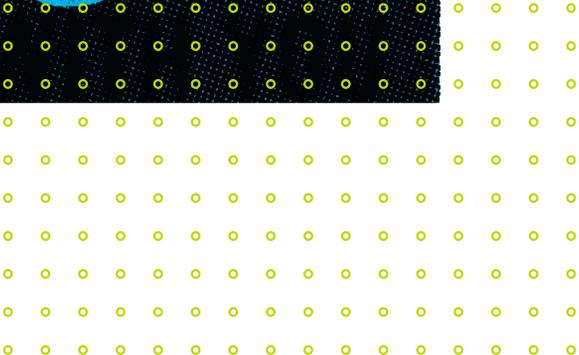


**HIGHLIGHTS**  
**2021** AUS DEM JAHRBUCH DER  
MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT





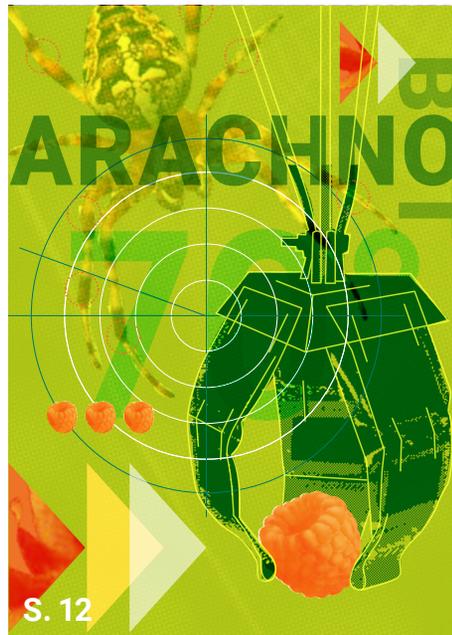
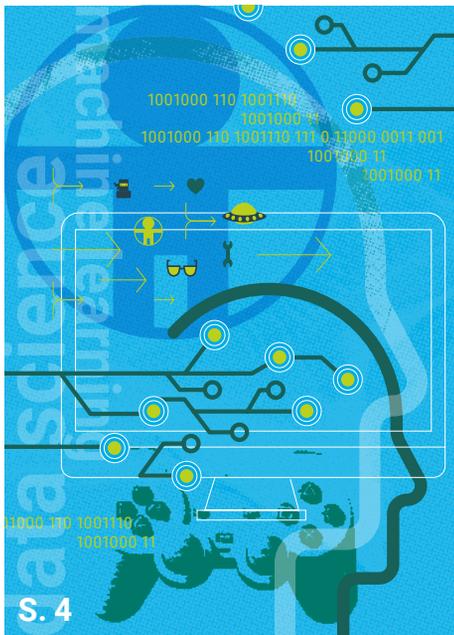
# Editorial

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 2021 wurden 15 aus Sicht der Wissenschaftskommunikation besonders geeignete und gerade auch für Laien interessante Beiträge herausgesucht und journalistisch aufbereitet.

Die Beiträge illustrieren auch, wie sehr Computertechnologien in die Forschung Einzug gehalten haben – ob als methodisches Instrument oder als Untersuchungsgegenstand an sich. So nutzt eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik die komplexen Welten von Computer- und Videospiele, um herauszufinden, warum Menschen insbesondere bei kreativen Prozessen immer noch besser abschneiden als die derzeit besten Computer-Algorithmen. Am Max-Planck-Institut für Informatik entwickeln Forschende Software, um optische statt der gängigen elektronischen Schalter in Cloud-Rechenzentren zu integrieren. Denn ein optischer Datenverkehr zwischen den Servern könnte die Arbeit der Rechenzentren effizienter machen. Und am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung wiederum untersuchen die Forscherinnen und Forscher, welche Auswirkungen künstliche Intelligenz auf soziale, kulturelle, politische und ökonomische Prozesse hat. Eine zentrale Frage hierbei ist, wie das Verhalten von Maschinen die menschliche Moral beeinflusst.

Viel Spaß beim Lesen der Jahrbuch-Highlights von 2021!

