

**HIGHLIGHTS**  
**2020** AUS DEM JAHRBUCH DER  
MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



# Editorial

Jedes Jahr legt die Max-Planck-Gesellschaft einen wissenschaftlichen Tätigkeitsbericht in Form des Jahrbuchs als Rechenschaftslegung gegenüber der Öffentlichkeit und ihren Zuwendungsgebern vor. Im Zentrum stehen dabei die Fragen: Wo stehen wir und wo wollen wir hin? Die Max-Planck-Institute sind gebeten, aus ihren wissenschaftlichen Arbeiten, soweit diese zu einem gewissen Abschluss gekommen sind, jeweils eine Arbeit oder ein Projekt herauszugreifen, das sich für eine Darstellung im Jahrbuch eignet. Die Jahrbuch-Beiträge aller Max-Planck-Institute werden im Internet unter [www.mpg.de/jahrbuecher](http://www.mpg.de/jahrbuecher) veröffentlicht. Für die hier vorliegenden gedruckten Highlights aus dem Jahrbuch 2020 wurden 15 aus Sicht der Wissenschaftskommunikation besonders geeignete und gerade auch für Nicht-Expert\*innen interessante Beiträge herausgesucht und journalistisch aufbereitet.

So erläutern Forschende vom Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, warum es wichtig ist, zur Überwindung der gegenwärtigen Krise auch gesellschafts- und wirtschaftspolitische Zukunftsentwürfe zu entwickeln. Ob die Politik das Vertrauen in die Zukunft stärken kann, entscheidet dabei auch die rhetorische Überzeugungskraft. So gelang es Mario Draghi mit dem Versprechen „whatever it takes“ in der Eurokrise 2012, die Lage auf den Finanzmärkten zu stabilisieren und den Euro vorerst zu retten. Am Max-Planck-Institut für Softwaresysteme entwickelt eine Forschungsgruppe auf künstliche Intelligenz (KI) gestützte virtuelle Tutorium-Systeme, die Schülerinnen und Schüler entsprechend ihrer individuellen Fähigkeiten dabei unterstützen, programmieren zu erlernen. Das spielt im MINT-Unterricht eine zunehmend wichtige Rolle. Und am Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie setzen die Forschenden Tumorzellen mit Hemmstoffen auf eine radikale Zuckerdiät. Denn tatsächlich sind Krebszellen zuckersüchtig – sie brauchen zehnmal mehr Zucker als normale Zellen. Die identifizierten Substanzen werden nun am Lead Discovery Center zur Entwicklung von Leitmolekülen für die Medizin weiterentwickelt und könnten im Erfolgsfall eines Tages für Krebstherapien eingesetzt werden.

Viel Spaß beim Lesen der Jahrbuch-Highlights von 2020!

# Inhalt



**1** Die Zukunft  
in der Krise S. 4

**2** Maßgeschneiderte  
Katalysatoren für  
die grüne Energie-  
wirtschaft S. 8

**3** Krebszellen  
auf Diät S. 11



**4** Theorie und Praxis  
der COVID-19-  
Eindämmung S. 14

**5** Früh verheiratet –  
per Gesetz getrennt?  
S. 17

**6** Proteinstau  
im Gehirn S. 19



**7** Internationale  
Steuergerechtigkeit  
S. 22

**8** Besser hören durch  
Hirnstimulation  
S. 26

**9** Schwergewicht  
im Herzen  
einer Galaxie S. 29



**10** Embryos  
im Tiefschlaf  
S. 33

**13** Das Dilemma  
der Triage S. 42

**11** Programmieren  
lernen mit künst-  
licher Intelligenz  
S. 35

**14** Eine Schwarze Witwe  
im Weltall S. 44

**12** Vermehrung von  
Hybridsaatgut  
S. 39

**15** Künstliches  
Erbgut vermehrt  
sich selbst S. 47





Future

WHATEVER  
IT TAKES



# 1 Die Zukunft in der Krise

**LISA SUCKERT**

↳ Max-Planck-Institut  
für Gesellschaftsforschung,  
Köln

In Krisen erscheint die Zukunft weniger greifbar. Für die sozialwissenschaftliche Forschung sind Zukunftsvorstellungen jedoch ein wichtiger Zugang, um den Verlauf von Krisen zu verstehen – das zeigt sich in der aktuellen Coronapandemie genauso wie bei der Finanzkrise von 2007 oder dem Brexit-Votum. Dabei wird deutlich: Zur Überwindung einer Krise braucht es gesellschafts- und wirtschaftspolitische Zukunftsentwürfe ebenso dringend wie Impfstoffe oder Überbrückungsgelder.

**M**it dem Ausbruch von Corona sind Routinen, Hoffnungen und Ziele in vielen Lebensbereichen hinfällig geworden. Es gilt, „auf Sicht zu fahren“ – und das auf unbestimmte Zeit. Am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung erforschen wir seit Längerem in einer Reihe von Projekten, welche Bedeutung Erwartungen als Motor wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Dynamik haben. In Krisenzeiten wird die Tragweite dieses Ansatzes besonders deutlich: Zukunftsentwürfe beeinflussen ganz wesentlich die Wahrnehmung, Verschärfung und Überwindung von Krisen.

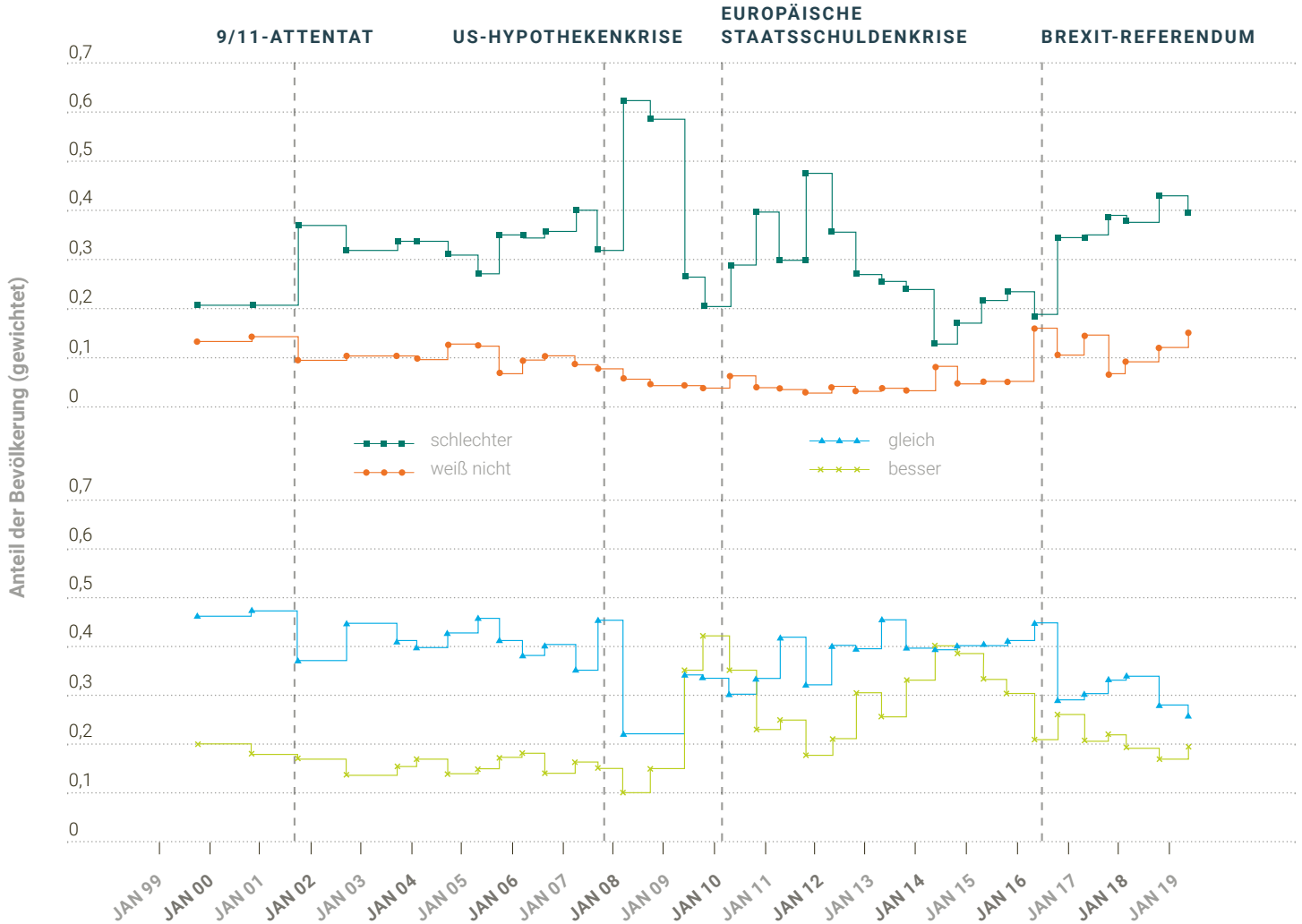
„Krise“ bezeichnet eine plötzliche Verschlechterung mit ungewissem Ausgang. Der Zusammenbruch der Finanzmärkte, das Brexit-Votum oder die Coronapandemie sind auch deshalb Krisen, weil sie uns überrascht haben. Die Realität weicht in Krisenzeiten vom erwarteten Verlauf ab. Die vermeintliche Planbarkeit der Zukunft dank immer genauerer Prognosen steigert daher paradoxerweise das Krisenpotenzial: Je konkreter unsere Erwartungen, desto leichter können sie enttäuscht werden.

Krisen durchkreuzen nicht nur unsere unmittelbaren Pläne, sondern erschüttern auch grundlegende Prinzipien, die unsere Vorstellung von der Zukunft prägen. Gängige Praktiken der Verbriefung erschienen unter

dem Eindruck der Finanzkrise auf einmal bedenklich, der Brexit rüttelte am Fundament des europäischen Integrationsprozesses und die Coronakrise stellt die globale Mobilität infrage. Krisen sind somit von doppelter Unsicherheit geprägt: Direkt erfahrbare Turbulenzen werden von dem weiterreichenden Gefühl überlagert, „die Welt nicht mehr zu verstehen“. Die Zukunft lässt sich in Krisenzeiten nicht mehr als stabile Verlängerung der Vergangenheit denken.

## Echte Krise oder halb so schlimm?

Wo althergebrachte Maßstäbe obsolet werden und positive Szenarien fehlen, erscheint vielen die Zukunft als bedrohliches Mysterium. In Großbritannien waren die Krisenereignisse der letzten Jahrzehnte von einer solchen Veränderung der Zukunftsvorstellungen begleitet: Nach den 9/11-Anschlägen, der US-Hypothekenkrise und der europäischen Staatsschuldenkrise sowie nach dem Brexit-Referendum sank jeweils in der direkten Folge der Anteil der Briten, die eine stabile oder sogar bessere wirtschaftliche Lage erwarteten; gleichzeitig stieg der Anteil jener markant, die eine Verschlechterung befürchteten.



Ergebnisse der „Eurobarometer“-Umfragen in Großbritannien: Die Frage lautete: „Welche Erwartungen haben Sie an die wirtschaftliche Lage im Vereinten Königreich in den nächsten zwölf Monaten?“

Ob ein unerwartetes Ereignis als einschneidender Wendepunkt oder bloß als unglücklicher Ausreißer gilt, wird auch in öffentlichen Deutungskämpfen entschieden: Heftig wird darum gerungen, ob es sich um eine „echte“ Krise handelt oder „alles halb so schlimm“ ist. War die Finanzkrise von 2007 eine Krise des globalen Finanzsystems oder das Fehlverhalten einzelner Akteure? Würde das Brexit-Votum überhaupt etwas verändern? Und ist das Coronavirus wirklich gefährlicher als die übliche Grippe? Hier kommen Zukunftsvorstellungen ins Spiel: Sie zeigen negative Folgen auf, entwerfen plausible Szenarien und machen so den Krisenstatus greifbar.

In ökonomischen Krisen haben solche Diskurse eine ganz besondere Bedeutung, weil sie deren Verlauf beeinflussen. Zentrale Elemente unserer Wirtschaftsordnung wie Lohnarbeit, Unternehmertum, Zinsen oder eine stabile Währung erfordern das Vertrauen in eine gestaltbare Zukunft. Doch wo Erwartungen einbrechen und sich negative Szenarien auftun, gerät der kapitalistische Motor ins Stocken. Auf den Finanzmärkten zeigt



sich dieser Teufelskreis sehr eindrücklich. Ein breiter Vertrauensverlust infolge negativer Prognosen führte zur Ausweitung der Immobilienkrise 2007, die sich über eine globale Finanz- und Bankenkrise zu einer Währungs- und Staatsschuldenkrise entwickelte und Länder wie Griechenland an den Rand des Ruins brachte.

Diese doppelte Unsicherheit von Krisen hat also das Potenzial für zusätzliche wirtschaftliche Verwerfungen: Unsichere Zukunftserwartungen verschärfen ökonomische Krisen; und nicht primär wirtschaftliche Krisen wie die Coronapandemie entwickeln eine wirtschaftliche Dimension, die so verheerend sein kann wie die ursprüngliche Krise. Regierungen stehen nun vor der Aufgabe, Unsicherheiten abzufedern und mit gezielten Eingriffen positive Erwartungen zu wecken. Ob die Politik das Vertrauen in die Zukunft stärken kann, entscheidet aber auch die rhetorische Überzeugungskraft: Das Versprechen „whatever it takes“ des Europäischen Zentralbankchefs Mario Draghi vermochte es in der Eurokrise 2012, die Lage auf den Finanzmärkten zu stabilisieren und den Euro vorerst zu retten.

Zwar sind Fehlentwicklungen im globalen Finanzsystem, politische Zerwürfnisse oder ein Krankheitserreger kaum durch zur Schau gestellten Optimismus zu stoppen. Gleichwohl lassen sich nur in der intensiven öffentlichen Debatte Lösungsszenarien abwägen sowie Ziele und Mittel neu definieren. Gelingt es, die Unbestimmtheit der Zukunft als Offenheit zu begreifen und eine Vorstellung von Zukunft zu etablieren, die weite Teile der Bevölkerung teilen, kann ein Klima des Aufschwungs entstehen. Krisen gehen dann in eine Phase der Zuversicht über.

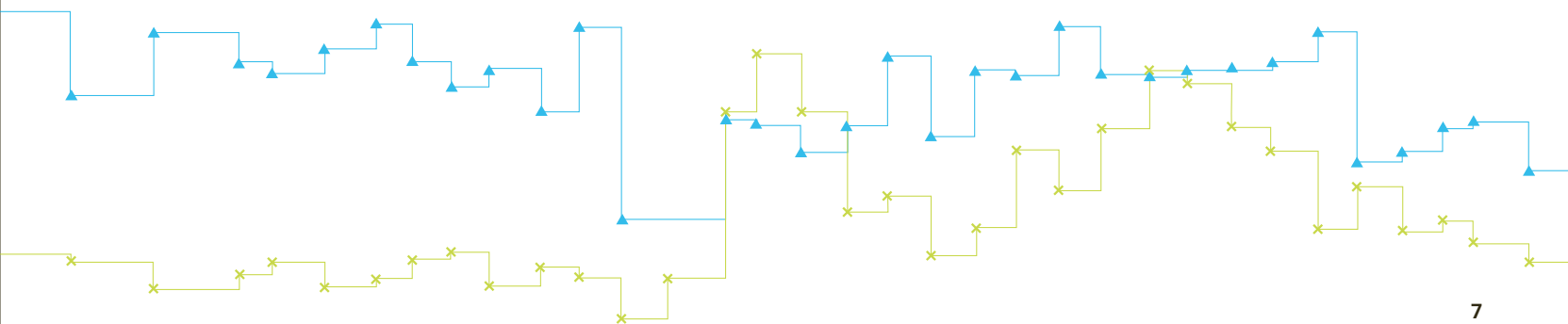
Wie der Brexit zeigt, ist dies keine zwangsläufige Entwicklung. Der Anteil jener Briten, die positiv in die Zukunft blicken, nahm bereits vor dem Referendum ab. Und danach haben sich die Erwartungen noch weiter eingetrübt, zugleich nahm der Anteil derjenigen zu, denen die Zukunft so unsicher scheint, dass sie keine Einschätzung mehr abgeben können („weiß nicht“). Das Brexit-Votum und die nachfolgenden Kontroversen wurden kaum von positiven Zukunftsszenarien getragen, sondern von Ängsten und dem nostalgischen Wunsch, die Vergangenheit aufleben zu lassen.

## Regierungen stehen nun vor der Aufgabe, Unsicherheiten abzufedern und positive Erwartungen zu wecken.

### Zukunftsutopien sind Mangelware

Eine solche „Zukunftsmüdigkeit“ ist derzeit in vielen Gesellschaften spürbar. Nach einem Krisenjahrzehnt, in dem sich die gesellschaftlichen Trennungslinien verstärkt haben, gelingt es den fragmentierten Gesellschaften schon in Normalzeiten immer weniger, eine positive Zukunft für die breite Bevölkerung zu zeichnen: Die Zukunft scheint selbst in die Krise geraten zu sein.

Dies sind denkbar ungünstige Ausgangsbedingungen, um den sozioökonomischen Verwerfungen der Pandemie zu begegnen. Wo Fortschritt schon in normalen Zeiten kein gemeinsames Projekt mehr ist und Zukunftsutopien Mangelware sind, fällt es in Krisenzeiten umso schwerer, Vertrauen in die Zukunft zu fassen. Zur Überwindung der gegenwärtigen Krise braucht es daher – mindestens so dringend wie einen Impfstoff – gesellschafts- und wirtschaftspolitische Zukunftsentwürfe, die über bestehende Spaltungen hinweg verfangen und so wieder nachhaltig Zuversicht vermitteln können. o



# 2 Maßgeschneiderte Katalysatoren für die grüne Energiewirtschaft

**BEATRIZ ROLDÁN  
CUENYA, ARNO  
BERGMANN,  
CHRISTOPHER KLEY,  
PHILIPP GROSSE,  
SEBASTIAN ÖNER**  
↳ *Fritz-Haber-Institut der  
Max-Planck-Gesellschaft,  
Berlin*

Energieträger wie Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffe effizient und ohne Kohlendioxidemission zu produzieren ist ein wesentlicher Baustein einer klimaneutralen Wirtschaft. Mit geeigneten Katalysatoren ist es sogar möglich, Treibstoffe, aber auch wichtige Ausgangsstoffe für die chemische Industrie aus Kohlendioxid herzustellen. Unserer Gruppe ist es gelungen, einen solchen Katalysator live bei der Arbeit zu beobachten und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse die Produktion zweier ökonomisch interessanter Substanzen aus CO<sub>2</sub> zu optimieren.

**D**ie grüne Energiewende gehört zu dem wohl bedeutendsten Modernisierungsprojekt unserer Gesellschaft. Dafür wird eine emissionsfreie Produktion von Energieträgern wie Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen unumgänglich sein.

Wasserstoff hat als Energieträger viele wünschenswerte Eigenschaften: Er ist ungiftig, macht Energie speicher- und transportierbar und hinterlässt bei der Verbrennung keine Schadstoffe, sondern nur Wasserdampf. Er lässt sich durch Elektrolyse aus Wasser herstellen. Verwendet man hierfür Strom aus erneuerbaren Energiequellen, also etwa von Windrädern oder Photovoltaikanlagen, so geschieht dies ohne Treibhausgasemissionen.

In letzter Zeit gehen Forscher der Frage nach, ob sich auch andere Energieträger CO<sub>2</sub>-frei herstellen lassen. Erfolgversprechend erscheint hier Ethylen, das sich zur Herstellung von Kraftstoffen eignet, aber vor allem einen wichtigen Ausgangsstoff für die Chemieproduktion in erster Linie von Kunststoffen wie Polyethylen darstellt. Weltweit werden jährlich 158 Millionen Tonnen

des Gases produziert, und zwar indem Erdgas und das Leichtbenzin Naphta auf 850 Grad Celsius erhitzt werden. Dabei werden jedoch große Mengen CO<sub>2</sub> frei.

Allerdings kann Ethylen auch aus CO<sub>2</sub> erzeugt werden. Ließe sich dieser Prozess effizienter gestalten, würde das Treibhausgas bei der Produktion von Ethylen nicht freigesetzt, sondern aus der Atmosphäre entfernt. Das stößt jedoch auf Probleme, denn CO<sub>2</sub> ist äußerst stabil und reaktionsträge. Um Ethylen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) herstellen zu können, müssen Sauerstoffatome (O) im CO<sub>2</sub>-Molekül durch Wasserstoffatome (H) ersetzt werden. Zusätzlich ist die Bindung von zwei Kohlenstoffatomen (C) notwendig, was den Reduktionsprozess noch komplexer macht. Hier kommen Elektrokatalysatoren ins Spiel: Diese binden die gewünschten Reaktionspartner an der Oberfläche und treiben die chemische Reaktion direkt mit elektrischem Strom an. Auf diese Weise ist prinzipiell eine sehr effiziente Umwandlung möglich. Die Suche nach solch einem idealen Katalysator ist eine Kernaufgabe auch unserer Forschung.

