielfalt (CBD) von 1992 und sein Nagoya-Protokoll von 2010 verlangen für die Nutzung – etwa durch Unternehmen oder Forschungsinstitutionen – nicht nur die Zustimmung des Herkunftslandes oder der indigenen Völker für den Zugang zu ihren genetischen Ressourcen und zum darauf bezogenen traditionellen Wissen, sondern auch einen Ausgleich für die Vorteile aus der Nutzung. Darunter können finanzielle Vorteile (etwa Zugangsgebühren, ein Teil des Gewinns aus der Produktion oder Forschungsmittel) sowie nichtfinanzielle Vorteile (etwa wissenschaftliche Kooperation, die Weitergabe von Technologien oder eine gemeinsame Inhaberschaft von Patenten) fallen.

Dieses bilaterale Verhältnis zwischen nutzender Industrie oder Forschung als Nutzer und Herkunftsländern (beziehungsweise indigenen Völkern) kann unter Umständen jedoch kostspielig und zeitaufwendig sein. Um die Innovation in Bereichen von besonderer Bedeutung für die Menschheit nicht zu beeinträchtigen, werden in einigen internationalen Instrumenten gewisse Ausnahmen geregelt. Der Internationale Vertrag über pflanzengenetische Ressourcen für Ernährung und Landwirtschaft der Welternährungsorganisation sieht beispielsweise einen multilateralen Mechanismus für den Vorteilsausgleich vor, wenn es um die Nutzung bestimmter Pflanzen (etwa Äpfel, Bananen, Kartoffeln, Karotten, Mais oder Sonnenblumen) geht. In diesen Fällen fließt ein Anteil des Produktumsatzes in einen Fonds, der die Vorteile nach zuvor festgelegten Kriterien an Länder und Projekte verteilt. Im Pandemic Influenza Preparedness Framework der Weltgesundheitsorganisation werden nichtfinanzielle Vorteile, die sich aus der Nutzung von Influenzaviren ergeben, ebenfalls multilateral aufgeteilt (zum Beispiel Spende von Impfdosen, medizinische Ausbildung). Schließlich wurde 2023 im Rahmen des UN-Seerechtsübereinkommens das Abkommen zum Schutz der Biodiversität auf Hoher See unterzeichnet. Es regelt unter anderem die Aufteilung der Vorteile, die sich aus der Nutzung genetischer Ressourcen aus Gewässern ergeben, über die kein Land Souveränität besitzt.

Die Effektivität der Verträge ist allerdings beschränkt. So sind die USA mit der weltweit stärksten biotechnologischen Industrie der CBD als einziges

## WICHTIGE ELEMENTE DER BIOLOGISCHEN VIELFALT UND DES KULTURELLEN ERBES BLEIBEN UNGESCHÜTZT

Land der Welt nicht beigetreten. Aufgrund von Schutzlücken und ungenauen Formulierungen wird nur ein geringer Teil der Gewinne mit den Herkunftsländern oder den indigenen Völkern geteilt. Außerdem bleiben wichtige Elemente des kulturellen Erbes ungeschützt. Aber auch die Industrie beschwert sich über die große Rechtsunsicherheit in Bezug auf ihre Pflichten. Denn die Zugangsregeln sind in den einzelnen Ländern nicht nur sehr unterschiedlich gestaltet, sondern oft auch unklar formuliert. Es werden daher weitere internationale Regulierungen benötigt.

Vor diesem Hintergrund könnte man das Jahr 2024 als das Jahr der Biodiversität und des kulturellen Erbes bezeichnen. Denn nicht weniger als vier bedeutende internationale Verträge wurden in diesen Bereichen gleichzeitig verhandelt. Der bisher erfolgreichste ist der im Mai verabschiedete

Vertrag der Weltorganisation für geistiges Eigentum (Wipo): Wipo Treaty on Intellectual Property, Genetic Resources and Associated Traditional Knowledge. Er zielt darauf ab, die Rechtssicherheit zu erhöhen und durch Transparenz die Einhaltung nationaler Zugangs- und Vorteilsausgleichsregeln zu fördern. Dabei werden Patentanmelder verpflichtet, das Herkunftsland oder zumindest die Quelle der genetischen Ressourcen oder des traditionellen Wissens in der Patentanmeldung anzugeben. Kommen sie dieser Pflicht nicht nach, werden nationale Sanktionen außerhalb des Patentrechts angewendet, die beispielsweise Geldbuße, Marktverbot oder Ausschluss von öffentlichen Ausschreibungsverfahren umfassen können. Das Patent kann aber auch für nichtig erklärt werden, wenn der Patentanmelder mit betrügerischer Absicht die Herkunft nicht oder falsch angibt. Inwieweit dieser Vertrag einen effektiven Rechtsschutz der genetischen Ressourcen und des

kulturellen Erbes gewährleisten wird, bleibt abzuwarten. Patentanmelder haben die Möglichkeit, das Herkunftsland nicht anzugeben, wenn sie es nicht kennen. Zudem herrscht Unklarheit über die Umsetzung der Kontrollmaßnahmen und Sanktionen auf nationaler Ebene.

Daneben werden in der Wipo zwei weitere Verträge verhandelt: einer zum Schutz weiteren traditionellen Wissens und einer zum Schutz traditioneller kultureller Ausdrucksformen (wie etwa von Tänzen, Kleidung, Schmuckgegenständen und Designs indigener Gruppen). In diesem Fall soll die Nutzung der Kulturgüter der Zustimmung der entsprechenden indigenen Völker unterliegen. Allerdings konnten sich die Länder über wesentliche Aspekte des Schutzsystems noch nicht einigen, etwa über die Definition der geschützten Kulturgüter, die Rechtsinhaberschaft, die Ausnahmen und die Schutzfrist. Es ist nicht zu erwarten, dass diese Verhandlungen in den kommenden Jahren zu einem Ende kommen.

Schließlich hat auch die Digitalisierung Konsequenzen. Auf Basis digitaler Sequenzinformationen (DSI) – etwa der Nukleotidsequenz eines Gens –

→

---

werden zunehmend biotechnologische Produkte entwickelt, etwa Arzneimittel, Nahrungsmittel, Kosmetik und Biokraftstoffe. Da die Identifizierung des Herkunftslandes und bilaterale Verhandlungen über den Zugang zu zahlreichen Informationen und deren Nutzung besonders herausfordernd sind, haben sich die Vertragsparteien des Übereinkommens über die biologische Vielfalt im Rahmen ihrer 16. Konferenz (COP 16 in Cali, Kolumbien) Anfang November auf einen multilateralen Mechanismus geeinigt, wie die Vorteile aus der Nutzung dieser Informationen aufgeteilt werden sollen. Zusammenfassend sollen DSI-Nutzer – insbesondere Unternehmen, die Arzneimittel, Nutrazeutika, Kosmetik, Biotechnologie sowie Laborausstattung zur Sequenzierung und Verwendung von DSI sowie darauf bezogene Dienstleistungen anbieten – finanzielle und nichtfinanzielle Vorteile aus DSI-Nutzung multilateral teilen. Ein Teil der Einnahmen aus Produkten und Dienstleistungen, die mithilfe digitaler Sequenzinformationen entstanden sind, werden zukünftig einem unabhängigen internationalen Fonds zugewiesen, der unter anderem den Schutz der Biodiversität und indigene Völker unterstützen wird.

20

## MIT EINEM TEIL DER EINNAHMEN WIRD DER SCHUTZ DER BIODIVERSITÄT UNTERSTÜTZT

Was gut klingt, ist in der Umsetzung schwierig. So müssen internationale Abkommen in der Regel in nationales Recht umgesetzt werden, um Wirkung zu entfalten. Sonst sind die Nutzer nicht verpflichtet, Beiträge zum Fonds zu leisten. Der Mechanismus findet zudem keine Anwendung bei Sequenzinformationen, für die Zugang und Nutzung bereits in einem Vertrag zwischen dem Nutzer und dem Herkunftsland geregelt werden. Außerdem wurden wichtige Aspekte nicht geregelt. Dazu zählen die genaue Definition von DSI, der Prozentsatz der aufzuteilenden Vorteile kleiner und mittlerer Unternehmen oder der Unternehmen, die außerhalb festgelegter Industriesektoren tätig sind, sowie konkrete Pflichten hinsichtlich der Aufteilung nichtmonetärer Vorteile neben Compliance-Maßnahmen und Sanktionen. Ob und wie der Mechanismus von den Vertragsparteien praktisch umgesetzt wird und inwieweit er die DSI-Regulierung in anderen internationalen Organisationen (wie etwa im Rahmen der obengenannten Verträge der Welternährungsorganisation und der Weltgesundheitsorganisation) beeinflussen wird, bleibt deshalb abzuwarten. Angesichts der lückenhaften Umsetzung der CBD und des Nagoya-Protokolls in den letzten Jahrzehnten ist es nicht ausgeschlossen, dass Länder mit einer starken biotechnologischen Industrie das Instrument derart umsetzen, dass ihren Nutzern keinerlei umfangreiche Vorteilsausgleichspflichten auferlegt werden.

Wem gehören nun Biodiversität und kulturelles Erbe? Aufgrund der regulatorischen Komplexität gibt es darauf keine pauschale Antwort. Sie variiert je nach geschütztem Gut, anwendbarem Vertrag und geltenden Ausnahmen. Die Vielzahl an Regelwerken spiegelt die Unterschiede in der Art der geschützten Güter wider, die materiell (zum Beispiel genetische

## NICHTS HINDERT LÄNDER, WEITERE MASSNAHMEN AUF REGIONALER ODER MULTILA- TERALER EBENE ZU ERGREIFEN

Ressourcen) oder immateriell (zum Beispiel traditionelles Wissen, DSI) sein können und unterschiedliche Rechteinhaber (zum Beispiel Herkunftsländer, indigene Völker) haben – oder gar keine.

Darüber hinaus ermöglicht das internationale Recht eine Vielzahl von Auslegungen, wie die Regeln auf nationaler Ebene umgesetzt werden sollten. Der genaue materielle und zeitliche Schutzzumfang, Compliance-Maßnahmen und Sanktionen können beispielsweise von Land zu Land sehr unterschiedlich sein. Dies kann dazu führen, dass die nicht genehmigte Nutzung einer bestimmten Ressource oder eines bestimmten Wissens in einem Land erlaubt, in einem anderen jedoch verboten ist. Zudem stellt das internationale Recht nicht sicher, dass das bilaterale Verfahren zwischen Nutzer und Herkunftsland (oder indigenem Volk) für den rechtmäßigen Zugang zu genetischen Ressourcen und traditionellem Wissen effizient ist, was für die Nutzer von Nachteil ist. Hinzu kommt, dass die Pflichten der Länder gegenüber den in ihrem Hoheitsgebiet lebenden indigenen Völkern nicht in diesen internationalen Verträgen geregelt sind. Ob die Vorteile, die bei der Nutzung traditionellen Wissens aufgeteilt werden, tatsächlich bei indigenen Völkern ankommen, hängt vom nationalen Recht des jeweiligen Landes ab.

Wichtig wäre es daher, dass die internationalen Gesetzgeber präzise, effektive und verständlichere regulatorische Mechanismen festlegen. Diese sollen nicht nur rechtssichere und effiziente Zugangsverfahren für berechnigte Nutzer gewährleisten, sondern auch einen gerechten Vorteilsausgleich für die Herkunftsländer und die indigenen Völker. Aber auch in diesem Fall könnten Streitigkeiten zwischen Ländern darüber entstehen, ob das internationale Recht ordnungsgemäß umgesetzt wird. Ein (heute nicht existierender) rechtsverbindlicher Mechanismus, solche Streitigkeiten beizulegen, wäre wichtig, um die Einheitlichkeit der Vorschriften, die Effektivität des internationalen Rechts und die Effizienz des Vorteilsausgleichs zu gewährleisten.

Es ist zwar wahr, dass divergierende Interessen der Staaten Fortschritte im internationalen Recht behindern können. Nichts hindert jedoch ein Land, dem an einem effizienten und wirksamen Rechtsschutz genetischer Ressourcen und traditionellen Wissens gelegen ist, daran, solche Vorschriften auf regionaler oder multilateraler Ebene zu erlassen. Wenn einige Länder ähnliche Vorschriften zu Effizienz, Schutzzumfang, Einhaltung und Sanktionen erließen, böten sie Unternehmen, die auf dem globalen Biotechnologiemarkt tätig sind, einen Anreiz, sich daran zu halten, um mehrfache Sanktionen zu vermeiden. Dies wiederum könnte verhindern, dass Länder in einen Wettbewerb um die günstigsten Zugangsbedingungen treten, was zu einem „Wettlauf nach unten“ in Bezug auf die Höhe des erforderlichen Vorteilsausgleichs führen würde.



# DAS BLEIBT IN DER FAMILIE

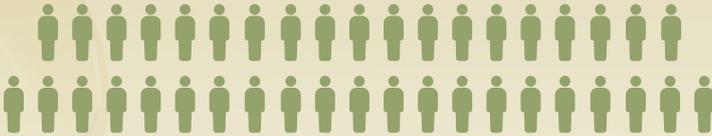
## ANTEIL DER GESAMTBEVÖLKERUNG (NACH VERMÖGEN)

### Obere 10%



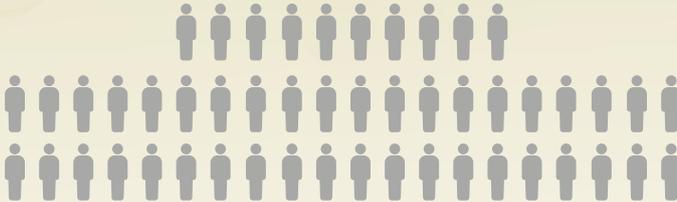
**60,9%**

### 50 bis 90%



**36,6%**

### Untere 50%



**2,5%**

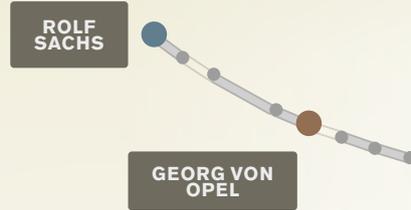
des Gesamtvermögens  
in Deutschland

Das Vermögen ist in Deutschland ungleich verteilt: Wenige haben viel, viele haben wenig. Die Soziologinnen Daria Tisch und Emma Ischinsky des Max-Planck-Instituts für Gesellschaftsforschung haben das Vermögen der reichsten 0,01 Prozent der Bevölkerung untersucht. Ihre Analysen zeigen, dass Weltkriegen, Revolutionen, Wirtschaftskrisen und Währungsreformen zum Trotz ein Teil der Spitzenvermögen in Deutschland erstaunlich beständig ist. Große Vermögen gehören oft zu familiären Netzwerken und sind so gegen Verlust recht gut abgesichert.

GRAFIK: GCO

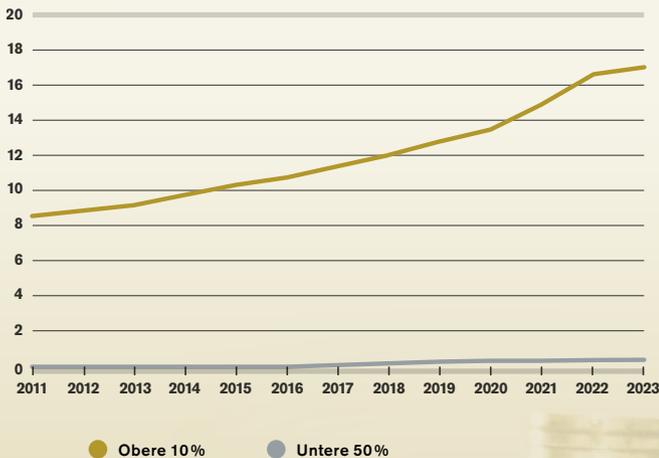
22

QUELLE: EUROPÄISCHE ZENTRALBANK



## DIE REICHEN WERDEN REICHER

Billionen Euro



Zwischen 2011 und 2023 ist das Vermögen der reichsten 10 Prozent der Bevölkerung viel stärker gewachsen als das der unteren 50 Prozent in der Vermögensverteilung.



QUELLE: „VERMÖGENSUNGLEICHHEIT IN DEUTSCHLAND UND EUROPA“, AUS „SCHLAGLICHTER DER WIRTSCHAFTSPOLITIK“ (03/2024), BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMA

**BESTÄNDIGE SPITZENVERMÖGEN**

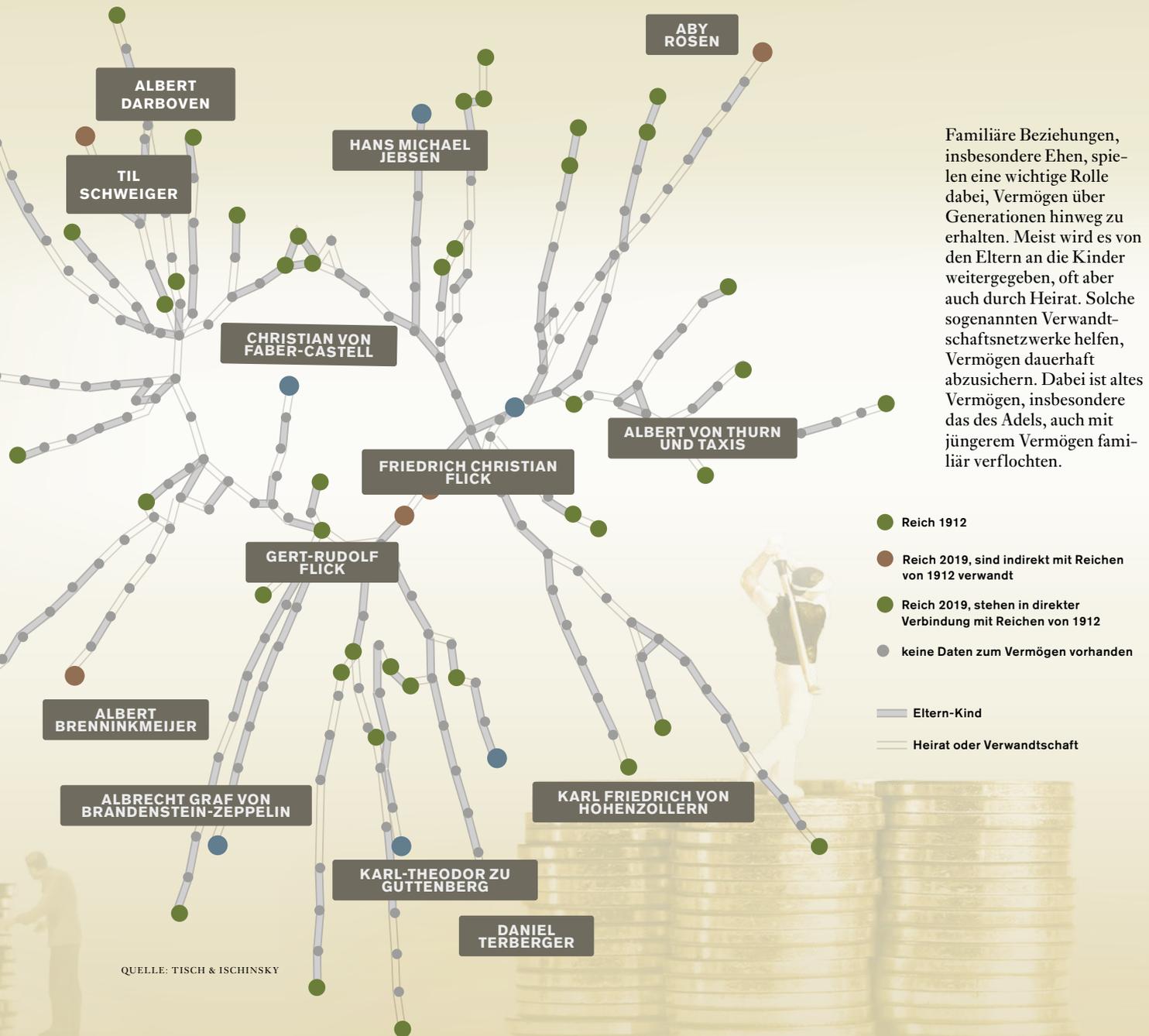
Etwa acht Prozent der größten Vermögen von heute können direkt auf eine Reichenliste von 1913 zurückgeführt werden. Ein Drittel der Unternehmen, die mit den heutigen größten Vermögen verbunden sind, wurden vor dem Ersten Weltkrieg gegründet. (Die Kaufkraft einer Reichsmark aus dem Jahr 1912 entspricht 6,20 Euro des Jahres 2023.)

**2019**

Mio. Euro	<b>7.600</b>	<b>5.800</b>	<b>5.500</b>	<b>3.500</b>	<b>3.100</b>	<b>2.600</b>	<b>2.400</b>	<b>2.300</b>	<b>2.200</b>	<b>2.100</b>
	Oetker	Merck Finck & Co.	Tengelmann Group	Sartorius	Robert Bosch	Vorwerk	Schwenk Zement	Voith	Spaten-Franziskaner-Bräu	Wacker Chemie
Mio. Mark	<b>1,5</b>	<b>16,0</b>	<b>7,0</b>	<b>1,5</b>	<b>20,0</b>	<b>19,0</b>	<b>1,5</b>	<b>22,0</b>	<b>92,0</b>	<b>11,5</b>

**1913**

QUELLE: TISCH & ISCHINSKY



Familiäre Beziehungen, insbesondere Ehen, spielen eine wichtige Rolle dabei, Vermögen über Generationen hinweg zu erhalten. Meist wird es von den Eltern an die Kinder weitergegeben, oft aber auch durch Heirat. Solche sogenannten Verwandtschaftsnetzwerke helfen, Vermögen dauerhaft abzusichern. Dabei ist altes Vermögen, insbesondere das des Adels, auch mit jüngerem Vermögen familiär verflochten.

QUELLE: TISCH & ISCHINSKY

# IM FOKUS

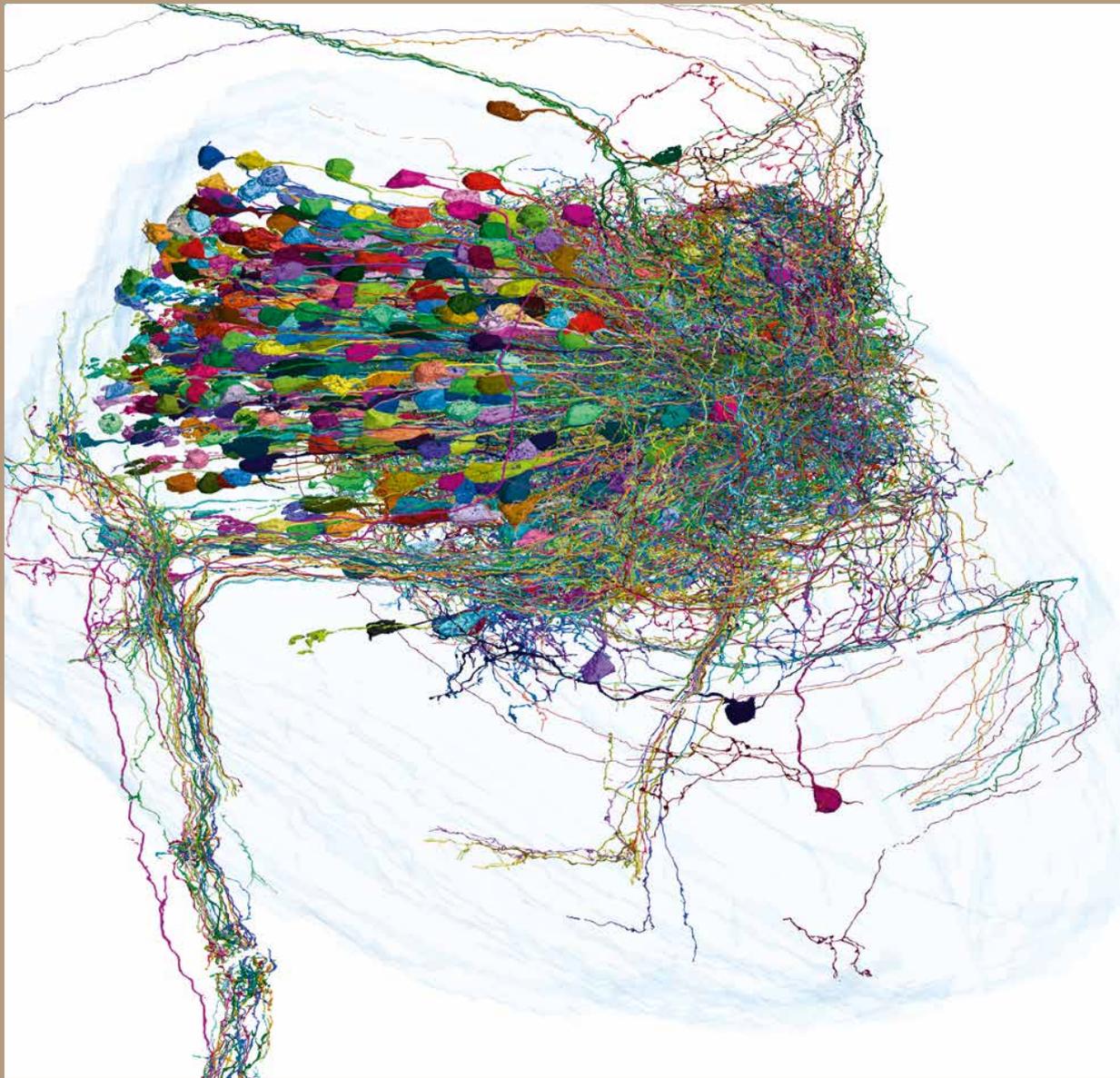
---

HAB ICH DIE WAHL?

24 | IST DAS FREIWILLIG?

30 | WILLST DU MIT MIR GEHEN?

36 | HIGHSCORE DES LEBENS



Ausschnitt aus dem Gehirn des Zebrafis: Das Bild zeigt einen kleinen Teil der Nervenzellen im sogenannten Tectum, einem eiförmigen Teil des Mittelhirns (grau unterlegt). In diesem Wirrwarr neuronaler Verbindungen wird die Entscheidung getroffen, wohin der Fisch im nächsten Moment schwimmt und ob er sich einem Objekt annähert oder sich davon abwendet. Sind diese Entscheidungen „frei“? (Größe des Ausschnitts circa 0,5 mm.)

BILD: DOMINIQUE FÖRSTER

# IST DAS FREIWILLIG?

TEXT: HARALD RÖSCH

25

„Der Mensch kann tun, was er will, aber er kann nicht wollen, was er will.“ In der Frage, ob der Mensch sein Handeln selbst bestimmt, vertrat der Philosoph Arthur Schopenhauer einen klaren Standpunkt: Einen freien Willen gibt es nicht! Bis heute haben Philosophie und Wissenschaft keine endgültige Antwort darauf gefunden. Für Herwig Baier vom Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz liegt das vor allem an den unterschiedlichen Begriffen von Freiheit.

Seit Sie heute Morgen aufgestanden sind, haben Sie bereits jede Menge vermeintlich freie Entscheidungen getroffen: graue oder schwarze Hose, Tee oder Kaffee, arbeiten oder spazieren gehen? Obwohl Ihnen natürlich bewusst ist, dass Sie gewissen Zwängen unterworfen sind, würden Sie Ihre Entschlüsse sehr wahrscheinlich als frei bezeichnen. Sie hätten sich ja auch für die jeweils andere Option entscheiden können – wenn Sie es denn gewollt hätten! Aber warum wollten Sie nicht? Womit wir wieder bei Schopenhauer sind. „Ich habe mich viel mit dieser Frage beschäftigt, eine abschließende Antwort habe ich allerdings noch nicht gefunden“, antwortet Herwig Baier auf die Anfrage, ob er als Neurobiologe etwas zum freien Willen sagen könne. Damit ist er nicht allein, schließlich hat die Frage schon die griechischen Philosophen der Antike umgetrieben, und auch die Neurowissenschaften beschäftigen sich seit einigen Jahrzehnten damit.

Als Beginn der neurowissenschaftlichen Beschäftigung mit dem freien Willen gilt ein Experiment, das der Physiologe Benjamin Libet in den 1980er-Jahren durchgeführt hat. Libet bat Testpersonen, einen im Kreis wandernden Lichtpunkt zu beobachten und an einer von ihnen selbst gewählten Position des Punktes zu beschließen, die Hand zu heben. Libets Messungen ergaben, dass die Entscheidung bereits gefallen war, ehe die Probanden die Hand hoben – 0,2 Sekunden vorher. Schon eine Sekunde vor der Bewegung konnte Libet zudem einen Anstieg elektrischer Hirnströme messen. Dieses sogenannte Bereitschaftspotenzial steigt im Vorfeld einer Bewegung immer an. Offenbar hatte also das Gehirn seine Entscheidung bereits vor der Testperson getroffen. Gegner und Skeptiker eines freien Willens zitieren das Libet-Experiment bis heute als Beleg dafür, dass das Gehirn eine Entscheidung trifft und der Mensch nur glaubt, diese sei eine Folge seines Willens.