# Inhalt



**1** Anfang ohne Fehler S. 4

**2** Computer werden neugierig S. 7

**3** Die erstaunliche Geschichte unserer Mundflora S. 9

**4** Gelenke für kooperative Roboter S. 12

**5** Schwärmende Fresszellen S. 15

**6** Das virtuelle Fusionskraftwerk S. 18

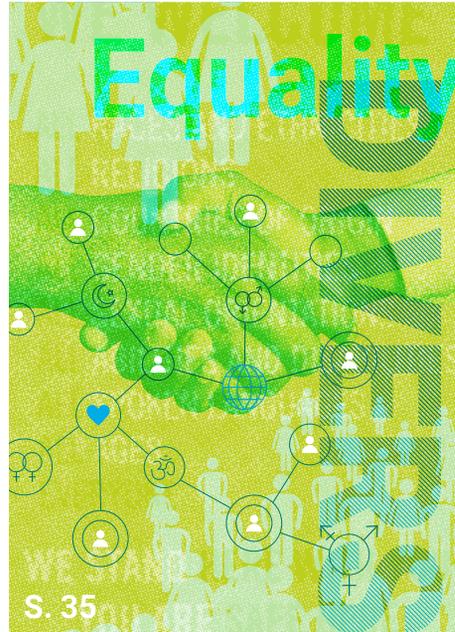
**7** Wenn intelligente Maschinen schlecht beraten S. 21

**8** Karambolagen im künstlichen Sternhaufen S. 24

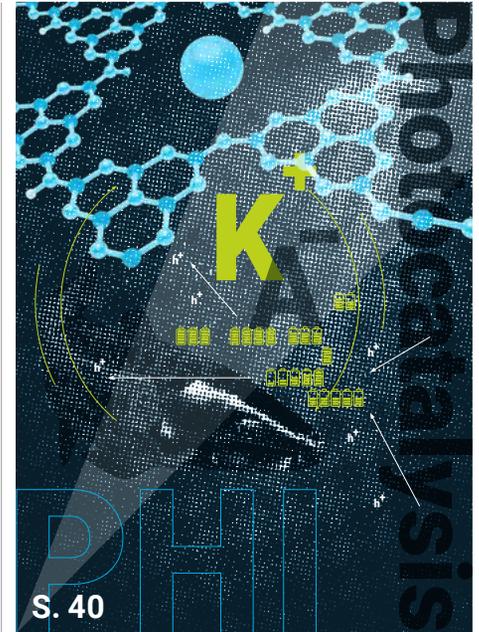
**9** Patentrechte in pandemischen Zeiten S. 26



S. 28



S. 35



S. 40

**10** Kontakte in  
der Leber S. 28

**11** Optischer  
Datenverkehr  
in der Cloud S. 32

**12** Sind  
Organisationen  
offen für  
Diversität? S. 35

**13** Blutversorgung  
in künstlichen  
Gewebe S. 38

**14** Vielseitige  
Speicher für  
Lichtenergie S. 40

**15** Wege in eine grüne  
Metallwirtschaft  
S. 43

# 1 Anfang ohne Fehler

**TOMMASO  
CAVAZZA,  
LENA WARTOSCH,  
MELINA SCHUH**

↳ *Max-Planck-Institut  
für Multidisziplinäre  
Naturwissenschaften,  
Göttingen*

Nur etwa eine von drei Befruchtungen führt zu einer Geburt. Viele aus einer Befruchtung entstehende Embryonen entwickeln sich nicht weiter, weil sie eine falsche Anzahl an Chromosomen tragen. Dies ist eine der Hauptursachen für Fehlgeburten und Unfruchtbarkeit. Häufig hat die falsche Chromosomenzahl ihren Ursprung schon in der Eizelle. Unsere neuesten Untersuchungen zeigen jedoch, dass Fehler auch häufig nach der Befruchtung drohen, wenn das Erbgut beider Elternteile vereinigt wird. Dieser für die Entstehung neuen, gesunden Lebens grundlegende Vorgang ist erstaunlich ineffizient.