## Ein Video des Tathergangs

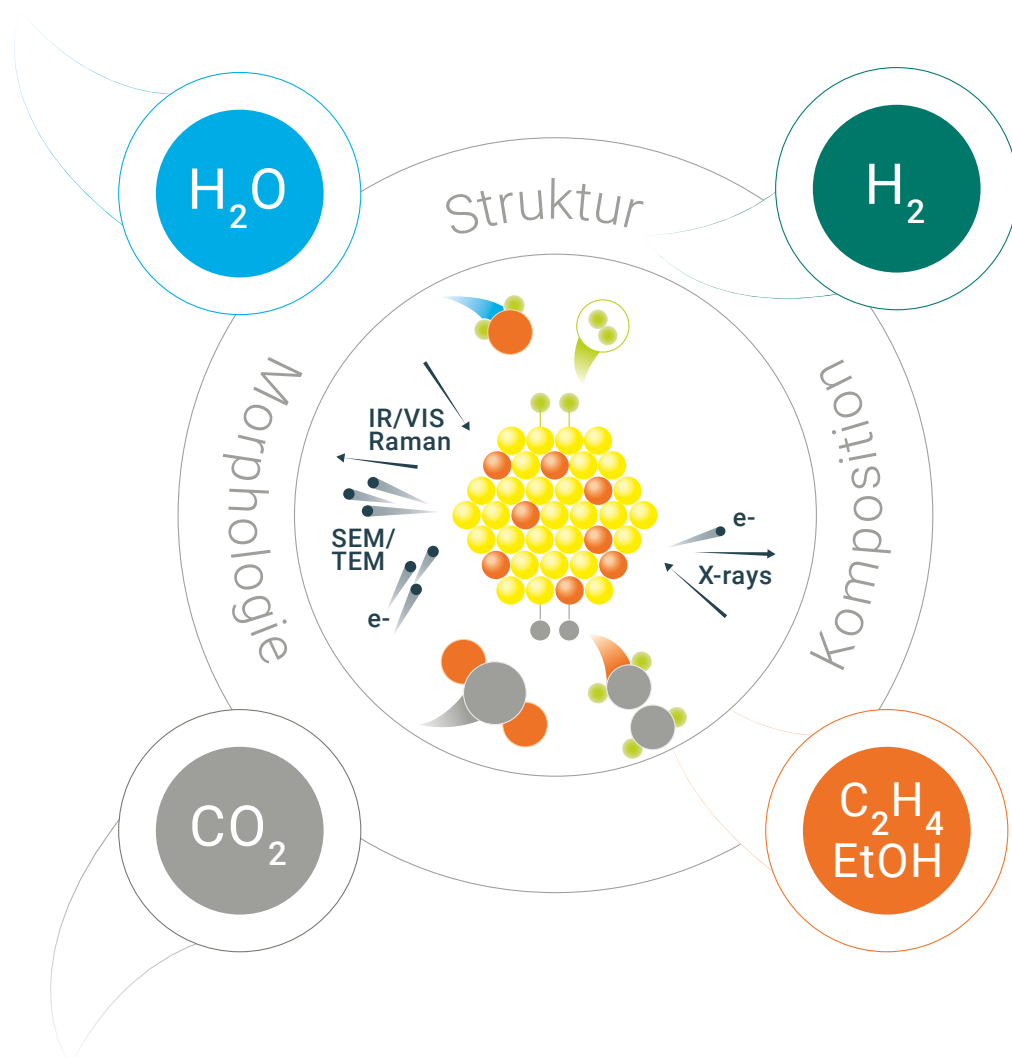
Schon seit Längerem weiß man, dass Kupfer ein idealer Katalysator für die Ethylensynthese sein könnte. Insbesondere kupferbasierte Nanostrukturen mit einer bestimmten Geometrie, sogenannte 1-0-0-Facetten, weisen eine hohe Selektivität für die Bildung von Ethylen auf. Allerdings verändert sich der Katalysator während der Reaktion, sodass die Selektivität bisher nicht langfristig erhalten bleibt. Diese unzureichende Stabilität und Effizienz macht solche Katalysatoren bisher wirtschaftlich unrentabel.

Das Hauptproblem besteht darin, dass man nicht weiß, wie sich die Katalysatoroberfläche während der Reaktion verändert. Klar ist, dass sich Kerneigenschaften der Katalysatoren wie die chemische Zusammensetzung und die atomare Oberflächenstruktur unter Reak-

tionsbedingungen in Flüssigkeiten unentwegt verändern, was direkt deren Funktionsmechanismen beeinflusst. Die Veränderungen aufzuspüren, ist wie eine Detektivarbeit: Wir kennen den Schauplatz vor und nach dem Verbrechen, und von dort leitet man ab, was dazwischen passiert ist. Was man aber wirklich will, ist ein Video des Tathergangs. Wir haben es tatsächlich geschafft, einen solchen Verlauf der chemischen Reaktion live zu beobachten.

Dies gelang uns, indem wir Abbildungsverfahren mit atomarer und hoher zeitlicher Auflösung so weiterentwickelt haben, dass sie sich auch unter den ungewöhnlichsten Bedingungen, nämlich in Flüssigkeit und während der aktiven Elektrolyse, einsetzen ließen. Mittel der Wahl waren für uns elektrochemische Rasterkraftmikroskopie und Flüssigphasen-Elektronenmikroskopie. Damit entdeckten wir, dass sich während der Katalyse

*CO<sub>2</sub> und Wasser (H<sub>2</sub>O) können an einem Katalysator elektrolysiert werden. Dabei können Ethylen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) beziehungsweise Ethanol (EtOH) oder Wasserstoff (H<sub>2</sub>) entstehen. Um den Prozess zu optimieren, wurde er mit verschiedenen Methoden untersucht.*



## Eine exakte Kontrolle über die ideale Morphologie kann gewünschte elektrochemische Reaktionen wie die Umwandlung von CO<sub>2</sub> oder die Wasserstoffherstellung begünstigen.

zuerst Kupfer-Nanowürfel bilden. Diese schrumpfen dann jedoch wieder, bewegen sich auf der Elektrode und formieren sich letztlich zu baum- oder strauchartigen Strukturen, sogenannten Dendriten.

Diese dynamische Anpassung der Katalysatorform als Folge der Reaktionsbedingungen verdeutlicht, dass die Funktion des Katalysators stets mit der Morphologie im aktiven Zustand verbunden ist. In diesem Fall kam es zu einer morphologischen Umwandlung in Nanopartikel und Dendriten, die mit einer vermehrten Produktion von Wasserstoff verbunden ist. Im Umkehrschluss bedeutet dies: Eine exakte Kontrolle über die ideale Morphologie kann gewünschte elektrochemische Reaktionen wie die Umwandlung von CO<sub>2</sub> oder die Wasserstoffherstellung begünstigen.

### Ein optimiertes Katalysatordesign

In einem weiteren Experiment haben wir nachgewiesen, dass auch die Art, wie die elektrische Spannung an den Katalysator angelegt wird, einen Einfluss auf die chemische Reaktion ausübt. Positive Spannungspulse während der CO<sub>2</sub>-Reduktion auf Kupferoberflächen führen zu einer gesteigerten Erzeugung von Ethanol

im Vergleich zu anderen Kohlenstoffprodukten. Mit der Rasterkraftmikroskopie und der Röntgen-Photoelektronenspektroskopie fanden wir heraus, wie sich die Oberfläche während dieser Reaktion veränderte – es bildeten sich Nanopyramiden, und das Kupfer oxidierte. Damit haben wir aufgedeckt, dass die Spannungspulse auf der Kupferoberfläche morphologische Veränderungen hervorrufen und spezielle Oxidstrukturen erzeugen. Diese beiden Prozesse beeinflussen die selektive Produktion von Ethanol.

Die Erkenntnisse ermöglichen also ein Katalysatordesign, das wahlweise für die Produktion von Ethylen oder anderen organischen Substanzen wie etwa Ethanol aus CO<sub>2</sub> optimiert ist. Wie wir gesehen haben, sind solche Elektrokatalysatoren mit gezielten Spannungspulsen unter technologisch relevanten Reaktionsbedingungen sogar dynamisch steuerbar.

Auf dem Weg vom Labor zum großtechnischen Einsatz sind jedoch noch einige offene Fragen zu beantworten. Sehr hohe elektrische Stromdichten und erhöhte Temperaturen beeinflussen beispielsweise die direkte Umgebung und damit die Funktionsweise der Katalysatoren stark. Wir arbeiten daran, diese grundlegenden Wechselwirkungen in der Zukunft noch besser zu verstehen. o

# 3 Krebszellen auf Diät

**SLAVA ZIEGLER,  
HERBERT WALDMANN**  
↳ Max-Planck-Institut  
für molekulare Physiologie,  
Dortmund

Die Sucht nach Süßem kennen viele Menschen nur zu gut. Auch Krebszellen sind zuckersüchtig – sie brauchen zehnmal mehr Zucker als normale Zellen. Wir nutzen diese Schwäche und setzen Tumorzellen mit Hemmstoffen auf eine radikale Zuckerdiät. Unsere Substanzen werden nun am Lead Discovery Center zur Entwicklung von Leitmolekülen für die Medizin weiterentwickelt. Im Erfolgsfall könnten die Substanzen eines Tages für Krebstherapien eingesetzt werden.

**Z**ucker in Form von Glukose erfüllt vielfältige Funktionen: Er ist eine schnell verfügbare Energiequelle und liefert Grundbausteine für Biomoleküle, die für Zellteilung und -wachstum nötig sind. Im Normalfall wird Glukose in Anwesenheit von Sauerstoff hocheffizient und mit maximaler Energieausbeute verwertet.

Der deutsche Biochemiker Otto Warburg beobachtete bereits im Jahr 1924, dass Krebszellen Glukose anders abbauen als gesunde Zellen. Sie gewinnen ihre Energie auf einem schnelleren, aber ineffizienteren Weg. Dieser Stoffwechsel-Route folgen auch gesunde Körperzellen, wenn es ihnen an Sauerstoff fehlt, zum Beispiel bei hoher sportlicher Belastung.

## Hoher Zuckerbedarf

Die Besonderheit des sogenannten Warburg-Effektes ist es, dass Krebszellen den schnellen Zuckerabbau auch bei ausreichender Versorgung mit Sauerstoff vorziehen. Weil er aber nur einen Bruchteil an Energie liefert, gleichen sie die Versorgungslücke durch Aufnahme einer mehr als zehnfach höheren Zuckermenge aus. Auf dieser Entdeckung beruhen moderne Nachweisverfahren in der Krebsdiagnostik. So macht die

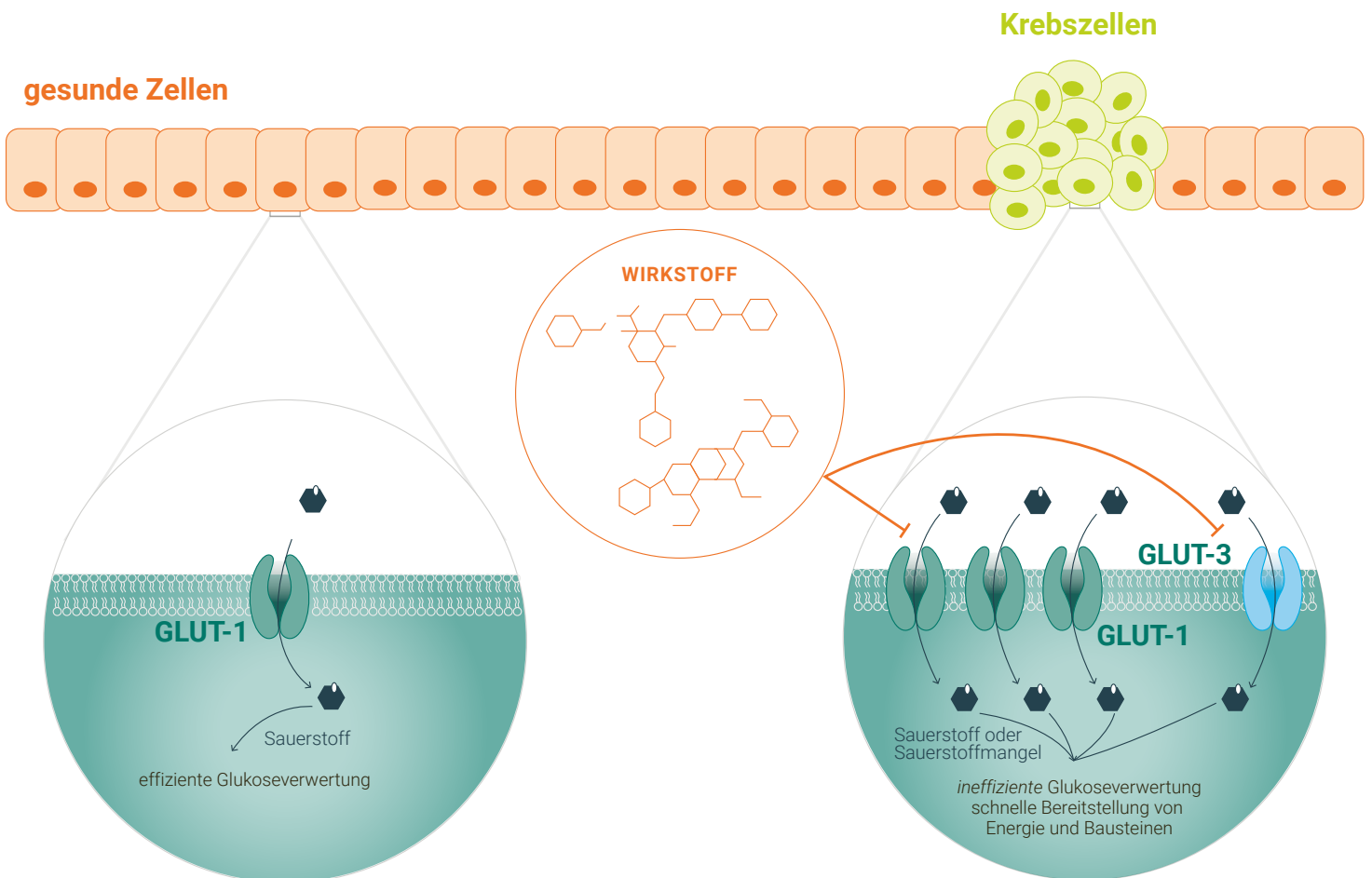
Positronen-Emissions-Tomografie (PET) sichtbar, wo im Körper vermehrt Zucker aufgenommen wird, und enthüllt die Lage und das Stadium eines Tumors.

Wir vom Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie in Dortmund wollen die Zuckersucht der Krebszellen nutzen, um diese zu bekämpfen. Unser Ansatz ist es, den Glukosetransport in die Zellen zu blockieren. Doch wie gelangt der Zucker in die Zellen? Glukose ist gut wasserlöslich und kann daher problemlos über das Blut zu den Zellen transportiert werden. Für die Aufnahme in die Zellen sorgen dann verschiedene Glukosetransporter-Proteine, auch GLUT genannt. Insbesondere zwei Arten von Glukosetransportern, GLUT-1 und GLUT-3, gelten als vielversprechende Angriffspunkte.

Die Natur hat eine Vielzahl von Substanzen hervorgebracht, die biologisch aktiv sind: Sie binden aufgrund ihrer chemischen Struktur an bestimmte Proteine und beeinflussen deren Aktivität. Viele dieser Stoffe wirken auch in menschlichen Zellen, weshalb bioaktive Stoffe als Inspiration für Medikamente genutzt werden. Bekannte Beispiele dafür sind Digitalis (Digitalisglykoside) aus der Fingerhut-Pflanze, aus denen Medikamente gegen Herzkrankheiten hervorgegangen sind, oder die Salicylsäure aus der Weide, der das Schmerzmittel Aspirin entstammt.



Gesunde Zellen (rot) verwerten Glukose in Anwesenheit von Sauerstoff. Schnell wachsende Krebszellen (grün) nutzen den Zucker ohne Sauerstoff. Dies ist deutlich ineffizienter, aber schneller. Die Krebszellen müssen deshalb mehr Zucker aufnehmen. Dafür produzieren sie besonders viele Glukosetransporter (GLUTs). Hemmstoffe blockieren die Transportmoleküle und hungern die Krebszellen auf diese Weise aus.



In unserer Forschungsabteilung haben wir auf Basis von Naturstoffen neue Wirkstoffe für die Medizin entwickelt. Wir zerlegen Naturstoffe in ihre Grundbausteine und kombinieren sie dann neu miteinander. So erhalten wir eine große Vielfalt potenziell wirksamer Substanzen, die in der Natur so nicht vorkommen.

## Zurzeit werden unsere Hemmstoffe zu Leitstrukturen weiterentwickelt – der erste Schritt auf dem Weg zum Medikament.

Chemische Synthesemethoden haben heutzutage das Angebot längst über die natürlichen Stoffe hinaus erweitert. In unserem Fall haben wir eine Bibliothek mit über 150.000 chemischen Substanzen wie nach der sprichwörtlichen „Nadel im Heuhaufen“ durchsucht. Dabei sind wir auf drei Kandidaten gestoßen, die gleich beide Varianten des Zuckertransporters blockieren. Zwei dieser Kandidaten enthalten neuartige Kombinationen von Naturstoffgrundbausteinen, die in der Natur nicht zu finden sind.

In unseren Experimenten mit Tumorzellkulturen zeigten die so entwickelten Pseudo-Naturstoffe dann tatsächlich den erwünschten Effekt: Sie verlangsamten bei einer Reihe von Krebszelllinien das Wachstum so lange, bis diese abstarben. Das Wichtigste dabei: Gesunde Zellen blieben verschont.

Doch leider lassen sich Tumorzellen nicht immer so leicht austricksen. Nicht selten entwickeln sie Wirkstoffresistenzen oder finden ein anderes Schlupfloch. Bei Glukosemangel können sie auch andere Nährstoffe verwerten, wie beispielsweise Glutamin. Um die Krebszellen, in diesem Fall eine Darmkrebs-Zelllinie, daran zu hindern, haben wir sie gleichzeitig mit einem GLUT-Hemmstoff und einem Hemmstoff der Glutaminverwertung behandelt. Tatsächlich verstärkte diese Kombination den wachstumshemmenden Effekt.

Eine weitere Ausweichoption der Tumorzelle bei Glukosemangel ist die erhöhte Produktion der anderen Variante des Glukosetransporters, GLUT-3. Da unsere GLUT-Hemmer neben GLUT-1 ebenfalls GLUT-3 blockieren, wird auch dieser Schutzmechanismus der Krebszellen umgangen. Diese Wirkstoffe könnten also besonders effektiv sein, da sie sowohl auf den Stoffwechsel als auch die internen Rettungsmechanismen der Krebszellen abzielen.

### Wirkung im Zentrum des Tumors

Im Vergleich zur flachen Zellkultur auf der Nährboden-Platte ist ein echter Tumor ein räumliches Gebilde. Seine äußeren Zellen haben besseren Zugang zu Nährstoffen als die im Inneren. Sind unsere Hemmstoffe im Zellverband genauso wirksam? Um das möglichst realistisch zu überprüfen, haben wir einen der GLUT-Hemmstoffe in künstlich gezüchteten 3D-Zellgebilden erforscht, sogenannten Sphäroiden. Tatsächlich hemmt der Wirkstoff auch hier das Wachstum der Krebszellen. Vor allem die Zellen im Inneren der Sphäroide starben ab, eine Beobachtung, die sich mit Ergebnissen aus der Krebsforschung deckt: Die Verwertung von Glukose wird danach vor allem im Zentrum des Tumors gebraucht.

Unsere GLUT-Hemmstoffe könnten eine vielversprechende Therapiemöglichkeit sein – nicht nur gegen Krebs, sondern auch bei anderen Krankheiten, die mit hohem Zuckerbedarf einhergehen, wie beispielsweise Entzündungen, bestimmte bakterielle und virale Infektionen oder Schuppenflechte. Zurzeit werden unsere GLUT-Hemmstoffe im Lead Discovery Center in Dortmund, gegründet von der Technologietransfer-Organisation Max Planck Innovation, zu sogenannten Leitstrukturen weiterentwickelt – ein erster Schritt auf dem Weg zum Medikament. o

# 4 Theorie und Praxis der COVID-19- Eindämmung

**VIOLA  
PRIESEMANN,  
MICHAEL WILCZEK**

↳ *Max-Planck-Institut  
für Dynamik und Selbst-  
organisation, Göttingen*

Im Frühjahr 2020 wurde die Welt von einem Virus überrascht: SARS-CoV-2 hat sich rasant ausgebreitet und jeden Einzelnen vor unerwartete Herausforderungen gestellt. Seitdem haben wir am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Teamarbeit über die verschiedenen Abteilungen und Forschungsgruppen hinweg Erkenntnisse zur Ausbreitung und Eindämmung von COVID-19 gewonnen und einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Zunächst war vereinzelt die Rede von einer neuartigen Lungenkrankheit in China, Ende Januar 2020 traten dann in Deutschland die ersten Fälle auf. Ende Februar 2020 war schließlich klar, dass SARS-CoV-2 in Europa angekommen ist. Wir haben unmittelbar daraufhin ein Modell entwickelt, um aus den gemeldeten Fallzahlen die Reproduktionszahl  $R$ , die angibt, wie viele weitere Personen eine bereits infizierte Person im Mittel ansteckt, zu schätzen, die Wirksamkeit von Interventionen (z. B. Lockdowns) zu quantifizieren und Kurzzeitprognosen zu erstellen. Unsere Arbeit hat damit zeitkritische Informationen für mögliche Eindämmungsstrategien geliefert. Diese schnelle, wirksame Arbeit war nur möglich, weil wir uns am Campus Göttingen und innerhalb der Max-Planck-Gesellschaft sehr schnell mit einer interdisziplinären Expertengruppe, aus der Medizin bis hin zur Physik, zusammengefunden haben.