Mehrere Forschungsgruppen haben Libets Messungen seitdem bestätigt. Uneinigkeit herrscht allerdings bis heute darüber, was sie tatsächlich bedeuten. Manche Kritiker wenden zum Beispiel ein, dass das Bereitschaftspotenzial ohnehin ständig in einem bestimmten Rhythmus steigt und sinkt und deshalb gar nicht der Grund für die Entscheidung zum Heben der Hand sein könne. Das Bereitschaftspotenzial löse die Bewegung nicht aus, vielmehr mache es sie in einer bestimmten Phase seiner Wellenbewegung lediglich wahrscheinlicher. Andere wiederum bemängeln, unter den Bedingungen des Experiments sei das Heben der Hand keine echte Willensentscheidung.

## „Der Mensch hat einen Willen wie jedes andere Lebewesen auch – ob dieser frei ist, ist Definitionssache.“

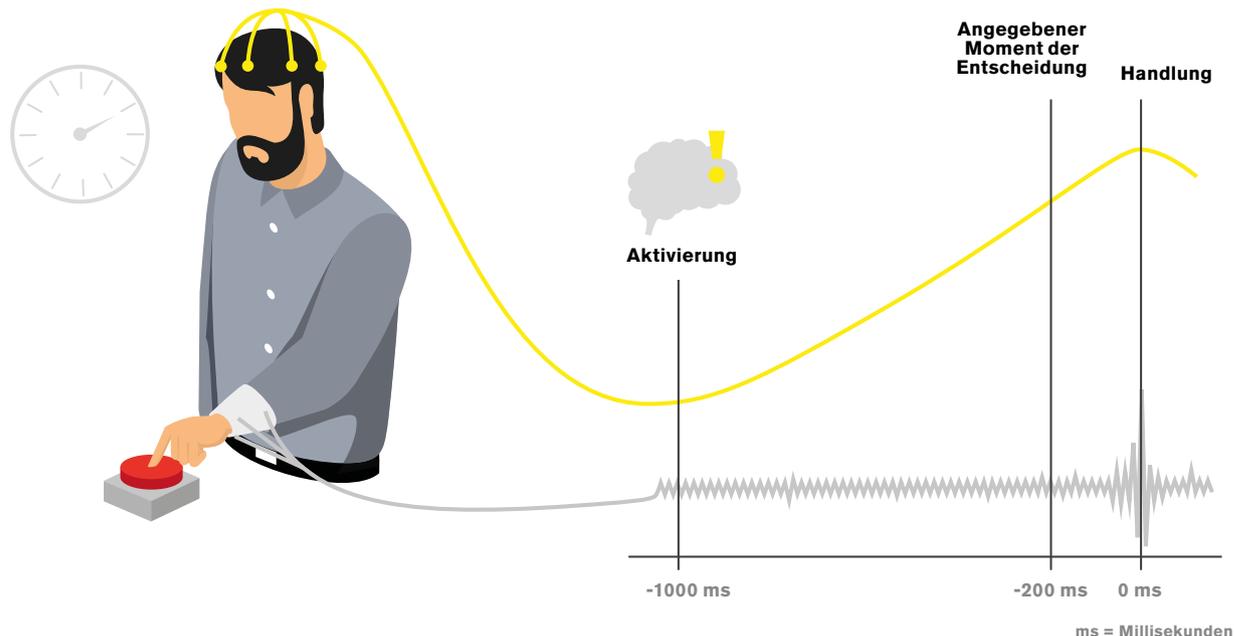
HERWIG BAIER

Und so stehen sich bis heute zwei Lager gegenüber. Ein prominenter Vertreter einer deterministischen Sichtweise, derzufolge das Handeln des Menschen eine Folge molekularer und zellulärer Abläufe ist, die nicht willentlich beeinflusst werden können, ist der Psychologe Robert M. Sapolsky. In seinem 2023 erschienenen Buch *Determined* legt er dar, dass unsere Handlungen ausschließlich das Resultat der Aktivität von Nervenzellen sind, die wiederum aus molekularen und elektrochemischen Vorgängen besteht. Der Neurogenetiker Kevin J. Mitchell argumentiert, dass ein freier Wille allen physikalischen Gesetzmäßigkeiten zum Trotz existiert, ja sogar ein Produkt der Evolution ist. Demnach wären unsere Handlungen also nicht von vornherein festgelegt.

Klare Definitionen und die Fähigkeit zum Wechsel der Perspektive – für Herwig Baier sind das Voraussetzungen dafür, Willensfreiheit zu verstehen.



FOTO: HERWIG BAIER / MPI FÜR BIOLOGISCHE INTELLIGENZ



Der Klassiker: In seinem berühmten Experiment maß Benjamin Libet die Aktivität des Gehirns (gelbe Kurve) und der Muskulatur (grau) von Testpersonen, während diese zu einem von ihnen selbst gewählten Zeitpunkt auf der „Uhr“ eine Hand hoben. Zwischen dem von den Probanden angegebenen Moment des Entschlusses bis zur Bewegung der Hand vergingen 0,2 Sekunden. Ihr Gehirn wurde jedoch schon circa eine Sekunde vor der Bewegung aktiv – offenbar hatte es schon längst entschieden, bevor dies den Probanden bewusst wurde.

27

Wie kann es sein, dass zwei renommierte Neurowissenschaftler in einer so bedeutsamen Frage entgegengesetzte Standpunkte vertreten? „Sapolsky und Mitchell meinen unterschiedliche Dinge, wenn sie vom freien Willen sprechen. Deshalb müssen wir meiner Meinung nach erst einmal definieren, was ein ‚Wille‘ überhaupt ist und was wir unter ‚frei‘ verstehen“, sagt Herwig Baier. „Einen Willen haben zwangsläufig alle Lebewesen, weil sie Absichten haben: Sie lösen Aufgaben, um am Leben zu bleiben und sich zu vermehren. Das unterscheidet lebendige von toter Materie. Um diese Aufgabe zu erfüllen, müssen Lebewesen etwas *wollen*, zum Beispiel Nährstoffe zu sich nehmen, Paarungspartner finden und überhaupt: günstige Lebensbedingungen suchen und ungünstige vermeiden.“

Einen Willen gibt es also – aber ist er auch frei? Und: Besitzen auch nicht menschliche Organismen einen freien Willen? An diesen Fragen scheiden sich noch immer die Geister. Der Schweizer Philosoph Peter Bieri zum Beispiel definierte eine Handlung als frei, wenn sie mit dem übergeordneten Ziel oder Urteil des Handelnden übereinstimmt. Demzufolge könnten auch Mäuse und Fische, vielleicht sogar Einzeller „frei“ sein. Ganz anders sah dies Daniel Dennett. Der Philosoph vertrat den Standpunkt, von allen Lebewesen besitze lediglich der sprachbegabte

Mensch einen freien Willen. Herwig Baier beurteilt die verschiedenen philosophischen Standpunkte so: „Freiheit ist kein eindeutig definierter Begriff. Für den einen ist es die Möglichkeit, aus einer Fülle von Optionen eine auswählen zu können. Für den anderen wären dies dagegen keine freien, sondern letztlich zufällige Entscheidungen. Dazu kommt, dass sich viele Menschen – und das gilt auch für Philosophen – bei dem Gedanken unwohl fühlen, dass ihre subjektiv empfundene Willensfreiheit von Nervenzellaktivität, von Hormonen, vom Stoffwechsel und von ihrer persönlichen Lebensgeschichte eingeschränkt wird. Dabei spielt es erst einmal keine Rolle, ob ein freier Wille eine Illusion oder ein reales Produkt der Evolution ist.“

## Die Fähigkeit, eine Wahl zu treffen

Auf die Frage, ob der Mensch einen freien Willen besitzt, könnte man an dieser Stelle also antworten: Einen Willen besitzt er wie jedes andere Lebewesen auch. Ob dieser frei ist, ist Definitionssache! Welches philosophische Konzept man auch immer bevorzugt, ein Wille äußert →

sich in der Fähigkeit, aus verschiedenen Handlungsoptionen eine auszuwählen – also eine Entscheidung zu treffen. Wie sich ein Organismus in einer bestimmten Situation entscheidet und was ihn dabei beeinflusst, lässt sich dann im Labor untersuchen. Herwig Baier untersucht mit seinem Team die wenige Millimeter großen Larven von Zebrafischen. Diese bieten den großen Vorteil, dass ihr Körper und ihr relativ einfach aufgebautes Gehirn weitgehend durchsichtig sind. Deshalb lässt sich die Aktivität der Nervenzellen von außen beobachten. Die Forschenden möchten herausfinden, welche Nervenzellen im Gehirn aktiv sein müssen, damit die Fischlarven ein bestimmtes Verhalten zeigen. Dafür zeigen sie den Tieren auf einem Bildschirm schwarze Punkte, die immer größer werden und dadurch ein Objekt auf Kollisionskurs simulieren. Ein derartiger Reiz löst Fluchtverhalten aus. Die Larven müssen sich nun entscheiden, wohin sie schwimmen. „Taucht ein Punkt vor einem Auge auf, dann flüchten die meisten in die entgegengesetzte Richtung. Sehen die beiden Augen unterschiedlich kräftige Punkte, so schwimmen die Larven weg vom stärkeren Reiz in die Richtung des schwächeren. Erscheint vor beiden Augen jedoch ein gleich starker Reiz, ‚gewinnt‘ meist einer der Punkte, und zwar offenbar nach dem Zufallsprinzip. Das heißt, das Gehirn entscheidet sich spontan und in Sekundenschnelle, welcher der beiden Reize wichtiger ist“, erklärt Baier. Diesen Entscheidungen liegt ein Schaltkreis aus Nervenzellen zugrunde, den Baiers Team im Mittelhirn verortet hat. Wird die Aktivität des Schaltkreises blockiert, können die Tiere nicht mehr den stärkeren Reiz auswählen und flüchten oft in die „falsche“ Richtung.

## Eine Entscheidungszentrale im Fischgehirn

Dieses Netzwerk ist also so etwas wie die Entscheidungs-zentrale der Fische. Wenn man den Fischen einen Willen zuschreiben möchte, dann wäre dieser Schaltkreis die neuronale Umsetzung davon – allerdings nur für diese spezielle Verhaltensentscheidung. In anderen Situationen „beschließen“ andere Netzwerke. „Aus neurobiologischer Perspektive gibt es nicht die *eine* Entscheidungszentrale und den *einen* Sitz des Willens, sondern viele“, betont Baier. Die oben beschriebenen

Verhaltensstrategien laufen nicht nach dem immer gleichen Schema ab. Tatsächlich kann ein und derselbe Fisch sich einmal so und einmal anders entscheiden. In einer Minderheit der Fälle entscheidet sich der Fisch, der mit zwei gleich starken Reizen konfrontiert ist, auch einfach dafür, durch die Mitte zu schwimmen.

„Die Verdrahtung im Gehirn erlaubt unterschiedliche Verhaltensantworten auf den identischen Reiz“, sagt Baier. Ist das dann freier Wille? „Es kommt ganz darauf an: Wenn man unter ‚frei‘ versteht, dass sich die Fischlarve völlig unabhängig von äußeren und inneren Einflüssen verhalten kann, dann sicher nicht. Unsere Studien zeigen, dass körperliche Zustände die Entscheidung maßgeblich beeinflussen. Je nachdem, ob ein Tier hungrig oder satt ist, gestresst oder entspannt, wird es sich im Mittel anders entscheiden. So fliehen etwa satte Fischlarven viel häufiger vor einem nur schwach bedrohlichen Reiz, während hungrige Larven meist mutiger sind – schließlich könnte der Punkt ja auch etwas Essbares sein. Bestimmt wirken sich auch zuvor gemachte Erfahrungen aus. Wenn ‚frei‘ also heißt, dass innere und äußere Einflussfaktoren an sie angepasste Verhaltensweisen auslösen, die nicht nur einem simplen Reiz-Antwort-Muster folgen, dann schon.“

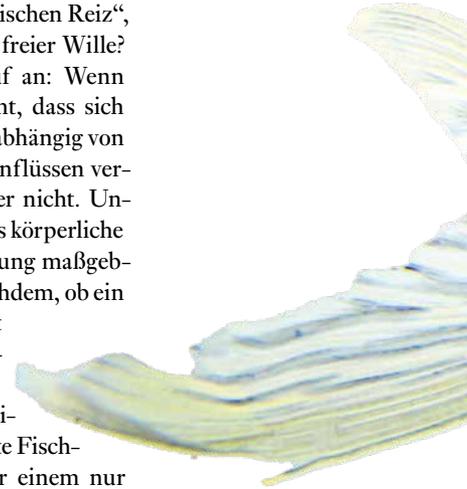
Ein Organismus muss seine individuelle Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft im wahrsten Sinne des Wortes im Kopf haben, um komplexe Entscheidungen

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Jedes Lebewesen besitzt einen Willen – nämlich das zu tun, was seinem Fortbestehen dient. Ob dieser Wille frei ist, hängt davon ab, was man unter „frei“ versteht.

Der Wille ist nicht frei in dem Sinne, dass er absolut unbeschränkt ist, denn Entscheidungen werden von einer Vielzahl innerer und äußerer Faktoren beeinflusst. Aber er ist frei, sich aus einer begrenzten Zahl an Optionen diejenige auszuwählen, die seinen Absichten und Zielen am ehesten entspricht.

Die Vorstellung eines freien Willens ist möglicherweise eine Illusion, die das Gehirn erzeugt. Ob diese Illusion nur eine Begleiterscheinung eines hochkomplexen Nervenzellnetzwerks ist oder ein Produkt der Evolution, welches das Überleben fördert, ist umstritten.



**„Die meisten Neurobiologen würden wohl die Existenz einer Seele oder eines Geistes ablehnen – zumindest beruflich.“**

HERWIG BAIER

sinnvoll treffen zu können. Er muss sich an zurückliegende Ereignisse erinnern, sich auf aktuelle Anforderungen fokussieren und vorhersehen können, was seine Handlungen bewirken werden. „Wir wissen heute, dass unsere Fischlarven all das beherrschen“, sagt Baier. Unklar ist aber noch, ob die Tiere auch die Fähigkeit zur mentalen Navigation besitzen – ob sie sich also geistig einen Weg vorstellen können, den sie nehmen werden. Zur Beantwortung dieser Frage stellt sich Baier ein Experiment vor, in dem Zebrafische eine



Zebrafische können sich an Zurückliegendes erinnern, auf Wesentliches konzentrieren und die Folgen ihres Tuns vorhersehen – alles Voraussetzungen für absichtsvolles Handeln. Aber können sie auch aus mehreren Optionen die günstigste auswählen?

Belohnung erhalten, wenn sie verschiedene Futterstationen in einer bestimmten Reihenfolge anschwimmen. Wenn Ortszellen im Gehirn, die bei Wirbeltieren an bestimmten Orten in einem Raum aktiv sind, bereits feuern, bevor das Tier die nächste Belohnungsstation erreicht hat, wäre dies ein Hinweis darauf, dass die Fische ihre eigenen zukünftigen Handlungen planen können. Und wer plant, muss sich ja verschiedene Optionen vorstellen können. Aber obwohl Zebrafisch, Fruchtfliege und Fadenwurm nachgewiesenermaßen Entscheidungen treffen, fällt es schwer, diese Fähigkeit als freien Willen zu bezeichnen. Das liegt womöglich an einer Vermischung zweier Konzepte: das eines freien Willens und das eines Bewusstseins. Diese Konfusion hat Herwig Baier zufolge auch eine falsche Interpretation des Libet-Experiments zur Folge. „Der Zeitpunkt, zu dem die Probanden nach eigener Aussage entschieden haben, den Arm zu heben, ist möglicherweise gar nicht der Moment der Entscheidung, sondern der, in dem ihnen die zuvor getroffene Entscheidung bewusst wurde. Die Entscheidung, ob sie nun frei oder unfrei war, benötigt etwas Zeit, bis wir sie als solche wahrnehmen.“

Eine Folge der Begriffsverwirrung ist, dass es absurd erscheint, bei Fliegen und Würmern von einem freien Willen zu sprechen. Schließlich billigt der Mensch Bewusstsein außer sich selbst häufig nur noch Menschenaffen und ein paar wenigen anderen hoch entwickelten Arten zu. Die Vermischung verkompliziert die Sache, denn was Bewusstsein eigentlich ist, wie man es messen kann und welche Tierarten eines besitzen, ist ähnlich komplex wie die Frage nach der Existenz eines freien Willens. Eine Gemeinsamkeit der beiden Konzepte ist, dass der Mensch auch sein Bewusstsein als

etwas vom Gehirn Losgelöstes wahrnimmt. „Die meisten meiner Kollegen würden wohl die Existenz einer Seele oder eines Geistes ablehnen, zumindest beruflich“, erteilt Baier dem philosophischen Dualismus eine Absage.

Aber warum empfinden wir es überhaupt so, als ob es in unserem Kopf mehr geben müsse als miteinander verschaltete Nervenzellen und elektrische Signale? Vielleicht hat es sich in der Evolution als nützlich erwiesen, eine solche Illusion zu haben: Ein Organismus überlebt möglicherweise eher, wenn er sich als Individuum wahrnimmt, das eigenständig entscheidet und handelt. Sie könnte aber auch nur ein Nebenprodukt eines hoch komplexen und dynamischen Nervenzellnetzwerks sein, ohne Zweck und ohne Nutzen und vor allem ohne Wirkung auf unsere Entscheidungen.

## Konsequenzen für Schuld und Strafe

Die Diskussion über einen freien Willen ließe sich als Streit in der Forschung und intellektuelle Fingerübung der Philosophie abtun, hätte sie nicht durchaus praktische Konsequenzen. Wie frei wir sind, wenn wir uns am Morgen für eine graue Hose und einen Tee entscheiden, hat zwar keine großen Folgen – ob wir jedoch zum Beispiel frei in dem Entschluss sind, eine Uhr entweder zu kaufen oder zu stehlen, dagegen sehr wohl: Wenn das Verhalten eines Individuums von Evolution, Biografie und neurophysiologischen Vorgängen vorbestimmt wäre, dann hätte dieses ja gar keine Wahl. Robert Sapolsky, der die Existenz eines freien Willens leugnet, folgert daraus, dass dies Konsequenzen für die Rechtsprechung haben sollte. Kann ein Mensch grundsätzlich nicht für sein Handeln verantwortlich gemacht werden, dann muss die Justiz dies Sapolskys Ansicht nach bei der Strafbemessung berücksichtigen – ein Gerichtsurteil kann keine persönliche Schuld feststellen, denn diese gibt es nicht. Umgekehrt sollten Wohlverhalten und Leistung viel weniger oder überhaupt nicht belohnt werden. Herwig Baier ist da anderer Meinung. Seiner Ansicht nach ergibt es durchaus Sinn, Menschen für ihr Tun zur Verantwortung zu ziehen: „Das Ahnden von Gesetzesübertretungen dient vor allem der Abschreckung. Ein Rechtssystem muss von der Autonomie des Individuums ausgehen, selbst wenn diese eine Illusion ist.“ Denn genau diese abschreckende Wirkung funktioniert dann wie einer der äußeren Faktoren, welche die Entscheidung eines Menschen im Uhrenladen beeinflussen und ihn vom Diebstahl abhalten. Zumindest für die Uhrenbranche würde es jedenfalls erhebliche Probleme mit sich bringen, wenn man sich vor Gericht auf „Schuldunfähigkeit wegen unfreien Willens“ berufen dürfte.

Individuelle Freiheiten,  
neue Lebensmodelle:  
Partnerschaften sind  
anspruchsvoller und  
komplexer geworden.  
Freiheit bedeutet  
auch, die Beziehung  
aktiver zu gestalten.



# WILLST DU MIT MIR GEHEN?

TEXT: SABINE FISCHER

FOTO: ADRIANA-VELASQUEZ / UNSPLASH

Ein Wischen nach rechts, ein Wischen nach links – nie zuvor schien es bei der Suche nach einer Partnerschaft mehr Möglichkeiten zu geben als heute, zumindest wenn man den Versprechen von Dating-Apps glaubt. Doch wie frei ist die Partnerwahl tatsächlich? Und auch die Entscheidung, ob und wann Paare Kinder bekommen? Das untersuchen Julia Leesch und Nicole Hiekel am Max-Planck-Institut für demografische Forschung.

Es ist eine unmögliche Liebe: Als Rose und Jack sich auf dem Deck der Titanic zum ersten Mal über den Weg laufen, wissen vor allem die Zuschauer, was die beiden trennt. Sie, eine gebildete junge Frau aus der gehobenen amerikanischen Gesellschaft. Er, ein mittelloser Spieler und Künstler irgendwo aus dem Mittleren Westen. Gemeinsamkeiten? Fehlanzeige. Trotz dieser Unterschiede entzündet sich zwischen den beiden eine Liebe, die Klassenschranken überwindet – aber in James Camerons Filmklassiker von 1997 doch in einer Tragödie endet.

## „Eine vermeintlich größere Auswahl führt in Sachen Partnerwahl nicht unbedingt ans Ziel.“

JULIA LEESCH

### Bedingte Wahlfreiheit

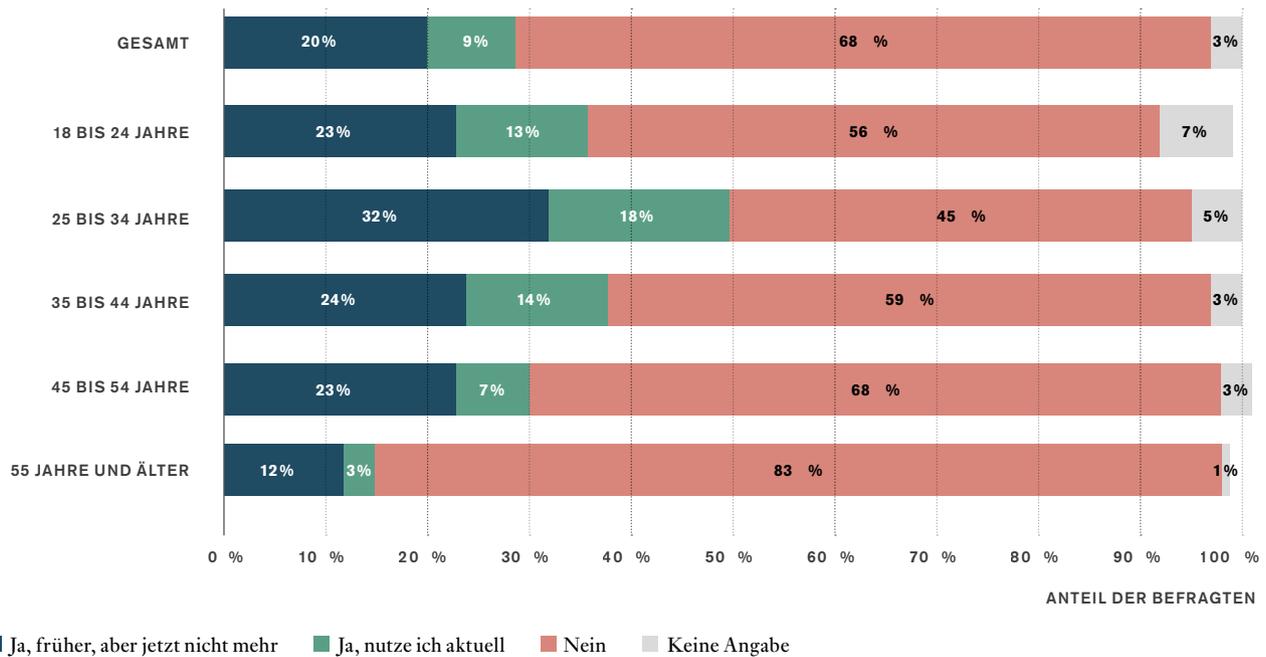
Die Literatur- und Filmgeschichte ist reich an Liebesbeziehungen über Standesgrenzen hinweg, die tragisch enden. Im Roman *Sturmhöhe* der viktorianischen Schriftstellerin Emily Brontë etwa führt die Liebe der wohlhabenden Catherine zum Stallburschen Heathcliff in eine Katastrophe. Und in Friedrich Schillers *Kabale und Liebe* scheitert die Beziehung zwischen Ferdinand, einem Adligen, und Louise, Tochter eines Stadtmusikanten, an deren bürgerlicher Herkunft. Hätten Rose und Jack also trotz großer Liebe keine Chance gehabt? In der damaligen Gesellschaft – die Titanic sank 1912 – wäre es für die beiden tatsächlich schwierig geworden: Auf der Suche nach einer Beziehung blieb Menschen kaum Wahlfreiheit. Außerhalb des eigenen sozioökonomischen Standes waren romantische Verbindungen kaum möglich – genauso unwahrscheinlich ist, dass Jack und Rose gemeinsam alt geworden wären.

Doch wie sieht das Ganze heute aus? Hätten die beiden in unserer heutigen Gesellschaft eine höhere Chance auf das gemeinsame Glück? Reiner Zufall ist es auch heute nicht, mit wem Menschen eine Beziehung eingehen: „Es gibt klar erkennbare Faktoren, nach denen Personen Partnerschaften eingehen“, erklärt Julia Leesch, die sich am Max-Planck-Institut für demografische Forschung unter anderem mit der Frage beschäftigt, welche Muster bei der Partnerwahl zu beobachten sind. Ganz frei in der Entscheidung, so eine zentrale Erkenntnis, sind wir in dieser Hinsicht nämlich nicht: „Wir sind abhängig davon, welchen Menschen wir überhaupt begegnen. Außerdem ist entscheidend, welche eigenen Präferenzen wir mitbringen und von welchen Personen unser Interesse letztlich erwidert wird. Das schränkt die Wahlfreiheit schon einmal bedeutend ein“, sagt Leesch.

Und das, obwohl Dating heute auf den ersten Blick so frei und grenzenlos erscheint wie nie zuvor. Dank Dating-Portalen wie Hinge, Tinder und anderen ploppen potenzielle Partnerinnen und Partner nicht nur zu Tausenden auf den Smartphone-Bildschirmen auf, der nächste potenzielle Partner scheint auch rund um die

Uhr verfügbar – und das gefällt: Rund die Hälfte der 25- bis 34-Jährigen haben laut einer Umfrage des Meinungsforschungsinstituts YouGov schon einmal Dating-Apps genutzt. Bei den 45- bis 54-Jährigen sind es noch 30 Prozent. Eine Studie der Universität Wien zeigt zudem, dass Dating-Apps den meisten Nutzenden das Gefühl geben, jederzeit viele potenzielle Partnerinnen und Partner zur Auswahl zu haben.

Doch frei von der Marktsituation, eigenen Präferenzen und vor allem davon, ob diese auch wechselseitig bestehen, sei man auch online nicht, erklärt Leesch. Denn auch wenn der Pool an potenziellen Partnerinnen und Partnern durch die virtuellen Plattformen erweitert werde, können auch hier nicht alle ihrer Wunschvorstellung beliebig folgen. „Forschende haben das Verhalten von Nutzerinnen und Nutzern untersucht und etwa entdeckt, dass Männer mit zunehmendem Alter bevorzugt jüngere Frauen anschreiben. In der Realität gibt es aber vergleichsweise wenige Beziehungen mit großem Altersunterschied zwischen den Partnern. Eine vermeintlich größere Auswahl führt in Sachen Partnerwahl daher nicht unbedingt ans Ziel“, so Leesch. Welche Kriterien dabei eine besonders wichtige Rolle spielen, untersucht eine groß angelegte Studie eines Forschungsteams um die US-amerikanische Wissenschaftlerin Tanya Horwitz. Das Team wertete 199 Studien aus und gewann so Erkenntnisse darüber, wie wichtig bestimmte Faktoren für die Partnerwahl waren. Yyouk Willems, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, hat die Ergebnisse dieser Studie zusammengefasst. Diese machen deutlich: Ob wir uns eine Beziehung mit einem anderen Menschen vorstellen können, entscheiden nicht etwa Ausstrahlung, Humor oder die schönen Augen des Gegenübers – wie James Cameron das bei Jack und Rose inszenierte. Die größten Gemeinsamkeiten zeigten die untersuchten Paare vielmehr bei relativ unromantischen Faktoren. Ganz oben stehen dabei das IQ- und Bildungslevel sowie das Trink- und Rauchverhalten der anderen Person.



Quelle: YouGov

Partnersuche über Datenbanken: Anteil der Internetnutzerinnen und -nutzer, die Dating-Apps nutzen, nach Altersgruppen im Jahr 2024.