**S**obald eine Eizelle von einem Spermium befruchtet wird, werden die Gene des Vaters und der Mutter kombiniert. Beide steuern jeweils eine Kopie der 23 Chromosomen bei, die die genetische Information, auf der DNA kodiert, enthalten. Der Embryo erbt somit einen vollständigen Satz Chromosomen.

Die Vorläuferzelle einer Eizelle enthält noch zwei Kopien von jedem der 23 Chromosomen. Damit aus dieser Zelle Eizellen entstehen können, muss die Hälfte ihrer 46 Chromosomen entfernt werden. Dies geschieht während eines speziellen Zellteilungsprozesses, der Meiose. Das Problem ist, dass dieser Prozess sehr fehleranfällig ist. Schon bei jungen Frauen tragen zehn bis 20 Prozent der Eizellen zu wenige oder zu viele Chromosomen. Bei Frauen über 40 Jahren sind es sogar mehr als 50 Prozent. Dies liegt daran, dass die unreifen Eizellen einer Frau bereits vor ihrer Geburt produziert werden. Eine 40-jährige Frau hat also 40 Jahre alte Eizellen. Je älter die Frau und ihre Eizellen werden, desto wahrscheinlicher ist es, dass die reife Eizelle zu viele oder zu wenige Chromosomen hat. Dies ist eine der Hauptursachen für Fehlgeburten und Unfruchtbarkeit.

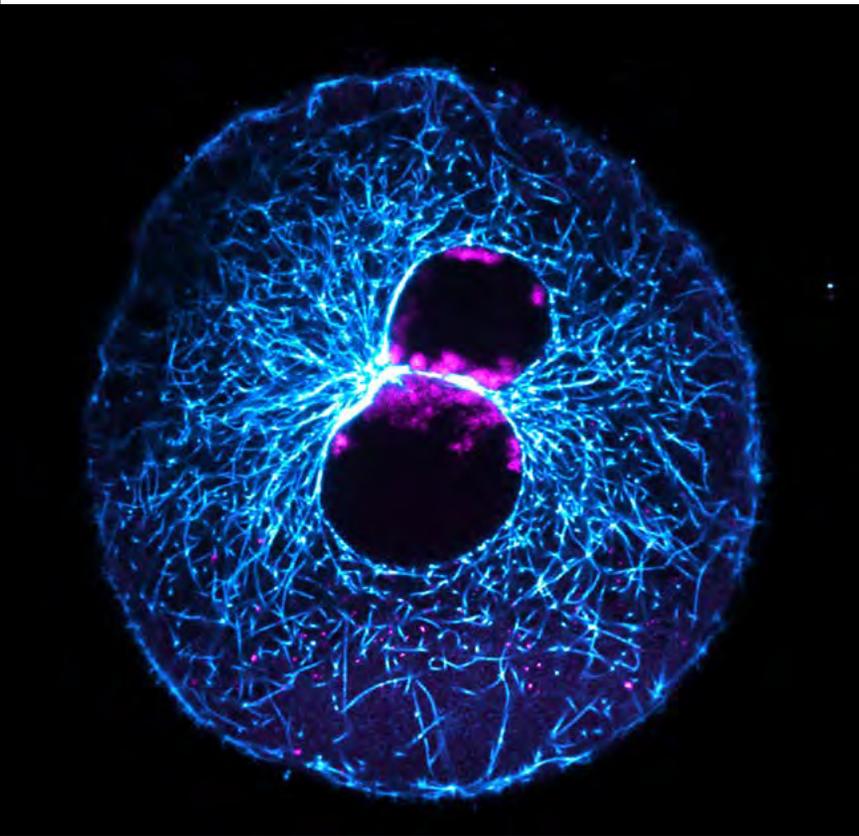
Wir haben bereits mehrere Faktoren aufgedeckt, die zu den hohen Fehlerquoten in Eizellen beitragen. Eine Art zelluläre Maschine, der sogenannte Spindelapparat,