Auch die physikalischen Ursachen der SARS-CoV-2-Übertragung hat ein Team um Eberhard Bodenschatz erforscht. Das Virus verbreitet sich maßgeblich durch Aerosole, das heißt durch feinste Tröpfchen in der Luft. Infizierte Personen stoßen diese bereits mit der Atemluft aus – wesentlich stärker jedoch etwa beim Sprechen oder Singen. Die Aerosole verteilen sich in der Umgebung, sodass andere Menschen in der Nähe diese einatmen. Am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation haben wir nicht nur die Aerosole selbst mit rund 130 Testpersonen untersucht, sondern auch, wie sich die Partikel ausbreiten und wie Masken gegen eine Infektion wirken. Um zur Eindämmung der Pandemie beizutragen, haben wir

auch eine App entwickelt, die für jeden Raum berechnet, wann gelüftet werden muss, um das Infektionsrisiko zu minimieren.

Bald nach dem Beginn der Pandemie haben wir mögliche Wege aus dieser erforscht. Gerade zu Anfang wurde viel diskutiert, ob das kontrollierte Erreichen einer natürlichen Gruppenimmunität – ohne Impfung – möglich sei. Eine Gruppenimmunität besteht dann, wenn ein Großteil der Bevölkerung nach durchgestandener Krankheit oder Impfung immun ist. Das Virus kann sich dann nur noch lokal in der Bevölkerung ausbreiten. Ein Team um Stephan Herminghaus hat anhand eines epidemiologischen Modells untersucht, ob und unter welchen Umständen eine natürliche Gruppenimmunität erreicht werden könnte. Das Modell schließt ein, dass die Immunität nach einer Infektion langsam abklingt. Das bedeutet, dass eine Infektion einige Monate oder Jahre nach durchgestandener Krankheit oder Impfung wieder möglich ist. Es stellte sich heraus, dass sich ohne Impfen keine Gruppenimmunität gegen SARS-CoV-2 erreichen lässt: Wegen der Kapazitätsgrenzen der Intensivstationen müsste die Ausbreitung so verlangsamt werden, dass es Jahre dauern würde. Die ersten Personen könnten sich also wieder infizieren, bevor die letzten immun sind.

Als alternative Eindämmungsstrategie haben wir eine praktikable Lösung aufgezeigt, mit der sich die Pandemie beherrschen lässt: ein Gleichgewicht bei niedrigen Fallzahlen und moderaten Kontaktbeschränkungen. Wie unsere Berechnungen zeigen, bleibt das Infektionsgeschehen bei einer Wocheninzidenz von rund zehn oder weniger



Neuinfektionen pro 100.000 Einwohner stabil, ohne dass starke Kontaktreduktionen notwendig sind. Dabei haben wir neben dem bekannten Kipppunkt bei Überschreitung eines R-Werts von 1 einen neuen Kipppunkt entdeckt: Steigen die Inzidenzen, dann kippt die Entwicklung ins exponentielle Wachstum, weil die Gesundheitsämter die Kontaktpersonen von Virusträgern nicht mehr effektiv nachverfolgen können. Bei niedrigen Fallzahlen ist es also möglich, Lockdowns zu vermeiden. Hohe Infektionsraten dagegen sind höchst instabil und erfordern so immer wieder strenge Maßnahmen, um das Gesundheitssystem nicht zu überlasten. Niedrige Fallzahlen helfen also allen: der Gesundheit, der Gesellschaft und der Wirtschaft. Mittelfristig wird hier das Impfen weitere Erleichterungen bringen.

## Bei Inzidenzen unter zehn pro 100.000 Einwohner ist ein gezieltes, lokales Eingreifen besonders effektiv.

Zur Eindämmung von COVID-19 wird oft die Mobilität eingedämmt. Eine besondere Art der Mobilitätseinschränkung sieht vor, die Bevölkerung in einer Region in kleinere Gruppen aufzuteilen und Kontakte ausschließlich innerhalb dieser Gruppen zu erlauben. Eine Gruppe um Ramin Golestanian hat im Modell gezeigt, dass zufällige Schwankungen die Pandemie lokal ausrotten können. Diese Schwankungen können auch den Höhepunkt einer Infektionswelle insgesamt reduzieren. Ähnliche Effekte führen zudem dazu, dass regionale Eindämmungsstrategien bei niedrigen Fallzahlen besonders effizient sind. Wichtig dabei ist, alle überregionalen Infektionsketten zu verhindern. Um diese Effekte optimal zu nutzen, sollten lokale Kontaktbeschränkungen schon bei niedrigen Inzidenzen von etwa zehn Infektionen pro 100.000 Einwohner in sieben Tagen greifen. Dafür kommt man insgesamt mit deutlich weniger Kontakteinschränkungen aus als bei einem nationalen Lockdown oder höheren Schwellenwerten.

Eine wichtige Grundlage unserer Arbeiten waren stets tagesaktuelle Daten über das Infektionsgeschehen. Schon deutlich bevor die zweite Welle in Deutschland diskutiert wurde, fanden wir Anzeichen dafür in den Daten: Die täglichen Fallzahlen haben sich stetig alle zwei bis vier Wochen verdoppelt, jedoch nur auf niedrigem Niveau. Allerdings blieb die Zahl der Todesfälle anfangs konstant. Diese Diskrepanz nährte Spekulationen, dass lediglich die Testzahl erhöht sei, nicht die Ausbreitung. Wir haben dies widerlegt, indem wir die Altersstruktur in unsere Berechnungen einbezogen haben. Bei niedrigen Fallzahlen waren die Älteren gut geschützt. Bei hohen Fallzahlen war das wegen der hohen Dunkelziffer nicht mehr möglich. Wir haben gezeigt, dass es bei einer hohen Dunkelziffer viele Menschen gibt,

die das Virus weiterverbreiten, ohne dass sie es wissen. Die Ausbreitung springt so auf die Älteren über. Die Todesfälle sind dann wie vorhergesagt angestiegen. Der Schutz der Älteren, der bei niedrigen Fallzahlen möglich war, ist nicht mehr gelungen.

Ein wichtiger Beitrag zur Eindämmung der Virusausbreitung ist das Testen, das Nachverfolgen von Kontakten und das Isolieren von Infizierten und Kontaktpersonen (englisch: Test-Trace-Isolate – TTI). Wie wirksam ist diese Strategie aber in der Realität? Das TTI hat mit einigen Herausforderungen zu kämpfen: Es sollte schneller sein als die Virusausbreitung; es sollte auch prä- und asymptomatische Übertragungen entdecken und reduzieren; es gibt TTI-Vermeider; die Quarantäne wird nicht perfekt eingehalten; und werden die Fallzahlen zu hoch, wird der von uns entdeckte Kipppunkt der TTI-Kapazitäten überschritten, und das Virus breitet sich selbst-beschleunigt aus. Die Fallzahlen steigen schneller als exponentiell. Wir haben all diese Aspekte im Modell einbezogen und abschätzen können, dass man mit TTI etwa doppelt so viele ungewollte Ansteckungskontakte haben kann wie ohne TTI. Bricht das TTI zusammen, muss man die Kontakte also deutlich reduzieren, allein um das exponentielle Wachstum zu stoppen. Wir haben unsere Ergebnisse Mitte September veröffentlicht und dann im Herbst 2020 leider genau das beobachtet: Ein Landkreis nach dem anderen hat höhere Fallzahlen entwickelt – und nachdem die Inzidenz über etwa 20 gestiegen war, sind die Zahlen deutlich in die Höhe geschossen. Leicht verschärfte Einschränkungen konnten den Anstieg einige Wochen später nur bremsen. Erst Ende Dezember haben die verschärften Lockdown-Regelungen die Inzidenz wieder gesenkt. Hier ist es ähnlich wie bei einem Brand: Bevor er sich zu weit ausgebreitet hat (also bei niedriger COVID-Inzidenz), ließe er sich lokal gezielt mit einem Feuerlöscher stoppen. Ist das Feuer aber zu groß geworden, muss man zu drastischen Maßnahmen greifen.

## Viele Gespräche mit Politikerinnen und Politikern

Neben der Forschung war die Kommunikation der Ergebnisse ein zentrales Anliegen für uns. Wir haben seit dem Frühjahr 2020 unsere Ergebnisse regelmäßig in renommierten Fachjournalen publiziert und unsere Erkenntnisse in zahlreichen Positionspapieren, Zeitungsartikeln, Interviews und Talkshows vermittelt sowie viele Gespräche mit Politikerinnen und Politikern geführt. Damit hat das Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation dazu beigetragen, die grundlegende Physik der Virusausbreitung, das exponentielle Wachstum und die Mathematik hinter den Eindämmungsmaßnahmen zu erklären und weiterzuentwickeln. Wir hoffen, dass wir mit unserer Grundlagenforschung auch im Jahr 2021 zur Bewältigung dieser Pandemie beitragen können. o



# 5 Früh verheiratet – per Gesetz getrennt?

**NADJMA YASSARI,  
RALF MICHAELS**  
↳ *Max-Planck-Institut  
für ausländisches  
und internationales  
Privatrecht, Hamburg*

Die Heirat Minderjähriger ist in Deutschland verboten, vor allem um Mädchen und junge Frauen vor den Folgen einer verfrühten Ehe zu bewahren. Das „Gesetz zur Bekämpfung von Kinderehen“ beschränkt sich aber nicht auf Deutschland, sondern spricht auch im Ausland rechtswirksam geschlossenen Ehen die Gültigkeit ab. Es ist allerdings fragwürdig, ob das mit dem Schutz der Ehe und des Kindeswohls vereinbar ist.

Inmitten der Fluchtbewegung nach Europa im Herbst 2015 bewegte das Schicksal eines syrischen Flüchtlingspaars die Menschen in Deutschland. Das Paar war von den deutschen Behörden getrennt worden, weil die Braut bei der Eheschließung erst 14 Jahre alt war. Die zwangsweise Trennung erfolgte, obwohl die junge Frau erklärtermaßen mit ihrem acht Jahre älteren Ehemann zusammenbleiben wollte. Sollte eine solche Ehe in Deutschland wirksam sein?

Der Gesetzgeber meint Nein. 2017 schaffte er in Deutschland nicht nur die Möglichkeit ab, im Einzelfall mit Genehmigung schon vor dem 18. Lebensjahr zu heiraten, er dehnte diese strikte Altersgrenze auch auf im Ausland geschlossene Ehen aus: War mindestens einer der Ehegatten bei der Eheschließung zwischen 16 und 18 Jahre alt, muss die Ehe mit wenigen Ausnahmen aufgehoben werden. War ein Ehegatte unter 16 Jahre alt, ist die Ehe unwirksam und wird behandelt, als sei sie nie geschlossen worden.

In Deutschland kommen Frühehen heute kaum mehr vor, doch mit Geflüchteten ist das Phänomen wieder ins Land gekommen. Das Gesetz zeigt daher eine klare Stoßrichtung: Es ist primär gegen im Ausland geschlossene Ehen gerichtet. Diesen soll nun ausnahmslos die Anerkennung verweigert werden, wenn sie vor Vollendung des 18. Lebensjahrs geschlossen wurden.

Der Bundesgerichtshof, der in dritter Instanz über die Wirksamkeit der Ehe des syrischen Paares zu entscheiden hatte, zeigte sich skeptisch: Das „Gesetz zur Bekämpfung von Kinderehen“ verstoße möglicherweise gegen den im Grundgesetz garantierten Schutz der Ehe: Auch die minderjährige Ehefrau habe einen Anspruch darauf, dass ihr Status anerkannt werde. Nun muss das Bundesverfassungsgericht darüber entscheiden.

## Anderswo gelten variable Kriterien

Das Gericht stellte seinerseits im Dezember 2019 eine Anfrage an das Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Privatrecht mit der Bitte, als sachkundiger Dritter Stellung zu nehmen. Für die größtenteils empirischen Fragen zur Situation von Geflüchteten in Deutschland, die das Gericht stellte, haben wir indes keine spezielle Expertise. Stattdessen wollten wir eine Stellungnahme abgeben, die auf unseren Kernkompetenzen basiert: der Privatrechtsvergleichung mit dekolonialem Ansatz sowie dem internationalen Privatrecht. Wir stellten ein Team aus 30 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zusammen, um die sozialen, rechtlichen und praktischen Ausprägungen von Frühehen in mehr als 60 Rechtssystemen zu untersuchen.

## Gerade die zu schützende minderjährige Ehefrau steht durch das deutsche Gesetz häufig schlechter da.

Die Bestandsaufnahme umfasst islamisch geprägte Rechtsordnungen, Länder Lateinamerikas, aber auch europäische Länder innerhalb und außerhalb der EU sowie die USA und Japan.

Bereits die undifferenzierte Rede von „Kinderehen“ ist problematisch, da es auch um Menschen im Alter von 15 bis 17 Jahren geht, die gemeinhin als Jugendliche gelten. Daher verwenden wir in unserer Stellungnahme – anders als der Gesetzgeber – den Begriff der „Frühehe“, um alle Ehen zu erfassen, die früh im Leben geschlossen werden, ohne dass dafür eine genaue Altersgrenze maßgeblich ist. Der Blick in unterschiedliche Rechtsordnungen zeigt nämlich: Die Ehemündigkeit, also die Wertung eines Gesetzgebers darüber, wann Personen die notwendige körperliche und geistige Reife besitzen, um die Folgen einer Heirat abzusehen und diese tragen zu können, wird nur teilweise an fixe Altersgrenzen geknüpft. In vielen Ländern wird diese anhand variabler, von den zuständigen Behörden und Stellen zu konkretisierender Kriterien wie der Körper- oder Geistesreife oder des Kindeswohls ermittelt.

### Die Ehe als Ausweg aus der Not

Ebenso verengt eine Fokussierung auf die Flüchtlingssituation den Blick: Auch in einigen europäischen Ländern, den USA oder Lateinamerika können Personen vor ihrem 18. Lebensjahr wirksam eine Ehe eingehen. Erleidet etwa eine US-Amerikanerin bei einem Besuch in Deutschland einen Herzinfarkt, so dürfte nach dem Gesetz ihr Ehemann nicht über ihre Behandlung

entscheiden, wenn sie ihn noch minderjährig geheiratet hat und die Ehe daher in Deutschland nicht wirksam ist.

Geleitet wurde die Stellungnahme insbesondere von der Frage, wann ausländische Ehen, die nicht die Vorgaben des deutschen Rechts erfüllen, dennoch schützenswert sind. Das Heiratsverhalten wird insbesondere von Wertvorstellungen über Ehe und Familie sowie von der Stellung Minderjähriger und von Geschlechterrollen geprägt: Sexuelle Kontakte sind mancherorts nur zwischen Ehegatten erlaubt. Nur die Ehe sichert einen anerkannten Platz in der Gesellschaft. In manchen Situationen erscheint eine frühe Eheschließung als Ausweg aus wirtschaftlicher Not oder ermöglicht die Flucht aus einer gewalttätigen Ursprungsfamilie. Es gibt also vielfältige Gründe, eine Frühehe einzugehen.

### Die Betroffenen verlieren Ansprüche

Wird einer solchen Ehe nach der Einreise nach Deutschland pauschal die Wirksamkeit abgesprochen, werden die Betroffenen in ihrem sozialen und rechtlichen Status verletzt und verlieren vermögensrechtliche Ansprüche, wie etwa auf ehelichen Unterhalt oder im Todesfall das Ehegattenerbrecht. Gerade die zu schützende minderjährige Ehefrau steht dadurch häufig schlechter da.

Der globale Vergleich zeigt, dass das deutsche „Gesetz zur Bekämpfung von Kinderehen“ durch die Abschaffung der Einzelfallbetrachtung und der Gleichsetzung inländischer mit ausländischen Ehen zu ungewöhnlichen Härten führt. Es erlaubt weder Spielraum für die Würdigung individueller Belange oder der konkreten Lebensumstände der Betroffenen noch ermöglicht es ihnen, ihre eigene Position im Rahmen eines rechtsstaatlichen Verfahrens geltend zu machen. Sie haben keine Stimme mehr.

Der Umgang mit unterschiedlichen Rechtskulturen gehört zu den Herausforderungen des Zusammenlebens in einer von Globalisierung geprägten Welt. Wenn nach ausländischem Recht geschlossene und im guten Glauben an ihre Gültigkeit gelebte Ehen ohne Einzelfallprüfung für unwirksam erklärt werden, setzt das pauschal den von einem anderen Rechtssystem garantierten Status außer Kraft. Das ist nicht die Aufgabe des Rechts. o

# 6 Proteinstau im Gehirn

**IRINA DUDANOVA**

↳ Max-Planck-Institut  
für Neurobiologie,  
Martinsried

Neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson oder Chorea Huntington sind unheilbare Krankheiten. Ein gemeinsames Merkmal sind Proteinablagerungen im Gehirn. Zusammen mit meinem Team untersuche ich, wie sie das Überleben und die Funktionstüchtigkeit von Nervenzellen beeinträchtigen.

**Z**ellen sind Meister der Protein-Faltkunst: Damit Proteine ihre jeweiligen Aufgaben erfüllen können, müssen sie sich zu einem komplexen räumlichen Gebilde zusammenlagern. Eine strenge Qualitätskontrolle stellt sicher, dass sich ein Protein korrekt faltet. Als „Kontrolleure“ fungieren Faltungshelfer-Moleküle, die geschädigte Proteine erkennen und reparieren oder ihren Abbau fördern. Sie sorgen damit für ein Gleichgewicht der Proteinfunktionen in der Zelle, die sogenannte Proteostase.

Besonders wichtig ist diese Stabilität in Nervenzellen. Da sie langlebig sind und sich nicht teilen, sind sie besonders anfällig für Alterungsprozesse. Im Fall von neurodegenerativen Erkrankungen häufen sich falsch gefaltete Proteine in den Nervenzellen an, anstatt entsorgt zu werden. Dies kann je nach Erkrankung das Gedächtnis, die Kontrolle der Muskulatur oder elementare Körperfunktionen beeinträchtigen. Doch wie hängt beides zusammen? Das erforschen wir vom Max-Planck-Institut für Neurobiologie sowohl an Zellkulturen als auch an lebenden Mäusen. Die Tiere dienen uns als Modelle menschlicher Erkrankungen.

Um die Entstehung von Proteinablagerungen in Nervenzellen des Mausgehirns im Mikroskop untersuchen zu können, haben wir ein fluoreszierendes

Sensormolekül entwickelt, mit dessen ausgestrahltem Licht wir den Proteostase-Zustand unter dem Mikroskop sichtbar machen können. Damit das Sensorprotein selbst die Zellvorgänge so wenig wie möglich beeinflusst, verwenden wir das Protein, das Glühwürmchen zum Leuchten bringt. Dies hat auch den Vorteil, dass es auf die niedrigere Körpertemperatur des Insekts optimiert ist. Dadurch bleibt es in der wärmeren Säugerzelle ständig auf die Hilfe der Faltungshelfer-Proteine angewiesen, um in Form zu bleiben. Seine Fluoreszenz zeigt so den Aufenthaltsort der aktiven Faltungshelfer-Proteine innerhalb der Zelle.

## Sensor für Proteinfaltung

Gesunde Nervenzellen verfügen über ausreichend Faltungskapazitäten, um die kleinen Mengen des Sensorproteins in korrekter Form zu halten. Unter diesen Bedingungen ist der Sensor gleichmäßig in der Zelle verteilt. Ist das Abwehrsystem für Fehlfaltungen hingegen überfordert, kann das Sensorprotein seine korrekte Form nicht mehr beibehalten. Es bildet dann kleine Anhäufungen innerhalb der Zellen, die im Mikroskop als leuchtende Punkte erkennbar sind. Mit dieser Methode kann man

# Alzheimer



?????????????  
?????? ?????  
???????

??????  
??????

???????  
??????  
???

???

????

??????

???????

???????



Proteostase-Störungen bei verschiedenen Krankheiten erkennen und im Detail untersuchen. Darüber hinaus könnte der Sensor künftig dabei helfen, die Wirksamkeit möglicher Therapien zu beurteilen. Was passiert also in der Zelle, wenn sich fehlgefaltete Eiweiße ablagern? Um die Abläufe näher zu beleuchten, setzten wir zusammen mit Kollegen vom Max-Planck-Institut für Biochemie künstlich erzeugte Proteine ein. Diese ahmen die typische fehlgefaltete Struktur von Proteinen nach, die an neurodegenerativen Erkrankungen beteiligt sind, und lagern sich in sogenannten Einschlusskörperchen ab. Da diese „Statisten“ mit keinem krankheitsrelevanten Protein verwandt sind, können wir mit ihnen grundlegende Mechanismen dieser Erkrankungen untersuchen.