„Auf Persönlichkeitsmerkmale wie die Frage, ob jemand eher introvertiert oder extrovertiert ist, kommt es anscheinend weitaus weniger an“, führt Willems aus. Auch sie war zwar auf den ersten Blick überrascht, doch inzwischen hält sie diese Ergebnisse für nachvollziehbar: „Es könnte daran liegen“, so Willems, „dass Menschen viel stärker darauf achten, wie man in einer Beziehung gemeinsam Zeit verbringt und für welche Werte die andere Person steht. Unterschiede bei den Charakterzügen scheinen Paare eher ausgleichen zu können.“

Auch die zweite zentrale Erkenntnis der Studie legt nahe, dass die Liebesgeschichte von Jack und Rose in der heutigen Zeit vermutlich kein gutes Ende nehmen würde: Denn dass Gegensätze sich anziehen, scheint bei der Partnerwahl ein Mythos zu sein. Die überwältigende Mehrheit der untersuchten Paare zeige vielmehr eine große Bandbreite an Gemeinsamkeiten. „Paare, die wirklich grundlegend unterschiedlich sind, gab es hier kaum“, sagt Willems. Vor allem was den sozialen Status angeht, und das ist auch nicht überraschend: „Menschen agieren in ihrem sozialen Umfeld und suchen hier nach Personen, die ihnen ähnlich sind.“ Wie beispielsweise Bildung die Wahl der Partnerin oder des Partners

beeinflusst, hat Julia Leesch untersucht. „Bildung ist auch ein Indikator für Dinge wie Einkommen, Werte oder Lifestyle und umfasst daher mehr als nur die Frage nach dem Bildungsabschluss. Das macht diesen Faktor besonders interessant.“ Sie hat irische Zensusdaten zu rund 100 000 jungen Frauen im Alter zwischen 25 und 34, die in einer Partnerschaft leben, ausgewertet. Dabei zeigte sich: Gleich und gleich gesellt sich gern. Im Jahr 2016 hatten etwa 60 Prozent der von Leesch analysierten Frauen einen Partner mit demselben Bildungsstand – Experten sprechen von Bildungshomogamie.

## Bildung und Kinderwunsch

Ist das reiner Zufall? „Vermutlich nicht“, sagt Leesch. Kombinierten die Forschenden rein zufällig Personen aus dem Datensatz zu fiktiven Paaren, hatten nur noch 40 Prozent denselben Bildungsstand. Der Trend zur Bildungshomogamie lasse sich heute in vielen europäischen Ländern nachweisen. Dies sei vor allem durch die Bildungsexpansion, also die wachsende Zahl von Personen mit höheren Bildungsabschlüssen, zu erklären, so Julia Leesch. „Es spielt eine große Rolle, wer bei der →

Partnerwahl überhaupt zur Verfügung steht. Wenn viele Menschen das gleiche Bildungslevel haben, wird es auch viele Paare geben, bei denen beide den gleichen Bildungsgrad haben.“

Dass die Ähnlichkeit von Bildungsgraden innerhalb von Beziehungen eine ganz wesentliche Rolle spielt, ist bekannt. „Die Forschung zeigt: In der Vergangenheit war es so, dass Ehen, in denen die Frau eine höhere Bildung besaß als der Mann, ein größeres Scheidungsrisiko hatten“, so Julia Leesch. „Das könnte daran liegen, dass diese Verteilung früher nicht den gängigen Geschlechternormen entsprach, was solche Beziehungen möglicherweise belastete.“ Hätten also Jack und Rose das Schiffsunglück beide überlebt und geheiratet, wäre die Wahrscheinlichkeit einer Scheidung wohl sehr hoch gewesen. Zumindest wären auf das Filmpaar zahlreiche sehr große Herausforderungen zugekommen. Denn die Bildung prägt auch weitere Entscheidungen über den Lebensweg massiv, zum Beispiel die Entscheidung, ob und wann ein Paar Kinder bekommt.

## Nicht nur Versorgungsgemeinschaft

Wie die Partnerschaft weitere Lebensentscheidungen beeinflusst, untersucht Nicole Hiekel, die am Max-Planck-Institut für demografische Forschung die Gruppe „Geschlechterungleichheiten und Fertilität“ leitet. Der Faktor Bildung spiele beispielsweise in Sachen Kinderwunsch eine tragende Rolle: „Hochgebildete wollen in der Regel später Kinder als Niedriggebildete, auch weil ein Studium den meisten als nicht mit einer Familiengründung kompatibel erscheint und sie erst in höherem Alter in den Arbeitsmarkt einsteigen“, so Hiekel. Hierfür seien auch sich wandelnde gesellschaftliche Rahmenbedingungen verantwortlich. Denn vor allem für Frauen hat sich die Bedeutung von Partnerschaft, Kind und Familie grundlegend verändert. „In der Vergangenheit waren Frauen meistens von ihren Ehemännern finanziell abhängig, und aufgrund der gesellschaftlichen Konventionen hinsichtlich der Geschlechterrollen konnten sie daran auch wenig ändern.“ Die Bildungsexpansion und die starke Arbeitsmarktbeteiligung von Frauen haben dazu geführt, dass sie heute in Partnerschaften finanziell unabhängiger sind. Frauen legen heute mehr in die Waag-

schale – und auch für Männer ist es heute wichtiger, dass die Partnerin zum Haushaltseinkommen beiträgt. In diesem Punkt sehen wir eine Angleichung der Geschlechter“, resümiert Nicole Hiekel.

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Partnerwahl wird oft als frei wahrgenommen, doch sie wird stärker von Gemeinsamkeiten wie einem ähnlichen Bildungsniveau und Lebensstil beeinflusst als von romantischen Vorstellungen.

Paare mit höherem Bildungsabschluss bekommen später Kinder als solche mit niedrigem Bildungsabschluss.

Durch die Bildungsexpansion und die damit verbundene finanzielle Unabhängigkeit beider Partner hat emotionale Intimität in der Partnerschaft vor allem für Frauen an Bedeutung gewonnen. Damit einhergehend stellen moderne Partnerschaften höhere Anforderungen an die Kommunikationsfähigkeit.

Die wachsende finanzielle Unabhängigkeit beeinflusst nicht nur die Partnerwahl, sondern auch die Entscheidung, eine Beziehung zu beenden: Für die meisten Menschen ist eine Partnerschaft heute viel mehr als eine Versorgungsgemeinschaft. „Die Bedeutung der Beziehung für die persönliche Entfaltung ist wichtiger geworden“, stellt Hiekel fest. Das verändert auch die Erwartungen an eine erfolgreiche Beziehung. Fühle ich mich meinem Partner nah? Spüre ich Wertschätzung? Insbesondere der Wunsch nach emotionaler Intimität hat heute einen deutlich höheren Stellenwert. Bleibt diese Erwartung unerfüllt, stehen die Zeichen für den Bestand einer Beziehung schlechter als in früheren Zeiten.

Mit diesem Wertewandel geht für Singles eine neue Freiheit einher: „Viele Menschen haben heute stärker das Gefühl, dass die eigene Identität mehrere Dimensionen hat. Partner- und Elternschaft sind klar noch immer Teile davon. Es haben sich aber gesellschaftlich alternative Räume aufgetan, in denen Menschen sich

verwirklichen können, zum Beispiel in Hobbys oder Freundschaften“, erklärt Hiekel. Dennoch bleibe eine ernsthafte und stabile Beziehung für die meisten ein zentrales Lebensziel: „Für viele hat die Vorstellung, emotionale Nähe zu einer Person zu finden, immer noch einen hohen Stellenwert. Und auch dahinter steht heute eine Art von Selbstverwirklichung, die

**„Die Bedeutung der Beziehung für die persönliche Entfaltung ist wichtiger geworden.“**

NICOLE HIEKEL



Gemeinsamkeiten verbinden: Bildung, Lebensstil und Werte, aber auch die Vorstellung von einem gelungenen Urlaub beeinflussen, wer zueinanderfindet – und zusammenbleibt.

Menschen in der Vergangenheit nicht selbstverständlich zugestanden wurde.“

Diese Selbstverwirklichung wiederum führt zu einer weiteren Form der Freiheit: Beziehungsmodelle diversifizieren sich, werden neu ausgehandelt und individuell gestaltet – von polyamoren Beziehungen, bei denen die Beteiligten gleichwertige Liebesbeziehungen mit mehreren Menschen führen, über gleichgeschlechtliche und offene Modelle, in denen Personen es einander gegenseitig erlauben, außerhalb der Beziehung Sex mit weiteren Personen zu haben. „Hier entsteht eine große Freiheit, weil der institutionelle Rahmen nicht mehr so gegeben ist und Partnerschaften stärker auf Aushandlungsprozessen beruhen“, so die Demografin Hiekel. Das führe zu Veränderungen: „Studien zeigen, dass gleichgeschlechtliche Beziehungen in der Regel gleichberechtigter organisiert sind, gerade was die Verteilung bezahlter Erwerbsarbeit und unbezahlter Sorgearbeit betrifft.“ Das deute darauf hin, dass die typische Aufteilung von Aufgaben zwischen Männern und Frauen in heterosexuellen Beziehungen oftmals gar nicht darauf abziele, für alle das Beste rauszuholen – also den Nutzen zu maximieren. Vielmehr scheinen diese Partnerschaften immer noch stark von tradierten Rollenbildern geprägt zu sein, so Hiekel. „Es könnte auch sein, dass weniger kon-

ventionelle Lebensformen den Menschen mehr Raum geben, sich selbst zu definieren“, führt die Forscherin weiter aus. Ähnliches beobachte man auch bei heterosexuellen Paaren, die unverheiratet zusammenleben. „Dass diese Form der Beziehung vor dem Gesetz nicht anerkannt ist, führt unter anderem dazu, dass die Paare weniger stark dazu neigen, ihre Einkommen zusammenzuführen.“

Gleichzeitig schafft der neu gewonnene Gestaltungsspielraum aber auch neue Herausforderungen: „Eine Partnerschaft jenseits hergebrachter Normen und Praktiken auszuhandeln, sei es hinsichtlich sexueller Monogamie, einer geschlechtsunabhängigen Arbeitsteilung oder der Grenzziehung zwischen gemeinsamem und eigenem Eigentum, erfordert Ressourcen, allen voran Kommunikationsfähigkeit. Das ist anspruchsvoll, und da sind Menschen nicht mit den gleichen Kompetenzen ausgestattet“, so Nicole Hiekel. „Freiheit heißt auch, dass jede und jeder eine große Verantwortung übernimmt, die eigene Beziehung nachhaltig zu gestalten.“ Und mal abgesehen davon, dass Beziehungsmodelle und Partnerschaften heute in mancher Hinsicht anspruchsvoller und komplexer geworden sind als zu Zeiten von Rose und Jack: Auch in der heutigen Zeit hätte es die Liebe der beiden nicht ganz leicht.

Pinball: Das Leben gleicht einem Flipper-spiel – die Chancen auf Gesundheit und Wohlstand sind ungleich verteilt. Wer schwierige Startbedingungen vorfindet, schafft Erfolg und Aufstieg nur mühsam. Bei gutem Start erreichen Spielende dagegen Topwerte.



# HIGHSCORE DES LEBENS

TEXT: MICHAELA HUTTERER

FOTO: ADOBESTOCK

37

Gene, Umwelt, Gesellschaft – es sind Faktoren, die wir nicht frei wählen können, die uns jedoch prägen und dabei auf erstaunliche Weise zusammenwirken.

Traumatische Erfahrungen und die Lebensumstände steuern die Aktivität unserer Gene. Wie genetische Voraussetzungen und soziale Benachteiligung in jungen Jahren interagieren und was wir dagegen tun können, untersucht Laurel Raffington am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin.



Als Entwicklungspsychologin untersucht Laurel Raffington, wie soziale Ungleichheit und genetische Veranlagung die Entwicklung von Kindern und Jugendlichen beeinflussen.

38

Zwei Spieler stehen an einem besonderen Flipperautomaten: „Genetic Pinball“ prangt darüber. Beide wollen den Highscore knacken und möglichst viele Punkte in den oberen Bereichen des Spielfelds holen: Bildung, Gesundheit und Status. Der Zufall gibt dabei nicht nur vor, wie groß der Flipperball ist – er steht für die genetische Disposition –, sondern auch, wo der Ball ins Spiel kommt. Spieler 1 entstammt in dieser Runde einer wohlhabenden Familie. Sein Ball ist groß, er startet nahe an den punktetragenden Bereichen wie Bildung und Gesundheit. Spielerin 2 hat weniger gute Startbedingungen: Das Geld ist knapp, auch für Schulbildung und Gesundheit. Sie startet auf der anderen Seite des Spielfelds, und ihr Ball ist um einiges kleiner als der ihres Mitspielers. Während dessen Ball mühelos Punkte sammelt, bringt Spielerin 2 ihren Ball nur mit viel Geschick in die punktetragenden Bereiche. Viel zu oft landet er im Aus oder fällt in eines der Löcher im Spielfeld, in die nur die kleinen Kugeln fallen können. Sie stehen für Widrigkeiten im Leben wie etwa ein undurchlässiges Bildungssystem. Hat Spielerin 2 überhaupt Chancen, den Highscore zu knacken?

Was im Spiel reichlich unfair anmutet, ist in Wahrheit eine Erkenntnis aus einer psychologischen Forschungsarbeit aus dem Jahr 2020, die eine Agentur als Video-

spiel umgesetzt hat. Von Mai bis Oktober konnten Besuchende auf dem Ausstellungsschiff MS Wissenschaft testen, ob und wie sich Gene und sozioökonomische Faktoren auf das spätere Leben auswirken. Umstände, die sie nicht frei wählen konnten, weil sie – wie unsere genetische Disposition – durch den Zufall vorgegeben werden.

## Frühkindliche Prägungen erkennen

„Wir haben keinen Einfluss darauf, mit welchen Genen wir geboren werden oder in welcher Familie wir aufwachsen oder in welchem Land“, sagt Entwicklungspsychologin Laurel Raffington. „Aber unsere Gene und wie wir aufwachsen, die Umgebung, die Ernährung, der Stress in der Familie – all das hat Einfluss auf unsere Gesundheit im späteren Leben.“ Raffington leitet die Forschungsgruppe „Biosocial“ am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin. Gemeinsam mit ihrem Team erforscht sie, wie sich soziale Ungleichheit und die Lebensführung auf die Funktion, genauer die Steuerung der Gene auswirken und zu unterschiedlichen Entwicklungen in den Bereichen Bildung und Gesundheit über die Lebensspanne hinweg führen.

Jahrzehntlang galt das menschliche Erbgut oder Genom als bestimmender und unveränderlicher Bauplan des Lebens. Ob Aussehen, Persönlichkeit oder Krankheitsrisiko: Jede Information ist in unserer DNA in Form unterschiedlicher Sequenzen der Basen Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin gespeichert. Dabei hat jede unserer gut 250 verschiedenen Zellarten dieselbe Gensequenz, aber nicht alle Gene sind in allen Zellen aktiv. Die Leber bildet Leberzellen, die Haut Hautzellen. Was bestimmt also, welche Zelle welche Gene nutzt? Biochemische Prozesse schalten bestimmte Gene stumm und verhindern, dass diese abgelesen werden können. Diese epigenetischen Markierungen steuern, welche Gene aktiv sind, und sind – anders als die DNA – durchaus flexibel: Das epigenetische Profil eines Menschen reagiert auf äußere Einflüsse. Besonders auf schädliche.

„Wir wissen, dass Kinder aus sozial benachteiligten Familien häufiger ungünstigen Lebensbedingungen ausgesetzt sind, etwa ungesünderer Ernährung, stärkerer Luftverschmutzung an

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Menschliche Entwicklung geschieht durch ein komplexes Zusammenspiel von genetischen Eigenschaften, Umweltfaktoren und gesellschaftlichen Strukturen.

Welche genetischen Veranlagungen sich ausprägen, hängt von unseren Lebensumständen vor und nach der Geburt ab.

Die Epigenetik zeigt, dass unser biologisches Alter durch sozioökonomische Ungleichheit (Armut) und Ernährung bedingt ist.

---

# „Menschliche Entwicklung geschieht durch ein Zusammenspiel aus Genen, Umwelt und Gesellschaft.“

LAUREL RAFFINGTON

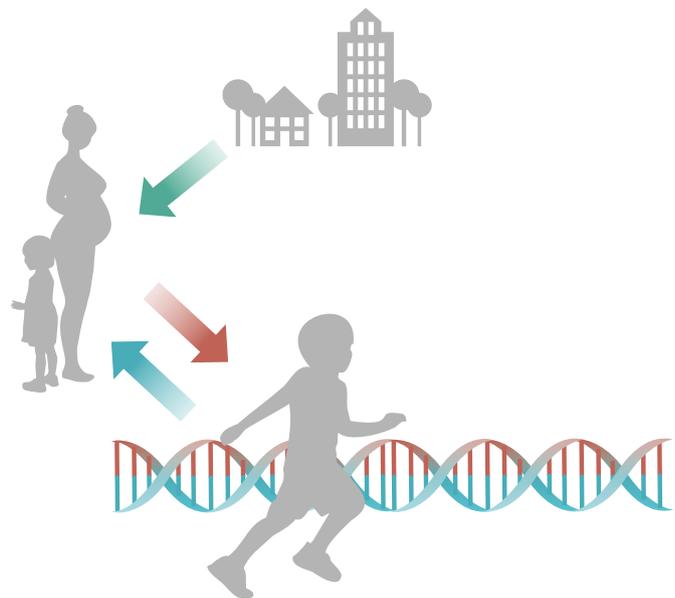
weniger naturnahen Wohnorten oder Umweltgiften, aber auch mehr familiärem Stress“, sagt Laurel Raffington. „Sie haben ein erhöhtes Risiko für einen geringeren Bildungserfolg und eine Vielzahl von Erkrankungen.“ Doch lässt sich dies auch am epigenetischen Profil betroffener Kinder ablesen? Schließlich zeigen sich die Auswirkungen widriger Umstände in der Kindheit oftmals erst Jahrzehnte später.

Um das herauszufinden, haben Laurel Raffington und ihr Team Speichelproben von gut 3200 Jugendlichen zwischen acht und 18 Jahren in den USA untersucht. Dabei machten die Forschenden die Beobachtung, dass Kinder aus einem sozial benachteiligten Umfeld bereits epigenetische Profile aufwiesen, die in früheren Studien an Erwachsenen mit einem schlechteren Gesundheitszustand in Verbindung gebracht wurden, wie etwa einem erhöhten Risiko für Fettleibigkeit, und einem höheren biologischen Alter. „In vorherigen Studien war bereits gezeigt worden, dass Kinder, die in finanzieller Armut aufwachsen, später eine höhere Krankheitslast und eine kürzere Lebenserwartung haben“, sagt Laurel Raffington. „Wir glauben nun Messungen entdeckt zu haben, die diesen ‚langem Arm‘ der Kindheit in Echtzeit aufzeichnen können – und damit den langfristigen Effekt von Umwelteinflüssen und Entwicklungsprozessen in der Kindheit.“

Dabei prägen uns nicht nur physische Erfahrungen, sondern auch psychische: 2015 entdeckte Elisabeth Binder, Direktorin am Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München, dass sich Traumata der Mutter aus Kinder-

tagen später an deren Kinder vererben. „Wir konnten bei den Kindern epigenetische Veränderungen an einem Gen feststellen, das an der Stressbewältigung beteiligt ist“, berichtet die Neurowissenschaftlerin. Die Gewalterfahrungen von 32 Müttern während des Holocausts prägten bei ihren Kindern die Steuerung des Gens, das das Stresshormonsystem kontrolliert. Da die Kinder die Erfahrungen der Mütter nicht geteilt hatten, müssen sie von den Eltern übertragen worden sein.

Gewalterfahrung hinterlässt also auch im Epigenom Spuren. Elisabeth Binder erforscht, wie genau die genetische Veranlagung und äußere Einflüsse bei psychiatrischen Erkrankungen zusammenspielen und das Risiko dafür erhöhen. „Negative Lebensereignisse haben eine starke Auswirkung auf das Risiko für psychiatrische Erkrankungen. Und das Risiko ist besonders ausgeprägt,



Wechselwirkung: Lebensumstände und genetische Veranlagung beeinflussen unsere Gesundheit. Gesundheit wiederum beeinflusst die Genaktivität – bereits im Mutterleib und über die Lebensspanne hinweg.

wenn diese Ereignisse in der Kindheit stattgefunden haben“, sagt Binder. Ein Grund dafür liege in der Hirnentwicklung, die erst mit Anfang 20 abgeschlossen sei. Davor ist das Gehirn besonders empfänglich für Einflüsse von außen – im positiven wie negativen Sinne.

Bekannt ist auch: Die epigenetische Prägung durch Traumata, die Ernährungslage während der Schwang- →

gerschaft, Umweltgifte oder Rauchen wird offenbar weitergegeben, und zwar über Generationen hinweg. Das zeigen Studien der transgenerationalen Epigenetik an Tieren. Wie der Prozess bei Menschen funktioniert, ist noch Gegenstand der Forschung. Kinder etwa, die während des holländischen Hungerwinters 1944/1945 zur Welt kamen, neigten als Erwachsene zu Übergewicht. Rein genetisch findet sich dafür keine Erklärung.

Dabei offenbart die epigenetische Forschung auch konstruktive Erkenntnisse: „Dass wir epigenetische Markierungen bei Kindern gefunden haben, bedeutet nicht, dass deren Entwicklung irreversibel vorgezeichnet ist“, sagt Raffington. „Weil epigenetische Markierungen auf Genen veränderlich sind, können sie etwa stumm geschaltete Gene wieder aktivieren und so die Gesundheit beeinflussen.“ So erklärt sich auch, warum nicht alle Menschen mit derselben Veranlagung etwa

für Diabetes diese Krankheit auch bekommen oder warum bei manchen ein erhöhtes Risiko für Fettleibigkeit in Adipositas umschlägt und bei manchen nicht. Erkenntnisse liefert da vor allem die Zwillingforschung. „Zwillinge, auch eineiige, versterben oft an unterschiedlichen Krankheiten trotz identischen Genpools. Die Wahrscheinlichkeit, dass man an einer koronaren Herzkrankheit stirbt, wenn man einen eineiigen Zwilling hat, der an einer koronaren Herzkrankheit verstorben ist, liegt bei etwa 40 Prozent, nicht 100, und diese Zahl variiert nach Geschlecht und Alter.“

Für Laurel Raffington belegen diese Beobachtungen, dass das Zusammenspiel von Genen und Umwelt ein Entwicklungsprozess ist. „Bis zu einem gewissen Grad können wir die Weichen, die in der Jugend gestellt werden, vermutlich noch umlegen.“ Sie verweist auf Studien, die zeigen, dass sich das epigenetische Profil verbessert, wenn sich Menschen gesünder ernähren oder

Auf dem Ausstellungsschiff MS Wissenschaft konnten Jugendliche beim Spiel „Genetic Pinball“ testen, wie Veranlagung und Lebensumstände das eigene Leben prägen.



FOTO: ILJA C. HENDEL / WISSENSCHAFT IM DIALOG

aufhören zu rauchen. Rauchen verändert das Epigenom von Lungenzellen, Gene können so krankheitsfördernde Eigenschaften bekommen: „Wenn eine Person aufhört zu rauchen, macht sich das im epigenetischen Profil positiv bemerkbar. Aber eventuell ist der Effekt im Vergleich zu frühkindlichen Prägungen kleiner, das wissen wir noch nicht so genau“, erklärt Raffington. Sicher ist: Je eher sich die Lebensumstände und -führung ändern, desto geringer das Risiko, eine Disposition für ein Altersleiden zu aktivieren.

## Weichen frühzeitig stellen

„Wir sehen, dass die Weichen für ein jüngeres epigenetisches Alter möglichst früh gestellt werden sollten“, sagt die Wissenschaftlerin. Raffington bezieht sich besonders auf die soziale Ungleichheit. „Unsere Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Armut in einem sehr frühen Lebensalter, etwa bei der Geburt, besonders prägend für die spätere Gesundheit sein kann.“ Als notwendige Konsequenz sollten gerade sozioökonomisch schwache Familien unterstützt werden, wenn die Kinder noch sehr klein sind, erinnert sie.

Wie bedeutend finanzielle Unterstützung sein kann, zeigt eine US-amerikanische Studie, an der Laurel Raffington und Elisabeth Binder beteiligt sind. In der Studie „Baby’s First Years“ erhielten finanzschwache alleinerziehende Mütter in den USA ab der Geburt ihres Kindes sechs Jahre lang monatlich etwa 330 Dollar. Ein Novum für die USA: Unterstützungsleistungen wie etwa das deutsche Kindergeld gibt es nicht; einzig während der Pandemie erhielten Eltern einen Steuernachlass. Mittlerweile sind diese Kinder nahezu sechs Jahre alt. In der Studie untersuchen die Forschenden, ob die finanzielle Unterstützung nicht nur die Lebensumstände der Kinder verändert, sondern auch deren epigenetische Profile beeinflusst hat. „Erste Ergebnisse zeigen, dass die Mütter mehr Geld für ihre Kinder ausgegeben und mehr Zeit mit ihnen verbracht haben. Hinweise für das oft vorgebrachte Vorurteil, das Geld fließe in Alkohol und Zigaretten, fanden sich nicht“, sagt Raffington. Erste epigenetische Auswertungen wollen die Max-Planck-Forscherinnen im kommenden Jahr veröffentlichen.

Studien zur epigenetischen Prägung von Kindern helfen nicht nur, mehr über die Gen-Umwelt-Interaktion zu erfahren, die uns prägt, sondern bieten Impulse auch für

Politik und Gesellschaft. „Als Individuen haben wir keine Wahlfreiheit, unsere genetische Disposition oder Familie auszusuchen“, gibt Raffington zu bedenken. „Als Gesellschaft haben wir jedoch die Freiheit, soziale Ungleichheit anzugehen und unsere Bildungs- und Gesundheitssysteme zu optimieren.“

Wie leicht sich Strukturen – zumindest im Spiel – ändern lassen, können Interessierte am genetischen Flipperautomaten selbst ausprobieren. Laurel Raffington und ihr Team konzipierten mit dem Spieleentwickler Purple Sloth einen zweiten Level, bei dem Spielende wichtige Parameter des Spielfelds ändern und etwa soziale Ungleichheiten beseitigen können. Auf der MS Wissenschaft nutzten die Spieler Level 2, um etwa den Zugang zu Bildung für Kinder aus nichtakademischen Haushalten zu verbessern. Das wäre schon mal eine Pinball-Falle weniger für die weniger privilegierte Kugel.

[www.mpg.de/podcasts/laurel-raffington](https://www.mpg.de/podcasts/laurel-raffington)



Wovon hängt Erfolg im Leben ab, und was können wir frei wählen? Einfach QR-Code scannen und online testen.

## GLOSSAR

### EPIGENETIK

Der Begriff bezeichnet ein Teilgebiet der Biologie und beschäftigt sich mit zellulären Prozessen, welche die Aktivität von Genen beeinflussen.

### EPIGENOM

Es umfasst alle chemischen Veränderungen an der DNA und den daran gebundenen Proteinen (etwa Histone), die die Aktivität der Gene steuern, ohne die DNA-Sequenz selbst zu verändern. Diese Veränderungen beeinflussen die Funktion der Zellen.

### BIOLOGISCHES ALTER

Es gibt den Gesundheits- und Funktionszustand des Körpers wieder, gemessen an seiner tatsächlichen Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Es kann von der Anzahl der Lebensjahre abweichen.



Als Kind hat Meeyoung (genannt Mia) Cha einen Traum: Sie möchte Astrophysikerin werden. Ihr Weg verläuft jedoch anders. Nach einer harten Schulzeit wird sie sich nicht den Sternen, sondern der Informatik widmen. Heute untersucht sie als Direktorin am Max-Planck-Institut für Sicherheit und Privatsphäre, wie künstliche Intelligenz und soziale Medien die Gesellschaft verändern.

TEXT: FINN BROCKERHOFF

Termine wie der heutige stehen für Mia Cha seit gut einem Jahr immer häufiger auf dem Programm: ein Konferenzsaal; Mia Cha am Rednerpult; drum herum Dutzende Vertreterinnen und Vertreter aus Politik und Wirtschaft. Dieses Mal sind es Delegationen aus Deutschland und Südkorea, die sich in der futuristischen Kulisse der Gläsernen Manufaktur, einer E-Auto-Fabrik von Volkswagen in Dresden, für das jährliche Deutsch-Koreanische-Forum zusammengefunden haben. Sie wollen über zukünftige Kooperationen der beiden Länder beraten. „Ich denke, eine Zusammenarbeit von Deutschland und Korea im Bereich der künstlichen Intelligenz birgt großes Potenzial für beide Länder“, konstatiert Mia Cha, seit Dezember 2023 Direktorin am Max-Planck-Institut für Sicherheit und Privatsphäre in Bochum.

Mia Cha, die mit Big Data sozialwissenschaftliche Fragestellungen untersucht, war von den Veranstaltern des Forums eingeladen worden, um einen Überblick über die Möglichkeiten und die Bedeutung einer länderübergreifenden Kooperation im

Bereich der KI zu geben. Als koreanische Informatikerin an einem deutschen Forschungsinstitut hat sie tiefen Einblick in die Forschungsinfrastrukturen beider Länder und sieht sich selbst als Vermittlerin in der wissenschaftlichen Zusammenarbeit.