sorgt dafür, dass eine reifende Eizelle die richtige Anzahl an Chromosomen enthält. Dieser Apparat besteht aus Proteinfasern, die während der Meiose an den Chromosomen ansetzen. Die Fasern ziehen eine Kopie jedes Chromosomenpaares zu einem der beiden gegenüberliegenden Pole. Danach teilt sich die Zelle. Erstaunlicherweise zeigen unsere Untersuchungen, dass der Spindelapparat in menschlichen Eizellen sehr instabil ist und sich oft falsch an die Chromosomen anlagert. Dies führt zu Fehlern bei der Chromosomentrennung. Kürzlich haben wir entdeckt, dass menschlichen Eizellen ein Motorprotein (KIFC1) fehlt, wodurch die Spindeln instabil werden. Durch künstliches Einbringen des Motors in die Eizelle konnten wir die Spindeln stabilisieren und Fehler bei der Chromosomentrennung verringern.

## Veränderungen im Alter

Fehler treten auch durch altersbedingte Veränderungen der Chromosomen-„Architektur“ auf: Sie fallen vorzeitig auseinander, noch bevor sie getrennt werden.

Interessanterweise passieren Chromosomentrennungsfehler nicht nur in der Eizelle, sondern auch im frühen Embryo von Säugetieren. Die Zeit unmittelbar



*Neues Leben entsteht: Das väterliche und mütterliche Erbgut (magenta) befindet sich kurz nach der Befruchtung einer Eizelle eines Rindes in zwei getrennten sogenannten Vorkernen. Bevor sich das Erbgut vereinigt, sammeln sich die Chromosomen an der Kontaktfläche. (Blau: ein Teil des Zellskeletts)*

nach der Vereinigung von Spermium und Eizelle, das sogenannte Zygoten-Stadium, scheint eine äußerst kritische Phase für eine gesunde Entwicklung zu sein. Wir wollten herausfinden, warum dies der Fall ist. Für unsere Untersuchungen werteten wir Videos von menschlichen Zygoten aus, die Kolleginnen und Kollegen in der Bourn Hall Clinic in England aufgenommen haben. Dort werden für Kinderwunschbehandlungen routinemäßig Mikroskopie-Videos menschlicher Zygoten aufgenommen.

Studien an menschlichen Zygoten aber sind insbesondere aus ethischen Gründen schwierig. Deshalb haben wir uns auf die Suche nach einem neuen Modellorganismus begeben, mit dem sich die frühe Embryonalentwicklung detailliert untersuchen lässt. Gemeinsam mit Forschenden am Institut für Nutztiergenetik des Friedrich-Loeffler-Instituts, Neustadt, haben wir Methoden entwickelt, um die ersten Teilungen einer Rinderzygote live zu beobachten. Zygoten von Rindern sind denen des Menschen sehr ähnlich, zum Beispiel, was die Anordnung der Chromosomen und die Organisation der Spindel betrifft. Auch die Häufigkeit von Fehlern

bei der Chromosomentrennung während der ersten Zellteilungen ist in beiden Organismen ähnlich hoch. Ein weiterer Vorteil des „Modellsystems Rind“ ist, dass wir die Eizellen für die Befruchtung aus Schlachthofabfällen gewinnen können.

## Verlorene Chromosomen

Wir befruchteten die Rinder-Eizellen im Labor und verfolgten mithilfe hochauflösender Lebendzellmikroskopie, wie sich das elterliche Erbgut vereinigt. Nach der Befruchtung liegen die elterlichen Chromosomen zunächst in zwei getrennten Kernen vor, den sogenannten Vorkernen. Unter dem Mikroskop konnten wir beobachten, dass sich die elterlichen Chromosomen an der Grenzfläche der beiden Vorkerne ansammeln – bei einigen Zygoten allerdings tanzten einzelne Chromosomen aus der Reihe. Infolgedessen gingen diese bei der Vereinigung des Erbguts verloren, und die neu entstandenen Zellkerne besaßen zu wenige Chromosomen. Diese Zygoten wiesen dann wie erwartet Entwicklungsstörungen auf. Das Zusammenlagern der Chromosomen an der Grenzfläche der beiden Vorkerne scheint also ein äußerst wichtiger Schritt zu sein. Gelingt diese Ansammlung der Chromosomen nicht, passieren Fehler und der Embryo entwickelt sich nicht korrekt.