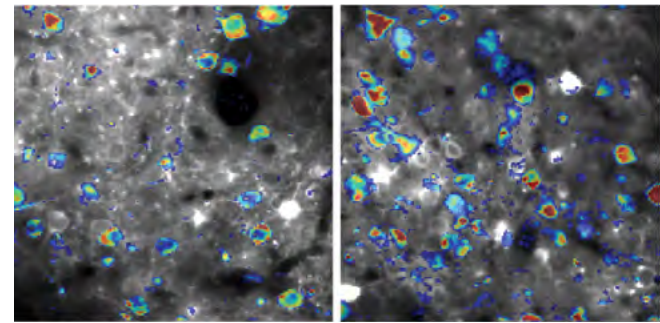
## Probleme bei der Müllentsorgung

Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop zeigen, dass in Zellen mit künstlich erzeugten Ablagerungen ausgerechnet diejenigen Strukturen beeinträchtigt sind, die für die Müllentsorgung verantwortlich sind. Bläschenartige Organellen, Lysosomen genannt, nehmen normalerweise fehlgefaltete Proteine und anderen zellulären Abfall auf und verdauen sie in ihrem Inneren. In diesem Fall sind die Lysosomen jedoch angeschwollen und enthalten offenbar unverdautes Material.

Wie wir aus biochemischen Analysen wissen, sind solche Proteinablagerungen klebrig. Dadurch fangen sie auch funktionsfähige Proteine der Zelle ab. Tatsächlich haben wir in den Ablagerungen ein Protein gefunden, das am Transport von Lysosomen-Bausteinen beteiligt ist. Sind die Lysosomen geschädigt, kommt es zu einem Stau im zellulären Entsorgungssystem. Dieser trägt dazu bei, dass die Überlebensfähigkeit der Nervenzellen abnimmt. Mit unserer gemeinsamen Studie konnten wir somit eine neue Verbindung zwischen den Proteinablagerungen, der Beeinträchtigung der Abbauvorgänge in Nervenzellen und letztendlich dem Tod der Zellen nachweisen.

Eiweißablagerungen schädigen nicht nur Nervenzellen, sie stören auch die Kommunikation der Zellen

*Mikroskopaufnahmen von Nervenzellen in der Hirnrinde einer gesunden (links) und einer Maus mit einer Huntington-ähnlichen Erkrankung (rechts). Zellen mit starker Aktivität sind rot, schwach aktive Zellen sind blau dargestellt. Die stärkere Aktivität im Gehirn des kranken Tiers könnte auf eine Schädigung hemmender Nervenzellen zurückzuführen sein.*



untereinander. Wir erforschen diese Veränderungen mithilfe einer speziellen Mikroskopiertechnik an Mäusen, die an Chorea Huntington erkrankt sind. Patienten mit dieser Erkrankung leiden unter anderem an unwillkürlichen krampfartigen Muskelzuckungen. Mit der Methode können wir die Nervenzellaktivität am lebenden Tier messen und den Aktivitätsverlauf über mehrere Wochen verfolgen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Nervenzellen in dem für die Muskelkontrolle zuständigen Teil der Hirnrinde bereits vor dem ersten Auftreten der Verhaltensänderungen stärker aktiv sind. Gewebeuntersuchungen in Chorea-Huntington-Mäusen und in menschlichem Chorea-Huntington-Gehirngewebe sowie biochemische Analysen weisen darauf hin, dass diese Überaktivität möglicherweise mit einer verminderten Hemmung in den Verbindungsstellen der Nervenzellen (Synapsen) zusammenhängt.

## Pläne für die Zukunft

Jede neurodegenerative Erkrankung hat ihre eigene Ausprägung. Grund dafür ist, dass bestimmte Nervenzelltypen besonders früh und stark betroffen sind, während andere länger verschont bleiben. Warum das so ist, ist vielfach noch unklar. In zukünftigen Untersuchungen möchten wir die Merkmale der unterschiedlich stark betroffenen Zelltypen noch genauer untersuchen. Auf diese Weise wollen wir herausfinden, welche Vorgänge bei der Krankheitsentstehung eine Rolle spielen. o



# 7 Internationale Steuergerechtigkeit

**JOHANNA STARK**

Max-Planck-Institut  
für Steuerrecht und  
Öffentliche Finanzen,  
München

Die internationale Steuerordnung steht vor einem grundlegenden Umbau. Es mehren sich die Stimmen, die fordern, Gerechtigkeits-erwägungen bei der internationalen Verteilung von Besteuerungsrechten stärker zu berücksichtigen. Was aber bedeutet Gerechtigkeit in diesem Kontext? Bisher gibt es darüber keinen Konsens. Ein Blick auf verschiedene philosophische Gerechtigkeitstheorien liefert kein einheitliches Bild, was die moralische Verpflichtung zur Umverteilung von Ressourcen über Staatsgrenzen hinweg angeht.

**W**enn Apple ein neues iPhone in Kalifornien entwickelt, dieses in China zusammenbauen lässt, dann an deutsche Kunden verkauft und die Erträge aufgrund konzerninterner Vereinbarungen einer Tochtergesellschaft in Irland zugerechnet werden – welcher Staat darf die letztlich erzielten Gewinne zu welchem Anteil besteuern? Die Antwort darauf ergibt sich aus dem internationalen Steuerrecht, einem in seinen Grundzügen etwa einhundert Jahre alten Regelungskörper aus zwischenstaatlichen Abkommen, die die Aufteilung von Besteuerungsrechten bei grenzüberschreitenden Geschäftstätigkeiten festlegen.

## Das ganze Regelungsgefüge anpassen

Dieses Regelungssystem steht nun vor tiefgreifenden Reformen. Einig ist man sich darin, dass die internationale Steuerordnung nicht nur punktueller Anpassungen bedarf, sondern das ganze Regelungsgefüge an die zunehmend globale Integration von Wirtschaftsketten, die gestiegene Mobilität von Steuerzahlern wie auch von Kapital sowie an primär digitale Geschäftsmodelle angepasst werden muss.

Weniger Einigkeit gibt es im Hinblick auf die Strukturprinzipien und Leitideale, denen eine solche Neuausrichtung der internationalen Steuerordnung folgen sollte. Zunehmend sind Forderungen zu hören, dass die Staatengemeinschaft bei dem anstehenden Umbau den Blick darauf richten sollte, wie sich eine neue internationale Steuerordnung nicht nur effizient und umsetzbar, sondern auch gerecht ausgestalten lässt. Die Forderung nach internationaler Steuergerechtigkeit wird nicht zuletzt vonseiten der Entwicklungs- und Schwellenländer erhoben, die ihren Anteil an den Wertschöpfungsketten global operierender Unternehmen in größere Besteuerungsanteile übersetzt sehen wollen, als dies nach den bisherigen Regeln der Fall ist.

Sofern es darum geht, Wertschöpfungsbeiträge neu zu gewichten, diskutieren wir letztlich über ein plausibles Verständnis des Wertschöpfungsbegriffs. Das Ziel, Besteuerungsrechte so zu verteilen, dass sie mit anteiligen Wertschöpfungsbeiträgen im Einklang stehen, ist zwar auf den ersten Blick einleuchtend; bei genauerem Hinsehen stellt sich jedoch heraus, dass dem Wertschöpfungs-begriff die konkrete Aussagekraft fehlt. Zwar kann man damit begründen, warum Steueroasen als Heimat bloßer „Briefkastenfirmen“ nicht zum Zuge kommen sollten.



*Elendsviertel in Dhaka, der Hauptstadt von Bangladesch. Menschen, die in Slums wie diesem leben, könnten möglicherweise von Änderungen in der internationalen Steuerordnung profitieren.*

Darüber hinaus lässt sich aus dem Begriff aber kaum eine Verteilung von Besteuerungsrechten unter all jenen Staaten ableiten, die eine Verbindung mit Faktoren wie Entwicklung, Produktion, Marketing und Verkauf für sich reklamieren.

### Über Grenzen hinweg umverteilen?

Die Diskussion über mehr internationale Steuergerechtigkeit hat aber noch eine ganz anders gelagerte Dimension: Hier ist es die global gesehen drastisch ungleiche Verteilung von Ressourcen und Lebenschancen, die nach politischen und rechtlichen Veränderungen auch im Bereich des internationalen Steuerrechts verlangt. Ausgangspunkt für dieses Argument sind die Bedürfnisse und (Menschen-)Rechte von Individuen. Für die Befriedigung dieser Bedürfnisse und die Verwirklichung grundlegender Leistungs- und Teilhaberechte, etwa des Rechts auf Bildung, braucht es Ressourcen. Grundsätzlich wäre es denkbar, das internationale Steuerrecht als Instrument zur Umverteilung finanzieller Ressourcen insbesondere zugunsten von Entwicklungsländern einzusetzen. Im nationalen Kontext ist das Steuersystem seit jeher ein zentrales Umverteilungsinstrument, auch wenn die konkrete Ausgestaltung von Art und Umfang oft zu politischen Auseinandersetzungen führt.

**Für die Verwirklichung grundlegender Rechte, etwa des Rechts auf Bildung, braucht es Ressourcen.**

## Ein Zuwachs an Besteuerungsrechten für einen Staat geht nicht zwingend mit einer Verbesserung der Lebensbedingungen seiner Einwohner einher.

Der Umgang mit globaler Armut und Ungleichheit spielt in diesem Zusammenhang indes eher selten eine Rolle. Dieses Auseinanderfallen von nationaler und internationaler Perspektive auf das moralische Gebot zur Umverteilung lässt sich in einem ersten Zugriff sozialpsychologisch erklären: Je stärker die sozialen, politischen und wirtschaftlichen Beziehungen von Menschen untereinander sind, desto eher sehen sie Umverteilung als Gebot von Gerechtigkeit an. Wie steht es jedoch um die normative Kraft dieser Erklärung? Mit anderen Worten: Sprechen stärkere Gerechtigkeitsgründe dafür, mit steuerfinanzierten Sozialleistungen Mitmenschen in Deutschland zu unterstützen als hungernde Kinder in Bangladesch? Falls ja, was ist die Rechtfertigung für diese Varianz? Solche Fragen sind Gegenstand einer Debatte zwischen Befürwortern unterschiedlicher Gerechtigkeitstheorien; sie wird vor allem in der politischen Philosophie geführt, hat aber auch Auswirkungen auf die Gerechtigkeitsdiskussion im internationalen Steuerrecht.

### Steuerverlagerungen bekämpfen

Über den Aspekt der territorialen Reichweite von Gerechtigkeitspflichten hinaus stellt sich die Frage: Ist das internationale Steuerrecht für eine internationale Umverteilung das richtige Instrument? Man muss unterscheiden zwischen den Gründen, die für oder gegen eine internationale Umverteilung von Ressourcen im Allgemeinen sprechen, und den Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Möglichkeiten, eine solche Umverteilung zu erreichen und damit letztlich bessere Lebensbedingungen für die Menschen insbesondere in Entwicklungsländern zu schaffen. Zu den weiteren Möglichkeiten zählen etwa humanitäre Hilfe und Entwicklungshilfe, aber auch eine Stärkung des Menschenrechtsschutzes im Anfangsstadium internationaler Lieferketten.

Ohne den politischen Handlungsbedarf im Hinblick auf die Situation der Menschen in vielen Teilen der Welt in Abrede zu stellen, muss man sich klarmachen, dass ein Zuwachs an Besteuerungsrechten für einen bestimmten Staat nicht zwingend mit einer Verbesserung der Lebensbedingungen seiner Einwohner einhergeht. Wenn es letztlich um die Bedürfnisse, Rechte und Lebenschancen von Individuen geht und es die krasse Ungleichheit zwischen Menschen ist, die das Gerechtigkeitsproblem ausmacht – dann ist eine Umverteilung von staatlichen Besteuerungsrechten auf einer notwendigerweise kollektiven Ebene kein Garant für den gewünschten Erfolg.

Auch wenn keine ideale Lösung für eine gerechte Ausgestaltung dieses vielschichtigen Verteilungsszenarios auf der Hand liegt, hat die Debatte darüber immerhin zu politischem Handlungswillen im Hinblick auf ein verwandtes Problem geführt: Besteuerungsrechte sind für alle Staaten nur etwas wert, wenn es überhaupt einen Gewinn zu besteuern gibt. Das setzt voraus, dass die Gewinne von Apple & Co nicht wie bisher aufgrund ausgeklügelter Konstruktionen so lange durch verschiedene Konzerngesellschaften über den Globus geschickt werden können, bis sie im staaten- und steuerlosen Nirvana verschwinden. Gegen derartige Gewinnverlagerungen multinationaler Unternehmen vor allem im Digitalbereich versuchen die OECD und die Gruppe der zwanzig wichtigsten Industrie- und Schwellenländer G20 derzeit mit einem abgestimmten Maßnahmenpaket vorzugehen. Wie groß der Erfolg sein wird, muss sich zeigen. Das Gerechtigkeitspotenzial einer in diesem Rahmen geplanten globalen Mindestbesteuerung sollte jedenfalls nicht unterschätzt werden. o





# 8

## Besser hören durch Hirnstimulation

**MOLLY J HENRY,  
YURANNY  
CABRAL-CALDERIN**

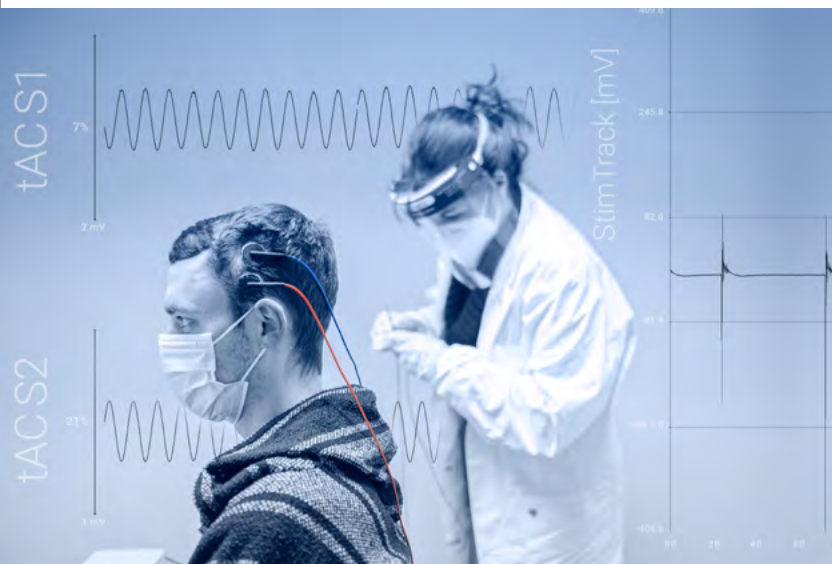
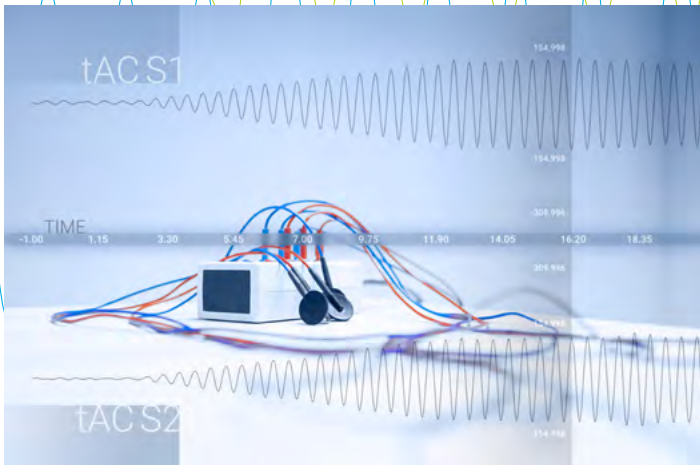
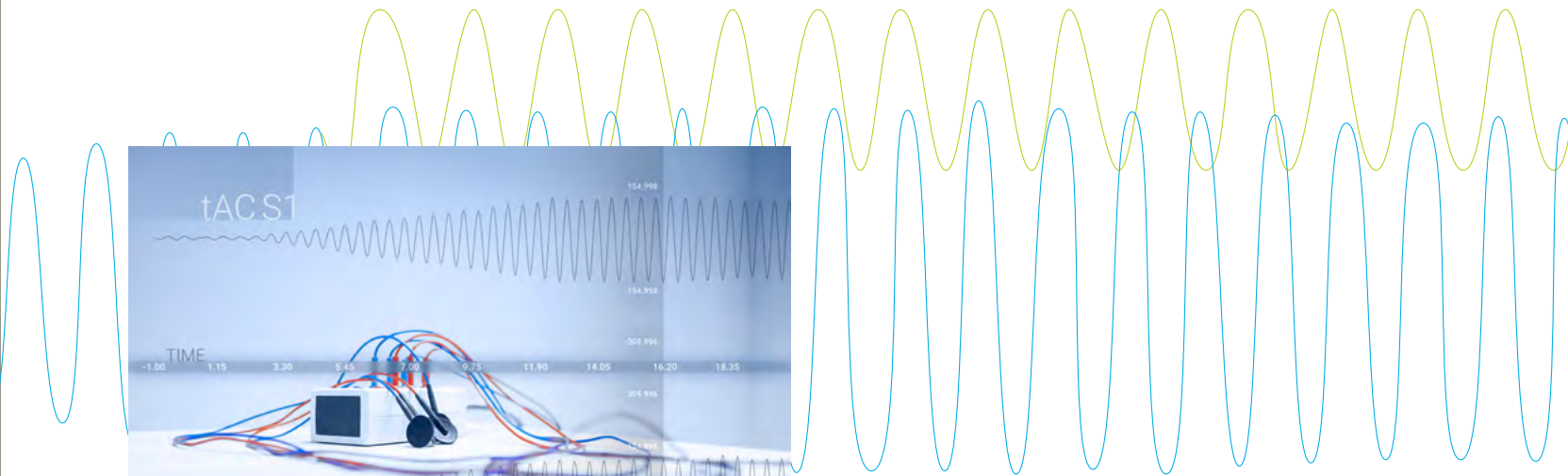
↳ *Max-Planck-Institut  
für empirische Ästhetik,  
Frankfurt am Main*

Die Aktivität der Zellen im menschliche Gehirn läuft in bestimmten Rhythmen ab. Diese Hirnrhythmen synchronisieren sich mit den Rhythmen von Klängen, die wir hören, also auch mit gesprochener Sprache. Je erfolgreicher Gehirn und Umwelt synchronisiert sind, desto besser verstehen wir, was wir hören. Neue Hirnstimulationstechniken versprechen, die Synchronität und damit das Hörvermögen zu steigern, wenn die Stimulation genau auf das Gehirn ausgerichtet werden kann. Wir haben untersucht, ob eine solche Ausrichtung auf die Hirnrhythmen Tag für Tag stabil möglich ist.

**S**obald ein Klang – etwa eine Stimme oder ein Lied – auf unser Ohr trifft, wird die Schallwelle in ein elektrisches Signal umgewandelt und an das Gehirn weitergeleitet. Dort werden bestimmte Nervenzellen mit dem elektrischen Signal, das von den Ohren kommt, synchronisiert, sie schalten sich also im Rhythmus der Klänge ein und aus. Die Synchronisierung von Gehirn und Umwelt ist wichtig, damit wir uns einen Reim auf die Geräusche in unserer Umgebung machen können. Je erfolgreicher sich beispielsweise unsere Hirnrhythmen mit den Rhythmen der Sprache synchronisieren, desto besser verstehen wir die sprechende Person, und desto genauer können wir ihre Stimme aus den Hintergrundgeräuschen heraushören. Insbesondere mit zunehmendem Alter fällt es uns schwer, jemandem in einer lauten Geräuschkulisse beim Sprechen zuzuhören. Gerade dieses Problem könnte eventuell gelindert werden, wenn wir einen Weg finden, die Synchronität zwischen Gehirn und Umwelt zu verbessern.

Eine vielversprechende Technik, um das zu erreichen, ist die sogenannte transkranielle Wechselstromstimulation. Bei dieser Technik wird mittels Elektroden ein schwacher elektrischer Strom an die Außenseite des Kopfs angelegt. Die Technik ist vollkommen ungefährlich und die Stimulation in der Regel überhaupt nicht zu spüren. Es hat sich gezeigt, dass sich die elektrische Strömung mit den Hirnrhythmen verknüpfen kann und dadurch das natürliche Timing und die Form der Hirnrhythmen verändert. In einer Reihe von Studien wurde bereits getestet, ob mittels dieser Technik eine bessere Synchronisation von Klangrhythmen und Hirnrhythmen erreicht werden kann. Die bisherigen Ergebnisse sind jedoch inkonsistent.

Zwischen den Rhythmen im Gehirn und den Rhythmen in der Umwelt gibt es eine Zeitverzögerung, die für jeden einzelnen Menschen ganz spezifisch ist. Daher müssen wir zunächst die Zeitverzögerung zwischen Gehirn und Klang bei einer Person kennen, um die Stimulation richtig auf ihre Hirnrhythmen ausrichten zu können.