„Deutschland hat einen starken Industriesektor und bietet etwa an den Instituten der Max-Planck-Gesellschaft unvergleichliche Forschungsmöglichkeiten“, sagt Mia Cha. Korea wiederum habe viele junge Talente im Bereich der KI-Forschung – nicht zuletzt, weil die Jugend in den koreanischen Science High Schools früh an die Wissenschaft herangeführt werde. „Ich habe in meiner Jugend selbst eine solche Highschool besucht und in Korea studiert. Ich weiß aus eigener Erfahrung, wie umfangreich und wie gründlich die wissenschaftliche Ausbildung in Korea ist“, berichtet Mia Cha.

Dass sie eine wissenschaftliche Karriere gewählt hat, verdankt Cha nach eigener Aussage maßgeblich ihrem Vater. Während die beiden damals auf dem Weg zu Mias Grundschule durch den dichten Nebel liefen, der ihre Heimatstadt Chunchon in der nördlichen Provinz Gangwon fast jeden Morgen einhüllte, erzählte der Vater ihr von seiner Arbeit. „Als Professor für Nuklearphysik hatte er unter anderem die Aufgabe, nahe der Grenze zu Nordkorea Wasserproben aus Flüssen zu entnehmen und anhand der radioaktiven Belastung herauszufinden, ob Nordkorea Atomtests durchführt. Er brachte mir vieles über Kernreaktionen bei, auch über jene im Weltall. Er erklärte mir, wie Sterne geboren werden und wie sie sterben. Das hat mich damals total fasziniert.“ In ihrem Kopf →

# BESUCH BEI

---

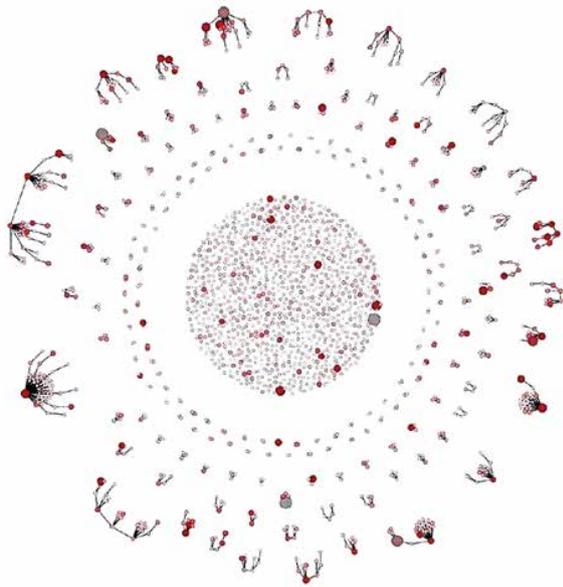
MEEYOUNG  
CHA

FOTO: MPI FÜR SICHERHEIT UND PRIVATSPHÄRE

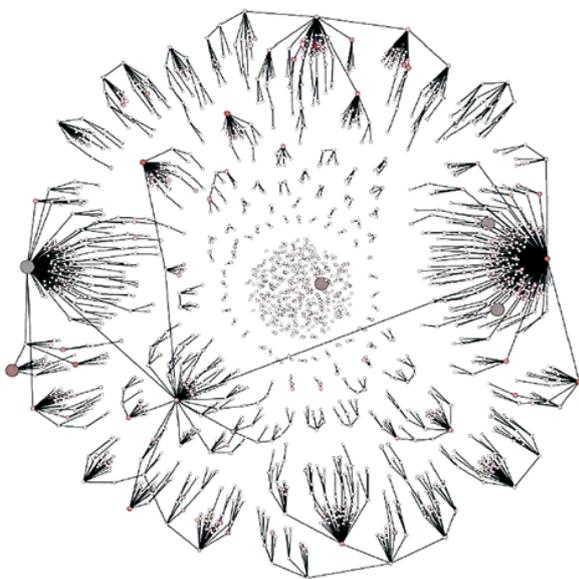


43

An der Schnittstelle von Informatik und Gesellschaft: Meeyoung (genannt Mia) Cha untersucht unter anderem, wie Menschen über das Internet in Verbindung treten und wie sich Informationen über die sozialen Medien verbreiten.



Jeder Punkt steht für einen Twitter-Account, der zu einem bestimmten Gerücht (oben) oder zu einem Fakt (unten) postet, jede Linie für einen Retweet oder Reply. Beide, Gerücht und Fakt, sind populär (hohe Anzahl der Punkte), doch User interagieren beim Fakt bereitwilliger. Diese Graphen, die mithilfe künstlicher Intelligenz erstellt wurden, unterstützen Faktenchecker beim Sichten großer Datenmengen.



formte sich schnell ein detailliertes Bild der Welt dort oben – und bald auch der Wunsch, Astrophysikerin zu werden.

Als Mias Eltern ihr daraufhin vorschlugen, ihre schulische Laufbahn an einer erst kürzlich eingerichteten Science High School in der nahen Stadt Wonju

fortzusetzen, willigte Mia ein. „Diese koreanischen Highschools sind sehr exklusive Einrichtungen mit einer sehr schwierigen Aufnahmeprüfung und einer fast schon garantierten Perspektive. Man verbringt praktisch seine gesamte Schulzeit im Wohnheim, lernt von morgens 8:00 Uhr bis abends 23:00 Uhr“, erklärt Mia Cha. Für viele sei diese Laufbahn sehr anstrengend, aber dennoch eine gute und bereichernde Zeit. Bei ihr selbst sei es jedoch leider ganz anders gewesen: Weil ihr keine Zeit mehr für Vorbereitungskurse blieb, schaffte die junge Mia die Aufnahmeprüfung nur knapp: „Ich war das Schlusslicht der Klasse. Und anders als heute haben damals nur sehr wenige Mädchen die Science High School besucht, und ich hatte so gut wie keine Freunde dort. Schon nach wenigen Wochen habe ich alles dort gehasst und wollte nur noch weg.“ Sie entschied sich für die Flucht nach vorne: ein Hochbegabten-Programm. Tatsächlich avancierte sie zu einer der besten Schülerinnen und schaffte den Abschluss in zwei statt drei Jahren. Doch der Preis war hoch: „Ich habe einige Jahre gebraucht, um mich psychisch von der Belastung zu erholen.“

Obwohl Mia Cha ihre Highschool-Zeit rückblickend als stärkende Erfahrung sieht, die sie für ihr weiteres Leben abgehärtet hat, wünscht sie ihren Kindern doch auf keinen Fall eine so unangenehme Schulzeit. Als Mia Cha im Frühjahr 2024 mit ihrer Familie von Korea nach Bochum zog, achtete sie daher sehr darauf, wie es ihren beiden Kindern an den neuen Schulen in Deutschland ergeht. „Meine Tochter ist zwölf und besucht ein städtisches Gymnasium, und mein sechsjähriger Sohn ist im vergangenen Sommer in die Grundschule gekommen. Abgesehen von zwei zusätzlichen Deutschstunden pro Woche nehmen sie am normalen Unterricht teil und kommen gut zurecht“, erzählt Mia Cha. „Sie sprechen inzwischen bereits viel besser Deutsch als ich. Und wenn ich frage, wie es in der Schule läuft, antworten beide immer nur, dass ich mir nicht so viele Sorgen machen soll.“

Auch wenn Mia Cha die Torturen, die sie während ihrer Highschool-Zeit erlebt hat, nicht vergessen wird, hatte sie dank ihrer exzellenten schulischen Leistungen immerhin die Möglichkeit, ohne die sonst üblichen Aufnahmebedingungen am renommierten Korea Advanced Institute of Science and Technology (Kaist) zu studieren. Nur zu gern hätte sie ihren Traum, Astrophysikerin zu werden, nun endlich Realität werden lassen. Doch einen Studiengang Astrophysik gab es am Kaist nicht.

Auf Empfehlung ihres Vaters nahm sie daher 1998 das Informatikstudium auf. „Er meinte, in der Astrophysik würden immer mehr Leute für die Auswer-

tung der großen Datenmengen gesucht, wofür Programmierkenntnisse die wichtigste Grundlage seien.“ Doch wirkliche Erfahrung im Programmieren hatte sie bis zu diesem Zeitpunkt kaum gesammelt. „Mein Vater war allerdings einer der Ersten in meiner Heimatstadt, die damals bereits im Büro einen Internetzugang hatten. Als ich im Sommer 1995 zwei Wochen Schulferien hatte, durfte ich es selbst ausprobieren. Es gab zwar nur ein paar Dutzend Websites, die haben mich aber direkt in den Bann gezogen.“

Sofort packte Mia Cha der Wunsch, ihre eigene Webseite zu programmieren. Da sie jedoch keinen Zugriff auf Anleitungen oder Bücher zu dem Thema hatte, erschloss sie sich stattdessen aus dem Quelltext der bestehenden Webseiten, welche Befehle welchen Effekt haben. „Ich habe also ein paar Tage damit verbracht, meine eigene Webseite zu entwickeln, und mir auf diese Weise ein rudimentäres Programmierverständnis selbst beigebracht.“ Auf dieser technischen Grundlage hat sie später an der Universität mit der gleichen Motivation schnell aufgebaut. „Im Informatikstudium blühte ich zum ersten Mal so richtig auf – und habe angefangen, das Leben zu genießen.“ In dieser Zeit nahm sie sich endlich auch für private Dinge die Freiheit, die ihr in ihrer Jugend durch das ewige Lernen versagt ge-

Hinterfragen. „Ich war selbst nie ein Guru in Sachen Programmierung. Aber weil ich in meiner Kindheit viel Zeit allein verbracht habe, war ich schon immer oft in meiner eigenen Gedankenwelt und konnte mir Dinge sehr gut bildlich vorstellen. Und ich glaube, das hilft mir heute bei der Forschung.“ Das zeigte sich für Mia Cha beispielsweise, als sie an ihrer Dissertation arbeitete.

Mitte der 2000er-Jahre war IPTV, also die Übertragung von Fernsehprogrammen und Filmen mithilfe des Internetprotokolls, groß im Kommen. Doch die Netzwerke der damaligen Zeit waren den Anforderungen noch nicht vollends gewachsen. Oftmals erreichten Datenpakete auf dem Weg vom IPTV-Anbieter zum Endnutzer ihr Ziel nicht, weil bestimmte Routen überlastet waren. Dadurch kam es zu Aussetzern und Fehlern bei der Übertragung. „Ich habe mir daher in meiner Dissertation überlegt, wie sich die Zuverlässigkeit der Datenübertragung erhöhen lässt.“ Hierfür suchte Mia Cha nach einem Algorithmus, der für jede „verstopfte“ Route die besten Alternativen und Umleitungen berechnet. Dieses Problem war eigentlich rein mathematischer Natur. „Als ich mir die komplexen Übertragungswege der Daten aber bildlich vorstellte, war mir sofort klar, dass das Problem mehrschichtig war. Die Wahl der besten Route in der Praxis hängt stark vom

## „Im Informatikstudium blühte ich zum ersten Mal so richtig auf.“

blieben war. „Zum Beispiel fuhr ich damals einen schicken Sportwagen“, erzählt die Wissenschaftlerin lachend.

An der Informatik gefällt Mia Cha vor allem die Vielfalt der Möglichkeiten. „Einige Teilbereiche sind ziemlich abstrakt und mathematisch, andere sehr konkret und anwendungsbezogen.“ Außerdem lasse sich die Informatik mit so ziemlich jeder anderen wissenschaftlichen Disziplin verknüpfen – egal ob Wirtschafts-, Umwelt- oder Sozialwissenschaften –, weil inzwischen überall Methoden aus der Informatik für die Forschung eingesetzt würden. „Gerade durch Big Data, Deep Learning und künstliche Intelligenz haben sich die Möglichkeiten noch einmal drastisch erweitert“, sagt Mia Cha. „Es kommt dabei gar nicht so sehr darauf an, gut programmieren zu können.“ Viel wichtiger seien das Denken und

Nutzungsverhalten der Kunden ab.“ Sie folgerte daraus, dass es für die Auslastung bestimmter Routen ein vorhersagbares Muster geben müsse, welches von soziodemografischen Faktoren wie etwa der Bevölkerungsdichte, der Altersverteilung oder der politischen Orientierung abhängt. „Wo leben die Menschen? Wie setzen sich die Haushalte zusammen? Für welche Themen interessieren sie sich? All das beeinflusst die Auslastung der Netzwerke.“ Mia Cha analysierte deshalb die Fernsehgewohnheiten von einer Viertelmillion IPTV-Nutzerinnen und -nutzern und optimierte mit den Ergebnissen den Verteil-Algorithmus.

„Dabei ist mir klar geworden, dass die Kombination aus Informatik und Sozialwissenschaft in der Gesellschaft Dinge zum Positiven verändern kann“, erzählt die Wissenschaftlerin. Als sie im Anschluss an

→

ihre Dissertation für zwei Jahre als Postdoktorandin ans Max-Planck-Institut für Softwaresysteme in Saarbrücken ging, rückten die sozialwissenschaftlichen Fragestellungen immer mehr in den Fokus ihrer Forschung. „Ich interessierte mich dafür, wie Menschen über das Internet in Verbindung treten und wie sie durch die sozialen Medien miteinander verbunden sind.“ 2010 veröffentlichte sie die Studie *The Million Follower Fallacy*, in der sie an-

das sahen, fühlten wir uns in der Verantwortung, etwas dagegen zu unternehmen. Aus diesem Grund haben wir damals die Aktion *Facts before Rumors* gestartet, mit der wir den Fake News praktisch zuvorkamen. Wir kannten dank unserer Forschung ihre Verbreitungsmuster, folglich konnten wir überall auf der Welt gezielt Faktenchecks verbreiten, noch bevor die entsprechenden Falschinformationen überhaupt dort angekommen waren.“

## „Wir haben Faktenchecks verbreitet, noch bevor die Falschinformationen angekommen waren.“

hand der Analyse von 54 Millionen Twitter-Konten zeigte, dass Nutzerinnen und Nutzer mit einer großen Follower-Zahl nicht zwangsläufig auch großen sozialen Einfluss haben. Das Paper stieß damals auf große Resonanz und wurde bis heute fast 5000-mal zitiert.

2010 kehrte Mia Cha ans Kaist zurück, wo sie in den folgenden Jahren unter anderem als Assistant Professor in verschiedenen Bereichen der Angewandten Informatik tätig war. Parallel hatte sie von 2015 bis 2016 eine Gastprofessur bei Facebook (heute Meta) inne. „Es war sehr spannend, tiefgehende Einblicke in die Arbeitsweise der Plattform zu erhalten. Zugriff auf die unglaublichen Datensätze der Plattform zu haben – das fühlte sich für mich an, als wäre ich ein Kind in einem Süßwarenladen. Doch gleichzeitig sehnte ich mich danach, tiefer in die wissenschaftliche Grundlagenforschung einzusteigen.“ Als sich ihr daher 2019 die Chance bot, als leitende Wissenschaftlerin am südkoreanischen Institute for Basic Science (IBS) das Pioneer Research Center for Mathematical and Computational Sciences zu gründen, willigte sie sofort ein: „Interessanterweise wurde das IBS nach dem Vorbild der deutschen Max-Planck-Institute aufgebaut, und es bietet ebenfalls die Freiheit, risikoreiche und langfristige Grundlagenforschung zu betreiben. Dort konnte ich also bereits deutlich freier und selbstbestimmter forschen.“ Seither ist es Mia Chas zentrales Forschungsfeld, wie sich Informationen über die sozialen Medien verbreiten. Im Fokus steht für sie immer wieder die KI-gestützte Erkennung von Fake News: „Während der Covid-19-Pandemie haben mein Forschungsteam und ich mitverfolgt, wie sich Falschinformationen über das Virus in den sozialen Netzwerken verbreitet haben“, berichtet Cha. „Als wir

Ob soziale Medien einen positiven oder einen negativen Einfluss auf die Gesellschaft ausüben, hängt laut Mia Cha maßgeblich von den zugrunde liegenden Algorithmen der Plattformen ab. Aktuell seien diese darauf ausgelegt, die Nutzerinnen und Nutzer so lange wie möglich auf der Plattform zu halten und die Gewinne der Betreiber zu maximieren. Umgekehrt könne man die Algorithmen jedoch genauso dafür optimieren, den Menschen Content anzuzeigen, der ihr Leben wirklich bereichert, ist sich Mia Cha sicher. Wie sich das konkret realisieren ließe, möchte sie mit ihrer Arbeitsgruppe in Bochum künftig genauer erforschen. „Mein Team steckt gerade noch mitten in der Umzugsphase. Aber schon bald werden wir hier richtig loslegen“, sagt sie und freut sich sichtlich. Ihr schweben etwa Kooperationen mit den sozial- und neurowissenschaftlichen Instituten der Max-Planck-Gesellschaft vor, um zu untersuchen, wie Menschen Social-Media-Content im Gehirn verarbeiten. „Wenn wir verstehen, wie Menschen auf bestimmten Content reagieren und warum sie die Plattformen auf eine bestimmte Weise nutzen, dann können wir Problemen wie Fake News, Hassrede oder Schädigungen der psychischen Gesundheit künftig besser entgegenwirken.“

Wie Mia Cha auch auf dem Deutsch-Koreanischen-Forum in Dresden betont, bestehe durch den Ausbau der angewandten KI-Forschung großes Potenzial, die Sicherheit, die Gesundheit und das allgemeine Wohlergehen der Gesellschaft positiv zu beeinflussen. „Das Ziel ist es, Datenwissenschaft



für die Menschheit zu betreiben“, fasst sie die Idee am Ende ihres Vortrags für die Delegierten aus Deutschland und Korea zusammen. Darunter fallen nicht nur die sozialen Medien, sondern in jüngerer Zeit auch Satellitendaten. „Unsere KI-Algorithmen identifizieren in den Bildern Merkmale, die etwa mit Armut korrelieren.“ Auch Schäden durch die Folgen des Klimawandels lassen sich mithilfe von KI-Analysen kostengünstig und einfach überwachen.

Nicht zuletzt aufgrund dieses anwendungsnahen und lösungsorientierten Forschungsansatzes ist Mia Cha als wissenschaftliche Beraterin viel gefragt. Bereits wenige Tage nach dem Forum war sie im Oktober 2024 als Rednerin zum Weltgesundheitsgipfel der Vereinten Nationen eingeladen, wo sie an der Podiumsdiskussion zur Frage „Kann KI das öffentliche Vertrauen in die Wissenschaft stärken?“ teilnahm. Außerdem ist sie Teil eines Gremiums, das UN-Generalsekretär António Guterres zu den ethischen Fragen künstlicher Intelligenz berät. Trotz ihrer vielfältigen neuen Aufgaben findet sie Zeit für ihr Privatleben – und das sogar mehr als zuvor: „In Korea gab es für mich nur die Arbeit, und meine Kinder hatten eine Tagesmutter.“ Doch seit sie in

Bochum ist, stehe die Familie bei ihr deutlich mehr im Fokus, sagt Mia Cha. „Mir ist es sehr wichtig, dass sie hier in Deutschland glücklich sind.“ Als Nächstes müsse sie nun endlich mal das Deutschlernen in Angriff nehmen, meint Mia Cha lachend: „Während meiner Postdoc-Zeit in Saarbrücken bin ich mit Englisch immer gut klargekommen.“

Was daneben noch an Freizeit bleibt, verbringt Mia Cha am liebsten mit Lesen: „Mein Ziel ist es, sechzig Bücher pro Jahr zu lesen.“ Bisher habe sie zwar erst dreißig Bücher geschafft, aber sie mache sich deswegen keinen Stress. „Ich liebe es einfach, bei einer Tasse Kaffee mit meinen Gedanken allein zu sein.“ Häufig denkt sie dann über ihre Zukunft nach. „Ich habe eine ganze Liste mit Ideen und Wünschen.“ Vor Kurzem habe sie sich beispielsweise ausgemalt, wie in über zwanzig Jahren ihre Abschiedsfeier am Max-Planck-Institut aussehen könnte: „Ich stelle mir vor, wie ich mich in perfektem Deutsch bei all meinen Kollegen und Freunden bedanke. Und ich hoffe, dass ich das Gefühl haben werde, mit meiner Arbeit etwas bewirkt zu haben. Nicht nur für die Forschung und die wissenschaftliche Zusammenarbeit von Deutschland und Korea, sondern auch für die Gesellschaft.“ ←

KI für mehr Vertrauen in die Wissenschaft? Diese Frage diskutiert der Präsident der Max-Planck-Gesellschaft Patrick Cramer (Mitte) auf dem World Health Summit 2024 mit Mia Cha (Zweite von rechts) sowie mit Expertinnen und Experten des globalen Gesundheitsmanagements.



FOTO: MPI FÜR SICHERHEIT UND PRIVATSPHÄRE



# ZWEITER BLICK

MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR MOLEKULARE PHYSIOLOGIE

Damit alle Körperteile dort landen, wo sie hingehören, bilden sich sehr früh in der Embryonalentwicklung die Körperachsen. Sie legen fest, wo beim Embryo oben und unten, vorne und hinten sowie rechts und links ist. Dabei bestimmt eine Achse die Position der beiden Körperöffnungen Mund und After. Entlang dieser Achse werden verschiedene Gene aktiviert, sodass sich unterschiedliche Gewebe bilden können. Forschende haben mithilfe weniger Tage alter Stammzellen einer Maus Zellhaufen entwickelt, die einem Mausembryo ähneln (rechts). Damit können sie die Rolle von Signalstoffen (auf dem Bild nicht sichtbar) bei der Bildung der Körperachsen untersuchen. Mit spezifischen Farbstoffen lässt sich die Lage der verschiedenen Zelltypen sichtbar machen (grau: Zellkerne).

49

# WÄCHTER DES ERBGUTS

TEXT: NORA LESSING

50 An einem Puzzle mit tausend Teilen kann man schon mal viele Stunden sitzen. Martin Beck vom Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt hat zwanzig Jahre gebraucht, bis er ein ganz besonderes Puzzle komplettiert hatte: Der Forscher und sein Team haben die Anordnung der tausend Proteinmoleküle aufgedeckt, aus denen jede Kernpore besteht – Proteinkomplexe, die einen tunnelförmigen Durchgang durch die Membran des Zellkerns bilden. Die Proteine sind Türe und Türsteher in einem: Sie verbinden den Zellkern mit der umgebenden Zelle und kontrollieren aktiv, was rein- und rausdarf. Viren zum Beispiel müssen draußen bleiben.

Kraftwerke zur Energieproduktion, Fabriken für Artikel des täglichen Bedarfs, Verbrennungsanlagen für Giftmüll: In jeder Körperzelle geht es zu wie in einer Großstadt. Unzählige Fachkräfte und spezialisierte Einrichtungen sorgen rund um die Uhr dafür, dass alles läuft wie am Schnürchen: Proteinfabriken – sogenannte Ribosomen – produzieren neue Proteine, Kraftwerke stellen Energie zur Verfügung, Experten für Qualitätssicherung wie zum Beispiel Chape-

ron-Proteine helfen schief gewickelten Proteinen, Haltung anzunehmen. Und Logistiker – Proteine, die jeweils eine bestimmte Fracht erkennen – bringen Baumaterialien genau dorthin, wo sie gerade gebraucht werden.

Die Grundlagen für dieses Treiben verbergen sich in dem von einer schützenden Membran umgebenen Zellkern. Hier lagern die Baupläne für die meisten Proteine und für die RNA-Moleküle der Zelle. Die Akten studieren dürfen jedoch nur ausgewählte Moleküle: Um in das Innere des Kerns zu gelangen, müssen sie zuerst eine der vielen Kernporen passieren – und diese sind streng bewacht. Hindurch kommt nur, wem die Poren Durchlass gewähren.

Wie genau diese kleinen Tunnel aufgebaut sind und welche Eigenschaften sie haben, untersucht Martin Beck vom Max-Planck-Institut für Biophysik

in Frankfurt am Main. Das ist eine wahre Mammutaufgabe, denn die Poren bestehen nicht nur aus rund tausend Einzelproteinen, sondern sie stehen auch mit vielen weiteren Proteinen in der Zelle in Kontakt. Noch dazu können sich die Mikrotunnel der verschiedenen Zelltypen unterscheiden, und sogar ein und dieselbe Zelle kann verschiedene Arten von Kernporen besitzen.

## Wettrüsten mit Krankheitserregern

Was ist der Grund für diese Vielfalt? „Möglicherweise ist sie das Resultat eines permanenten Wettrüstens zwischen Kernporen und Krankheitserregern“, erklärt Martin Beck. Eine wichtige Aufgabe der Poren ist es, den Zellkern gegen Eindringlinge wie Viren und Bakterien zu verteidigen.

# WISSEN AUS

— BIOLOGIE & MEDIZIN

Reiches Innenleben einer Zelle: Umgeben von der Zellhülle (hellgrün) liegen Kompartimente, die verschiedene Aufgaben für die Zelle erfüllen. Als Kommandozentrale fungiert der von einer Membran umgebene Zellkern (aufgeschnittene Kugel). Er enthält unter anderem das Erbgutmolekül DNA und damit die Bauanleitung für die meisten Zellproteine. Poren in seiner Membran kontrollieren den Im- und Export von Molekülen. In stapelartigen Kompartimenten (grün, rosa) werden Proteine hergestellt, modifiziert und in Bläschen verschickt, wieder andere Kompartimente dienen der Energieerzeugung (orange).



51

Diese wollen die darin gelagerten Baupläne, die DNA, für ihre Zwecke einspannen. Immer wieder gelingt es Erregern jedoch, die Abwehrmechanismen der Zelle auszutricksen, mithilfe einer gefälschten Eintrittskarte die Poren zu passieren und in den Zellkern einzudringen. Sie schmuggeln ihre eigene Erbinformation ein, sodass die Zelle dann in erster Linie Proteine produziert, welche die Invasoren für die eigene Vermehrung benötigen. Das geht so lange, bis das Immunsystem des Körpers den Fehler erkennt und der Zelle den Garaus macht oder diese vor Erschöpfung stirbt. „Aber wenn sich Kernporen in der Evolution immerzu verändern, dann müssen sich Bakterien und Viren den Zugang zum Zellkern jedes Mal wieder neu schaffen“, sagt Martin Beck. Salopp gesagt: Erreger, die für die einen Zellen noch brandgefährlich waren, scheitern bei deren Verwandten mit etwas Glück schon am Türsteher der Kernmembran.

52 Aufgebaut ist eine Kernpore wie ein Tunnel, in den eine Vielzahl von Tentakeln hineinragen. Diese sind wasserabweisend und schrecken die meisten Moleküle in der Zelle ab. Auf diese Weise hält sich der Kern ungebetene Gäste vom Leib. Nur einige hochspezialisierte Proteine lassen sich von den Tentakeln nicht beeindruckt: Sie dienen als Andockstellen für Proteine, die zum Transport bestimmte Moleküle durch die Pore schleusen können. Dies sogenannten Importine und Exportine können ihre Fracht dann im Porenkanal platzieren.

Solche Importine hat Becks Kollege Dirk Görlich, Direktor am Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften in Göttingen, untersucht. Importine nehmen dafür vorgesehene Proteine als Fracht auf und befördern sie in das Innere des Kerns. Müssen hingegen Moleküle aus dem Kern heraustransportiert werden, so sind Exportine zur Stelle. „Sehr wahrscheinlich gibt es spezialisierte Kernporen, die sich auf eine ganz bestimmte Fracht konzentrieren und dementsprechend jeweils auch ein bisschen anders gebaut sind“, erklärt Martin Beck.

Eine Kernpore besteht aus 35 unterschiedlichen Proteinen. Insgesamt kommen so rund tausend Moleküle zusammen. Mit der Frage, wie genau die einzelnen Moleküle angeordnet sein müssen, damit eine einsatzbereite Pore entsteht, haben sich Martin Beck und sein Team viele Jahre lang beschäftigt. Da die Poren so winzig sind, dass mit Licht arbeitende Mikroskope sie nicht detailliert genug sichtbar machen können, untersuchen die Forschenden sie mit einem Elektronenmikroskop. Zunächst müssen sie die Poren aber regelrecht schockgefrieren, denn nur dann haben die allgegenwärtigen Wassermoleküle keine Zeit, Eiskristalle zu bilden, die den Aufbau der Poren zerstören würden. Zudem halten die Moleküle im tiefgefrorenen Zustand für die Aufnahme still.