Doch wie kommt es, dass sich die Chromosomen nicht korrekt versammeln? Unsere Ergebnisse zeigen, dass Motorproteine und Komponenten des Zellskeletts die Bewegung der Chromosomen innerhalb der Vorkerne steuern. Interessanterweise sind es dieselben Elemente, die auch dafür sorgen, dass sich die beiden Vorkerne aufeinander zubewegen. Die Vereinheitlichung des elterlichen Erbguts beruht also auf zwei sehr eng miteinander verknüpften Vorgängen, die aber oft schiefgehen. Ob sich ein Embryo gesund entwickelt oder nicht, hängt damit von einem bemerkenswert ineffizienten Prozess ab. Unsere Erkenntnisse könnten für eine erfolgreiche künstliche Befruchtung menschlicher Eizellen wichtig sein. Wir konnten beispielweise zeigen, dass sich Fehler in menschlichen Eizellen durch das Einbringen des Motorproteins KIFC1 verringern lassen. Hierdurch könnte der Erfolg von Kinderwunschbehandlungen in Zukunft verbessert werden. o



# 2 Computer werden neugierig

**ERIC SCHULZ**

↳ Max-Planck-Institut  
für biologische Kybernetik,  
Tübingen

Computerspiele werden eigentlich zur Unterhaltung entwickelt, mein Team und ich nutzen sie aber zur Erforschung menschlichen Verhaltens. Damit eröffnen wir einerseits neue Ansätze in der psychologischen Forschung, andererseits tragen unsere Ergebnisse zur Verbesserung künstlich intelligenter Systeme bei.

**N**eugier ist eine zutiefst menschliche Eigenschaft – besonders bei Kindern ist sie stark ausgeprägt. Im Kinderbuch „Alice im Wunderland“ folgt Alice neugierig dem weißen Kaninchen und gelangt in eine vielfältige, traumartige Welt, in der sie sich mit ihrem kindlichen Forscherdrang behauptet und immer wieder neue Lösungen findet.

Die experimentelle Psychologie erforscht die Triebfedern menschlichen Verhaltens wie beispielsweise Neugier traditionell mit recht einfachen Szenarien. Um mehr über die Prinzipien intelligenten Handelns zu erfahren, werden Probanden beispielsweise aufgefordert, wiederholt Entscheidungen zwischen zwei Möglichkeiten zu treffen, oder sie sollen die Länge zweier Linien miteinander vergleichen.

Solche einfachen Versuchsanordnungen spiegeln nicht die Komplexität der realen Welt wider. Hinsichtlich des Umgangs mit Komplexität sind die Theorien des maschinellen Lernens den Theorien menschlichen Lernens mittlerweile weit überlegen. Dazu kommt, dass die Fähigkeiten künstlich intelligenter (KI-)Systeme in den vergangenen zehn Jahren einen kometenhaften Aufstieg erfahren haben. Dass sich die Fähigkeiten von Computern in so kurzer Zeit stark verbessert haben, lag insbesondere daran, dass sich der Schwerpunkt verlagert hat: Computer wurden zunehmend auf vielfältige Umgebungen und das Erlernen komplexerer Verhaltensweisen hin optimiert. Das Ergebnis ist beeindruckend: Computer

mit künstlicher Intelligenz besiegen sogar die menschlichen Weltmeister im jahrhundertealten Brettspiel „Go“ oder lösen schwierige mathematische Probleme.

Meine Forschungsgruppe möchte einen ähnlichen Wechsel in den Theorien menschlichen Lernens vollziehen: Wir studieren menschliches Verhalten in realitätsnahen Umgebungen. Dazu nutzen wir die komplexen Welten von Computer- und Videospielen. Wir konzentrieren uns insbesondere auf jene Verhaltensweisen, in denen Menschen immer noch besser abschneiden als die derzeit besten Computer-Algorithmen, beispielsweise auf kreative Prozesse.