*Bei der transkraniellen Wechselstromstimulation steuern zwei Elektroden an jeder Seite des Kopfs das auditive System an. Die Wellen zeigen den schwachen elektrischen Strom, der an die beiden Elektroden angelegt wird. Der Proband spürt davon nichts.*

Ein Problem dabei: Die mögliche Verbesserung der Synchronität zwischen Gehirn und Umwelt basierte bisher auf der ungeprüften Annahme, dass die Synchronität zwischen Gehirn und Umwelt von einem Tag auf den anderen gleich bleibt. Tatsächlich wurde bisher nicht experimentell getestet, ob Hirnrhythmen mit Klangrhythmen von einem Tag auf den anderen auf exakt die gleiche Weise synchronisiert sind. Das ist überraschend, da dies eine der wichtigsten Voraussetzungen dafür ist, um die elektrische Stimulation für die Verbesserung der Synchronität zwischen Gehirn und Umwelt nutzen zu können.

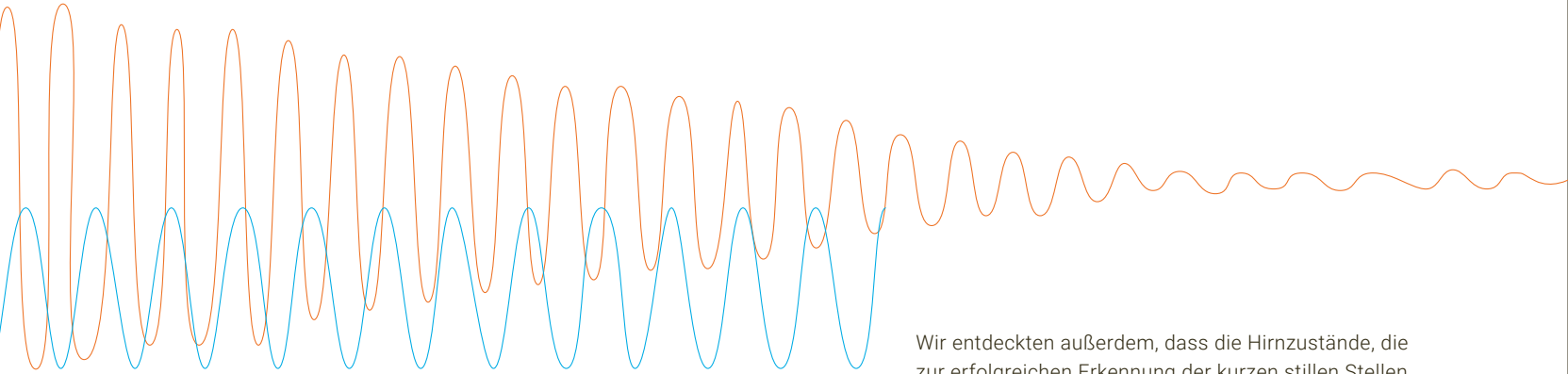
## Ein vielversprechendes Ergebnis

In unserer Studie luden wir Teilnehmer zu zwei getrennten Sitzungen ein und maßen jeweils die Synchronität von Gehirn und Umwelt mittels Elektroenzephalografie (EEG). Die Zeit zwischen den Sitzungen variierte zwischen zwei und 42 Tagen. Wir maßen die Hirnaktivität der Teilnehmer, während diese Klangrhythmen hörten, und stellten dabei ihre Aufmerksamkeit sicher, indem wir sie baten, auf schwer zu erkennende stille Stellen in den Klängen zu achten, die sie hörten. Zusätzlich zur Quantifizierung der Synchronität zwischen Gehirn und Umwelt testeten wir, welche Gehirnzustände mit guten Leistungen bei der Erkennung der stillen Stellen verbunden waren. Hier verwendeten wir das Erkennen kurzer stiller Stellen als Zielaufgabe. Denn genau das machen Zuhörer, wenn sie zum Beispiel den Unterschied zwischen einem „b“ und einem „p“ erkennen.

Wir entdeckten, dass die Synchronität zwischen Gehirn und Umwelt äußerst zuverlässig ist: Die Zeitverzögerung zwischen Hirnrhythmen und Klangrhythmen ist für einen einzelnen Menschen selbst nach einem Monat stabil. Das ist eine vielversprechende Nachricht für den gezielten Einsatz der transkraniellen Wechselstromstimulation zur Verbesserung der Synchronität von Gehirn und Umwelt.



## Zwei verschiedene Hirnrhythmen wirken zusammen und bestimmen, wie erfolgreich wir hören.



Wir entdeckten außerdem, dass die Hirnzustände, die zur erfolgreichen Erkennung der kurzen stillen Stellen führen, aus zwei verschiedenen Arten von Hirnrhythmen zusammengesetzt sind. Erstens hängt die erfolgreiche Wahrnehmung von den Hirnrhythmen ab, die tatsächlich mit den Klangrhythmen synchronisiert sind (und zwar mit einer Taktung von zwei Zyklen pro Sekunde oder, musikalisch ausgedrückt, 120 Schlägen pro Minute). Zweitens hängt eine erfolgreiche Wahrnehmung auch von einem Hirnrhythmus ab, der nicht mit den Klängen synchronisiert ist – dem sogenannten Alpha-Rhythmus, der mit der Aufmerksamkeit verbunden ist. Die beiden Hirnrhythmen wirken zusammen und bestimmen, wie erfolgreich wir hören. Diese Beobachtung ist ein wichtiger Durchbruch, der darauf hindeutet, dass die Verbesserung der Synchronität von Gehirn und Umwelt durch die Stimulation möglicherweise nicht ausreicht, um das Hören in lauten Geräuschkulissen zu verbessern.

### Den Ansatz wirksamer machen

Das Projekt ist noch nicht abgeschlossen. Wir verwenden derzeit funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI), ein bildgebendes Verfahren zur Untersuchung des Gehirns, um Informationen über die Hirnanatomie einzelner Menschen zu sammeln. Mithilfe dieser Kenntnisse wollen wir dann genauer bestimmen, wo wir Elektroden auf der Kopfhaut anbringen sollten, damit die Stimulation ihr neurales Ziel erreicht. Wir sind überzeugt, dass sich durch einen individualisierten Ansatz die Wirksamkeit der transkraniellen Wechselstromstimulation steigern lässt. Damit könnten wir eine Möglichkeit schaffen, die Reaktion des Gehirns auf Klänge zu beeinflussen und damit insbesondere im höheren Alter das Hörvermögen zu verbessern. o

# 9 Schwergewicht im Herzen einer Galaxie

**KIANUSCH  
MEHRGAN,  
JENS THOMAS**

↳ *Max-Planck-Institut  
für extraterrestrische  
Physik, Garching*

Inmitten des Galaxienhaufens Abell 85 sitzt ein gigantisches Milchstraßensystem. Diese Holm 15A genannte Riesengalaxie hat es im wörtlichen Sinne in sich: In ihrem Herzen lauert das mit 40 Milliarden Sonnenmassen größte bisher beobachtete schwarze Loch. Dabei ist das Zentrum von Holm 15A besonders arm an Sternen. Die Entdeckung, dass sich ausgerechnet dort eine außergewöhnlich große Schwarzkraftfalle befindet, bietet die Möglichkeit, die Masse von schwarzen Löchern selbst in Galaxien abzuschätzen, die für eine direkte Massenbestimmung zu weit entfernt sind.

**D**as Milchstraßensystem Holm 15A im Zentrum des Galaxienhaufens Abell 85 ist enorm groß. Allein seine Sterne ergeben zusammen eine Masse, die der von mehr als zwei Billionen Sonnen entspricht. Dennoch erscheint das Zentrum dieser gigantischen, rund 700 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernten Galaxie im Teleskop eher diffus und lichtschwach. In kleineren Galaxien mit kleineren schwarzen Löchern hingegen nimmt die Sterndichte zum Zentrum hin immer mehr zu, so wie das auch bei unserer Milchstraße der Fall ist. Das heißt: Kleinere schwarze Löcher sind von hellen galaktischen Kernen umgeben.

Doch bei den allergrößten Galaxien wie Holm 15A verhält es sich anders: Ihre Zentren sind zwar immer noch der hellste Teil, aber es gibt einen kleinen, für Riesengalaxien charakteristischen inneren Bereich, der sehr viel lichtschwächer ist, als man es aufgrund der Verteilung des Lichts im Rest der Galaxie erwarten würde. In den Zentralregionen dieser Systeme scheint gleichsam Licht zu fehlen – manchmal so viel, wie eigentlich

von Milliarden von Sonnen ausgestrahlt werden sollte. Offenbar leiden die massereichsten Galaxien unter einem zentralen Sterndefizit.

Dieser Unterschied in der Struktur der Galaxien lässt sich mit verschiedenen Entwicklungsstadien erklären. Der Theorie zufolge wachsen Galaxien durch Kollisionen und Verschmelzungen mit kleineren Milchstraßen. Bei jedem dieser kosmischen Unfälle sinken die schwarzen Löcher der beiden Galaxien ins Zentrum des neu entstehenden Systems und bilden dort zunächst ein rotierendes Paar. Damit sich die dunklen Schwarzkraftfallen in ein neues, massereicheres schwarzes Loch verwandeln können, müssen sie erst ihren überschüssigen Drehimpuls abgeben. Ohne ein umgebendes Medium, das den Drehimpuls aufnimmt, würden sie als Paar für sehr lange Zeit weiter umeinanderkreisen.

Stehen die verschmelzenden Galaxien jedoch am Ende ihrer Entwicklungsgeschichte, so ist ihr Vorrat an frei verfügbarem Gas in der Umgebung aufgebraucht. Es gibt also keine Materie mehr, die den Drehimpuls

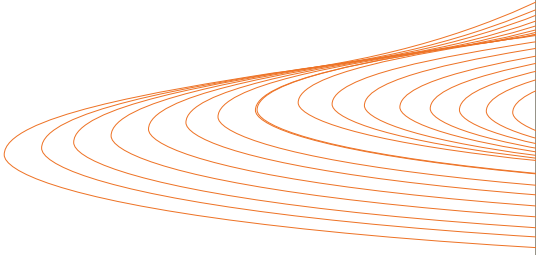


*Galaxie im Fokus:  
Der Haufen Abell 85,  
aufgenommen am Wendel-  
stein-Observatorium der  
Ludwig-Maximilians-  
Universität München. Die  
helle Galaxie in der Bildmitte  
namens Holm 15A besitzt  
einen ausgedehnten, diffusen  
Kern. Aus neuen Daten haben  
Astronomen die Masse des  
schwarzen Lochs dieses  
Milchstraßensystems direkt  
bestimmt.*

aufnehmen könnte. Dieser wird stattdessen an die umgebenden Sterne abgegeben. Dabei geraten Sterne, deren ursprüngliche Umlaufbahn zu nahe an das rotierende Paar heranführt, auf energiereichere Bahnen, die sie aus dem galaktischen Zentrum herausschleudern. Dieser Prozess funktioniert ähnlich wie die (allerdings viel sanfteren) Swing-by-Manöver, mit deren Hilfe Raumsonden während des engen Rendezvous mit einem Planeten an Energie gewinnen.

### Neue Sterne gleichen das Defizit aus

Auf diese Weise können Milliarden von Sternen aus dem Herzen der entstehenden Galaxie herauskatapultiert werden. In kleineren Galaxien, in denen noch nicht alles Gas aufgebraucht ist, lässt sich ein temporäres Sterndefizit mit der Zeit durch die Geburt neuer, junger Sterne wieder ausgleichen. In den älteren Riesengalaxien gelingt dies nicht, ihr Gasvorrat ist weitgehend aufgebraucht. Haben diese Systeme ihre Sterne in den Zentralregionen erst einmal verloren, können auch keine neuen nachwachsen.

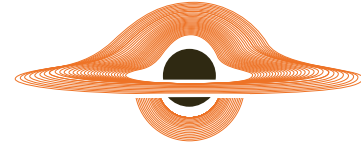


Unsere Studien der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass die abgegrenzten, diffusen inneren Bereiche von Riesengalaxien ein direktes Abbild der Einflussosphäre des schwarzen Lochs sind. Sie markieren also genau jene Region der Galaxie, in der die Gravitation zunächst von dem rotierenden Paar und später dann vom verschmolzenen schwarzen Loch dominiert wird. Weil massereiche schwarze Löcher vor ihrer Vereinigung viel mehr Gravitationsenergie freigeben als massearme, und weil die schwarzen Löcher in großen Galaxien besonders massereich sind, erscheinen die Kerne der größten Milchstraßen besonders lichtschwach und ausgedehnt.

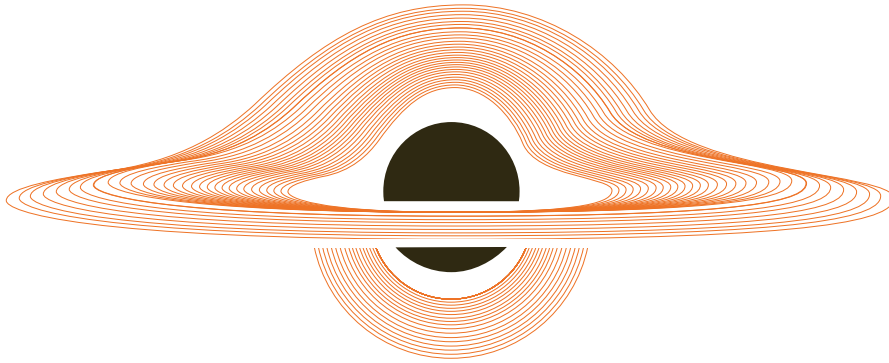
Eine vorläufige fotometrische Analyse von Holm 15A hatte bereits gezeigt, dass das schwarze Loch eine Einflussosphäre haben müsste, deren Durchmesser in etwa

## SCHWARZE LÖCHER

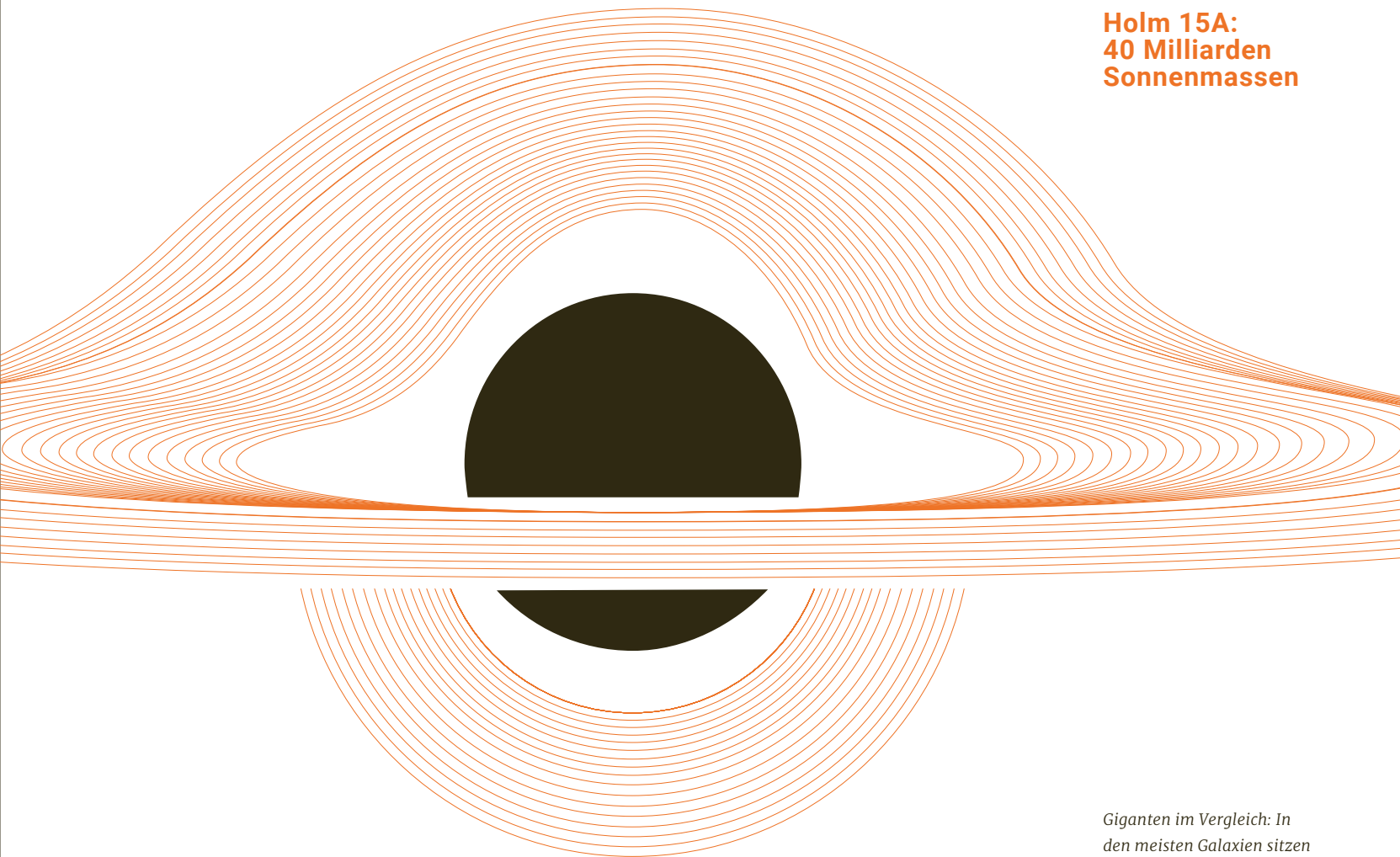
NGC 4472:  
2,5 Milliarden  
Sonnenmassen



NGC 1600:  
17 Milliarden  
Sonnenmassen



**Holm 15A:  
40 Milliarden  
Sonnenmassen**



*Giganten im Vergleich: In den meisten Galaxien sitzen schwergewichtige schwarze Löcher. Den Rekord mit 40 Milliarden Sonnenmassen hält die Schwarzkraftfalle in Holm 15A.*

## Das Massemonster ist vergleichsweise klein, aber immer noch etwa fünfmal so groß wie die Umlaufbahn des Zwergplaneten Pluto um unsere Sonne.

dem Abstand der Sonne zum Zentrum unserer Milchstraße entspricht, also rund 26.000 Lichtjahre. Nun gelangen uns sehr präzise Beobachtungen von Holm 15A mit dem Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte und dem Wide-Field Imager am Wendelstein-Observatorium der Ludwig-Maximilians-Universität München. So machten wir das schwarze Loch im Herzen von Holm 15A tatsächlich dingfest und bestimmten seine Masse zu der von 40 Milliarden Sonnen – Rekord! Damit bestätigte sich auch die Größe der Einflussosphäre des schwarzen Lochs aus der oben erwähnten fotometrischen Analyse. Das Massemonster selbst ist dagegen vergleichsweise klein, aber immer noch etwa fünfmal so groß wie die Umlaufbahn des Zwergplaneten Pluto um unsere Sonne; das bedeutet einen Durchmesser von ungefähr 30 Milliarden Kilometern.

### Blick in die ferne Vergangenheit

Für die Massebestimmung des schwarzen Lochs untersuchten wir die Bewegungen der Sterne im Zentrum von Holm 15A und analysierten sie mit einer aufwendigen numerischen Methode. Diese Technik basiert auf sogenannten Phasenraummodellen der Galaxie. Man

gewinnt sie aus vielen tausend Sternbahnen, die auf modernsten Hochleistungsrechnern simuliert werden. Mithilfe dieser Sternbahnen lässt sich der innere Aufbau einer Galaxie und ihre Masseverteilung besonders genau aus den Beobachtungen ableiten. Bei der Entwicklung und Anwendung dieser Methode spielt das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik eine weltweit führende Rolle.

Um das Wachstum der schwarzen Löcher und die Wechselwirkung mit der Entwicklung der Galaxien zu verstehen, müssen wir weit in die Vergangenheit zurückblicken. In der Astronomie können wir das, indem wir unseren Blick auf sehr weit entfernte Objekte richten, deren Licht vor vielen Milliarden Jahren ausgesandt wurde. Die spektroskopischen Signale, die man braucht, um die Bewegung der Sterne zu messen, werden dabei aber immer schwächer. Die Beobachtung von Holm 15A hat jetzt bestätigt, dass sich die Existenz sehr massereicher schwarzer Löcher in großen Galaxien durch eine genaue fotometrische Analyse der Sternverteilung ableiten lässt. Mit einer gewissen Unsicherheit gelingt dies sogar für die Bestimmung ihrer Masse. Solche fotometrischen Analysemethoden besitzen eine sehr große Reichweite. Daher erlauben sie neue Beobachtungsansätze, um die Entwicklung von schwarzen Löchern im frühen Universum zu erforschen. o

# 10 Embryos im Tiefschlaf

**IVAN BEDZHOV**  
↳ Max-Planck-Institut  
für molekulare Biomedizin,  
Münster

In Science-Fiction-Romanen verbringen Astronauten lange interstellare Reisen in sogenannten Stasiskapseln, in denen alle Körperfunktionen extrem verlangsamt werden. Auf diese Weise können sie selbst Jahrtausende lange Reisen überdauern – so zumindest die Vorstellung. Tatsächlich können viele Tierarten zu Beginn ihrer Entwicklung in eine Art „Scheintod“ verfallen. Zusammen mit meinen Kolleginnen und Kollegen untersuche ich diesen Ruhezustand in Embryos von Mäusen. Wir wollen verstehen, was dabei in den Zellen vor sich geht.