## Unschärfe Bilder

Von den so vorbereiteten Proben machen die Forschenden dann aus unterschiedlichen Perspektiven elektronenmikroskopische Aufnahmen. Im Anschluss kombinieren sie die Bilder und erstellen daraus dreidimensionale Modelle der Poren. „Trotz aller Bemühungen waren unsere Bilder jedoch lange Zeit nicht scharf genug, als dass wir die einzelnen Proteine hätten erkennen können. Deshalb war es so schwierig, herauszufinden, wie

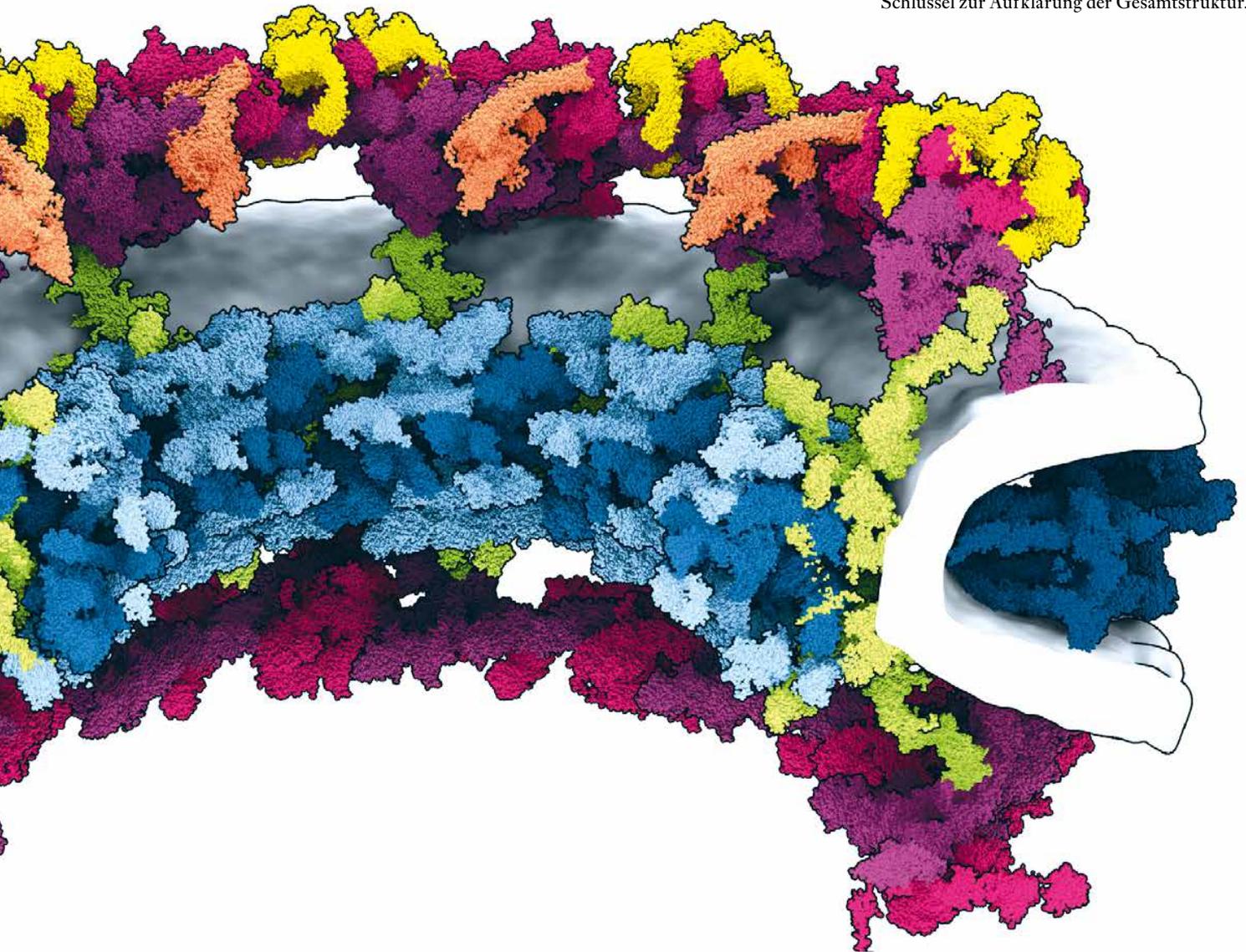


BILD: AUS SHYAMAL MOSALAGANTI ET AL., AI-BASED STRUCTURE PREDICTION EMPOWERS INTEGRATIVE STRUCTURAL ANALYSIS OF HUMAN NUCLEAR PORES. SCIENCE376, EAB949506 (2022).

**„Kein Tier, keine Pflanze, kein Pilz kann ohne Kernporen leben. Auch als Verteidigungsmechanismus gegen Krankheitserreger sind sie extrem wichtig.“**

MARTIN BECK

Eine Kernpore besteht aus rund tausend Proteinmolekülen. Komplexe mehrerer Proteine (hier farbig dargestellt) formen verschiedene Elemente der Pore wie den äußeren Ring (oben), den mittleren (Mitte) und den inneren Ring (unten). Die Analyse der 32, aus je zehn Proteinen bestehenden sogenannten Y-Komplexe (rot, pink) war ein Schlüssel zur Aufklärung der Gesamtstruktur.



53

sich die Einzelteile so zusammenfügen lassen, dass die Form entsteht, die wir auf den Bildern sehen.“

Um verstehen zu können, wie schwierig die Aufgabe war, die Martin Beck und seine Kolleginnen und Kollegen sich da gestellt hatten, muss man wissen, dass die Porenproteine unterschiedliche charakteristische Formen haben. Sie können zum Beispiel klein oder groß sein, sie können Vorsprünge und Vertiefungen aufweisen, glatte

oder zerfurchte Oberflächen besitzen. Elektrische Ladungen und andere chemische Eigenschaften sorgen dafür, dass Proteine einander anziehen oder abstoßen. Für ein Protein-3D-Puzzle aus tausend Teilen ergibt sich folglich eine schier unüberblickbare Menge an möglichen Lösungen – selbst wenn die finale Form bekannt ist. „An einem gewissen Punkt in meinem Leben habe ich nur noch über dieses Problem nachgedacht – und es hat meine Frau beinahe in den

Wahnsinn getrieben“, erinnert sich Martin Beck und lacht. „Überall in unserem Haus lagen Skizzen herum, mit deren Hilfe ich versuchte, mir vorzustellen, wie die Teile zusammenpassen.“

Auf den richtigen Weg brachte den Forscher und sein Team schließlich eine ganz bestimmte Struktur innerhalb der menschlichen Kernpore: der Y-Komplex. „Wir wussten, dass es in den Kernporen von Hefezellen →

eine Y-förmige Struktur gibt. Dieselbe Form konnten wir schließlich – nach Reihen sehr aufwendiger Experimente – auch in menschlichen Kernporen nachweisen“, erinnert sich Martin Beck. Für die Forschenden war das ein absoluter Glücksfall, denn der Y-Komplex setzt sich beim Menschen aus zehn Proteinen zusammen und ist somit relativ groß. Darüber hinaus sorgt seine charakteristische Form dafür, dass er auf elektronenmikroskopischen Aufnahmen gut zu erkennen ist. Hinzu kommt auch, dass in einer menschlichen Kernpore jeweils 32 solcher Y-Komplexe verbaut sind. Mit den Y-Komplexen konnten die Forschenden auf einen Schlag die Position von 320 Proteinen und damit die Struktur eines Drittels der Pore aufklären. „Mithilfe eines Algorithmus haben wir alle möglichen Orientierungen, Winkel und Positionen für die Y-Komplexe ausprobiert und jedes Mal berechnet, wie groß die Übereinstimmung mit unseren Bildern ist“, berichtet Martin Beck. Am Ende stellte sich heraus: Die 32 Y-Komplexe bilden gemeinsam zwei Ringe – die Grundstruktur des Tunnels, der durch die Kernmembran hindurchführt. „Sobald wir die Position der Y-Komplexe bestimmt hatten, wurde alles leichter. Heute wissen wir von den meisten Proteinbausteinen in der Kernpore, wo genau sie verbaut sind.“

## Einfache Struktur

Schaut man sich des Puzzles Lösung genauer an, dann fällt ins Auge: Die Struktur der menschlichen Kernpore ist eigentlich relativ simpel! Nach so viel schweißtreibender Puzzlearbeit ist dies doch eine verblüffende Erkenntnis. „Wenn man das nachbauen wollte, würde ich sagen: Lass uns drei Proteine designen. Eins hält die Membran offen (Tunnelöffnung), eins bildet den Ring (Tunnelwand) und eins die Tentakel. Und schon sind wir fertig.“ Beck zuckt mit den Achseln. „Warum es tausend Proteine braucht, um eine so einfache Struktur aufzubauen – das ist tatsächlich eine Frage, die mich nun schon seit Jahren umtreibt und die ich bislang nicht beantworten kann.“ Mittlerweile ist im-

merhin der Nachweis erbracht, dass die Tentakel im Inneren der Kernpore nicht gleich sind und verschiedene Eigenschaften haben. Spekuliert wird unter anderem, dass dies für den Transport verschiedener Frachten relevant sein könnte. „Möglich ist auch, dass es weit mehr Varianten gibt und sich die Kernporen in unterschiedlichen Zelltypen noch wesentlich stärker voneinander unterscheiden, als wir bislang angenommen haben. Um so viel Vielfalt hinzubekommen, braucht es möglicherweise die vielen verschiedenen Bauteile.“

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Kernporen sind keine starren Tunnel in der Kernmembran. Sie können sich zusammenziehen und weiten. Vermutlich gleichen sie so Zugkräfte auf die Kernmembran und Druckunterschiede zwischen dem Inneren des Kerns und der Zelle aus, wenn diese von äußeren Kräften verformt wird.

Es gibt viele Varianten des Kernporenkomplexes. Sie sind möglicherweise das Ergebnis eines evolutionären Wettlaufs, in dem sich die Poren immer wieder verändern mussten, um für Viren und Bakterien undurchdringlich zu bleiben.

Warum ein schlichter Membrankanal wie der Kernporenkomplex aus rund tausend Proteinmolekülen besteht, ist noch ein Rätsel. Eine Erklärung könnte sein, dass dies der Kernpore höhere Flexibilität verleiht und sie sich dadurch schneller anpassen kann.

---

Simple Grundstruktur hin oder her – dass Kernporen auf jeden Fall weit mehr sind als passive Kanäle, zeigen jüngste Forschungsergebnisse. Kürzlich konnte Martin Becks Arbeitsgruppe nachweisen, dass Kernporen sich zusammenziehen und weiten

können. „Vermutlich ist das eine Reaktion auf mechanische Belastung, die über die Kernmembran an die Porenproteine weitergegeben wird. Stellen Sie sich zum Beispiel eine Fresszelle vor, also eine ziemlich große Immunzelle, die sich in eine Blutkapillare zwängen muss. Durch den Druck auf die Zellmembran wird der Zellkern zusammengedrückt. Damit der Kern keinen Schaden nimmt und die Kernmembran nicht aufplatzt, muss der Druck ausgeglichen werden, und möglicherweise dienen die Kernporen als Druckventile.“ Denkbar ist auch, dass sich die kleinen Tunnel dabei wie Sprungfedern verhalten: Wenn die Zugkräfte nachlassen, ziehen sich die „Federn“ wieder zusammen. Mit finanzieller Unterstützung durch den Europäischen Forschungsrat (ERC) untersuchen die Forschenden aus Frankfurt derzeit, ob diese Vermutung zutrifft. Außerdem wollen sie herausfinden, wie genau es der Kernpore gelingt, ihren Durchmesser zu verändern, und ob geweitete Kernporen andere Frachten transportieren als enge.

## Viren im Zellkern

Zusammen mit Becks Kollegen Gerhard Hummer und seinem Team sowie der Gruppe von Hans-Georg Kräusslich an der Universität Heidelberg haben die Forschenden zudem entdeckt, wie HI-Viren ihr Erbgut in den Zellkern von Immunzellen einschmuggeln können. Die Erreger bestehen aus einem RNA-Molekül, das geschützt von einer kegelförmigen Kapsel aus Proteinen in die Zelle eindringt. Sobald sie drin sind, machen sie sich auf den Weg zum Zellkern. „Lange war unklar, wie das Kapsid an die Pore andockt und durch sie hindurchkommt. Das lag unter anderem daran, dass die Forschenden zum richtigen Zeitpunkt auf den richtigen Ort blicken mussten: Das Virus infiziert immer nur einen Teil der Zellen. Zudem besitzt jeder Zellkern Tausende Poren, durch welche das Virus eindringen könnte.“ Nach unzähligen Aufnahmen gelang schließlich ein Schnappschuss. „Eigentlich ist die Kapsel etwas zu groß für den Kanal. Auf unseren Bildern konnten wir erkennen,

dass sie sich dennoch in den Tunnel zwängen kann und dabei intakt bleibt.“ Aber warum gelingt es den Tentakeln der Pore nicht, den lebensgefährlichen Angreifer abzuwehren? Dirk Görlich's Team hat herausgefunden, dass der Grund dafür die Oberflächeneigenschaften der Viruskapsel sind. Sie ahmen die Eigenschaften von Importinen nach und werden daher von den Poren nicht abgewehrt. Außerdem dringt die Kapsel mit dem schmalen Ende voraus ein. Sie drängt sich also wie ein Keil in die Pore und zerstört dabei die Ringe.

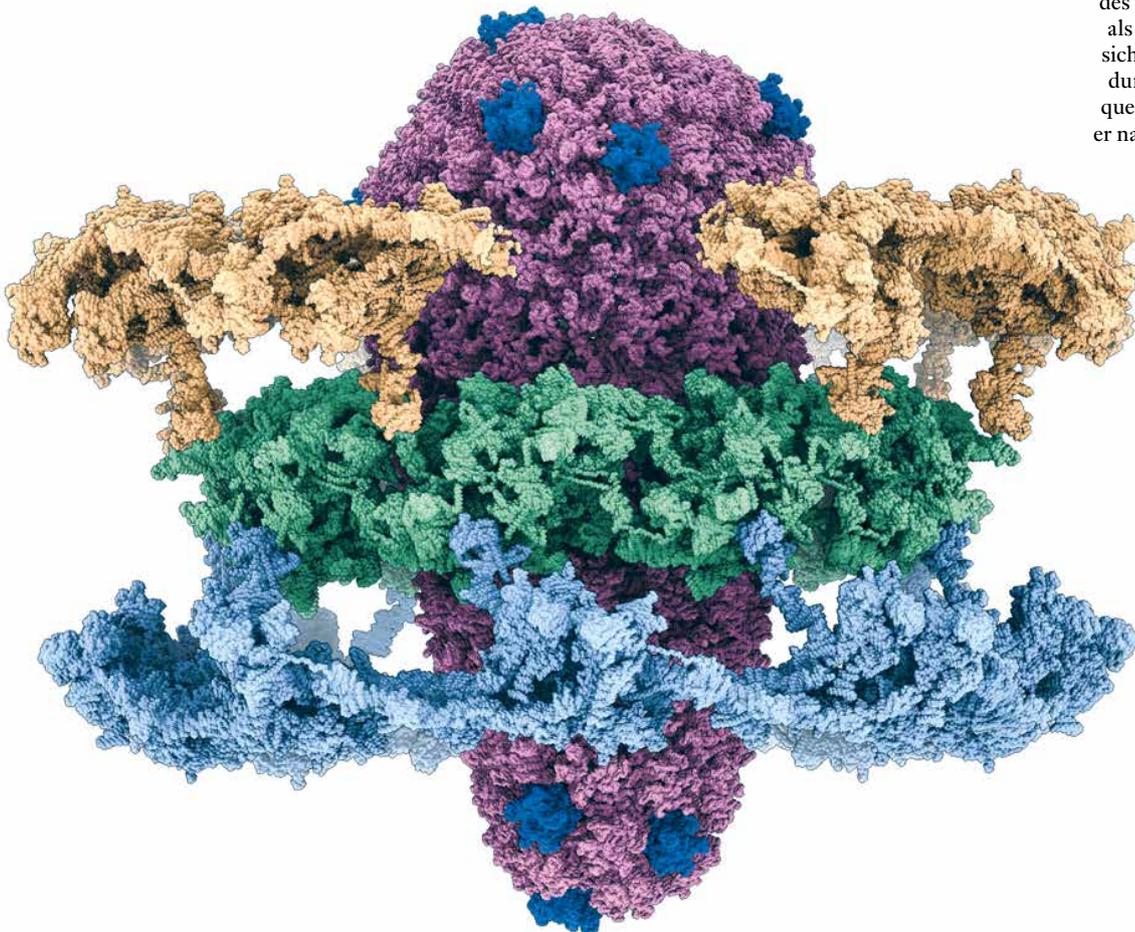
„Kein Tier, keine Pflanze, kein Pilz kann ohne Kernporen leben. Und auch als Verteidigungsmechanismus gegen

Krankheitserreger sind sie extrem wichtig“, betont Martin Beck. „Es gibt also jede Menge Gründe, warum wir die Poren des Zellkerns noch besser verstehen sollten.“ Veränderungen an den Kernporen könnten zum Beispiel eine Ursache für die erhöhte Krankheitsanfälligkeit im Alter sein: Die Kernporen werden im Laufe des Lebens durchlässiger und gewähren mehr Unbefugten Zutritt zum Allerheiligsten der Zelle. Auch bei Krebserkrankungen, das zeigen neueste Studienergebnisse, scheinen die Struktur und das Verhalten der Kanäle verändert zu sein. „Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung könnten also dabei helfen, neue Therapien gegen Krebs zu entwickeln.“

Martin Beck ist zuversichtlich, dass die kommenden Jahre zahlreiche neue Erkenntnisse zu Kernporen zutage fördern werden – nicht zuletzt dank immer leistungsfähigerer Computer, künstlicher Intelligenz und verbesserter Probenpräparationstechniken. „Heute können wir beobachten, wie HIV in eine Kernpore eindringt – so etwas wäre vor fünfzehn Jahren noch völlig unmöglich gewesen. Zugleich ist auch das, was wir heute wissen, nur die Spitze des Eisbergs. Das Universum, das es in Zellen noch zu entdecken gibt, ist immer noch weitgehend unerforscht.“ ←

Den Forschenden ist es erstmals gelungen, ein HI-Virus beim Eindringen in den Kern einer Zelle zu filmen. Da die Kapsel des Virus etwas größer ist als der Porenkanal, muss sich der Erreger förmlich durch die Pore hindurchquetschen. Dabei sprengt er nacheinander die Ringe der Kernpore.

55





56

Materialien für die Energie-  
wende: Für Anlagen, in denen  
Wasserstoff erzeugt wird  
wie hier bei der Linde AG  
in Leuna, aber auch für die  
Speicherung und den  
Transport dieses Energie-  
trägers werden neue Werk-  
stoffe gebraucht.

FOTO: PICTURE ALLIANCE / IMAGEBROKER | ROLF SCHULTEN

# KI GIBT STOFF

TEXT: TIM SCHRÖDER

57

Mit dem Trend zu mehr Nachhaltigkeit müssen auch Stahl und andere Materialien immer mehr Ansprüchen genügen: Sie sollen ungiftig sein, sich mit wenig Abfällen erzeugen und vollständig recyceln lassen. Außerdem will man bei Rohstoffen unabhängig von Nationen wie China werden. Das macht es recht knifflig, neue Materialien und Herstellungsprozesse zu entwickeln. Jörg Neugebauer und Dierk Raabe vom Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien setzen dabei jetzt auf künstliche Intelligenz.

Als die „Generalkonferenz für Maß und Gewicht“ am 26. September 1889 in Sèvres bei Paris ihren neuen Urmeter vorstellte, atmeten die Experten der Eichinstitute weltweit auf. Nach fast hundert Jahren hatte die Fachwelt endlich einen Urmeter gefunden, der allen Ansprüchen an Genauigkeit ge-

nügte: einen Stab aus einer Mischung, einer „Legierung“, von 90 Prozent Platin und 10 Prozent Iridium. Der Stab hatte eine feine Skala, an der man einen Meter ganz exakt ablesen konnte. Entscheidend aber war, dass Platin-Iridium-Legierungen fast unempfindlich gegenüber den Temperaturschwankungen sind, die in mittleren Breiten auftreten. Andere Metalle dehnen sich bei Hitze merklich aus und schrumpfen bei Kälte. Nicht so die Platin-Iridium-Legierung: Der Urmeter ist unter hiesigen Bedingungen stets so gut wie gleich lang.

Das Internationale Büro für Maß und Gewicht (IBMG) in Sèvres verschickte dreißig Kopien des Urmeters

an die Eichinstitute verschiedener Länder. Bis den Experten aufging, dass das auf Dauer recht kostspielig würde, denn das Edelmetall Platin war schon damals ausgesprochen teuer. Und so beauftragte das IBMG den hauseigenen Physiker Charles Édouard Guillaume damit, sich auf die Suche nach einer preisgünstigen Alternative für die Platin-Iridium-Legierung zu machen. In den folgenden Monaten und Jahren testete Guillaume etliche Materialkombinationen durch. Bis er 1896 schließlich auf die perfekte Mischung stieß – eine Legierung aus 64 Prozent Eisen und 36 Prozent Nickel, die so wie Platin-Iridium kaum auf Temperaturschwankungen reagiert. Der →

Forscher hatte damit einen Volltreffer gelandet. Denn die Legierung bot sich als alternatives Material nicht nur für den Urmeter an, sondern auch für andere Mess- und Präzisionsinstrumente, zum Beispiel für die Zahnräder in Taschen- und Armbanduhren. Auch die müssen unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen sein, damit das Uhrwerk nicht blockiert, wenn es wärmer wird. „Invar“ taufte Guillaume seine Legierung – im Sinn von invariabel, unveränderlich. Im Jahr 1920 erhielt er dafür den Nobelpreis.

## Invar-Legierungen für Wasserstoff

Heutzutage gibt es eine Fülle von Invar-Legierungen, deren Volumen jeweils in einem bestimmten Temperaturfenster stabil bleibt. So gibt es Legierungen für Kühltanks, in denen man Flüssiggas, Liquefied Natural Gas (LNG), bei minus 160 Grad Celsius lagert. Würde sich die Legierung bei Kälte zusammenziehen, könnten sich Risse bilden, Verschraubungen lösen, Ventile leckschlagen. „Die Industrie ist für neue Einsatzgebiete ständig auf der Suche nach neuen Invar-Legierungen, die über einen größeren Temperaturbereich weder schrumpfen noch sich ausdehnen“, sagt Dierk Raabe, Werkstoffwissenschaftler und Direktor am Düsseldorfer Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien; zum Beispiel sucht man nach Legierungen für Wasserstofftanks und -pipelines und die ganze Wasserstoffinfrastruktur, die in den nächsten Jahren weltweit entstehen wird.

Überhaupt sind derzeit viele neue Legierungen gefragt, weil die nachhaltige Transformation der Wirtschaft auch an Materialien viele Anforderungen stellt. „Das geht weit über das Beispiel Invar hinaus“, sagt Dierk Raabe. So will sich die Europäische Union mit dem „Gesetz zu kritischen Rohstoffen“ ab 2030 bei der Rohstoffversorgung unabhängiger machen von einzelnen Staaten – beispielsweise bei den Metallen der Seltenen Erden, die

heute zum allergrößten Teil aus China stammen. Eine Lösung wäre es, für eine Legierung chemische Elemente zu wählen, die sich beim Recycling leicht wiedergewinnen lassen. So würde man den Bedarf an Importen verringern. Alternativ könnte die Metallindustrie von kritischen Stoffen wie den Metallen der Seltenen Erden auf solche umsteigen, bei denen man nicht von einzelnen dominanten Lieferanten abhängt. Darüber hinaus sollen chemische Elemente aus Legierungen verschwinden, welche die Umwelt schädigen oder Menschen krank machen können. „Die Herausforderung besteht darin, dass man Elemente in Legierungen nicht so einfach durch andere ersetzen kann, weil sich dadurch die Eigenschaften eines Materials meist fundamental verändern“, ergänzt Jörg Neugebauer, Physiker und ebenfalls Direktor am Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien.

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Künstliche Intelligenz, genauer gesagt maschinelles Lernen, kann in großen Datenmengen Zusammenhänge erkennen, die Menschen verborgen bleiben. Die Fähigkeit kann man nutzen, um unter vielen Legierungen solche mit gewünschten Eigenschaften zu identifizieren.

Ein Team des Max-Planck-Instituts für Nachhaltige Materialien kombiniert maschinelles Lernen mit Datenbank-Informationen, physikalischen Rechnungen und mit Experimenten, um neue Legierungen zu entwickeln.

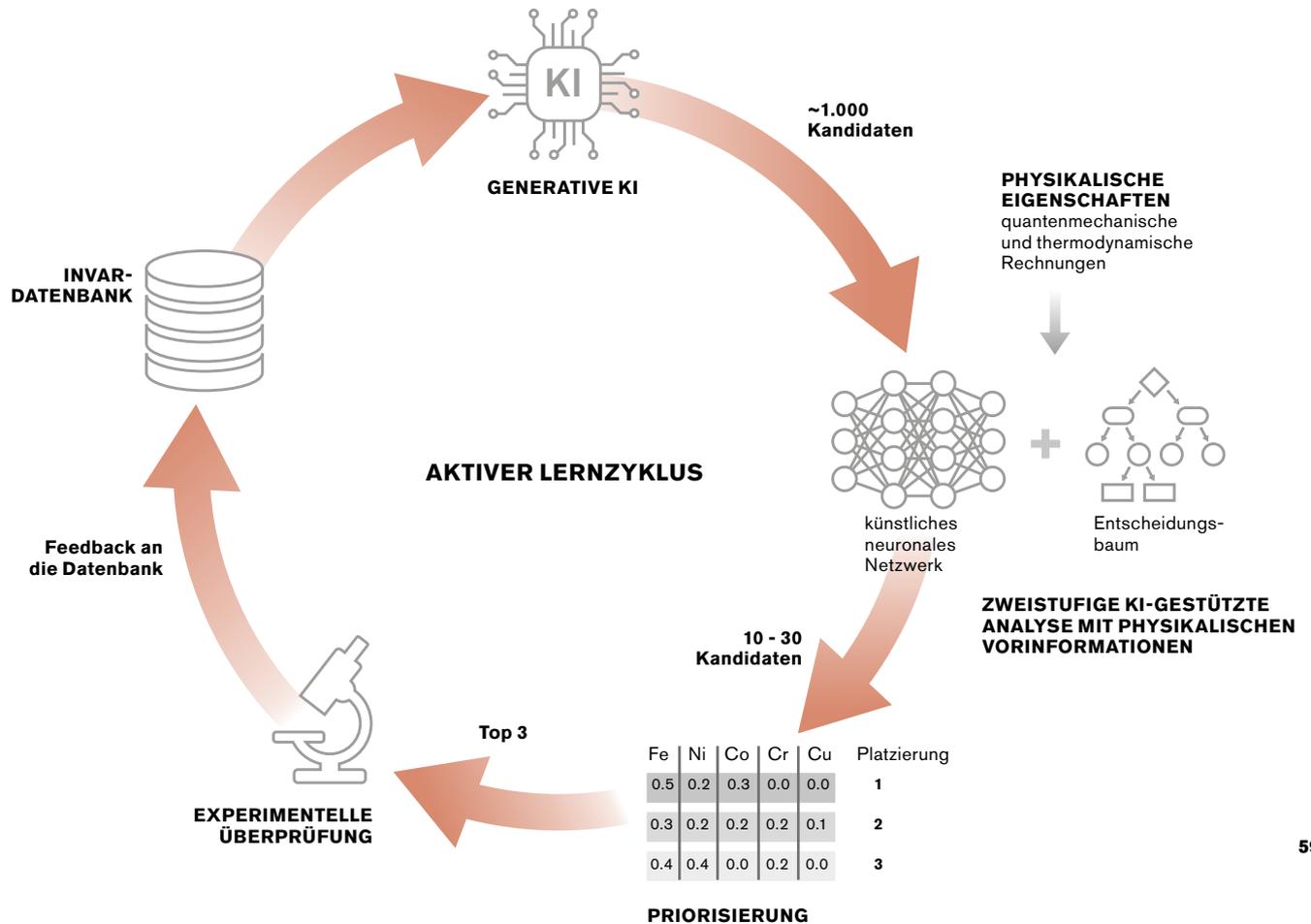
Auf diese Weise hat die Gruppe mithilfe von KI unter anderem Invar-Legierungen und Weichmagnete entwickelt. Sie nutzt aber auch Sprachmodelle für die wissenschaftliche Recherche.

---

Die Materialforschung steht derzeit also vor der Aufgabe, innerhalb weniger Jahre eine Fülle neuer Legierungen zu entwickeln. Mit Erfahrung, wissenschaftlicher Intuition und Experimenten im Labor allein sei das nicht zu schaffen, sagt Dierk Raabe. Deshalb setzen die Düsseldorfer Forscherinnen und Forscher seit einiger Zeit auf künstliche Intelligenz, genauer gesagt: auf maschinelles Lernen. Die Algorithmen helfen ihnen, schneller neue Legierungen für den Alltagseinsatz zu finden.

Maschinelle Lernverfahren setzen oft auf sogenannte neuronale Netze. Diese werden zunächst darauf trainiert, ein bestimmtes Muster zu identifizieren. Neuronale Netze heißen so, weil sie, wie die Nervenzellen im Gehirn, die Neuronen, Information in mehreren Schichten analysieren. Ein einfaches neuronales Netz reicht aber für die Materialforschung nicht aus.