## Spiel mit den Elementen

Eines der Spiele, die wir einsetzen, ist das kostenfreie Onlinespiel Little Alchemy (<https://littlearchemy.com/>). Hier starten die Spieler mit vier einfachen Elementen: Erde, Wasser, Luft und Feuer. Man kann auf einer virtuellen Leinwand jeweils zwei Elemente miteinander kombinieren, um ein neues zu erschaffen (so ergibt z. B. die Kombination aus „Wasser“ und „Feuer“ das neue Element „Dampf“). Insgesamt können 720 Elemente entstehen, von einfachen wie „Lehm“ oder „Gras“ bis zu komplexen wie „Mensch“ oder „Astronauteneiscreme“. Bemerkenswert ist, dass es für die Erschaffung von Elementen keinerlei Belohnung gibt, dennoch spielen



## Wir versuchen, Programme zu entwickeln, die ein Computerspiel genauso gut meistern wie Menschen.

täglich Tausende von Menschen dieses Spiel online. Was treibt ihr Verhalten an, und wie kann man dieses wissenschaftlich am besten beschreiben?

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Erfinder des Spiels haben wir uns das Verhalten von ca. 30.000 Spielern genauer angeschaut und mathematisch modelliert. Dabei haben wir entdeckt, dass Spieler versuchen, Elemente zu kreieren, aus denen sich wiederum möglichst viele andere Elemente erschaffen lassen. Diese Form von Neugier bezeichnet man als Befähigung.

Aus unseren Ergebnissen schließen wir, dass die Menschen so handeln, weil sie Spaß daran haben, immer mehr neue Elemente kreieren zu können. Gleichzeitig lernen sie immer mehr über das Spiel. Nun wollen wir die für die menschliche Neugier typischen Merkmale in künstliche Intelligenz einprogrammieren.

Mit einem komplexeren Onlinespiel erforschen wir, wie große Gruppen von Menschen gemeinsam entdecken und kreativ interagieren. Im Spiel One Hour One Life (<http://onehouronelife.com/>) bilden Spieler Gruppen und entwickeln neue Technologien. Dabei werden die Spieler jeweils zufällig in eine Familie und ein Szenario hineingeboren, und mit jeder Minute werden sie ein Jahr älter.

Gemeinsam erforschen die Familienmitglieder ihre Umgebung und können wie in Little Alchemy existierende Elemente kombinieren, um neue Elemente zu bilden. Hierbei entstehen, ausgehend von Steinen und

Stöcken, sogar komplexe Technologien wie Autos oder Flugzeuge. Dabei tragen die Teilnehmenden jeweils nur einen kleinen Teil zur Entwicklung der gesamten Familie über mehrere Generationen bei. Die älteste Familienlinie umfasste zum Zeitpunkt dieser Arbeit über 800 Generationen.

### Erfolg im Spiel

Um zu verstehen, was erfolgreiche, hoch-innovative Gruppen von weniger erfolgreichen unterscheidet, haben wir das Verhalten von ca. 30.000 Spielern in 6300 Familien analysiert. Erfolgreiche Gruppen besitzen vor allem zwei Merkmale: Erstens können sich Individuen effizient und zielgerichtet einfinden, das heißt, schnell Positionen einnehmen, die gerade gebraucht werden. Zweitens stehen in diesen Gruppen alle Mitglieder häufig in Austausch miteinander. Mathematisch lässt sich kollektive Neugier als gerichteter Suchprozess entlang des Graphen beschreiben, der die Elemente im Spiel umfasst. Derzeit versuchen wir, Programme zu entwickeln, die dieses Spiel genauso gut meistern wie die Menschen oder zumindest mit ihnen zusammenarbeiten können.

Wir glauben, dass die Komplexität von Spielen es uns ermöglichen wird, realistischere Modelle menschlichen Verhaltens zu bilden. Wenn wir herausfinden, welche Annahmen die Spieler mitbringen, könnte man diese Annahmen auch in Algorithmen des maschinellen Lernen einprogrammieren und damit deren Effizienz erhöhen. Mit Computerspielen lassen sich vermutlich auch die Grenzen menschlichen Lernens untersuchen.