**B**ei Insekten wird ein Zustand, in dem die Abläufe im Körper durch Hormone heruntergefahren werden, Diapause genannt. Sie passen sich so an jahreszeitliche Schwankungen der Umwelt an. In den Eiern von Seidenspinnern können beispielsweise Änderungen der Temperatur und Lichtverhältnisse die Diapause auslösen. Auch bei Säugetieren kann eine Diapause auftreten. So paaren sich Rehe bereits im Sommer, die Schwangerschaft schreitet dann aber mehrere Monate lang nicht voran. Die Embryonen pausieren in einem sehr frühen Entwicklungsstadium kurz vor der Einnistung in die Gebärmutter. Durch diese Verzögerung kommen die Kitze erst im Frühjahr zur Welt, wenn ihre Überlebenschancen besser sind.

Mittlerweile wurde die embryonale Diapause bei mehr als 130 Säugetierarten nachgewiesen, unter anderem auch bei der Hausmaus, einem Modellorganismus der biomedizinischen Forschung. Wie die Diapause bei den Mäusen reguliert wird, liegt immer noch weitestgehend im Dunklen.

Am Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin erforschen wir, wie die Lage und die Kommunikation von Zellen die Entwicklung des Embryos bestimmen. Wir wollen insbesondere wissen, ob es besondere Signalfstoffe gibt, die im Ruhezustand aktiviert werden, um das Entwicklungspotenzial des Embryos zu bewahren.

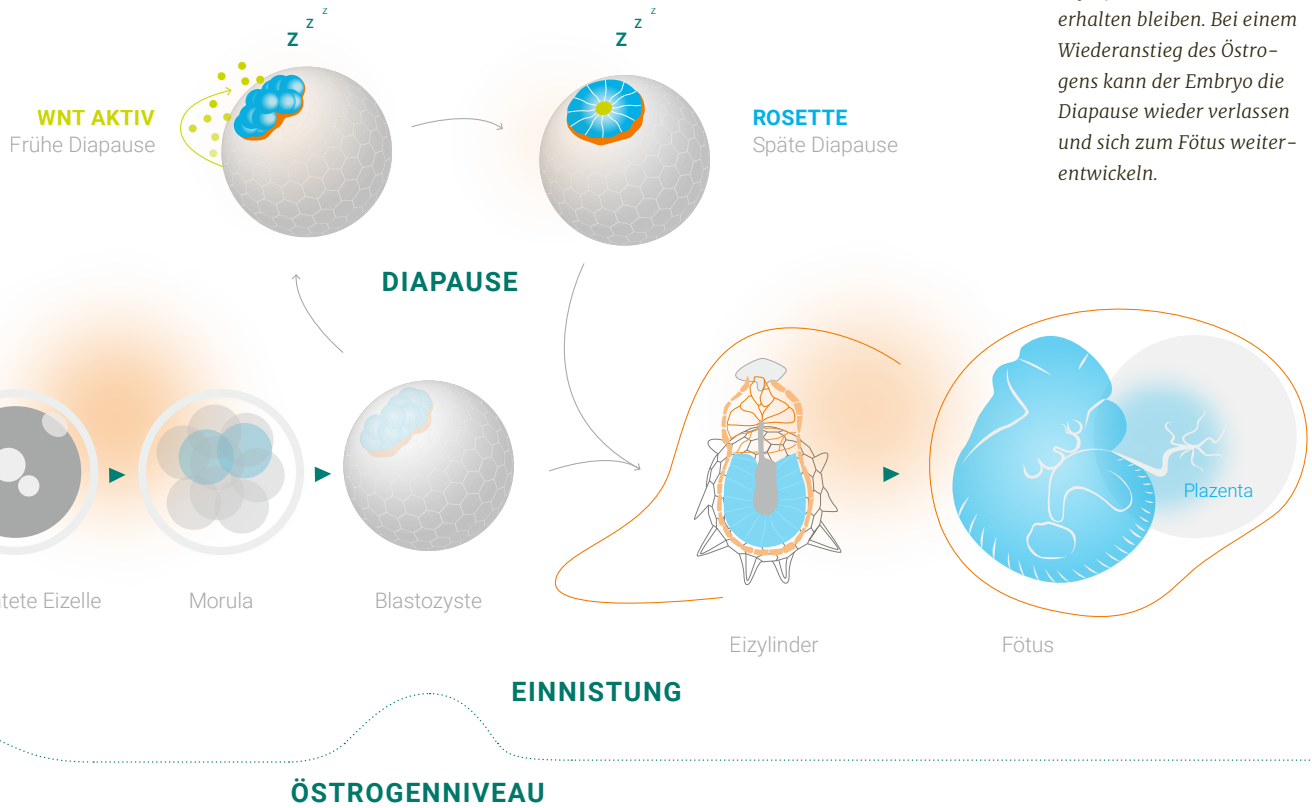
Bei Mäusen dauert es rund viereinhalb Tage, bis sich der Embryo von der befruchteten Eizelle zu einer Zellkugel aus etwa einhundert Zellen entwickelt hat, der Blastozyste. Sie besteht aus Stammzellen, die sich in jede Art von Körperzellen weiterentwickeln können, sowie zwei weiteren unterstützenden Zelllinien, welche die Plazenta und den Dottersack bilden.

## Pause bei niedrigem Hormonspiegel

Ein hoher Östrogenspiegel führt in diesem Stadium zur Einnistung der Blastozyste in die Gebärmutter und so zur Weiterentwicklung des Embryos. Diesen Umstand nutzen wir in unseren Experimenten: Durch die künstliche Senkung der mütterlichen Östrogenaktivität verhindern wir die Einnistung und lösen damit die Diapause aus. Bei der Analyse der Genaktivität während der Diapause der Mausedembryonen haben wir den sogenannten Wnt-Signalweg entdeckt, der ausschließlich innerhalb dieses Zeitraums aktiviert wird: Der Signalweg ist einer der evolutionär ältesten Signalwege der Embryogenese, der das Wachstum und die Entwicklung von Zellen steuert.

Während der normalen Embryonalentwicklung ist der Wnt-Signalweg in diesem Stadium jedoch entbehrlich,





Nach der Befruchtung durchläuft der frühe Embryo mehrere Teilungen bis zur Blastozyste. Bei niedrigem Östrogenspiegel tritt er in die Diapause ein. In der Diapause sorgt der Wnt-Signalweg dafür, dass die Stammzellen erhalten bleiben. Bei einem Wiederanstieg des Östrogens kann der Embryo die Diapause wieder verlassen und sich zum Fötus weiterentwickeln.

er wird erst später während der Gastrulation benötigt. Welche Rolle spielt der Wnt-Signalweg also in der schlafenden Blastozyste? Wir haben entdeckt, dass er die Umwandlung der Stammzellen von einer einfachen Zellkugel in eine rosettenartige Struktur steuert. Experimente, in denen wir während der Diapause den Signalweg inaktivierten, ließen die Stammzellen zerfallen.

### Signalstoffe des Embryos

Wir haben außerdem entdeckt, dass nicht die Mutter, sondern der Embryo selbst die Signalstoffe produziert, die den Wnt-Signalweg aktivieren. Er stellt sicher, dass die Stammzellen während der Diapause erhalten bleiben. Währenddessen wird der ruhende Embryo allmählich umgestaltet.

Warum die Stammzellen eine Rosette bilden, ist noch ein Rätsel. Wir haben zudem in der Mitte der Rosette einen kleinen Hohlraum entdeckt, in dem Zellen möglicherweise Botenmoleküle austauschen können. Neben den Wnt-Proteinen könnten also weitere noch unbekannte Signalfaktoren aktiv an der Diapause beteiligt sein.

Der schlafende Embryo ist ein wirklich faszinierendes Phänomen. Ob der Wnt-Signalweg während der Diapause auch bei anderen Säugetierarten genutzt wird, bleibt jedoch noch offen – genauso wie die Frage, ob auch menschliche Embryonen in einen Scheintod verfallen können. o

# 11 Programmieren lernen mit künstlicher Intelligenz

**SINGLA ADISH**  
↳ Forschungsgruppe  
Machine Teaching,  
Max-Planck-Institut  
für Softwaresysteme  
(Standort Saarbrücken)

Programmierfähigkeiten zu vermitteln spielt im modernen MINT-Unterricht eine zunehmend wichtige Rolle. Am Max-Planck-Institut für Softwaresysteme (Standort Saarbrücken) entwickeln wir auf künstliche Intelligenz (KI) gestützte virtuelle Tutoriumssysteme, welche die Schülerinnen und Schüler ihren individuellen Fähigkeiten entsprechend dabei unterstützen.

**E**ine gesellschaftliche Herausforderung besteht darin, für eine kosteneffektive und inklusive Bildung zu sorgen, die rechnergestütztes Denken und Problemlösungsfähigkeiten der Schülerinnen und Schüler fördert. Der aktuelle Lehrplan bis zum Abitur legt zunehmend Wert auf das Lösen offener Aufgaben (also Aufgaben ohne vorgefertigte Lösungen) – eine grundlegende Fähigkeit für den Erfolg in Fächern wie Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (die sogenannten MINT-Fächer).

Gerade das Programmieren kann hier wichtige Grundlagen vermitteln. Dazu ist eine individuelle Betreuung der Schülerinnen und Schüler notwendig, allerdings sind oft nicht ausreichend Lehrkräfte oder Tutoren verfügbar. Hier bieten durch künstliche Intelligenz unterstützte Tutoriumssysteme eine vielversprechende Alternative, die den Unterricht in den MINT-Fächern mit einem virtuellen Angebot ergänzt. Die derzeit verfügbaren Techniken für den Online-Unterricht sind jedoch begrenzt: Sie wurden zwar mit dem Ziel entwickelt,

Kurse in großem Umfang anzubieten, nicht aber, um die Problemlösungsfähigkeiten der Schülerinnen und Schüler zu fördern.

In den letzten Jahren haben wir in unserer Forschungsgruppe „Machine Teaching“ am Max-Planck-Institut für Softwaresysteme Techniken der nächsten Generation für den MINT-Unterricht entwickelt. Den Schwerpunkt bildet dabei auf Fragen basierendes Problemlösen, das etwa beim Programmieren, bei Beweisen mathematischer Theoreme oder beim Lösen schwieriger Rätsel angewendet werden kann. Um die Schülerinnen und Schüler auf diesen Gebieten effizient zu unterstützen, entwickeln wir neuartige, computergestützte Lernmodelle und Techniken für den maschinengestützten Unterricht.

Dazu entwerfen wir zunächst Rechenmodelle, mit denen sich der Lernprozess der Schülerinnen und Schüler individuell einschätzen lässt. Zudem entwickeln wir entscheidungstheoretische Modelle, mit denen sich quantifizieren lässt, von welcher Art der Unterstützung



when  clicked

set  to  of  +

move  steps

if  <  +  then

say Hello! for  secs

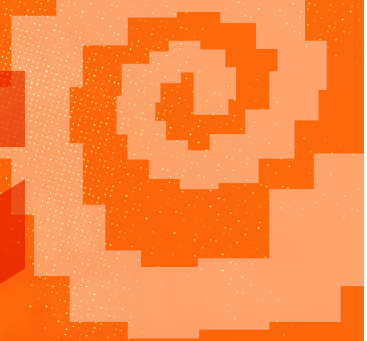
change  by   to

play sound

```
class Method
def from_set
  @bug
end

def request_send
  self.request_send
end
```

```
<_ <_ { } </>
{ } <_ </> <_
<_ <_ { } </>
```



## Wir haben einen neuartigen Algorithmus für die Aufgabensynthese entwickelt. Darin kombinieren wir Techniken aus Softwaretests und Machine Learning.

die Schülerinnen und Schüler am besten profitieren können. Basierend auf diesen Ergebnissen nutzen wir künstliche Intelligenz (KI), um personalisierte Lehrpläne zu erstellen, die den individuellen Lernprozess der Schülerinnen und Schüler berücksichtigen. Diese Programme können den Schülerinnen und Schülern aufbauend auf den von ihnen bereits gelösten Aufgaben weitere zuweisen oder sogar neue Aufgaben individuell zusammenstellen. Zudem sind unsere KI-Programme in der Lage, den Schülerinnen und Schülern ganz pragmatisch Hinweise zu geben, wenn sie bei der Lösung einer bestimmten Aufgabe nicht weiterkommen.

### Blockbasiertes Programmieren

In unserer Arbeit setzen wir speziell auf sogenannte blockbasierte visuelle Programmierumgebungen. Bei dieser Programmieretechnik nutzen die Schülerinnen und Schüler vorgefertigte Bildelemente, die bestimmten übergeordneten Programmierkommandos entsprechen und visuell dargestellt sind. Auf diese Weise können sie die Logik des Programmierens erlernen, ohne eine Programmiersprache beherrschen und den Text eines Programmcodes schreiben zu müssen. Solche visuellen

Programmierumgebungen werden zunehmend dafür eingesetzt, Programmieranfängern Informatikkonzepte vorzustellen. Angeführt durch den Erfolg von Projekten wie Scratch, Initiativen wie Hour of Code von Code.org (HOC) und Online-Plattformen wie CodeHS.com, ist das blockbasierte Programmieren zu einem integralen Bestandteil des Informatikunterrichts für Einsteiger geworden. Allein dank der HOC-Initiative konnten bisher über 50 Millionen Schülerinnen und Schüler weltweit insgesamt über eine Milliarde Stunden an blockbasierten Programmieraktivitäten ausführen.

Eine der wichtigsten pädagogischen Herausforderungen besteht darin, neue Übungsaufgaben zu entwerfen, die einem gewünschten Schwierigkeitsgrad entsprechen und spezifische Programmierkonzepte trainieren. Die Programmieraufgaben werden in der Regel von Fachlehrkräften von Hand redaktionell betreut, und das verfügbare Aufgabenspektrum ist begrenzt. So sieht beispielsweise Classic Maze der HOC-Initiative eine Abfolge von 20 Aufgaben vor: Millionen von Schülerinnen und Schülern haben sich an diesen Aufgaben versucht. Doch wenn es ihnen nicht gelingt, eine Aufgabe zu lösen, können sie keine ähnlichen Aufgaben üben, und wenn sie keine Unterstützung erhalten, können sie ihre Fähigkeiten nicht weiter ausbauen.





*Vorgefertigte Bildelemente, die bestimmten übergeordneten Programmierkommandos entsprechen und visuell dargestellt sind, helfen Kindern, die Logik des Programmierens zu erlernen, ohne dass sie eine Programmiersprache beherrschen müssen.*

Am Max-Planck-Institut für Softwaresysteme haben wir uns dieser pädagogischen Herausforderung angenommen und eine Methodik entwickelt, um neue Übungsaufgaben für Schülerinnen und Schüler zu generieren, die einem gewünschten Schwierigkeitsgrad entsprechen und ganz bestimmte Programmierkonzepte trainieren. Dabei variieren wir unter anderem auch die visuelle Anmutung von Aufgaben mit gleichen Konzepten, um die Schülerinnen und Schüler beschäftigt zu halten.

## Öffentlich zugängliche Online-Anwendung

Diese neuen Programmieraufgaben zusammenzustellen ist nicht trivial: Unter anderem lassen sich automatisch unbegrenzt viele Aufgaben konzipieren, doch nur einige davon besitzen auch sinnvolle Lösungen. Um die Probleme zu lösen, haben wir einen neuartigen Algorithmus für die Aufgabensynthese entwickelt. Darin kombinieren wir Techniken aus Softwaretests und Machine Learning. Der vorgeschlagene Algorithmus zur Aufgabensynthese kann 1.000 neue ähnliche Aufgaben generieren wie solche, die der Herausforderung „Hour of Code: Classic Maze“ von Code.org und dem Kurs „Intro to Programming with Karel [Einführung in das Programmieren mit Karel]“ von CodeHS.com entnommen sind. Die Effizienz des Synthese-Algorithmus haben wir in einer umfangreichen Benutzerstudie evaluiert. Derzeit entwickeln wir dazu eigens eine Online-Anwendung, die öffentlich zugänglich sein soll. o

# 12 Vermehrung von Hybrid- saatgut

**CHARLES  
UNDERWOOD,  
RAPHAËL  
MERCIER**

↳ Max-Planck-Institut  
für Pflanzenzüchtungs-  
forschung,  
Köln

Hybridsaatgut wird im Ackerbau und von vielen Hobbygemüse-  
gärtnern wegen seiner hohen Ernteerträge bevorzugt. Die  
Produktion von solchem auch wirtschaftlich ertragreichem  
Saatgut ist äußerst umständlich, es muss stets aufs Neue  
durch Kreuzung reinerbiger Elternlinien erzeugt werden. Wir  
forschen daran, Samen zu erzeugen, die ihren Hybridzu-  
stand von allein aufrechterhalten und die Vermehrung dieses  
hochwertigen Saatguts auf einfachem und schnellem Wege  
erlauben.

**D**er Anteil an Hybridsorten ist in den letzten Jahr-  
zehnten stark angestiegen, denn sie sind beson-  
ders ertragreich und das Ergebnis der Züchtun-  
gen ist gut vorhersehbar. So waren bereits im Jahr 1995  
bei Brokkoli, Tomaten und Rosenkohl über 80 Prozent  
der Sorten Hybridsorten. Dieser Trend setzt sich fort, und  
weitere Hybridsorten gibt es inzwischen zum Beispiel bei  
Mais und Raps.

Dass Samen nach der Kreuzung zweier verschiede-  
ner reinerbiger Elternpflanzen besonders gut gedeihen,  
ist dem sogenannten „Heterosis-Effekt“ zu verdanken.  
Diesen Effekt hat der deutsche Botaniker Joseph Gott-  
lieb Kölreuter schon im 18. Jahrhundert beobachtet:  
Kreuzungsnachkommen zweier reinerbiger Tabaklinien  
wuchsen stärker als deren Elternpflanzen. Kölreuter ver-  
mutete, dass die Stärke dieses Effekts mit der Verschie-  
denheit der Eltern zusammenhängt. Auch Gregor Mendel  
beobachtete in seinen berühmten Kreuzungsversuchen  
mit Erbsen, aus denen er die grundlegenden Vererbungs-  
regeln ableiten konnte, von diesem Effekt. Diese Ver-

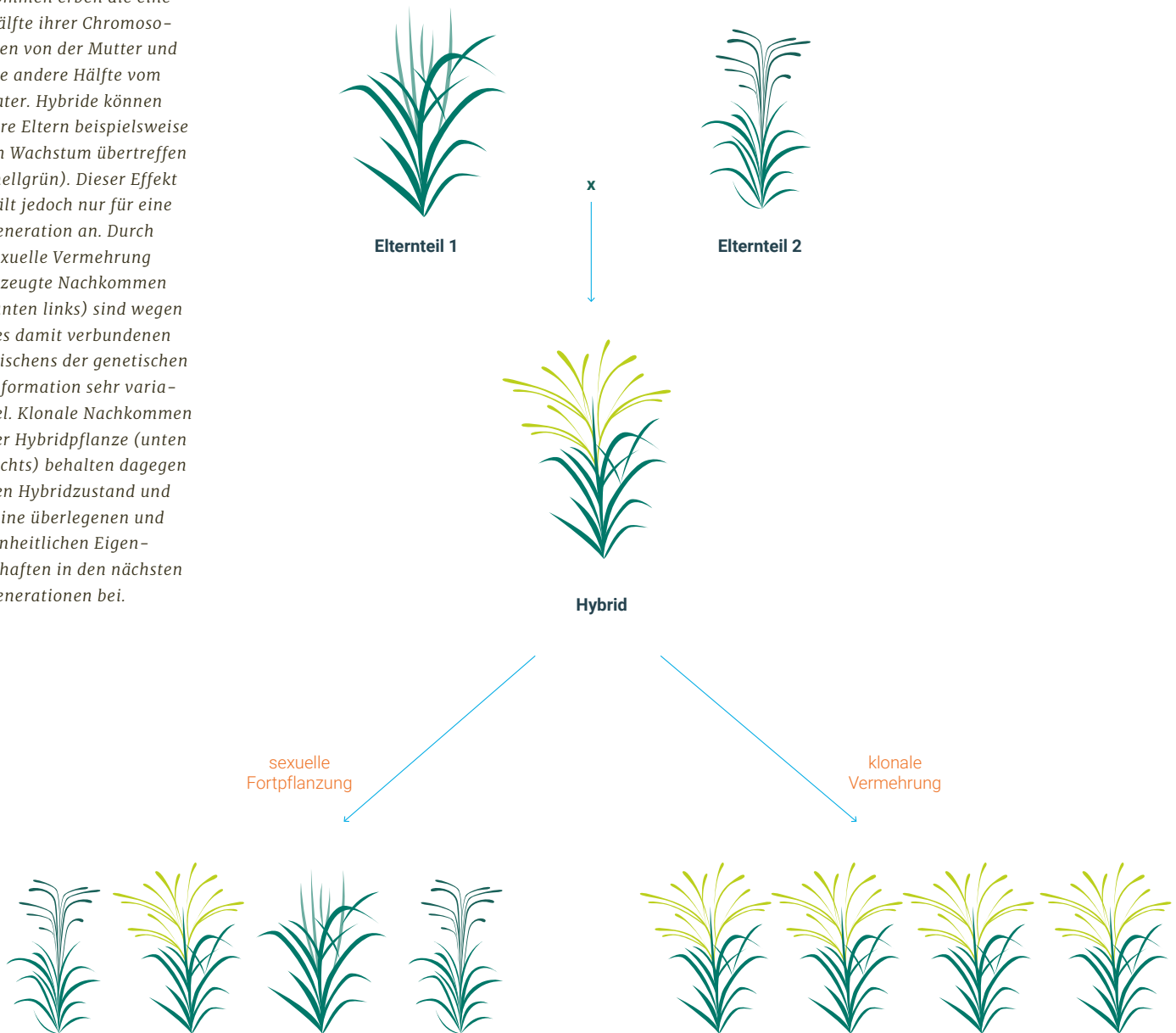
erbungsregeln sind es, die wir in unserer Forschungs-  
gruppe in Hinblick auf eine nachhaltigere Landwirtschaft  
beachten und durchbrechen müssen.