Dierk Raabe hat deshalb zusammen mit seinen Kolleginnen und Kollegen eine Art von KI-Methodencocktail entwickelt. Damit kann das Team in einem Kreislaufprozess vielversprechende neue Legierungen finden – etwa für Invar-Stähle. Der Prozess startet mit einer Aufgabe wie zum Beispiel: „Finde eine Invar-Legierung für einen Temperaturbereich x, die billiger ist als die herkömmlichen.“ Im ersten Schritt generiert nun ein KI-System aus Tausenden von Legierungsdaten, die in Datenbanken gespeichert sind, rund tausend Vorschläge für neue Invar-Legierungen. Im nächsten Schritt wählen weitere KI-Modelle, darunter künstliche neuronale Netze, zwanzig bis dreißig Kandidaten aus. Dabei werden die Vorschläge auch durch physikalische Berechnungen abgeklopft – etwa durch Rechnungen der sogenannten Dichtefunktionaltheorie. „Die innere Struktur und die Eigenschaften von Materialien hängen von verschiedenen quantenmechanischen Eigenschaften ab – zum Beispiel von den Energien zwischen den Atomen oder dem Magnetismus“, sagt Jörg Neugebauer. „Die Berechnungen berücksichtigen alle diese Parameter und



In einem aktiven Lernzyklus zu neuen Invar-Werkstoffen: Anhand von Legierungseigenschaften, die in Datenbanken gespeichert sind, schlägt ein generatives KI-Modell zunächst mögliche neue Zusammensetzungen vor. Aus diesen etwa tausend Vorschlägen wählen weitere KI-Modelle, darunter künstliche neuronale Netze, bis zu dreißig Kandidaten aus. Dabei berücksichtigen sie auch Ergebnisse physikalischer Rechnungen. Die drei Kandidaten mit den kleinsten thermischen Ausdehnungskoeffizienten werden experimentell überprüft und in die Datenbank aufgenommen.

können die im ersten Schritt vorgeschlagenen Legierungen daraufhin testen, ob sie auch tatsächlich die gewünschten Eigenschaften haben.“

Von den bis zu dreißig verbleibenden Kandidaten werden diejenigen, für die die Modelle die niedrigsten thermischen Ausdehnungskoeffizienten vorhergesagt haben, im Labor hergestellt und getestet. Die Ergebnisse fließen zurück in die Legierungsdatenbank, womit sich der Kreislauf schließt und von vorne beginnen kann. Da das System somit aus seiner eigenen Analyse lernt, sprechen Jörg

Neugebauer und Dierk Raabe von aktivem Lernen. Auf diese Weise hat ihr Team etwa zwei neue Invar-Legierungen für Wasserstoff- und Erdgastanks entwickelt, die ihr Volumen bei Temperaturschwankungen noch weniger verändern als herkömmliche Legierungen. Dierk Raabe erklärt, warum die Entwicklung solcher Materialien eine so knifflige Sache ist: Das fertige Material müsse eine ganze Reihe von Anforderungen erfüllen. Eine Aluminiumlegierung für ein Elektrofahrzeug zum Beispiel müsse fest und steif sein – zugleich aber auch korrosionsbeständig und recycelbar.

Hinzu kommt, dass sich das Material gut verarbeiten lassen müsse, beispielsweise beim Gießen, Schweißen oder beim Umformen, wobei jeder einzelne Prozess nachhaltiger, das heisst vor allem energieeffizienter werden sollte.

Und dann gibt es noch eine weitere Herausforderung. Seit einigen Jahren werden in Legierungen sehr viel mehr chemische Elemente vermischt als früher. Charles Édouard Guillaume brauchte für den ersten Invar-Stahl nur Eisen und Nickel. Moderne Legierungen – etwa für die Turbi- →



60

nen von Flugzeugen – enthalten mitunter mehr als zehn verschiedene chemische Elemente. Fachleute sprechen bisweilen auch von Hochentropie-Legierungen. Diese haben den Vorteil, dass man damit mehrere, zuweilen sogar gegensätzliche Eigenschaften in einem Material vereinen kann. Am Düsseldorfer Max-Planck-Institut wurden bereits vor einigen Jahren Hochentropie-Stähle entwickelt, die sehr fest sind, sich aber leicht verformen, wenn sie extrem stark belastet werden – der ideale Stahl für die Knautschzone von Autos. Die Stähle verformen sich bei einem Unfall um bis zu 35 Prozent und schlucken dabei Energie des Aufpralls.

Bei der Entwicklung der Hochentropie-Legierungen besteht das Problem da-

rin, dass sich die Anzahl möglicher Varianten mit der Zahl der chemischen Elemente vervielfacht. Selbst wenn man nur die am häufigsten für Legierungen genutzten Elemente in Betracht zieht, ergeben sich  $10^{50}$  mögliche Varianten. Zwar verfügt das Düsseldorfer Institut über sogenannte Sputteranlagen, mit denen sich in kurzer Zeit mehrere Zehntausend Legierungen in hauchdünnen Schichten erzeugen lassen. „Aber daran kann man nicht überprüfen, wie sich ein Stahl, der später im 1000-Tonnen-Maßstab hergestellt wird, im fertigen Bauteil verhalten wird“, sagt Jörg Neugebauer. „Man würde wohl kaum in ein Flugzeug steigen, dessen Werkstoffe nur als Nanolage untersucht wurden.“ Ohne die Hilfe der KI müsste man für Hochentropie-Legierungen Millio-

nen größerer Proben herstellen, um deren Eigenschaften zu testen. Das ist illusorisch und macht KI inzwischen unverzichtbar.

## Robuste Magnete für Windräder

Unlängst ist es dem Team am Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien auch gelungen, mithilfe von KI eine neue Hochentropie-Legierung für Weichmagnete herzustellen. Diese werden schon durch relativ schwache Magnetfelder magnetisiert und umgepolt. Der Markt für solche Weichmagnete wächst, weil sie unter anderem für Generatoren und praktisch alle Elektromotoren benötigt werden, die in Windrädern und Was-



Lag die künstliche Intelligenz richtig? Hongyu Chen (links) und Liuliu Han analysieren die Eigenschaften von weichmagnetischen Legierungen, für die Algorithmen eine hohe mechanische Stabilität vorausgesagt haben.

serkraftwerken Strom erzeugen und elektrische Fahrzeuge antreiben. Herkömmliche Weichmagnete sind dafür nicht unbedingt robust genug, weil sie unter starker mechanischer Beanspruchung beschädigt werden können oder korrodieren. Bislang gab es kaum mechanisch widerstandsfähige Weichmagnete, weil Robustheit und Weichmagnetismus bei den bisherigen Materialien einander entgegenstehen. Die neuen Hochentropie-Legierungen aus Eisen, Nickel, Kobalt, Tantal und Aluminium vereinen beide Eigenschaften: Sie sind mechanisch hart, behalten aber ihre „weiche“ Magnetisierung. Außerdem sind sie länger haltbar als herkömmliche magnetische Werkstoffe.

Der Methodenscocktail für aktives Lernen leistet den Forscherinnen und Forschern um Dierk Raabe und Jörg

Neugebauer also bereits gute Dienste. „Allerdings ist KI noch nicht so weit, dass sie uns in eine bestimmte Richtung schubst – nach dem Motto: Schaut euch mal die oder die Legierung an“, sagt Jörg Neugebauer. „Noch müssen wir die Richtung vorgeben und sie für die Suche nach neuen Legierungen mit Daten füttern, zum Beispiel den quantenmechanischen.“ Doch künstliche Intelligenz ist gut darin, Zusammenhänge zwischen vielen Parametern zu finden und Muster zu erkennen, die für den Menschen zu komplex sind. „Wer weiß, vielleicht reicht es zukünftig, wenige Parameter vorzugeben, die die Eigenschaften einer neuen Legierung beschreiben – und den Rest macht die KI“, sagt Jörg Neugebauer.

## Sprachmodelle für die Datenrecherche

Inzwischen setzen Dierk Raabe und Jörg Neugebauer auch auf eine KI-Technik, die durch ChatGPT populär geworden ist – die Large Language Models (LLM), die großen Sprachmodelle. Diese werden mit Unmengen von Texten gefüttert und lernen so, welche Buchstaben und Wortkombinationen mit hoher Wahrscheinlichkeit gemeinsam auftreten. Das befähigt sie dazu, Texte zu schreiben. Am Düsseldorfer Max-Planck-Institut sucht ein LLM etwa korrosionsbeständige Legierungen. In dem Projekt kommt zum einen die KI-gestützte Methodik mit all dem quantenmechanischen Wissen und den Informationen aus den Datenbanken zum Einsatz. Die Erforschung von Korrosion lebt aber vor allem auch von Laborberichten und Testprotokollen, die das Korrosionsverhalten von Materialien in normaler Sprache beschreiben. Diese Schriften füttern die Düsseldorfer in ein Large Language Model – um so schneller die Erkenntnisse zu verarbeiten. „Natürlich wissen LLM zunächst nichts über physikalische Zusammenhänge“, sagt Dierk Raabe. „Da kommt Mumpitz raus. Doch sie können uns enorm unterstützen.“ Sie eignen sich hervor-

ragend, um Teilaufgaben zu lösen, wie etwa die Analyse der Laborberichte. „LLM tragen Informationen zusammen, was uns die Suche nach Legierungen erleichtert. Wir Forscher werden mehr und mehr zu Dirigenten, die diesen Prozess nur noch steuern müssen.“

Vor einiger Zeit hat Dierk Raabe mit einem LLM die größten Schrotthandelsplätze der Welt gesucht und nach den Reststoffen, die dort gehandelt werden. Denn mit dem Trend hin zur Kreislaufwirtschaft wird die Menge an Schrott, die wiederverwertet werden muss, stark steigen. Dann wird man viele verschiedene Schrottarten – vor allem auch gemischten, also kontaminierten Schrott von schlechter Qualität – nutzen müssen. Es wäre großartig, wenn die KI den Materialforschern verraten würde, wie sich daraus hochwertige Legierungen und Produkte herstellen lassen. „Allein die Suche nach dem weltweiten Schrottangebot war schon faszinierend“, sagt Dierk Raabe. „Die Software hat mir das in einem halben Tag geliefert“, sagt er. Ohne KI wäre das wesentlich aufwendiger gewesen. „Das Ganze ist extrem aufregend. Ich bin sehr gespannt, wohin uns KI noch führen wird.“ ←

61

---

## GLOSSAR

*INVAR-LEGIERUNG* heißt ein Material, das sich bei Temperaturschwankungen im Volumen fast nicht verändert.

*WEICHMAGNETISCH* ist ein Werkstoff, wenn er sich durch ein relativ schwaches Magnetfeld magnetisieren beziehungsweise umpolen lässt. Solche Materialien werden unter anderem in Stromgeneratoren und in Elektromotoren eingesetzt.

---



FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG

**Der Polybot testet seine Grenzen aus: Was wie eine Spielwiese aussieht, ist seine Trainingsumgebung. An den Bildschirmen im Hintergrund kontrollieren Forschende den Trainingsablauf und sorgen dafür, dass der Vierbeiner auch in der freien Natur eigenständig zurechtkommt.**

# AUF FRUCHTBAREM BODEN

TEXT: TOBIAS BEUCHERT

In der Landwirtschaft stehen sich Wachstum und Nachhaltigkeit scheinbar unversöhnlich gegenüber. Künstliche Intelligenz kann dazu beitragen, den Widerspruch aufzulösen. Das Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Tübingen entwickelt gemeinsam mit der Landwirtschaft einen Roboter, der Felder künftig effizient und nachhaltig bearbeiten soll.

Stefan Funke betreibt gemeinsam mit seinem Bruder einen Biobetrieb in Mittelfranken. Mit viel Handarbeit pflegen sie zwanzig Sonderkulturen, darunter Arznei- und Gewürzpflanzen, etwa Brennnessel und Zitronenmelisse. Daneben wachsen Ackerfrüchte wie Mais, Raps und Roggen. Funke steuert seinen Traktor zielstrebig über den Acker. Es gilt, keine Zeit zu verlieren. Die Aussaat muss dringend unter die Erde. Warten sie zu lange, könnte ihnen die frühsummerliche Trockenheit einen Strich durch die Rechnung machen. „Wir alle spüren den Klimawandel“, sagt Funke mit geradeaus gerichtetem Blick. So viele heftige Trockenperioden wie in den letzten Jahren habe er noch nicht

gesehen. So wie viele Landwirtinnen und Landwirte stehen die Funkes unter dem wirtschaftlichen Druck, möglichst günstig zu produzieren.

Viele Betriebe setzen daher darauf, aus demselben Boden immer mehr rauszuholen und möglichst kosteneffizient und auf großen Flächen zu produzieren. Eine im Vergleich dazu deutlich nachhaltigere Form der Landwirtschaft sind sogenannte Polykulturen. Das Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme entwickelt mit dem Polybot einen Roboter, der helfen soll, diesen kleinteiligen und abwechslungsreichen Anbau zu realisieren – zu diesem Roboter später mehr.

Die Vorteile von Polykulturen sind gut erforscht. Am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, kurz Zalf, etwa startet im Jahr 2020 ein zehnjähriger Feldversuch namens patchCrop, bei dem die Agrarwissenschaftlerin Kathrin Grahmann und ihr Team ein Feld mit einer für konventionelle Betriebe typischen Fläche von 70 Hektar in Quadrate mit jeweils etwa einem halben Hektar unterteilen. Aktuell werden in einer Saison auf den kleinen Parzellen neun unterschiedliche

Früchte angebaut. „Langfristig machen Polykulturen Nahrungsmittel sicherer“, erklärt Grahmann. Sie streuen zunächst das Risiko. Denn bisher bauen konventionelle Betriebe auf einem großen Feld meistens nur eine Frucht an. Überhaupt entfallen ungefähr 60 Prozent der weltweiten pflanzlichen Ernährung auf nur drei Pflanzenarten: Reis, Mais und Weizen. Fällt eine Kulturart durch lang anhaltende Dürre aus, könnte in einer Polykultur eine andere Art durchhalten, etwa weil sie ihr Wasser aus tieferen Bodenschichten bezieht. „Damit dieses Konzept aufgeht, müssen wir unsere Ernährungsgewohnheiten ändern. Zurzeit landen in der EU etwa zwei Drittel des produzierten Getreides im Trog von Nutztieren“, sagt Grahmann. In Polykulturen lassen sich die dafür notwendigen großen Mengen an wenigen Futtersorten kaum erzeugen. Das heißt: weniger Fleisch und Milchprodukte, dafür mehr pflanzliche Nahrung.

Polykulturen sind auch deswegen vielversprechend, weil sie eine vielfältigere Fruchtfolge ermöglichen. Dadurch wird der Boden gesünder und fruchtbarer, als es in konventio- →

nellen Betrieben möglich ist. „Wer seine Felder intensiv und einseitig bewirtschaftet, sorgt für ein einseitiges und verarmtes Bodenbiom“, sagt Kathrin Grahmann. „Je gesünder das Bodenbiom, desto produktiver und effizienter ist auch der Boden.“ Die Mikroorganismen des Bioms zersetzen pflanzliche Überreste und reichern den Oberboden mit Mineralien an, also mit Nährstoffen für Pflanzen. Das gelingt in Polykulturen besonders gut, da ihre Böden weniger stark bearbeitet werden und die diversen Pflanzen sie unterschiedlich stark durchwurzeln, sodass die Böden gut durchlüftet werden. Der Humus, der entsteht, hat auch wegen des vielfältigen organischen Materials eine hohe Qualität, er macht die Oberschicht besonders fruchtbar. Dem gegenüber steht ein Feld, das stetig mit Nährstoffen aus Düngung versorgt wird – Pflanzen und Boden gewöhnen sich daran, sie brauchen keine Nährstoffe zu speichern. Auch in Trockenzeiten

hat die Polykultur einen Vorteil, denn ihre humusreiche Oberschicht ist formstabil und saugfähig. Ihr Boden speichert die Feuchte besser, die wiederum notwendig ist, damit die Wurzeln überhaupt erst Nährstoffe aufnehmen. Und auch im Fall von Starkregen, der infolge der Klimaerhitzung nun häufiger auftritt, dringt das Wasser tiefer in den Boden einer Polykultur ein, ohne oberflächlich abzuperlen oder die fruchtbare Schicht davonzuschwemmen.

Auch mehrjährige Blühstreifen zwischen den Parzellen einer Polykultur sind förderlich. Sie schaffen einen Lebensraum für Insekten und Mikroorganismen. Solche Streifen werden schon heute über EU-Mittel im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik Deutschlands gefördert – allerdings nur auf freiwilliger Basis und abhängig vom Bundesland. So steht es auch um die Bezuschussung kleinteiliger Feldparzellen. In Bayern etwa liegen

60 Euro pro Hektar bereit, wenn ein Feldstück kleiner ist als einen halben Hektar. Zudem lassen sich dort Gelder für vielfältige Fruchtfolgen beantragen – von 2025 an zumindest noch über *eine* von ursprünglich fünf Fördermaßnahmen. Ob das als Anreiz für landwirtschaftliche Betriebe ausreicht, eine Polykultur einzurichten, sieht Stefan Funke kritisch: „So eine Diversifizierung ergibt Sinn, aber auch wir kommen in unserem Betrieb nicht darum herum, Mais oder Gerste intensiver anzubauen. Wir stehen unter zeitlichem und wirtschaftlichem Druck. Es belastet mich, meinem Idealismus nicht folgen und eigene Initiativen nicht ausreichend umsetzen zu können“, sagt er. Auch Kathrin Grahmann sieht strukturelle Probleme: „Ein abwechslungsreicher Anbau bedeutet mehr Zeitaufwand. Es wundert mich daher nicht, dass Felder und Maschinen immer größer werden.“

## Klein und autonom

Der Gegenwurf sieht kleine, flexible und immer öfter von künstlicher Intelligenz (KI) gesteuerte Landwirtschaftsroboter vor, wie sie auch das Projekt patchCrop anwendet. Einige Firmen wie Bosch, FarmDroid oder die Open-Source-Lösung FarmBot bieten bereits seit einigen Jahren solche Produkte an. Während moderne Traktoren schon heute fahrenden Computern gleichen, die mittels GPS automatisiert Felder bearbeiten, ist der Einsatz künstlicher Intelligenz auf solchen kleinen Farmgehilfen noch Neuland. Manche davon erinnern auf den ersten Blick eher an einen Mars-Rover. Studien untersuchen derzeit, ob diese allein schon dadurch die Bodengesundheit fördern, dass sie den Untergrund weniger stark verdichten als eine Großmaschine. Weiter sollen Feldroboter in Zukunft genau dann aussäen, wenn der Boden feucht genug ist, oder Unkraut Stück für Stück eliminieren, ohne den Nutzpflanzen daneben zu schaden. So ließen sich auch Pestizide vermeiden, die viele Arten im und über dem Boden dezimieren können. Der Nachteil vieler dieser Roboter ist jedoch, dass sie nur für *eine* Aufgabe vorgesehen sind.

64



FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG

Ziel erkannt: Der Greifer packt einen Apfel, der auf einer Streuobstwiese liegt, und wird ihn gleich behutsam laden.

Und genau hier setzen die Tübinger Max-Planck-Forschenden mit ihrem Polybot an. Er soll das Schweizer Taschenmesser unter den Feldrobotern werden. Der intelligente Farmroboter ist ein Prototyp auf der Basis eines Vierbeiners, den Boston Dynamics unter dem Namen Spot vertreibt. Wer ihn live bei einer Demonstration beobachtet, dürfte überrascht sein. Aus dem Gleichgewicht lässt er sich nicht so leicht bringen: Ein kräftiger Tritt von der Seite, und der Roboter fängt sich elegant und ganz ohne nachtragend zu sein. Er ist wendig und meistert jedes Gelände, auch im Freien und selbst in Hanglage. Sebastian Blaes, Entwickler am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, sagt, er habe ein solches Exemplar einmal dabei beobachtet, als es wie ein Hund durch hohes Gras jagte. Das siebenköpfige Team am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme konzentriert sich vor allem darauf, das Gehirn des Polybot zu entwickeln, das den an der Front angebrachten Arm und das Werkzeug selbst kontrolliert.

Sein erstes Training absolvierte der Polybot auf einer Streuobstwiese. Dieser Lebensraumtyp gehört zu den artenreichsten Mitteleuropas, die Bewirtschaftung ist noch immer weitgehend Handarbeit. Automatisierte Hilfe ist hier willkommen, vor allem wenn es darum geht, das herabgefallene Obst aufzulesen. Bisher sammelt der Polybot größere Früchte wie Äpfel oder Birnen nach einem fest einprogrammierten Muster ein: Ringsum angebrachte Kameras und eine Kamera am Greifarm registrieren die herumliegenden Äpfel und ihre Umgebung, und der Computer berechnet laufend die Position des Greifers und dessen Entfernung zum Apfel. Im Labor und auf Kunstrasen funktioniert das bereits ganz gut – ist aber etwas wacklig. Und wenn eine Person im Weg steht, interessiert das den Algorithmus bisher herzlich wenig: Der Roboter rempelt sie einfach an.

Das Team trainiert den Polybot nun mit künstlicher Intelligenz für den Einsatz in der echten Welt. „Dabei gehen wir dem Greifarm buchstäblich selbst zur Hand und zeigen ihm, wie er einen Apfel greifen soll“, sagt Wieland



FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG

Auge in Auge: Wieland Brendel kontrolliert ein Beikrautpflänzchen, das der Roboter mithilfe eines neu entwickelten Werkzeugs entfernt hat.

Brendel, der Leiter der Forschungsgruppe für robustes maschinelles Lernen. In der Fachsprache heißt dieses Vorgehen *supervised learning*, zu Deutsch: überwachtes Lernen. Dahinter steckt ein maschineller Lernalgorithmus, welcher über Sensoren und Kameras am Greifer und ringsum alles mitverfolgt, während

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Der KI-gesteuerte Farmroboter Polybot soll die Landwirtschaft nachhaltiger gestalten, Polykulturen realisieren und damit gesündere Böden und eine diversifizierte Ernte ermöglichen. Konventionelle Maschinen sind zu groß oder zu spezialisiert.

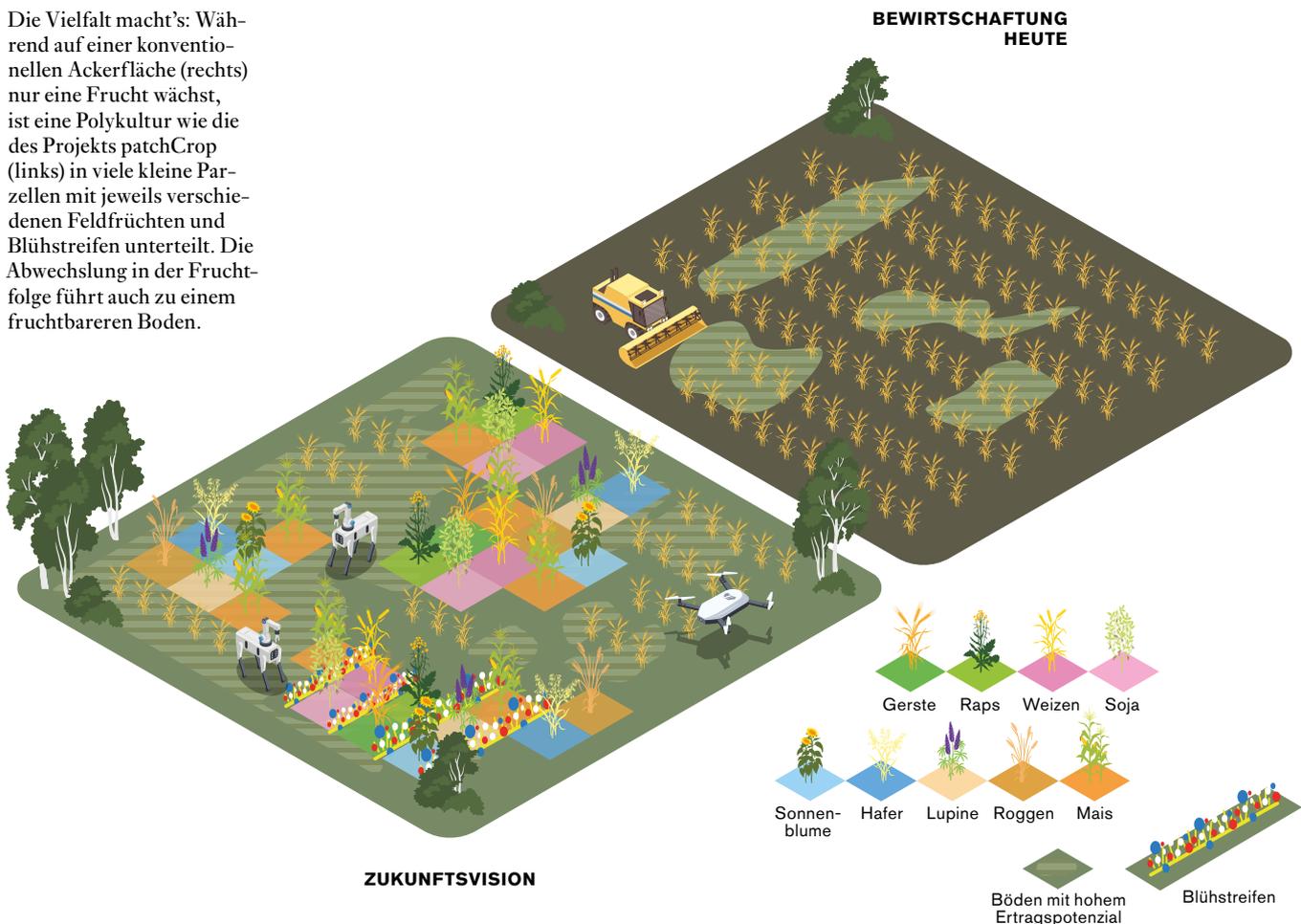
Ein abwechslungsreicher Anbau kostet Zeit und Personal. Mehrere Polybots könnten Abhilfe schaffen, indem sie alle nötigen Aufgaben bewältigen.

Das Team des Polybot setzt auf eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Landwirtschaft, damit sein Produkt den spezifischen Bedürfnissen auf dem Feld entspricht.

Sebastian Blaes den Greifarm langsam zu einem Apfel hin bewegt. Immer wieder manipuliert Blaes die verschiedenen Gelenke so, dass der Arm eine möglichst effiziente Bewegung zum Apfel ausführt. Eben so, wie sie auch ein Mensch ausführen würde. Je mehr die Forschenden den Roboter durch diese Demonstrationen trainieren, desto zielgenauer wird der Polybot dann nach dem Obst greifen, wenn das Training abgeschlossen ist. Woher der maschinelle Lerncode „weiß“, was einen Apfel ausmacht, das lässt sich bei dieser Trainingsmethode übrigens nicht genau erklären. Relevant könnten die Form des Apfels sein, seine glatte Oberfläche oder auch die Tatsache, dass etwas annähernd Kugelförmiges mit Stiel im Gras liegt.

Ist der Roboter fertig trainiert, sollte er natürlich auch dann arbeiten können, wenn schlechtes Wetter aufzieht, Regentropfen über die Linse rinnen oder die Sonne ihre Position ändert. Der Algorithmus darf dann nicht aus dem Konzept kommen, obwohl die Kameras einen Apfel bisher womöglich nur bei besten Lichtverhältnissen gesehen haben. Die Forschenden müssen das Gehirn der Maschine also unter verschiedenen Bedingungen trainieren. Daher auch die Bezeichnung der Forschungsgruppe: Robust Machine Learning. →

Die Vielfalt macht's: Während auf einer konventionellen Ackerfläche (rechts) nur eine Frucht wächst, ist eine Polykultur wie die des Projekts patchCrop (links) in viele kleine Parzellen mit jeweils verschiedenen Feldfrüchten und Blühstreifen unterteilt. Die Abwechslung in der Fruchtfolge führt auch zu einem fruchtbareren Boden.



GRAFIK: GCO NACH FELD 01/2022, LEIBNIZ-ZENTRUM FÜR AGRARLANDSCHAFTSFORSCHUNG (ZALF) E.V.

Die Streuobstwiese ist aber nur *ein* Anwendungsgebiet. Die Tübinger rüsten den Roboter gleichzeitig für seinen Einsatz auf Polykulturen. Die hauseigene Feinmechanik-Werkstatt entwickelt diverse Werkzeuge, mit denen der Roboterarm pflügen, säen oder unerwünschte Beikräuter aus dem Boden ziehen kann. Das Training läuft nach demselben Schema ab. Auf einem Feld nehmen sie den Roboterarm an die Hand und leiten ihn an, wie er zunächst sanft den Spitzweggerich, ein Beikraut, ansteuert, um ihn dann mit einem kurzen Ruck aus dem Boden zu rupfen.

Aber selbst wenn der Prototyp bei Wind und Wetter nicht nur den Spitzweggerich, sondern auch andere Beikrautarten inmitten der Nutzpflanzen erkennt, reicht ein einzelner Roboter nicht aus. Wer viele Menschen mit dem agrarökologischen Ansatz ernähren will, muss große, in viele Parzellen unterteilte Flächen wie die von patchCrop präzise bearbeiten. Es

bräuchte einen ganzen Schwarm an Polybots. Das kommt einem Paradigmenwechsel in der Landwirtschaft gleich. „Wenn es funktioniert, wäre der Gewinn riesig“, sagt Maike Kaufman, Innovationsberaterin am Max-Planck-Institut. Sie sorgt dafür, dass das Projekt den Sprung vom Labor in die Realität schafft. Noch ist all das aber eine Vision. Den Entwicklerinnen und Entwicklern geht es erst mal darum, ein Produkt zu schaffen, das wirklich hilft und nicht nur rumsteht. „Wenn wir mit der Programmierung fertig sind, soll der Polybot einen Hof mit einer Palette an Anwendungsmöglichkeiten betreten“, so Brendel. Er soll genug aus der Praxis gelernt haben, sodass es, egal auf welchem Acker, nur wenige Anweisungen in der Programmautomatik braucht, etwa: Aussaat – Zuckerrübe. Es lohnt sich dann kaum, ihn herumstehen zu lassen. Der Roboter ist Tag und Nacht einsatzbereit. „Je mehr Aufgaben er übernimmt, desto kreativer kann ein Landwirt sein und mit geringem Ri-

siko experimentieren, zum Beispiel neue Früchte pflanzen“, sagt Wieland Brendel. „Ökologisch erzeugte Produkte müssen bezahlbar sein und trotzdem ausreichende Gewinne abwerfen.“

## Wissenschaft trifft Landwirtschaft

Der Landwirt Stefan Funke dagegen sieht eine solche eierlegende Wollmilchsau kritisch: „Wie vielseitig und gleichzeitig spezialisiert kann der Roboter sein?“ Funke spricht aus Erfahrung, einen automatisierten Paprika-Ernteroboter hat er an- und wieder abgeschafft. „Die Technik funktionierte allemal unter Optimalbedingungen. Aber jeder Standort ist anders, und jede Paprika schaut anders aus“, sagt Funke. In Tübingen will man durch robustes Training dafür sorgen, dass so etwas dem Polybot nicht passiert. Das klappt aber nur, wenn sich die

Forschenden eng mit den Landwirtinnen und Landwirten abstimmen. Deshalb haben sie schon früh in der Entwicklung kleinere Höfe aufgesucht, um herauszufinden, was diese wirklich brauchen. „Zugegeben, manche sind dem Polybot gegenüber immer noch skeptisch, aber es hielt auch niemand unsere Idee für Quatsch“, sagt Maike Kaufman. Ein Landwirt hat sogar schon beim Training des Polybot geholfen und den Roboterarm genau so bewegt, wie er es tun würde. „Das hat viel Vertrauen geschaffen und war sehr hilfreich, denn ein Landwirt kennt sich natürlich viel besser mit der Arbeit aus als wir“, sagt Kaufman.

Dieses Prinzip der Forschung im Austausch mit der Landwirtschaft verfolgt auch das Living Lab. In diesem „lebendigen Labor“ definieren Forschende des Zalf mit Landwirtinnen und Landwirten eine Forschungsfrage, die nicht nur eine, sondern beide Seiten interessiert. „Wir steuern auf völlig neue klimatische Bedingungen zu“, sagt Masahiro Ryo, Wissenschaftler am Zalf. Wie können Nahrungsmittel aus der Landwirtschaft auch in einer solchen Zukunft gesichert werden? Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler forschen zwar

bereits an Pflanzensorten, die heftige Trockenperioden besser verkraften. Dank der Genschere CRISPR/Cas ist das möglich. „Aber richtig trockenheitsresiliente Arten gibt es eben nicht. Pflanzen brauchen immer Wasser und Nährstoffe“, sagt Kathrin Grahmann. Bietet die Polykultur da eine Lösung? Eine einfache Antwort gibt es nicht, denn die Lösung hängt vom Standort ab, dem dortigen Klima, von den angebauten Früchten und vielem mehr.

Masahiro Ryo und sein Team haben daher ein KI-Modell entwickelt, das die Komplexität des Problems vereinfachen soll. In diesem Modell fließen zahlreiche Daten zusammen, darunter Analysen von Bodenproben und Klimadaten aus dem Versuchsfeld von patchCrop und Erfahrungswerte von Betrieben, die dem Computermodell per Chatbot mitteilen, welche Methoden bei ihnen funktioniert haben und welche nicht. Ein intelligenter Algorithmus sucht nach Mustern in dem Datensatz und soll schon bald vorhersagen, welche Ackerfrucht im zukünftigen Klima unter welchen Anbaubedingungen die Chance hat, zu gedeihen und gute Erträge zu bringen. Dahinter steckt eine *trustworthy*

AI, so die Fachbezeichnung. Jede KI-Vorhersage, das ist der Anspruch, muss für Praktikerinnen und Praktiker vertrauenswürdig und nachvollziehbar sein, damit diese ihre wertvollen Erfahrungen vom Feld überhaupt mit der KI teilen.

Künstliche Intelligenz lässt sich in der Landwirtschaft also vielfältig einsetzen: An Bord des Polybot erleichtert sie die Arbeit auf dem Feld und könnte Polykulturen überhaupt erst in der Breite realisieren; als Teil des Living Lab beurteilt sie sogar, ob eine Polykultur im zukünftigen Klima erfolgreich ist. Damit aber nicht genug: „Unser KI-Modell ist so umfassend, es könnte auch dabei helfen, den schwierigen Schritt vom Roboter als Einzelkämpfer zum Roboterschwarm zu gehen“, sagt Masahiro Ryo. Für die Mütter und Väter des Polybot ist es eine Herzensangelegenheit, diese Vision zu realisieren. „Vielleicht können wir die Landwirtschaft als Arbeitsplatz schon bald ein Stück attraktiver machen“, sagt Maike Kaufman. Stellenanzeigen könnten eines Tages lauten: „Fachkräfte für die Landwirtschaft gesucht (m/w/d), geregelte Arbeitszeiten und familienfreundliches Umfeld garantiert.“ ←

67

Erster! Der Polybot und sein Team haben noch viel vor. Ihr nächstes Ziel: Sie wollen Landwirtinnen und Landwirte dabei unterstützen, nachhaltig zu wirtschaften.

FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG



## GLOSSAR

### BODENBIOM

bezeichnet den Gesamtlebensraum des Bodens, bestehend aus Bakterien, Pilzen und aus Algen. In einem Gramm Erde werkeln bis zu eine Milliarde verschiedener Mikroorganismen, die Nährstoffe für Pflanzen aufbereiten. Pilze, die in Symbiose mit Pflanzen leben, liefern diesen Kohlenhydrate und erhalten als Gegenleistung Nährstoffe.

### AGRARÖKOLOGIE

bezieht sich auf Konzepte und das Management von Agrarökosystemen. Dahinter steckt ein interdisziplinärer Ansatz mit dem Ziel sozial nachhaltiger Landwirtschafts- und Nahrungsmittelsysteme. Sie optimiert Wechselwirkungen zwischen Pflanzen, Tieren, Menschen und der Umwelt.

Leuchtendes Beispiel:  
Bei der Entwicklung  
von Quantencomputern  
nutzt das planqc-Team  
Laserlicht, um Atome  
einzufangen und zu  
manipulieren.



# RECHNEN MIT ATOMEN

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Sie sollen manche Rechnungen etwa beim Design von Windrädern und Flugzeugturbinen, in der Materialentwicklung oder der Klimaforschung einmal viel schneller ausführen als heutige Computer. Daher setzen unter anderem Microsoft, Google und IBM auf Quantencomputer. 2022 ist auch das Garching Start-up planqc, eine Ausgründung des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik, in das Rennen eingestiegen – mit einem eigenen technischen Konzept. 2027 sollen die ersten Quantenrechner des Unternehmens betriebsbereit sein.

„Sehen Sie die Glaszelle?“, fragt Johannes Zeiher im Labor. Durch ein Labyrinth aus optischen Bauteilen, Geräten und Leitungen hindurch kann man eine kleine Quarzglaszelle erspähen. Wäre das Experiment in Betrieb, dann könnte man darin eine Wolke von im Vakuum schwebenden Metallatomen leuchten sehen. Die könnte künftig den Rechenkern eines Quantencomputers bilden und dabei recht ästhetisch anmuten. Derzeit sind verschiedene Techniken im Rennen, mit denen praktisch einsetzbare Quantencomputer manche Probleme künftig viel schneller knacken sollen als heu-

tige Rechner. Auf die Wölkchen gasförmiger Atome setzt das Start-up planqc – der Name ist ein Kunstwort aus „Planck“ und „Quantencomputer“. Johannes Zeiher ist Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und einer der Gründer von planqc, einer Ausgründung des Instituts.

Das Start-up richtet sich gerade in einem ehemaligen Baumarkt in Garching ein. Die Wahl sei auf diesen Ort wegen des besonders soliden Tiefgeschosses gefallen, erklärt Sebastian Blatt, Chefentwickler und ebenfalls Gründer von planqc sowie Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Quantenoptik: „So solide Keller baut man heute nicht mehr. Dieser bleibt auch im Sommer kühl, was bei den Stromkosten der Klimaanlage spart.“ Darin wird gerade renoviert und umgebaut. Gleichzeitig entsteht in einem Reinzelt ein Labor, vielmehr die Entwicklungs- und Produktionsstätte künftiger Quantencomputer. Dort befindet sich bereits ein optischer Tisch, der die Ausmaße einer Tischtennisplatte hat und auf dem optische

Apparaturen für den planqc-Rechner entwickelt und getestet werden. Darum herum sind sogenannte Racks angeordnet, technische Regale, wie man sie von Computerservern kennt. In ihnen stecken Laser sowie Test- und Messgeräte.

Planqc entwickelt aber nicht nur eine als vielversprechend geltende Technik für einen frei programmierbaren Quantencomputer, sondern auch Rechenverfahren – Quantenalgorithmen –, die dieser verarbeiten soll. Man kann sich einen Quantenalgorithmus als Analogon zur Software für herkömmliche klassische Computer vorstellen. Da Quantencomputer anders funktionieren als gängige Rechner, können sie möglicherweise einige spezielle Aufgaben schneller lösen. Sie werden klassische Rechner also nicht ersetzen, können sie aber bei manchen Aufgaben ergänzen. Derzeit gibt es allerdings nur wenige Rechenverfahren für Quantencomputer. Wie vielseitig diese sich einsetzen lassen werden, hängt also auch davon ab, welche Quantenalgorithmen Forschende noch aus- →

69

klügeln. Deshalb sei das Algorithmen-Team bei planqc wichtig, sagt Sebastian Blatt.

## Auf der Suche nach Algorithmen

Die Entwicklung der Algorithmen leitet Martin Kiffner, der von der Universität Oxford zur Firma stieß. „Er ist ein Experte für Quantenalgorithmen, zum Beispiel speziell für die Fluidodynamik“, erklärt Blatt. „Fluidodynamikrechnungen kommen praktisch überall vor. Das ist eines unserer wichtigsten Standbeine in der Algorithmenentwicklung.“ Mit der Fluidodynamik lassen sich etwa die höchst komplexen Luft- oder Wasserströmungen um Turbinenschaufeln berechnen, was auf Computern enorme Rechenleistungen erfordert, aber für die Entwicklung effizienter Generatoren und Triebwerke nötig ist. Hier könnten Quantencomputer künftig Vorteile bringen. Auch die Entwicklung von Materialien werden sie möglicher-

weise beschleunigen, vor allem wenn es um Materialien geht, auf deren Quanteneigenschaften es ankommt – zum Beispiel solche für extrem empfindliche Sensoren oder neuartige Halbleiterelektronik. Denn gerade Quantencomputer dürften Quanteneigenschaften besonders effizient simulieren. Darüber hinaus könnten sie komplizierte chemische Verbindungen, etwa neue medizinische Wirkstoffe, berechnen. Manche Fachleute setzen auch darauf, dass die Rechner Logistikrouten optimieren werden oder Muster im atmosphärischen Geschehen besser erkennen und so die Wetter- und Klimavorhersagen verfeinern. Diese Anwendungen existieren bislang allerdings lediglich als Konzepte, von denen aktuell noch nicht klar ist, ob sie sich verwirklichen lassen.

Deshalb diskutiert das planqc-Team auch mit Industrievertretern, bei welchen Aufgaben Quantencomputer ihren Geschwindigkeitsvorteil ausspielen könnten. „Solche Kontakte helfen uns, zu verstehen, welche Anwendungen von Quantencomputern für die Wirtschaft interessant sind“, sagt Blatt. Erfahrung beim Brückenschlag zwischen Quantenphysik und Wirtschaft bringt Alexander Glätzle mit, der Dritte im Gründungstrio und Geschäftsführer von planqc. Er kommt aus der theoretischen Quantenphysik, hat unter anderem an der Universität von Oxford geforscht und wechselte 2018 in die Wirtschaft, wo er als Berater in der Kommerzialisierung von Quantentechnologien arbeitete. Dass einerseits so große Hoffnungen in Quantencomputer gesetzt werden, ihre Einsatzmöglichkeiten andererseits aber erst noch erforscht werden müssen, liegt daran, wie sie zu ihrer Rechenkraft kommen (siehe *Max Planck Forschung* 2/2022 und *Techmax* 36). Die Technik des planqc-Rechners beruht darauf, dass sich vor allem Alkalimetallatome wie etwa Rubidium und Lithium sowie Erdalkalimetalle wie Strontium in einer geschickten Kombination aus Laserlicht und Magnetfeldern einfangen lassen.

Wenn Sebastian Blatt das Konzept vorstellt, stößt er gelegentlich auf Skepsis: „Das ist ja kein richtiger Compu-

Mittler zwischen Grundlagenforschung und kommerzieller Entwicklung: Alexander Glätzle, Johannes Zeiher und Sebastian Blatt (von links) bilden das Gründungsteam von planqc.



70

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Derzeit werden drei Techniken für frei programmierbare Quantencomputer entwickelt: supraleitende Schaltkreise, Ionen in Paul-Fallen und neutrale Atome in optischen Gittern. Auf Letztere setzt das Start-up planqc, eine Ausgründung des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik.

Planqc plant, gemeinsam mit dem DLR beziehungsweise dem Leibniz-Rechenzentrum bis 2027 erste frei programmierbare Quantencomputer zu konstruieren und diese zu miniaturisieren. Dafür steht dem Unternehmen ein Kapital von 87 Millionen Euro zur Verfügung.

Bei welchen Berechnungen Quantencomputer schneller als klassische Rechner sind, wird derzeit erforscht. Aktuell werden Anwendungen in der Fluidodynamik, etwa zur Optimierung von Turbinen, in der Materialentwicklung und in der Klimaforschung untersucht.

ter, denn da gibt es ja gar keinen Chip“, bekomme er manchmal zu hören. Viele Gesprächspartner haben eine von der aktuellen Technik geprägte Vorstellung von Computerprozessoren. Dazu passen zwei Ansätze besser, die mit der planqc-Technik konkurrieren, weil es bei diesen echten Computerchips gibt. Einer dieser Ansätze nutzt als Qubits supraleitende Stromkreise, in denen also Strom bei sehr tiefen Temperaturen ohne Widerstand fließt. Daran forschen zum Beispiel IBM, Google oder das finnische Start-up IQM, das eine Niederlassung in München hat. In einem weiteren Konzept führen Ionen, sprich: elektrisch geladene Atome, die auf einem Chip in einem geschickt geformten elektrischen Feld, einer sogenannten Paul-Falle, gefangen werden, quantenlogische Operationen aus. Wie bei den elektrisch neutralen Atomen, mit denen planqc arbeitet, wer-

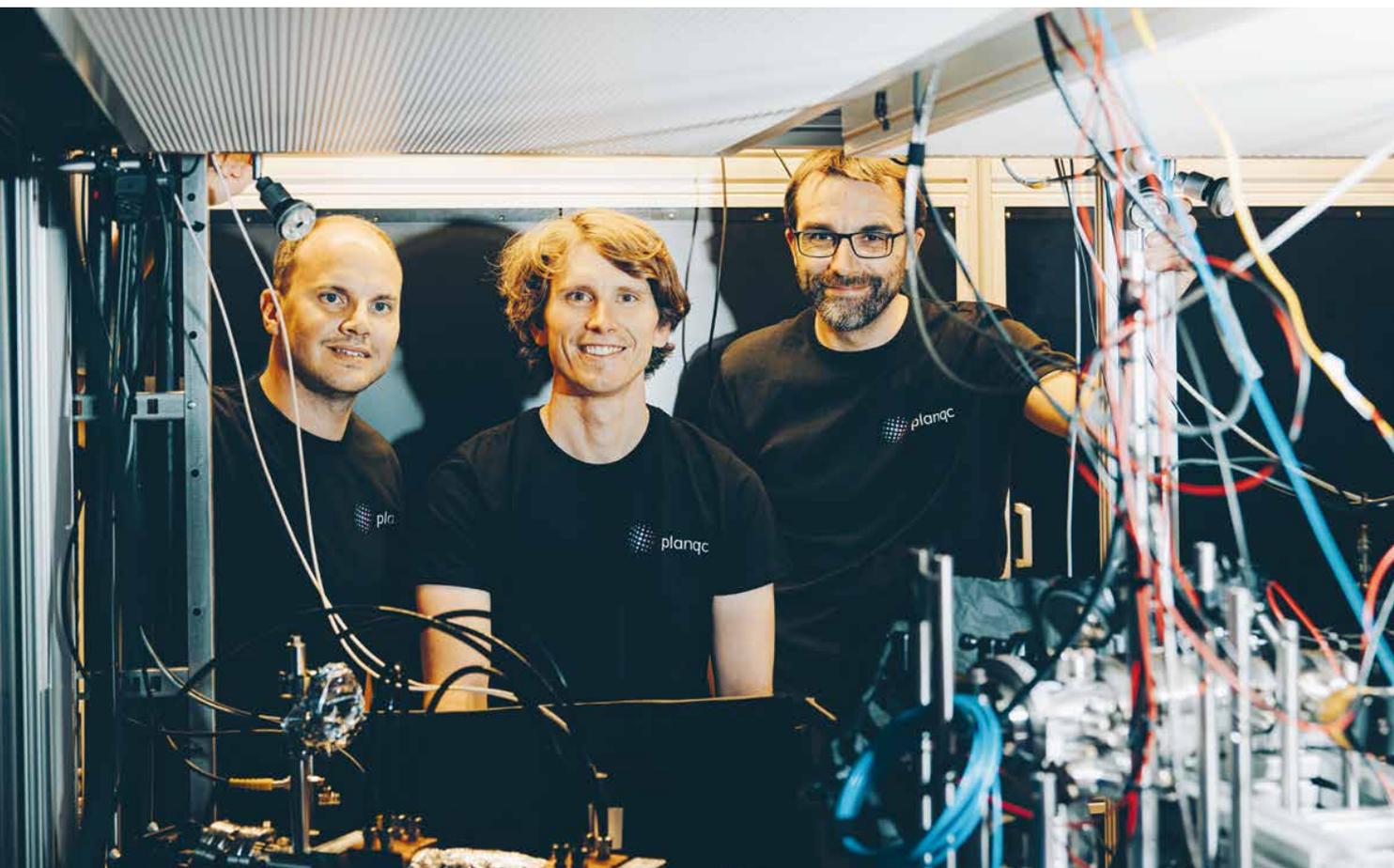


FOTO: PLANQC

den die ionischen Qubits mit Laserstrahlen angesteuert und manipuliert.

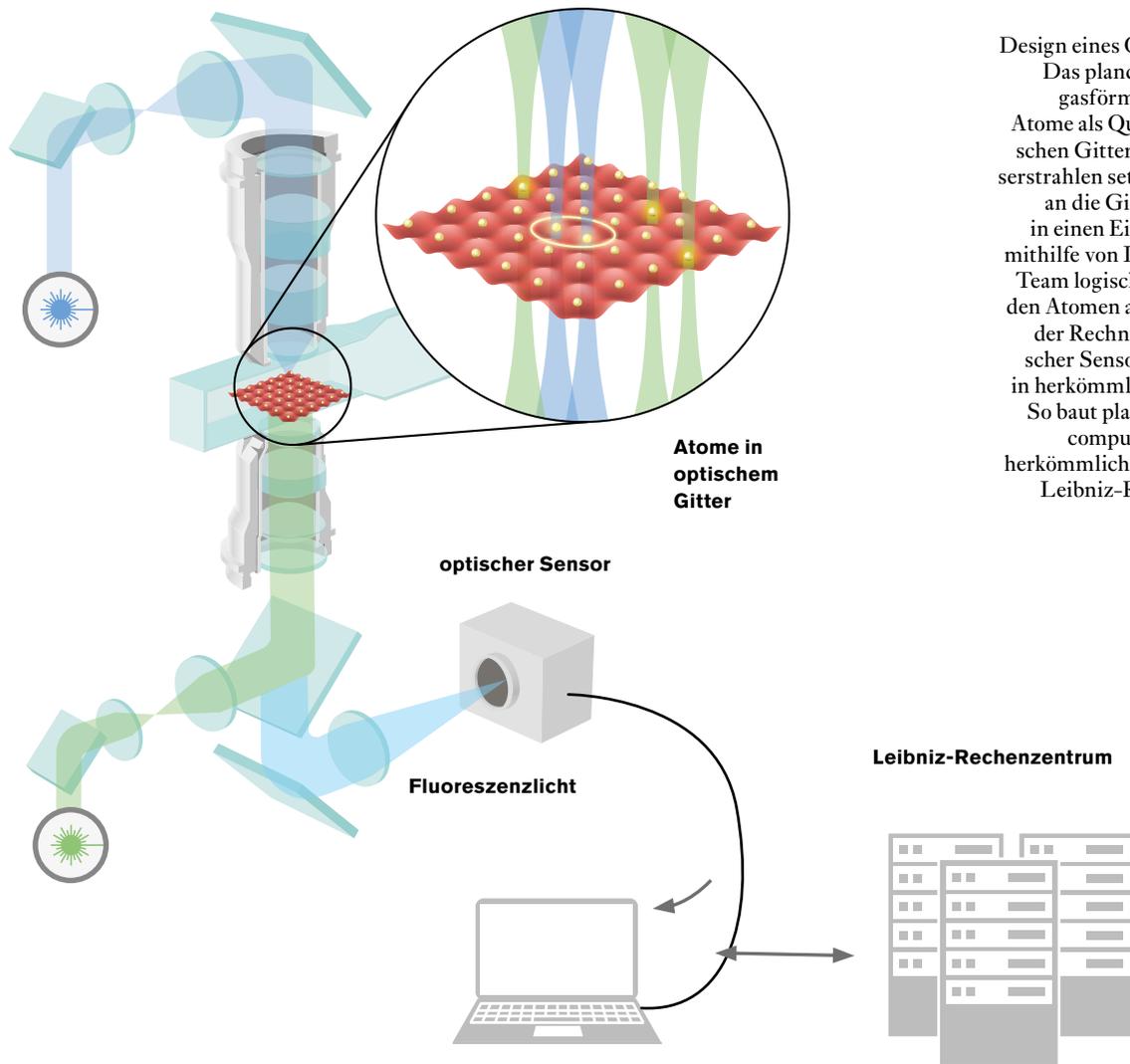
## Robuste Geräte nach Industrienormen

Von dem Ansatz, den planqc verfolgt, erhofft sich das Unternehmen, dass sich in den Lichtgittern vergleichsweise leicht eine größere Zahl von Atomen, sprich Qubits, zu einem Quantenprozessor vereinen lassen. Zur Entwicklung dieses Gebiets hat die langjährige Grundlagenforschung am Max-Planck-Institut für Quantenoptik beigetragen. Auf den Ergebnissen dieser Forschung aufbauend, wurde 2022 planqc gegründet. Johannes Zeiher, der weiterhin auch Grundlagenforschung betreibt, erklärt seine persönliche Motivation so: „Für mich ist klar, dass neutrale Atome eine vielver-

sprechende Technologie für Quantencomputer sind. Daher sollten wir erste Schritte gehen, um das Anwendungspotenzial solcher Maschinen zu untersuchen.“ Zudem bringe der intensive Austausch zwischen kommerzieller Entwicklung und Grundlagenforschung auch Letztere voran. „In der Grundlagenforschung entwickeln wir sozusagen Prototypen, die frei von kommerziellen Zwängen auf bestimmte Bereiche hin optimiert sind“, erklärt Zeiher. „Die bringen ab und zu Durchbrüche und eröffnen etwas ganz Neues.“ Auf der Basis dieser Erkenntnisse entwickelt planqc robuste kommerzielle Geräte, die auch alle Industrienormen erfüllen. Solche zuverlässigen Geräte hofft Zeiher später auch im Grundlagenlabor einsetzen zu können.

Planqc wächst im Quantenbiotop des Munich Quantum Valley heran. „Wir

sind die erste Ausgründung im Munich Quantum Valley“, sagt Sebastian Blatt. Als Vorzeigeprojekt wird planqc auch von der Bundesregierung gefördert, und zwar über eine Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, kurz DLR. Für das große Interesse an dem Garching Start-up sorgt auch das „Handlungskonzept Quantentechnologien“ der Bundesregierung. „Darin steht, dass man gerne bis Ende 2026 einen digitalen Quantencomputer mit hundert Quantenbits hätte“, sagt Blatt: „Und das einzige kommerzielle Projekt in Deutschland mit demselben Ziel ist eines, an dem wir zusammen mit dem DLR arbeiten.“ Dieses Projekt heißt DiNAQC, das Akronym steht für „Europas ersten Digitalen Neutral-Atom-Quantencomputer“. Für den Bau des Demonstrators mit zunächst hundert Quantenbits erhält planqc 30 Millionen Euro. Die →



**Design eines Quantenprozessors:**  
Das planqc-Team verwendet gasförmige, aber sehr kalte Atome als Qubits. In einem optischen Gitter aus gekreuzten Laserstrahlen setzen sich die Atome an die Gitterpunkte wie Eier in einen Eierkarton. Ebenfalls mithilfe von Laserlicht führt das Team logische Operationen mit den Atomen aus. Die Ergebnisse der Rechnungen liest ein optischer Sensor aus und speist sie in herkömmliche Elektronik ein. So baut planqc einen Quantencomputer als Koprozessor herkömmlicher Großrechner am Leibniz-Rechenzentrum auf.

GRAFIK: GCO NACH MPQ

72

Apparatur soll im Frühjahr 2027 beim DLR in Ulm in Betrieb gehen, also kaum später, als es das sehr ambitionierte politische Handlungskonzept vorsieht. An diesem Quantencomputer sollen erste Quantenalgorithmen für praktische Anwendungen ausprobiert werden. „Wir machen dort auch die ersten Schritte in Richtung Quantenfehlerkorrektur“, erläutert Blatt.

## Miniaturisierte Quantenrechner

Ein Korrekturmechanismus ist beim Quantenrechnen nötig, da Quanteninformation extrem empfindlich gegen kleinste Störungen ist. Sie muss aufwendig stabilisiert und auf Fehler geprüft werden. Zur Stabilisierung dient der Trick, jeweils mehrere physikalische Qubits, bei planqc sind es

die Atome, zu logischen Qubits zusammenzufassen. Passiert ein Fehler in einem physikalischen Qubit, kann die Quantenrechnung trotzdem weiterlaufen. Zur Fehlerkorrektur führt man Hilfsqubits ein, die als Sensoren für Störungen dienen – wie Kanarienvögel im Bergwerk. Solange eine Quantenrechnung läuft, dürfen die beteiligten logischen Qubits nämlich nicht auf Fehler überprüft werden, sonst bricht die Rechnung ab. Dank der Fehlermeldungen der Hilfsqubits kann das Resultat jedoch hinterher korrigiert werden. So benötigt ein Quantencomputer letztlich Zigtausende oder sogar Millionen von physikalischen Qubits.

Bislang füllt die Technik mit den optischen Geräten und Vakuumkammern, die ein planqc-Rechner benötigt, ganze Labore. Miniaturisierung ist deshalb ein Ziel des zweiten

Großprojekts von planqc, das vom Bundesforschungsministerium mit 20 Millionen Euro gefördert wird. Darin baut das Start-up gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik am Leibniz-Rechenzentrum in Garching bis Ende 2027 ein Gerät namens MAQCS, kurz für „Multikern Atomare Quantencomputing Systeme“. Dieser Rechner soll schon tausend Neutralatome als Quantenbits besitzen und gewissermaßen als Koprozessor in den dortigen konventionellen Großcomputer integriert werden, und zwar platzsparend in kompakte Racks. „Wir wollen auch die Vakuumkammer mit den Atomen in solch ein Rack hineinbringen“, erklärt Blatt: „Wir machen hier Ingenieursarbeit!“ Entsprechend benötigt planqc auch Ingenieure. „Die Firma muss jetzt wachsen, um die Projekte zeitgerecht zu schaffen.“ Da trifft es sich gut, dass das Start-up, das

aktuell insgesamt rund fünfzig Mitarbeitende hat, im Sommer 2024 weitere Millionen Euro an privatem Risikokapital eingeworben hat. So kommt es aktuell auf eine Finanzierung von 87 Millionen Euro – die Anteile an den beiden Großprojekten eingerechnet.