Während also die Pflanzen, die aus reinerbigem  
Kreuzungssaatgut (F1-Hybride) entstehen, stark wach-  
sen und einheitlich sind, sind die Pflanzen der nächsten  
Generation (F2), also diejenigen, die wiederrum aus den  
Samen der F1-Pflanzen wachsen, das genaue Gegen-  
teil: Sie sind extrem unterschiedlich, einige gedeihen  
wunderbar, andere bleiben klein. Manche werden stark,  
andere nur schwach von Schädlingen befallen. Die eine  
Pflanze hat viele Blüten, die Nachbarin nur wenige und  
bildet somit kaum Früchte. Ein Anbau von Samen aus  
der Hybridkultur ist folglich weit weniger Erfolg verspre-  
chend.

Der Grund dafür ist die sexuelle Fortpflanzung der  
F1-Hybriden: Die dafür erforderlichen Eizellen und Pollen  
gehen aus einer besonderen Art der Zellteilung hervor,  
der sogenannten Meiose. Dabei werden die Chromo-  
somen getrennt, sodass die Geschlechtszellen nur



Hybride Nutzpflanzen entstehen durch Kreuzung zweier reiner Linien (Elternteil 1 und Elternteil 2). Die Hybridnachkommen erben die eine Hälfte ihrer Chromosomen von der Mutter und die andere Hälfte vom Vater. Hybride können ihre Eltern beispielsweise im Wachstum übertreffen (hellgrün). Dieser Effekt hält jedoch nur für eine Generation an. Durch sexuelle Vermehrung erzeugte Nachkommen (unten links) sind wegen des damit verbundenen Mischens der genetischen Information sehr variabel. Klonale Nachkommen der Hybridpflanze (unten rechts) behalten dagegen den Hybridzustand und seine überlegenen und einheitlichen Eigenschaften in den nächsten Generationen bei.



den halben Chromosomensatz enthalten. Während der Meiose können Chromosomen jedoch neue genetische Kombinationen erzeugen, auch Rekombination genannt, die jede Zelle einzigartig machen. Wird eine Eizelle dann von einem Pollen befruchtet, entwickelt sich ein Embryo, der zwar die richtige Zahl von Chromosomen besitzt, der aber dennoch genetisch einzigartig ist.

## Asexuelle Vermehrung für einheitliches Saatgut

Sexuelle Fortpflanzung erhöht also die genetische Vielfalt – was vermutlich der Grund dafür ist, dass sie überhaupt entstanden ist. Für die Züchtung ertragreicher und möglichst einheitlicher Nutzpflanzen ist sie aber ungünstig. Vorteilhafter wäre eine asexuelle, klonale Vermehrung. Dafür darf bei der Bildung von Samen folglich weder Meiose noch Befruchtung stattfinden. Unser Ziel ist es, das gesamte mütterliche Erbgut in der Eizelle zu erhalten und die Entwicklung des Embryos ohne die Beteiligung eines männlichen Elternteils auszulösen. Mit unseren Experimenten konnten wir zeigen, dass wir die Meiose derart verändern können, dass die Chromosomenzahl nicht halbiert wird und keine Rekombination stattfindet. Statt der Bildung von Keimzellen werden nur „einfache“ Zellteilungen imitiert, die in allen Zellen einer Pflanze auftreten. Alle diese Zellen verfügen über dasselbe Erbgut.

**Wenn sich eine Eizelle ohne Befruchtung entwickelt, entstehen genetisch identische Nachkommen. Auf diese Weise können wir einheitliches Saatgut aus Hybriden erzeugen.**

Dieser Ansatz, bekannt als „Mitose statt Meiose“ (MiMe), ist das Ergebnis der Mutation dreier Gene, die für jeden der drei Hauptunterschiede zwischen Meiose und Mitose wesentlich sind. Vor ein paar Jahren haben wir MiMe zuerst bei der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* und später beim Reis entwickelt. Das Ergebnis ist eine genetisch nicht reduzierte und nicht rekombinierte Eizelle, die den (Hybrid)zustand der Mutterpflanze beibehält. Jedoch reicht dies für eine klonale Vermehrung noch nicht aus, da vor der Teilung der Eizelle ja die Befruchtung erfolgen muss.

## Embryos aus unbefruchteten Eizellen

Dieser Durchbruch gelang beim Reis, wo unbefruchtete Eizellen durch Aktivierung des sogenannten BBM1-Gens zur Bildung eines Embryos veranlasst wurden. In herkömmlichen Reispflanzen ist BBM1 lediglich im Pollen aktiv und löst die Embryonalentwicklung aus, sobald der Pollen mit der Eizelle verschmolzen ist. Ein aktives BBM1-Gen in der Eizelle kann die Bildung des Embryos jedoch direkt und ohne Befruchtung durch den Pollen starten.

Die Kombination einer Eizelle, welche die gesamte mütterliche genetische Information enthält, mit einer embryonalen Entwicklung ohne Befruchtung lässt also Nachkommen entstehen, die genetisch identisch zu ihren Eltern sind. Sie sind Klone. Auf diese Weise können wir neues, einheitliches und ertragreiches Hybridsaatgut direkt aus den Hybriden gewinnen, welches nur zu Beginn der Züchtung durch Kreuzungen erzeugt werden muss. Noch ist dieser Prozess nicht optimiert. Als Nächstes wollen wir die Rate der klonalen Samenbildung von derzeit 35 auf 100 Prozent erhöhen. Dafür müssen wir aber noch besser verstehen, wie die Embryonalentwicklung genetisch gesteuert wird.

Diese Entwicklung ist ein enormer Fortschritt für die Anwendung der klonalen Saatgutproduktion bei Nutzpflanzen. Sie ermöglicht die direkte Weitergabe des Hybridzustandes von einer Generation zur nächsten. Dadurch können die Kosten für die Produktion von Hybridsaatgut gesenkt, die Hybridzüchtung insgesamt kann erleichtert und die Vitalität derjenigen Nutzpflanzen erheblich gesteigert werden, die derzeit nicht als Hybriden angebaut werden, beispielsweise Gerste und Weizen. Dies kann dazu beitragen, die Erträge für eine wachsende Weltbevölkerung zu sichern und eine nachhaltigere Landwirtschaft zu fördern. o

# 13 Das Dilemma der Triage

**TATJANA HÖRNLE**

↳ Max-Planck-Institut  
zur Erforschung von Kriminalität,  
Sicherheit und Recht,  
Freiburg

Die COVID-19-Pandemie hat zeitweise dazu geführt, dass nicht alle lebensgefährlich Erkrankten behandelt werden konnten. Ein Triage-Gesetz existiert nicht. Welche Auswahlkriterien – wie Alter oder die Erfolgsaussicht einer Behandlung – angemessen und zulässig sind und wer diese festlegt, ist hochumstritten. Welche Vorgaben ergeben sich aus der Verfassung und dem Strafrecht? Ist Ex-post-Triage eine Straftat? Wir haben mit Fachleuten verschiedener Disziplinen solche ethischen und rechtlichen Fragen aufgearbeitet.

**D**ie Geschehnisse aus dem italienischen Bergamo vom März 2020 haben sich vielen ins Gedächtnis gebrannt. Tausende Menschen starben dort zu Beginn der Pandemie an COVID-19, die Krankenhäuser waren so überlastet, dass nur noch Patienten mit guten Überlebenschancen auf der Intensivstation aufgenommen wurden. Solche Szenarien kann es auch in der Zukunft wieder geben. Wenn sich Infektionskrankheiten mit großer Geschwindigkeit ausbreiten, ist erneut mit einer Knappheit lebensrettender Ressourcen (vor allem bei geschultem Personal, aber auch bei Medikamenten und Apparaten wie Beatmungsgeräten) zu rechnen. Dann entstehen schwierige medizinethische und rechtliche Fragen. Welche Kriterien sind anzuwenden, um unter Kranken auszuwählen, die mit gleicher Dringlichkeit intensivmedizinische Versorgung benötigen? Welche Vorgaben ergeben sich aus medizinethischen Prinzipien und welche aus der Verfassung? Wer soll Auswahlkriterien festlegen – die Behandelnden vor Ort, medizinische Fachgesellschaften oder der Gesetzgeber? Droht eine Bestrafung wegen Totschlags, wenn ein umstrittenes Auswahlkriterium angewendet wird und die nicht intensivmedizinisch behandelte Person stirbt?

Wie unterschiedlich die Meinungen zu Fragen wie diesen ausfallen, zeigt der Vergleich von zwei Stellungnahmen. Die klinisch-ethischen Empfehlungen deutscher medizinischer Fachgesellschaften vom 17. April 2020 messen den Erfolgsaussichten der Behandlung zentrale Bedeutung bei, und sie gehen davon aus, dass der Einsatz limitierter Ressourcen regelmäßig neu evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden müsse. Letzteres bedeutet auch, dass ein Behandlungsabbruch zugunsten neu eingelieferter Patienten (die sogenannte Ex-post-Triage) zulässig sein kann. Die Ad-hoc-Empfehlung des Deutschen Ethikrats vom 27. März 2020 setzt dagegen andere Akzente: Sie lehnt negative Auswahlkriterien ab, zu denen zum Beispiel das Alter gehört, und kommt zu dem Ergebnis, dass Ex-post-Triage rechtswidrig sei.

In einem Forschungsprojekt der Abteilungen für Strafrecht und Öffentliches Recht haben wir zusammen mit Expertinnen und Experten aus den Bereichen Verfassungsrecht, Medizinrecht, Strafrecht, Rechtsphilosophie und Praktische Ethik das heterogene Meinungsfeld aufgearbeitet. Unser Anliegen ist, durch eine systematische Erfassung der Fragen, Positionen und Argumente die rechtspolitischen Diskussionen besser zu strukturieren.



*COVID-Station des  
Universitätsklinikums  
Leipzig, Sachsen. Wegen  
der hohen Fallzahlen  
im Land standen im  
Dezember 2020 säch-  
sische Kliniken fast  
vor der Situation, Triage  
anzuwenden.*

Es existiert keine gesetzliche Regelung für Triage. In der Coronakrise wurde gefordert, ein Triage-Gesetz zu verabschieden, weil nach deutschem Verfassungsrecht das Parlament wesentliche Fragen entscheiden muss. Die Gegenposition, in unserem Projekt durch Steffen Augsberg vertreten, betont, dass der Staat keine Kriterien vorgeben dürfe, die menschliches Leben bewerten.

### **Losen oder Chancen abschätzen?**

Stark umstritten ist, inwieweit die Erfolgsaussicht einer Behandlung, die aus ärztlicher Sicht selbstverständlich zu berücksichtigen ist, auch aus ethischer und rechtlicher Sicht ein akzeptables Auswahlkriterium ist. Die Bevorzugung der Patienten, für die eine Genesung von der Akuterkrankung wahrscheinlicher ist, benachteilige vorerkrankte und gebrechliche Menschen, argumentiert eine 2020 erhobene Verfassungsbeschwerde. Die Beschwerdeführenden fordern, bei einem Verteilungskonflikt das Los entscheiden zu lassen. Eine zweite Position unterstützt dagegen die klinisch-ethischen Empfehlungen medizinischer Fachgesellschaften, die das Kriterium

der Erfolgsaussicht in den Vordergrund stellen. Dafür spricht, dass man behandelnden Ärztinnen und Ärzten, die in einer Pandemie besonders hohen persönlichen Risiken und Belastungen ausgesetzt sind, nicht zumuten kann, ausblenden zu müssen, ob ihr Einsatz Erfolg verspricht oder nicht.

Eine andere, in den klinisch-ethischen Empfehlungen nicht geregelte Frage ist, was den Ausschlag geben soll, wenn die Erfolgsaussichten konkurrierender Patienten ähnlich ausfallen. Dürfen jedenfalls dann weitere Auswahlkriterien, etwa Lebensalter, herangezogen werden? Elisa Hoven spricht sich (entgegen der vorherrschenden Auffassung in der Rechtswissenschaft) dafür aus, Alter als Auswahlkriterium zuzulassen. Grundlage ist eine für unser Projekt organisierte Bevölkerungsumfrage, die zeigt, dass 77 Prozent aller Befragten ein Beatmungsgerät bei gleicher Erfolgsaussicht einem Kind statt einem 80-Jährigen geben würden und dass nur eine kleine Minderheit eine Auswahl durch Los befürwortet.

### **Pflichterfüllung oder Tötungsdelikt?**

Mein eigener Beitrag konzentriert sich auf die strafrechtliche Bewertung eines Behandlungsabbruchs zugunsten von neu eintreffenden Erkrankten, die mit höherer Wahrscheinlichkeit überleben werden, falls sie die knappe Ressource erhalten. Eine solche Ex-post-Triage wird von vielen Juristen als Straftat (Totschlag) eingeordnet. Ich vertrete dagegen die These, dass eine Verurteilung wegen vorsätzlicher Tötung unangemessen wäre. Für Ärzte besteht eine Pflichtenkollision (sie müssen mehrere lebensgefährlich Erkrankte behandeln). Diese Pflichtenkollision ist im Strafrecht ein Rechtfertigungsgrund, der auch dann einschlägig ist, wenn Behandelnde die Erfolgsaussichten neu evaluieren und Ressourcen neu zuteilen.

Die erwähnte Bevölkerungsumfrage zeigt zu diesem Punkt heterogenere moralische Intuitionen als beim Alter als Auswahlkriterium: 41 Prozent sprachen sich für Ex-post-Triage aus, wenn Patienten mit besserer Erfolgsaussicht das Beatmungsgerät bekommen. 32 Prozent würden jedoch das Gerät dem zuerst Behandelten lassen, und 27 Prozent waren für einen Losentscheid. Aber die Frage nach dem gerechtesten Auswahlkriterium ist nicht identisch mit der Frage, ob diejenigen, die Ex-post-Triage anwenden, von einem Strafgericht zu Freiheitsstrafen verurteilt werden sollten. Große Zurückhaltung beim Einsatz des Strafrechts ist angebracht, weil es ein zu scharfes Instrument ist, um Verteilungsgerechtigkeit in existenziellen Notlagen durchzusetzen. o

# 14 Eine Schwarze Witwe im Weltall

**LARS NIEDER**

↳ Max-Planck-Institut  
für Gravitationsphysik,  
Teilinstitut Hannover

Das Rätsel um eine seit zwei Jahrzehnten bekannte Gammaquelle ist endlich gelöst. Die Strahlung stammt von einem extrem schnell rotierenden Neutronenstern – einem Pulsar, der zu einem Doppelsternsystem gehört. Für diese Entdeckung hat das Rechenprojekt Einstein@Home die über einen Zeitraum von zehn Jahren gesammelten Daten des Weltraumobservatoriums Fermi durchsucht. Das intensive Studium dieses Pulsars und seines Begleiters offenbarte ein Sternsystem der Extreme.

**W**enn einem massereichen Stern zum Ende seines Lebens der Brennstoff ausgeht, explodiert er als Supernova. Während er dabei seine äußeren Schichten ins All schleudert, kollabiert sein Inneres unter der eigenen Schwerkraft. Ist der ursprüngliche Stern nicht allzu schwer, verwandelt sich der Kern in einen Neutronenstern. Ein solches Objekt besteht aus extrem dichter und teilweise exotischer Materie, hat einen Durchmesser von rund 20 Kilometern und besitzt mehr Masse als unsere Sonne und damit eine unvorstellbar hohe Dichte: Ein Teelöffel eines Neutronensterns würde auf der Erde Milliarden Tonnen wiegen.

Von den bisher bekannten Neutronensternen variieren sich mehr als 2800 als sogenannte Pulsare. Denn rotierende Neutronensterne senden von ihren magnetischen Polen gebündelte Strahlung über weite Teile des elektromagnetischen Spektrums aus. Überstreicht ein solcher Lichtkegel zufällig die Erde, blinkt der Stern am irdischen Himmel wie ein kosmischer Leuchtturm. Die große Mehrheit der bekannten Pulsare ließ sich im Radiobereich aufspüren. Doch bei mittlerweile 250 Pulsaren gelang dies auch anhand ihrer hochenergetischen Gammastrahlung.

Derartige Gammapulsare beobachtet das Teleskop an Bord des NASA-Satelliten Fermi. Mit einer relativ kleinen Sammelfläche von einem Quadratmeter empfängt

es von typischen Gammapulsaren nur einmal pro Tag ein Photon. Wenn vorab nicht bereits aus Radiobeobachtungen bekannt ist, wie schnell der Pulsar rotiert, ist das Blinken im Gammabereich schwer zu finden. Der Grund: Typische Pulsare drehen sich in der Zeit zwischen der Messung zweier Gammaphotonen Millionen Mal um die eigene Achse.

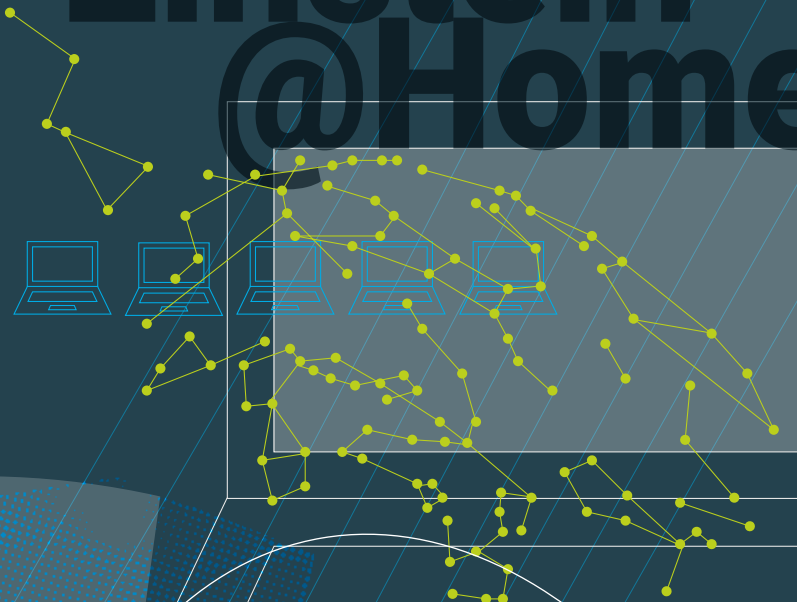
## Begleitstern erschwert die Suche

Zudem variiert der Abstand zwischen Erde und Pulsar durch die Bahnbewegung unseres Planeten um die Sonne. Diese Abstandsschwankungen sowie die endliche Lichtgeschwindigkeit verändern den Zeitraum zwischen zwei eintreffenden Pulsen. Hat der Pulsar außerdem noch einen Begleitstern, verkompliziert die daraus resultierende Eigenbewegung des Pulsars die Suche weiter.

Um einen solchen Gammapulsar mit Begleiter zu entdecken, müssen wir die Eigenschaften bestimmen, die den Neutronenstern und das Doppelsternsystem beschreiben. Dafür haben wir neue Methoden entwickelt, mit denen wir diese Parameter systematisch und möglichst rechen-effizient testen. Können wir den Begleitstern im sichtbaren Licht beobachten, so lassen sich die Suchbereiche für einige Parameter zusätzlich vorab eingrenzen.