Ob letztlich die neutralen Atome in optischen Gittern, supraleitende Schaltkreise oder aber Ionen in Paul-Fallen das Rennen um einen praktisch einsetzbaren Quantencomputer machen werden, ist derzeit noch offen. Das meint auch Piet Schmidt von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Dort entwickelt der Physikprofessor extrem präzise optische Atomuhren, welche ebenfalls auf Ionen in Paul-Fallen basieren. „Technologisch teilen wir mit dem Quantencomputer dieselbe Plattform“, erklärt Schmidt, Er ist Mitgründer des deutschen Start-ups Qudora, das kommerzielle Quantencomputer auf Basis von Ionen in Paul-Fallen entwickelt – ein Konkurrent von planqc also. Von den Fortschritten bei den Neutralatomen ist Piet Schmidt beeindruckt, er meint aber auch: „Das wird sich verlangsamen, die profitieren jetzt von bereits in den anderen Gebieten entwickelten Technologien.“

Angesichts des Ziels, viele Tausend, Zehntausend und mehr Qubits zu kontrollieren, sieht er noch enorme technische Herausforderungen bei allen drei Techniken. Bei den supraleitenden Qubits liegt ein ungelöstes Problem darin, dass die Schaltkreise extrem viele Kabel benötigen, die gute Wärmeleiter sind. Diese transportieren Wärme aus der Umgebung in den Kryostaten, der als Hightech-Thermoskanne den supraleitenden Chip kühlen soll. Wie trotzdem eine große Zahl von Qubits gekühlt werden kann, ist noch unklar. Hinzu kommen Probleme, aus dem supraleitenden Material, derzeit Aluminium, möglichst gleichartige Schaltkreise zu fabrizieren. Damit sich Ionen für Quantenrechnungen nutzen lassen, müsste nach Schmidts Ansicht die Miniaturisierung noch Fortschritte machen. Bislang können nämlich nicht genug optische und elektronische Komponenten in die Fallenchips integriert werden. Auch gelingt es bislang nicht, viele Ionen in einer Falle zu fangen. Mehrere Fallenchips zu koppeln, könnte hier ein Ausweg sein. Bei den Neutralatomen in optischen Gittern sieht Schmidt eine Hürde, die nach einem technischen Detail klingt, aber trotzdem noch genommen werden muss: Die Hilfsqubits müssen sich

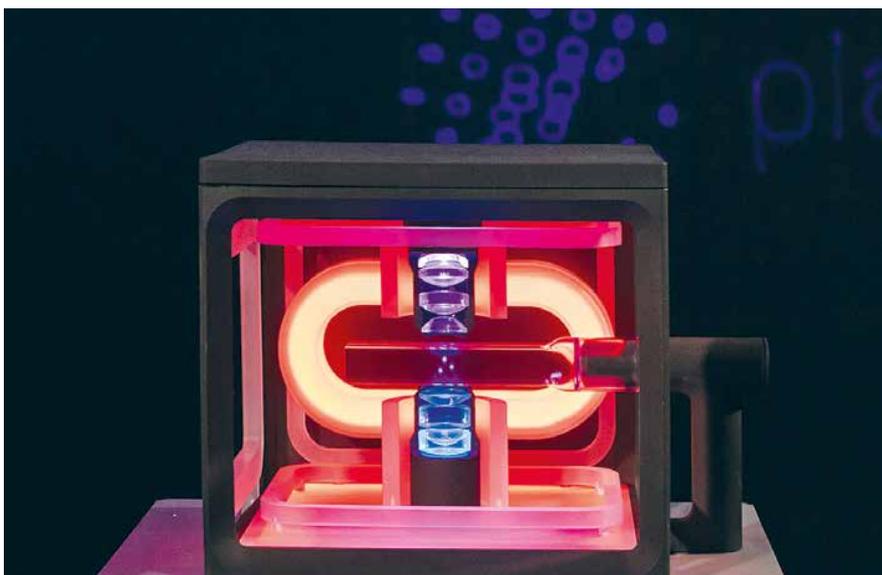
während der Rechnung noch schneller auslesen lassen, um die Fehlerkorrektur zu ermöglichen.

Und die Zukunftsaussichten? Piet Schmidt macht sich, so wie viele Forschende, Sorgen wegen des Hypes um den Quantencomputer. Der hat in Politik und Wirtschaft sehr hohe Erwartungen geweckt. Eine langfristige Förderpolitik muss Start-ups jedoch genug Zeit einräumen, damit sie Quantencomputer Schritt für Schritt kommerzialisieren können. „Ich war allerdings kürzlich bei Kollegen in den USA, in Harvard und am MIT, die zum Teil auch ihre eigenen Start-ups haben“, sagt er: „Die sind angesichts der derzeitigen Fortschritte sehr optimistisch.“ Planqc platziert seine Technik jedenfalls schon am Markt: „Natürlich kann jeder bei uns einen Quantencomputer kaufen“, betont Sebastian Blatt. Von einer Massenproduktion sei das Unternehmen jedoch noch weit entfernt, allein schon deshalb, weil die Computer von Stück zu Stück noch weiterentwickelt werden. „Sobald wir eines Tages einen Computer gebaut haben, den die Kunden in großer Stückzahl haben möchten“, sagt Sebastian Blatt, „würde planqc natürlich auch den Schritt zur Massenproduktion gehen.“ ←

73

Vorzeigeapparatur: Bei der Eröffnung des Firmensitzes 2024 präsentierte planqc das Design einer Glaszelle. Diese soll den Kern eines Quantenrechners bilden, in dem künftig viele Atome kontrolliert werden.

FOTO: PLANQC



## GLOSSAR

### OPTISCHES GITTER

Es wird durch kreuzweise überlagerte Laserstrahlen erzeugt. Deren Wellen überlagern sich so, dass das elektromagnetische Feld an den Gitterpunkten elektrisch neutrale Atome fixieren kann.

### PAUL-FALLE

heißt eine Anordnung von Elektroden, deren elektrische Felder so kombiniert werden, dass sie Ionen einfangen.

### SUPRALEITENDE SCHALTKREISE

werden aus einem widerstandslosen Leiter konstruiert und eignen sich wegen ihrer Quanteneigenschaften als Qubits.

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Marwa Kavelaars vom Berliner Max-Planck-Institut für Bildungsforschung ist für drei Wochen ins winterliche Skandinavien gereist. Sie untersucht menschliches Entscheidungsverhalten und erzählt von ihrer Arbeit mit finnischen Eisfischerinnen und -fischern.

FOTO: PETRI NIEMELÄ



Warten auf den großen Fang: Neben warmer Kleidung ist beim Eisfischen vor allem Geduld gefragt, aber auch die Bereitschaft, sein Glück an einer anderen Stelle zu versuchen.

74

Schon als Kind war ich gern draußen. Obwohl ich in der Stadt aufgewachsen bin, habe ich oft Tiere beobachtet, ob es nun kleine Insekten auf dem Spielplatz waren oder Vögel im Park. Auch später bin ich meiner Neugier gefolgt und habe in meiner Doktorarbeit das Verhalten von Seevögeln bei der Nahrungssuche erforscht. Mit kleinen GPS-Trackern habe ich ihre Bewegungsmuster aufgezeichnet. In meinem Postdoc-Projekt verfolge ich einen ganz ähnlichen Ansatz, nur dass es diesmal um menschliche Nahrungssuche geht, genauer gesagt: um das Eisfischen.

Eisfischen ist in Finnland eine beliebte Outdoor-Aktivität, bei der sich Entspannung, Geselligkeit und Naturgenuss verbinden lassen. Häufig geht es dabei auch um Wettbewerb. Unser Team unter der Leitung von Ralf Kurvers organisiert seit einigen Jahren gemeinsam mit Raine Kortet von der Universität Ostfinnland eigens Wettkämpfe, um Forschungsdaten zu sammeln. Wir mussten das ursprüngliche Wettbewerbssetting lediglich

ein wenig anpassen, um daraus ein kontrolliertes Experiment zu machen. Das Spannende daran ist, dass wir auf diese Weise menschliches Verhalten in der realen Welt studieren können anstatt im Labor oder online. Bei unseren Wettbewerben können sich die Eisfischerinnen und -fischer frei in ihrer natürlichen Umgebung bewegen, während wir ihre Bewegungen mithilfe von GPS-Smartwatches und Kopfkameras verfolgen. So wissen wir jederzeit, wohin sie gehen und was sie machen. Unser Ziel dabei ist es, zu verstehen, wie sie verschiedene Informationen kombinieren, um Entscheidungen zu treffen.

Als Erstes müssen sie entscheiden, wo sie ein Loch ins Eis bohren und ihre Leine auswerfen. Mit dem Handboh-

rer, den sie benutzen, ist das harte Arbeit, denn das Eis ist bis zu einen Meter dick. Sobald dies geschafft ist, brauchen sie einerseits Geduld, andererseits sollten sie aber nicht zu viel Zeit an einer unergiebigem Stelle vergeuden. Die zweite Entscheidung ist also, wie lange sie an einem Ort bleiben. Uns interessiert auch, welche Rolle dabei soziale Informationen spielen. Aus diesem Grund haben wir die Leute entweder allein oder zu mehreren losgeschickt, um zu untersuchen, ob sie, je nach sozialem Kontext, unterschiedliche Entscheidungen treffen.

Unser Team vom Max-Planck-Institut für Bildungsforschung war international, wir waren Forschende aus den Niederlanden, aus Frankreich und





## JOENSUU, FINNLAND

Deutschland. Zu viert haben wir in einer kleinen Hütte an einem See in der Gegend von Joensuu gewohnt, ganz im Osten Finnlands. Diese Hütte lag inmitten einer traumhaften Winterlandschaft, umgeben von Wäldern. Für die Wettbewerbe sind wir jeden Tag an einen anderen See gefahren. Am frühen Morgen trafen wir uns dort mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern und statteten sie mit den Smartwatches und den Kopfkameras aus. Dann ging es los.

Die Stimmung bei den Wettkämpfen war sehr entspannt. Nachmittags gab es am Seeufer meistens einen Stand mit Hotdogs, Kaffee und heißer Schokolade. Bei Temperaturen von minus zehn Grad konnte man das gut gebrauchen. Viele der Eisfischerinnen und -fischer kennen einander schon seit Jahrzehnten, und ich habe es sehr genossen, diese eingeschworene Gemeinschaft eine Zeit lang zu begleiten. Obwohl wir nicht dieselbe Sprache sprechen, entwickelten wir nach und nach ein Gefühl der Vertrautheit. Anfangs fan-

den die Eisfischerinnen und -fischer es vielleicht noch komisch, dass wir den weiten Weg von Berlin auf uns nehmen, um diese Wettbewerbe zu organisieren. Sie haben aber ihren Spaß daran und machen jedes Jahr wieder mit.

Wenn die Eisfischerinnen und -fischer nachmittags zurückkamen, wogen wir ihren Fang. Nach der Bekanntgabe der Gewinner, die ein Preisgeld erhalten, machten wir uns auf den Weg zurück zur Hütte. Dort mussten wir zunächst einmal alle Daten von den Smartwatches und Kameras auf den Rechner laden. Bei der Menge an Daten dauerte das immer mehrere Stunden. In der Zwischenzeit hat jemand von uns gekocht, während wir alles für den nächsten Tag vorbereiteten. Nach dem Abendessen wurde dann oft noch Holz aus der Garage geholt, und wir machten in der Sauna gleich neben der Hütte ein Feuer. So konnten wir uns nach einem langen Tag in der Kälte so richtig aufwärmen und beim Duft von Fichtennadeln entspannen.



75

FOTO: PRIVAT

Marwa Kavelaars

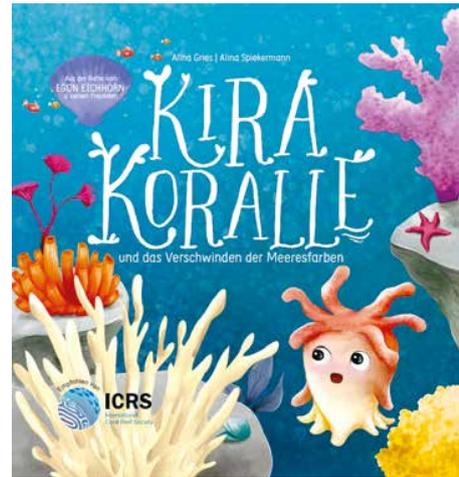
35, ist Biologin und stammt aus den Niederlanden. Seit 2023 ist sie Postdoc am Center for Adaptive Rationality. Ihre Leidenschaft gilt der Wissenschaftskommunikation. Sie möchte gerne Interesse an der Natur wecken und zugleich mehr Mädchen für die Wissenschaft begeistern. In ihrer Freizeit beobachtet sie gerne Vögel und wandert.

# ALGE GESUCHT

Es steht nicht gut um die Riffe. Infolge des Klimawandels kommt es immer häufiger zu Korallenbleichen: Stressbedingt stoßen die Korallen die photosynthetischen Algen ab, die als Symbionten in ihrem Gewebe leben. Dadurch verlieren sie ihre Farben und sterben schlimmstenfalls ab, wenn sich die Bedingungen nicht bessern. Die Kinderbuchautorin Alina Gries und die Illustratorin Alina Spiekermann haben vor diesem Hintergrund ein Bilderbuch herausgebracht. Protagonistin ist Kira Koralle – eine Korallenlarve, die davon träumt, eines Tages die bunteste Koralle im ganzen Ozean zu sein. Dafür braucht sie eine Alge. Kira begibt sich auf eine abenteuerliche Suche und lernt die unterschiedlichsten Meerestiere kennen. Einfach geschrieben und liebevoll illustriert, richtet sich die Geschichte an Kinder ab fünf Jahren. Sie entstand in Zu-

sammenarbeit mit Christian Voolstra, Korallenexperte an der Universität Konstanz und Präsident der International Coral Reef Society. Er stellt sicher, dass die Details stimmen – etwa die sechs Tentakel auf Kiras Kopf, die zur Gruppe der Sechsstrahligen Korallen gehört. Ein Glossar erklärt Begriffe wie Symbiose, Polyp oder Nesseltier. Ein Bild zum Ausmalen rundet das Buch ab. Mit *Kira Koralle* machen Alina Gries und Alina Spiekermann vor, wie es gelingen kann, Kinder für Umweltthemen zu begeistern.

*Elke Maier*



Alina Gries, Alina Spiekermann  
*Kira Koralle*  
48 Seiten, Buch Verlag Kempen  
19,90 Euro

76



## WAS WÄRE, WENN...?

„Alle Staatsgewalt geht vom Volke aus“, heißt es im Grundgesetz. Wie das Volk seine Gewalt ausübt, darüber herrscht Streit zwischen jenen, welche die liberale Demokratie mit ihrer Diskurs- und Kompromisspflicht zu schützen suchen, und jenen, die meinen, das „Volk“ vor „korrumpierten“ Eliten in Institutionen und Regierung schützen zu müssen. Jenes Gebilde aus Menschen also, von dem der Philosoph Jürgen Habermas sagte, das Volk „tritt immer im Plural auf“. Der Jurist und Autor Maximilian Steinbeis nimmt diesen Streit ernst und antizipiert seinen Ausgang. Sollten jene, welche die Macht dem „Volk“ zurückgeben wollen, in stärkere politische Verantwortung kommen: Welche Reformen würden folgen, und welche Einbußen an Demokratie drohten als Zwischenschritte zur Macht des „Volkes“? Mit einem 14-köpfigen Forschungsteam aus Wissenschaft und Praxis skizziert Steinbeis am Beispiel Thüringens jene Schritte und spielt ihre Auswirkungen auf Schulen und Universitäten, auf Justiz und Polizei,

auf Medien, Kunst und die Gesellschaft durch – auf Basis von mehr als hundert Interviews mit Vertretern aus der Praxis. Eingänglich und schnörkellos beschreibt er, wie einfach und rapide sich die freiheitliche demokratische Grundordnung umbauen ließe – durch juristische Expertise unter „Nutzung“ der Demokratie und ihrer Schwachstellen. Welche Möglichkeiten jeder Einzelne hat – privat oder als Funktions- oder Entscheidungsträger in der Verwaltung, in Gemeinden oder in Bildungseinrichtungen bis hin zum Bund selbst –, zeigt Steinbeis unter einem markanten Schlagwort: ziviler Verfassungsschutz. Unerlässlich ist das Wissen, wofür es sich einzustehen lohnt.

*Michaela Hutterer*

Maximilian Steinbeis  
*Die verwundbare Demokratie*  
304 Seiten, Hanser  
25,00 Euro

# NEU

# ERSCHIENEN

## DIE EVOLUTION DES KOSMOS

*Alles Zufall im All?*

Der unter Marketingaspekten clevere Titel macht neugierig, ist allerdings irreführend. Denn selbstverständlich wird diese rhetorische Frage auf den mehr als 200 Seiten nicht beantwortet – wie auch? Niemand kennt *Das geheime Rezept des Universums*, so die Unterzeile. Ist dieses Buch also eine Enttäuschung? Nein, im Gegenteil! Denn das kongeniale Autorengespann Erik Bertram und Dominika Wylezalek bietet einen so mitreißenden und verständlichen Streifzug durch die Geschichte des Alls, dass man das Buch gar nicht aus der Hand legen möchte. In drei Abschnitten schildern Bertram und Wylezalek die Entwicklung des Kosmos seit dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren und spannen den Bogen von den ersten Quantenfluktuationen über die Geburt der Galaxien, das Leben der Sterne bis hin zu unserer Erde und den Planeten, die um fremde Sonnen kreisen. Dabei geben die beiden interessante Einblicke in ihr jeweiliges Fachgebiet: So erklärt der theoretische Astrophysiker Erik Bertram, wie die Forschenden heute das Universum im Computer simulieren, während die beobachtende Astronomin Dominika Wylezalek die Leserinnen und Leser auf eine Reise in die chilenische Atacama-Wüste mitnimmt, zu einem der größten Fernrohre der Welt. In jeder Hinsicht auf dem neuesten Stand und mit Fotos und eingängigen Grafiken angereichert, bietet das Buch einen guten Überblick über die aktuelle Wissenschaft. *Alles Zufall im All?* Der Laie wird bei der Lektüre nicht nur staunen, sondern dazu eingeladen, selbst über Antworten nachzudenken.

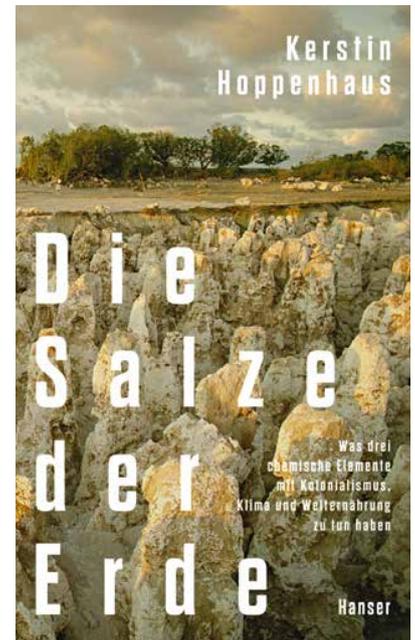
Helmut Hornung



Erik Bertram, Dominika Wylezalek  
*Alles Zufall im All?*  
224 Seiten, Franckh-Kosmos  
18,00 Euro

## FLUCH UND SEGEN

Nicht Gold, auch nicht Kohle, Erdöl oder Lithium – die kostbarsten Stoffe für unser Leben auf der Erde sind vielmehr Phosphor, Kalium und Stickstoff, schreibt die Biologin Kerstin Hoppenhaus. In vier Kapiteln zeigt sie, wie diese drei Elemente aus der Luft oder auf abgelegenen Inseln gewonnen werden oder wie sie sich aus Hühnermist, aus Stroh oder auch mithilfe von Bodenorganismen nachhaltig erzeugen lassen. Auch wie sie Ackerböden fruchtbar machen, im Übermaß aber zu Schadstoffen im Boden, der Luft und im Wasser wurden, und wie ihr Abbau mitunter ganze Landstriche zerstört, erklärt die Autorin. Die Dorsche in der Ostsee etwa leiden unter dem hohen Phosphateintrag und nehmen dadurch nicht nur zahlenmäßig ab, sondern werden auch immer kleiner und dünner. Ein weiteres Beispiel ist die mehr als 500 Meter hohe Abraumhalde aus Salz bei Fulda – genannt Monte Kali –, die durch den hohen Kaliumeintrag den Fluss Werra schädigt. Auf der kleinen Pazifikinsel Banaba geriet der Phosphatabbau zu einem ökologischen Desaster: Die Insel wurde von den Europäern verwüstet, nachdem sie dort große Mengen an phosphatreichem Gestein entdeckt hatten. Menschen haben



gigantische Ströme von Phosphor, Kalium und Stickstoff in Bewegung gesetzt, die inzwischen das Leben auf dem ganzen Planeten gefährden, resümiert Kerstin Hoppenhaus. Eine regenerative Kreislaufwirtschaft oder, mehr noch, planetares Handeln sei deshalb dringend nötig. Und da reichen eben nicht nur ein paar „Kniffe“, dafür müssten wir schon unser Verhalten ändern.

Katja Maria Engel

Kerstin Hoppenhaus  
*Die Salze der Erde*  
336 Seiten, Hanser  
26,00 Euro

77



# FÜNF FRAGEN

## ZUR KOMPENSATION VON CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN

AN BENEDICT PROBST

**Herr Probst, sind Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Kompensation wie der Bau von Windparks, der Schutz von Wäldern, eine klimafreundlichere Forstwirtschaft oder CO<sub>2</sub>-arme Kochhöfen für Länder des Globalen Südens sinnvoll?**

78

BENEDICT PROBST: Die Maßnahmen an sich sind sinnvoll, aber die dafür ausgegebenen Kompensationszertifikate führen kaum zu zusätzlichem Klimaschutz. Wenn zum Beispiel in China Windparks gebaut werden, ist das zwar gut für das Klima. Nicht gut ist allerdings, wenn behauptet wird, dass diese Windparks erst durch den Verkauf der Zertifikate finanziert werden könnten. Die Studien, die wir analysiert haben, zeigen, dass der Verkauf von Zertifikaten für Finanzierungsentscheidungen von Windparks keinerlei Rolle spielt.

**Worin liegen die Probleme bei der Zertifizierung?**

Wir haben 14 Studien zu 2346 CO<sub>2</sub>-Minderungsprojekten ausgewertet. Im Schnitt sparen die Maßnahmen weniger als 16 Prozent der Treibhausgase ein, die von den Projektentwicklern angegeben werden. Hinter diesen niedrigen Zahlen verbergen sich mehrere Probleme: Bei vielen Projekten hat der Verkauf von Zertifikaten zu keinen zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen geführt, wie etwa bei Windkraftprojekten in China, da diese ohnehin umgesetzt worden wären. Zudem berechnen viele Projektentwickler die Reduktionen mit Methoden, die nicht auf dem neuesten Stand der Wissenschaft beruhen. Hinzu kommen noch Fehlanreize

in der methodischen Ausgestaltung der Programme. So werden in den USA bei der Verbesserung der Waldbewirtschaftung häufig Flächen eingebracht, auf denen ohnehin bereits seit Langem weniger Holz entnommen wird. Die Reduktionen werden aber im Vergleich zu einem regionalen Mittelwert berechnet, der von einer höheren Holzentnahme ausgeht. Sie sind daher stark überschätzt.

**Können Kompensationen von CO<sub>2</sub>-Emissionen trotzdem zum Klimaschutz beitragen?**

Restemissionen aus der Industrie oder dem Transportsektor, die kaum vermeidbar sind, müssen langfristig kompensiert werden. Dies darf aber nur durch permanente Entfernungsmethoden geschehen wie etwa *direct air capture*, also die Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Luft, oder die Speicherung von CO<sub>2</sub>, das bei der Verbrennung von Biomasse entsteht. Diese Zertifikate sind allerdings sehr teuer, sie werden aber günstiger, wenn sich die Technik weiterentwickelt und solche Verfahren im großen Stil eingesetzt werden. Es gibt etwa Firmenkonsortien wie Frontier, die die teuren Zertifikate zur dauerhaften Kompensation kaufen. Das ist bislang aber nur ein kleiner Teil des Marktes.

**Wie wird CO<sub>2</sub> bepreist – abgesehen von Kompensationszertifikaten?**

Es gibt zum einen CO<sub>2</sub>-Steuern, bei denen man pro Tonne einen festen Betrag bezahlt, und zum anderen den Emissionshandel. Hier wird zum Beispiel in Europa ein Emis-

sionsbudget für Industrieanlagen festgelegt. Für einen Teil dieses Budgets bekommen die Unternehmen Verschmutzungsrechte zugeteilt, mit denen sie handeln können. Die Obergrenze sinkt jährlich, sodass der Preis und der Druck für Unternehmen, CO<sub>2</sub> einzusparen, steigen. Es wird befürchtet, dass Unternehmen Kompensationszertifikate kaufen und damit den Emissionshandel unterlaufen. Das ist bisher jedoch nur in geringem Umfang geschehen.

**Wie können Privatpersonen CO<sub>2</sub>-Emissionen etwa für Flüge kompensieren?**

Wir müssen uns von der Illusion verabschieden, Flüge für geringe Beträge kompensieren zu können. Fossile Emissionen verbleiben Tausende Jahre in der Atmosphäre und erfordern dauerhafte Entfernungsmethoden. Gängige Ansätze wie Waldschutz reichen nicht aus, da ihre Wirkung bei Waldverlust, etwa durch Brände, schnell zunichtegemacht wird. Es können aber Zertifikate aus den permanenten Entfernungsmethoden wie *direct air capture* gekauft werden, wie sie zum Beispiel das Schweizer Unternehmen Climeworks anbietet. Da diese jedoch sehr teuer sind, kann wohl kaum jemand damit seine Emissionen vollständig kompensieren. Man trägt aber zur Weiterentwicklung bei.

*Interview: Peter Hergersberg*

Benedict Probst ist Forschungsgruppenleiter des Net Zero Lab am Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb.

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen
- Assoziierte Forschungseinrichtungen

**Niederlande**

- Nimwegen

**Italien**

- Rom
- Florenz

**USA**

- Jupiter, Florida

**Brasilien**

- Manaus



IMPRESSUM

Max Planck Forschung wird herausgegeben von der Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin. ISSN 1616-4172

**Redaktionsanschrift**

Hofgartenstraße 8  
80539 München  
089 2108-1719 /-1276 (vormittags)  
mpf@gv.mpg.de  
www.mpg.de/mpforschung  
Kostenlose App: www.mpg.de/mpfmobil

**Verantwortlich für den Inhalt**

Dr. Christina Beck (-1276)

**Redaktionsleitung**

Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)

**Redaktion**

Dr. Tobias Beuchert (Astronomie, Physik, Technik; -1404)  
Michaela Hutterer (Kultur, Gesellschaft; -2617)  
Dr. Elke Maier (Biologie; -1064)  
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)  
Franziska Schulze (Kultur, Gesellschaft; -1957)

Zur besseren Lesbarkeit haben wir in den Texten teilweise nur die männliche Sprachform verwendet. Mit den gewählten Formulierungen sind jedoch alle Geschlechter gleichermaßen angesprochen.

**Bildredaktion**

Annabell Kopp (-1819)  
Susanne Schauer (-1562)

**Konzeptionelle Beratung**

Sandra Teschow und Thomas Susanka  
www.teschowundsusanka.de

**Gestaltung**

GCO Medienagentur  
Schaezlerstraße 17  
86150 Augsburg  
www.gco-agentur.de

**Druck & Vertrieb**

Vogel Druck & Medienservice GmbH  
Leibnizstraße 5  
97204 Höchberg

**Anzeigenleitung**

Philipp Bender  
Bertelsmann Marketing Services  
Tel: 49 173 60 55 713  
philipp.bender@bertelsmann.de

MaxPlanckForschung berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den Max-Planck-Instituten und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemein verständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und in englischer Sprache (*MaxPlanckResearch*) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 75 000 Exemplare (*MaxPlanckResearch*: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in *MaxPlanckForschung* vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der Max-Planck-Gesellschaft und ihrer Organe interpretiert werden.

Die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. unterhält 84 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 24 000 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 13 000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Im Jahr 2023 betrug die Grundfinanzierung durch Bund und Länder 2,1 Milliarden Euro. Die Max-Planck-Institute betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die Max-Planck-Gesellschaft ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

Max Planck Forschung wird auf Papier aus vorbildlicher Forstwirtschaft gedruckt und trägt das Siegel des Forest Stewardship Council® (FSC®).



Die MaxPlanckForschung  
kostenfrei abonnieren:



**MAX PLANCK**  
GESELLSCHAFT