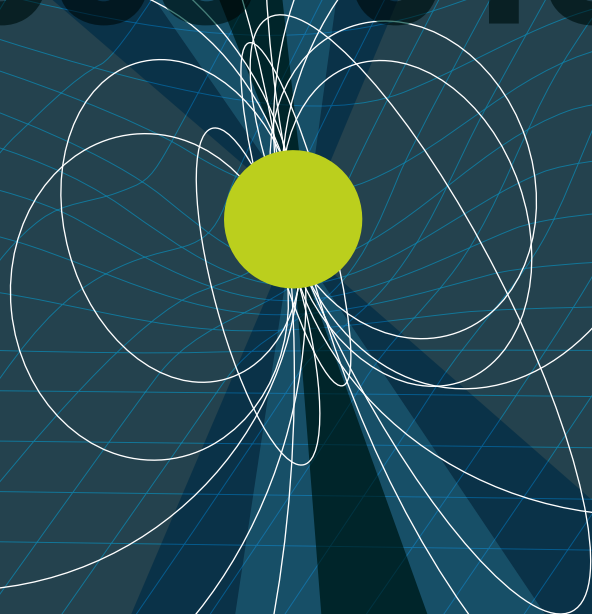
# Einstein @Home



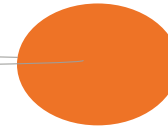
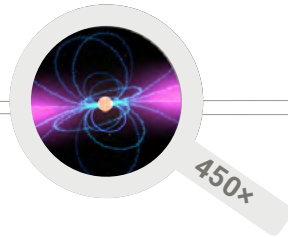
PSR

J1653-0158

11101110  
01010  
111010  
00101001  
00110  
00001  
111010  
1010  
1001001  
00010  
10010001  
110  
100110  
1010  
00010  
1001001  
10010001  
11010  
111010  
00010  
10010001  
1101110  
01010  
111010  
000101001  
00110  
111010  
00001







*Ungleiches Paar:  
Der Pulsar J1653-0158  
mit seinem langsam  
verdampfenden Partner-  
stern (unten) im Vergleich  
zum Erde-Mond-Sys-  
tem (oben). Bis auf den  
450-fach vergrößert  
dargestellten Pulsar sind  
alle Objekte und Um-  
laufbahnen maßstäblich  
abgebildet. Die gewaltigen  
Gezeitenkräfte des Pulsars  
verformen den Partner-  
stern zu einem Ei.*

In engen Doppelsternsystemen erhitzen die Pulsare durch ihre energiereiche Strahlung manche Begleitsterne auf der ihnen zugewandten Seite ganz erheblich. Dadurch verdampft Material von der Oberfläche des Partners, der sich langfristig vollständig auflösen kann. Daher stammt auch der Spitzname solcher Objekte: Schwarze-Witwe-Pulsare. Schwarze Witwen sind Spinnen, deren größeres Weibchen nach der Paarung das Männchen tötet und verspeist. Dass der Pulsar-Begleiter einseitig heißer ist, lässt sich mit Teleskopen im sichtbaren Licht beobachten und dazu nutzen, bestimmte Eigenschaften des Sterns – etwa seine Umlaufdauer um den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems – zu messen.

## Entdeckungstour mit dem Rechner

Eine seit 20 Jahren bekannte Gammastrahlen-Quelle im Sternbild Schlangenträger war schon lange von besonderem Interesse. Einige Astronomen haben hier ein wie oben beschriebenes System aus einem Pulsar und einem normalen Stern vermutet. Deswegen gab es eine Reihe von Beobachtungen optischer Teleskope, mit deren Hilfe wir unsere Suche in den Daten von Fermi auf bestimmte Bereiche einschränken konnten. Dennoch mussten wir noch  $10^{17}$  (also Hundert Millionen Milliarden) verschiedene Parameter-Kombinationen ausprobieren, um mögliche Pulsationen aufzuspüren.

Eine solche Suche würde auf einem normalen Computer selbst im günstigsten Fall immer noch mehr als ein halbes Jahrhundert dauern. Deshalb bedienten wir uns der immensen Rechenleistung von Einstein@Home. Dieses Projekt wurde im Jahr 2005 ins Leben gerufen und basiert auf der Teilnahme von Freiwilligen, die brachliegende Rechenzeit auf ihren Computern, Tablets oder Smartphones spenden. Auf diese Weise werden sehr aufwendige wissenschaftliche Analysen ermöglicht. Jeder und jede kann im Rahmen dieser Citizen Science astronomische Entdeckungen machen.

Dazu werden die Daten in kleinere Pakete unterteilt, die dann von den etwa 35.000 Computern der im Schnitt rund 22.000 Freiwilligen durchforstet werden. Zusam-

men erreichen sie eine geschätzte Rechenleistung, die jener von einem der 25 schnellsten Supercomputer der Welt entspricht. Tatsächlich erledigte Einstein@Home unsere Suche binnen knapp zwei Wochen und spürte den Schwarze-Witwe-Pulsar PSR J1653-0158 auf. Sowohl er selbst als auch das Doppelsternsystem, in dem er sich befindet, sind in vielerlei Hinsicht etwas ganz Besonderes.

Aus den Beobachtungen des Begleitsterns im sichtbaren und des Pulsars im Gammalicht gelang es uns, viele Eigenschaften zu ermitteln. So dreht sich der Pulsar mehr als 500-mal pro Sekunde um die eigene Achse und weist eine Masse auf, die doppelt so groß ist wie die unserer Sonne. Der langsam verdampfende Begleiter besitzt nur etwa ein Prozent der Sonnenmasse, ist aber sechsfach dichter als Blei. Dieses sehr ungleiche Paar umkreist sich in nur 75 Minuten und damit schneller als alle vergleichbaren Systeme. Weiterhin konnten wir aus den Langzeitbeobachtungen ableiten, dass das Magnetfeld des Pulsars zwar vielfach stärker als alle künstlich auf der Erde hergestellten Magnetfelder ist, für einen Neutronenstern aber außergewöhnlich schwach erscheint.

Nachdem wir den Gammapulsar auf diese Weise genau charakterisiert hatten, suchten wir erneut und sehr gründlich nach Radiostrahlung. Doch obwohl wir dazu einige der weltweit größten und empfindlichsten Teleskope einsetzten, konnten wir keine Radiowellen nachweisen. Der wahrscheinlichste Grund dafür ist, dass das vom Begleitstern abgedampfte Material diese langwellige Strahlung vollständig verschluckt. Für das hochenergetische Gammalicht hingegen stellt es kein Hindernis dar.

PSR J1653-0158 ist erst der zweite schnell rotierende Pulsar, der sich nicht im Radiobereich beobachten lässt. Seine Entdeckung legt nahe, dass es weitere spannende Pulsare wie diesen in unserer Galaxis gibt, die wir nur anhand ihrer Gammastrahlung entlarven können. Wir sind daher zuversichtlich, dass wir zukünftig mit unseren Methoden weitere bisher unerkannte Pulsare in Doppelsternsystemen finden werden. Und wir glauben, dass das Citizen-Science-Projekt Einstein@Home dabei wertvolle Dienste leistet. o

# 15 Künstliches Erbgut vermehrt sich selbst

**KAI LIBICHER,  
RENATE  
HORNBERGER,  
MICHAEL HEYMANN,  
HANNES MUTSCHLER**

↳ Max-Planck-Institut  
für Biochemie,  
Martinsried

Von der Zellteilung einer Mikrobe bis zur Geburt eines höheren Organismus – Vermehrung ist ein Schlüsselmerkmal dessen, was wir „Leben“ nennen. Damit Zellen sich teilen und vermehren können, müssen sie zunächst ihr Erbgut verdoppeln. Wir arbeiten daran, im Reagenzglas ein System zu entwickeln, das einen Teil seiner eigenen DNA und Proteinbausteine selbst herstellen kann. Dies ist ein wichtiger Schritt zur Schaffung einer künstlichen Zelle.

**W**as ist Leben? Eine Frage, die man je nach Blickwinkel ganz unterschiedlich beantworten kann. Aus naturwissenschaftlicher Sicht gibt es verschiedene Definitionsversuche, die meist die Selbsterhaltung, Vermehrung und Anpassungsfähigkeit chemischer Systeme in den Fokus stellen. Um die Prinzipien zu verstehen, die hinter diesen Eigenschaften stecken, folgen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der synthetischen Biologie dem Motto des Physik-Nobelpreisträgers Richard Feynman: „What I cannot create, I do not understand.“ Er wollte damit ausdrücken, dass er so lange etwas nicht verstanden hat, bis er es selbst nachbauen kann. Deshalb verfolgen Forschende auf dem Gebiet der synthetischen Biologie das Ziel, Abläufe in Zellen nachzubauen und einzelne Module zu funktionellen Einheiten zu kombinieren.

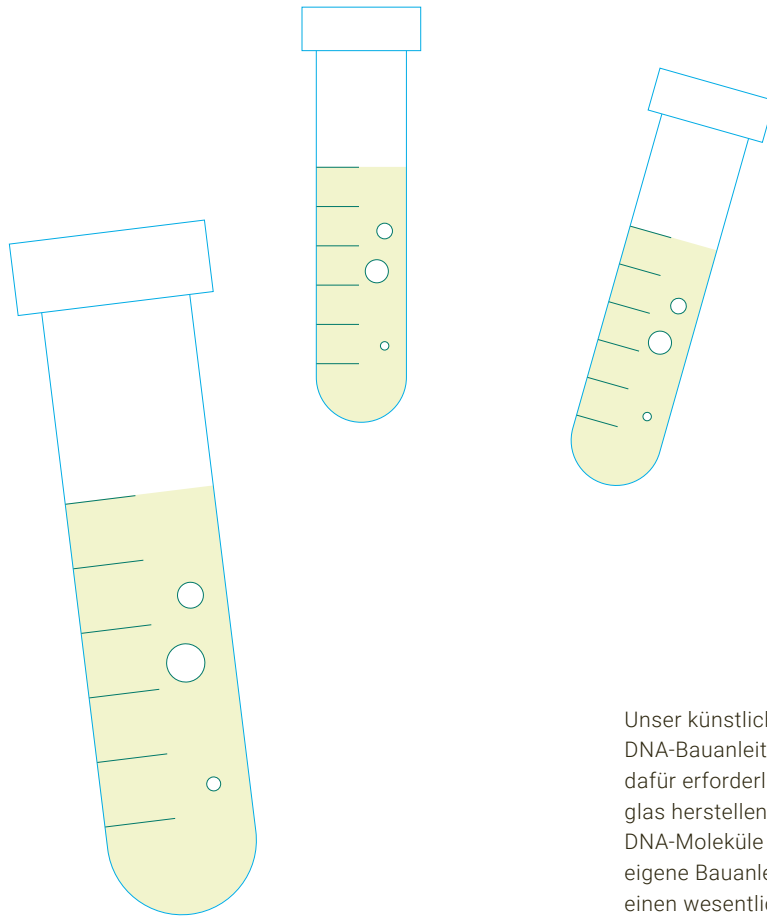
Unsere Forschung konzentriert sich auf den sogenannten „bottom-up“-Ansatz der synthetischen Biologie. Wir wollen also aus unbelebten molekularen Bausteinen lebensähnliche Systeme entwickeln. Unser Team konzentriert sich darauf, die Replikation von DNA-Molekülen und die Produktion von Proteinen nachzustellen, denn eine grundlegende Eigenschaft aller Lebensformen ist wie erwähnt ihre Fähigkeit, sich als abgegrenzte Einheiten selbst zu erhalten – und dazu gehört die

Fähigkeit zur Vermehrung und damit die Vervielfältigung des Erbguts.

Für eine Vermehrung von Erbgut und die Produktion von Proteinen im Reagenzglas benötigen wir eine Bauanleitung, molekulare Maschinen und Nährstoffe. Als Bauanleitung dient DNA, welche die Information für den Aufbau von Proteinen gespeichert hat. Proteine fungieren als molekulare Maschinen für die Biosynthese von Stoffen, da sie biochemische Reaktionen gezielt beschleunigen. Um Proteine anhand des DNA-Bauplans herzustellen und den genetischen Code in Ketten von Aminosäuren zu übersetzen, braucht es wiederum bestimmte Proteine und RNA-Moleküle.

## 150 Gene zur Erbgutvermehrung

Der Aufbau eines minimalen, sich selbst regenerierenden und zum Wachstum fähigen Systems benötigt viele Komponenten, um die einzelnen Teilreaktionen aufrechtzuerhalten. Alles in allem gehen wir von rund 150 essenziellen Genen aus, die von einem selbstvermehrenden Erbgut kodiert werden müssen. Interessanterweise werden über 95 Prozent dieser Gene allein für das Übersetzen der Erbinformation in Proteine benötigt.



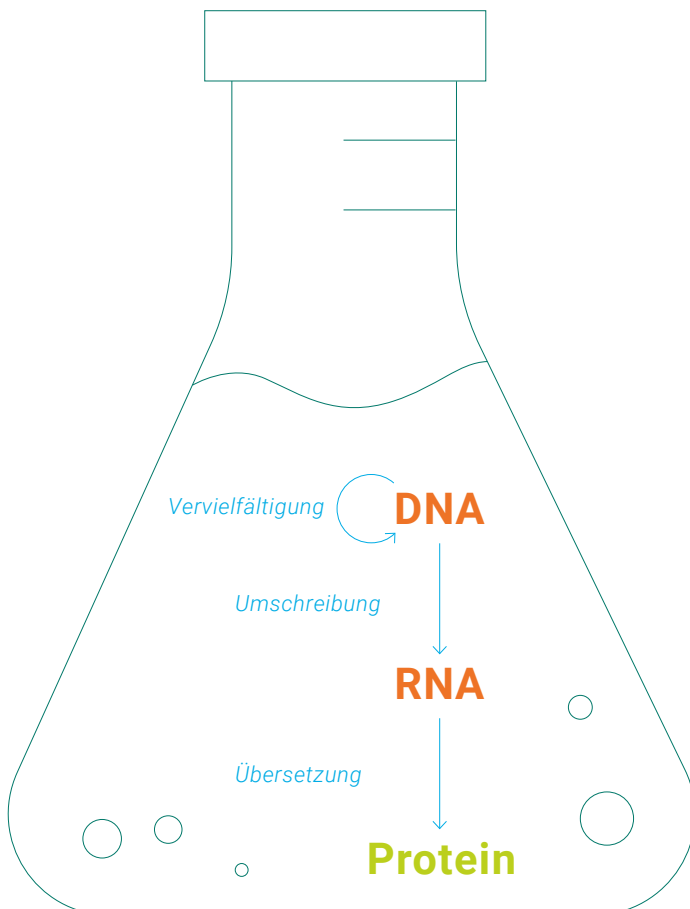
**Eine künstliche Zelle könnte als Produktionsstätte für Medikamente und Impfstoffe oder zur Energiegewinnung eingesetzt werden.**

Unser künstliches System kann inzwischen die eigene DNA-Bauanleitung vervielfältigen und parallel dazu die dafür erforderlichen Proteine selbstständig im Reagenzglas herstellen. Sogenannte DNA-Polymerasen können DNA-Moleküle kopieren – darunter auch solche, die ihre eigene Bauanleitung tragen. Das System erzeugt also einen wesentlichen Anteil seiner molekularen Bestandteile selbst. Außerdem kann es vergleichsweise lange DNA-Ketten ablesen und kopieren. Die künstlichen Genome haben wir dazu aus bis zu elf ringförmigen DNA-Fragmenten zusammengesetzt. Dieser modulare Aufbau ermöglicht es, bestimmte DNA-Abschnitte in die Bauanleitung einzufügen oder wieder zu entfernen, falls sie sich als nicht brauchbar für unser System erweisen. Unser größtes vervielfältigtes Genom besteht aus mehr als 116.000 Basenpaaren und erreicht damit bereits die Genomlänge von natürlichen, sehr einfach aufgebauten Zellen.

### Moleküle zur Übersetzung der DNA

Neben den für die DNA-Vervielfältigung wichtigen Polymerasen kodiert unser künstliches Genom weitere Proteine, beispielsweise 30 verschiedene Translationsfaktoren, die aus dem Bakterium *Escherichia coli* stammen. Translationsfaktoren sind wichtig für die Übersetzung der DNA-Bauanleitungen in Proteine und daher essenziell für sich selbst vervielfältigende Systeme, die existierende biologische Systeme zum Vorbild haben. Um zu zeigen, dass unser Reagenzglassystem nicht nur DNA vervielfältigen, sondern auch seine eigenen Translationsfaktoren herstellen kann, haben wir die Menge der

Ein sich selbst vervielfältigendes Erbgut im Reagenzglas. Von der DNA werden RNA-Moleküle abgelesen, die als Vorlage für die Bildung von Proteinen dienen. Für diesen einfach erscheinenden Vorgang sind viele Komponenten notwendig. Ein selbst replizierendes Erbgut muss deshalb aus mindestens 150 Genen bestehen.



produzierten Proteine gemessen. Überraschenderweise zeigte sich, dass ein Teil der Translationsfaktoren nach der Reaktion sogar in größeren Mengen vorhanden waren, als sie zuvor eingesetzt wurden. Dies ist ein bedeutender Schritt in Richtung eines sich kontinuierlich selbstvervielfältigenden Systems, das biologische Vorgänge nachahmt.

## Protozelle mit Stoffwechsel

In Zukunft wollen wir unser künstliches Erbgut um weitere DNA-Abschnitte erweitern und in Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen ein umhülltes System anfertigen, das in der Lage ist, durch Zugabe von Nährstoffen und gleichzeitiger Entsorgung von Abfallprodukten über einen längeren Zeitraum aktiv zu bleiben. Eine solche künstliche Zelle besäße zwar nur sehr eingeschränkte Fähigkeiten, hätte aber schon einen eigenen einfachen Stoffwechsel. Sie könnte in der Biotechnologie als Produktionsmaschine für Substanzen aller Art verwendet werden, auch für neuartige Pharmazeutika, Impf- oder Lebensmittelzusatzstoffe. Eine solche Minimalzelle könnte auch als Basis dafür eingesetzt werden, natürliche Ressourcen zu schonen oder die Umwelt zu entlasten, indem sie Alternativen zur Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen schafft, beispielsweise durch künstliche Fotosynthese.

Die Antwort auf die Frage, was Leben für seine Existenz unbedingt benötigt, werden wir aber erst dann erhalten, wenn wir eine von selbst beginnende und sich stetig fortsetzende Teilung einer Zelle entwickeln können. Davon sind wir gegenwärtig aber noch weit entfernt. o

# Die Max-Planck- Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft ([www.mpg.de](http://www.mpg.de)) ist eine der führenden Forschungseinrichtungen weltweit mit rund 24.000 Mitarbeiter\*innen. In den 86 Max-Planck-Einrichtungen betreiben über 6.900 Wissenschaftler\*innen sowie 6.100 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler\*innen Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften.

**M**ax-Planck-Institute arbeiten dabei auf Forschungsgebieten, die besonders innovativ sind und nicht selten einen speziellen finanziellen oder zeitlichen Aufwand erfordern. Ihr Forschungsspektrum entwickelt sich ständig weiter: Neue Institute oder Abteilungen werden gegründet, bestehende umgewidmet, um Antworten auf zukunfts-trächtige wissenschaftliche Fragen zu finden. Diese ständige Erneuerung erhält der Max-Planck-Gesellschaft den Spielraum, neue wissenschaftliche Entwicklungen rasch aufgreifen zu können.

Entstanden ist sie 1948 als Nachfolgeorganisation der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Seither sind 20 Nobelpreisträger\*innen aus ihren Reihen hervorgegangen. Neben fünf Auslandsinstituten betreibt die Max-Planck-Gesellschaft weitere 21 Max Planck Center mit Einrichtungen wie dem US-amerikanischen Princeton, der Harvard University, Sciences Po in Frankreich, dem University College London/UK oder der Universität Tokio in Japan. Je zur Hälfte finanziert von Bund und Ländern, verfügt sie über ein jährliches Gesamtbudget von 1,92 Milliarden Euro.





## Impressum

### Herausgeber

Max-Planck-Gesellschaft  
zur Förderung der Wissenschaften e.V.  
Abteilung Kommunikation  
Hofgartenstr. 8, D-80539 München  
Tel: +49 (0)89 2108-1276  
Fax: +49 (0)89 2108-1207  
E-Mail: presse@gv.mpg.de  
Internet: www.mpg.de

### Redaktion

Dr. Thomas Bürke, Dr. Virginia Geisel,  
Peter Hergersberg, Helmut Hornung,  
Dr. Jan-Wolfhard Kellmann, Dr. Felicitas Mokler,  
Dr. Harald Rösch, Mechthild Zimmermann

### Gestaltung

mattweis, München

### Druck

F&W Druck- und Mediencenter, Kienberg

Mai 2021

## Bildnachweis

### Die Zukunft in der Krise

S. 4: Illustration: mattweis

S. 6: Grafik: mattweis (Vorlage MPI für  
Gesellschaftsforschung)

### Maßgeschneiderte Katalysatoren für die grüne Energiewirtschaft

S. 9: Illustration: mattweis (Vorlage Fritz-Haber-  
Institut / ISC)

### Krebszellen auf Diät

S. 12: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für  
molekulare Physiologie / Slava Ziegler)

### Theorie und Praxis der COVID-19-Eindämmung

S. 15: Illustration: mattweis

### Proteinstau im Gehirn

S. 20: Illustration: mattweis

S. 21: MPI für molekulare Physiologie / Dudanova,  
Burgold

### Internationale Steuergerechtigkeit

S. 23: picture alliance / NurPhoto / Kazi Salahuddin Razu

S. 25: Illustration: mattweis

### Besser hören durch Hirnstimulation

S. 27: MPI für empirische Ästhetik / Felix Bernouly

### Schweregewicht im Herzen einer Galaxie

S. 30: MPI für extraterrestrische Physik / USM /  
Matthias Kluge

S. 31: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für extra-  
terrestrische Physik)

### Embryos im Tiefschlaf

S. 34: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für  
molekulare Biomedizin / Ivan Bedzhov)

### Programmieren lernen mit künstlicher Intelligenz

S. 36: Illustration: mattweis

S. 38: gorodenkoff / iStock

### Vermehrung von Hybridsaatgut

S. 40: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für Pflanzen-  
züchtungsforschung)

### Das Dilemma der Triage

S. 43: picture alliance / dpa / Waltraud Grubitzsch

### Eine Schwarze Witwe im Weltall

S. 45: Illustration: mattweis

S. 46: Illustration: mattweis (Vorlage von NASA /  
MPI für Gravitationsphysik / Knispel / Clark)

### Künstliches Erbgut vermehrt sich selbst

S. 48–49: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für  
Biochemie)