Unsere Forschung könnte zu einem Paradigmenwechsel in der Psychologie führen. Methoden aus Datenwissenschaft und maschinellem Lernen könnten in Zukunft die Untersuchung von Theorien der Kognitions- und Lernpsychologie möglich machen. Um beide Forschungsfelder erfolgreich zu verbinden, müssen wir wie Alice im Wunderland und unsere spielenden Probanden neugierig bleiben. o

# 3 Die erstaunliche Geschichte unserer Mundflora

**CHRISTINA  
WARINNER,  
JAMES FELLOWS  
YATES,  
IRINA VELSKO**

↳ *Max-Planck-Institut  
für evolutionäre Anthropologie,  
Leipzig*

Dank alter DNA aus der menschlichen Frühgeschichte gewinnen wir immer neue Erkenntnisse, wie unsere Vorfahren einstmal lebten. Nun ist es uns gemeinsam mit einem internationalen Forschungsteam gelungen, die Mundflora von Neandertalern, Primaten und Menschen zu rekonstruieren – darunter das älteste jemals sequenzierte orale Mikrobiom eines 100.000 Jahre alten Neandertalers. Die Ergebnisse liefern neue Hinweise zur Evolution, Gesundheit und Ernährung des Menschen.

In und auf unserem Körper leben Billionen mikrobieller Organismen, die Tausenden von Bakterienarten angehören – unser Mikrobiom. Diese Mikroben spielen für die menschliche Gesundheit eine Schlüsselrolle, doch war bisher nur wenig über ihre Evolution bekannt. In einer multidisziplinären internationalen Studie haben wir die Evolutionsgeschichte des oralen Mikrobioms von Hominiden (Menschenaffen und Menschen) untersucht, indem wir den Zahnstein von Menschen und Neandertalern aus den letzten 100.000 Jahren analysierten und mit dem von frei lebenden Schimpansen, Gorillas und Brüllaffen verglichen.

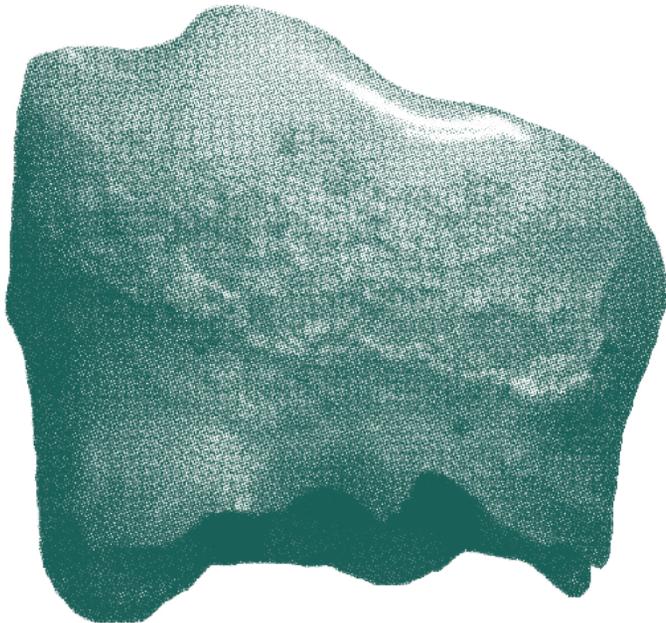
Forschende aus 41 Einrichtungen in 13 Ländern haben an der Studie mitgewirkt – der bisher größten und ehrgeizigsten Studie zur Mundflora des Menschen. Wir analysierten dazu den Zahnstein von mehr als 120 Individuen. Die Untersuchung repräsentiert entscheidende Etappen in der Evolution von Primaten und Menschen, sie führt zu überraschenden Erkenntnissen über das Verhalten früher Menschen und ermöglicht neue Einblicke in die Evolution des Mikrobioms von Hominiden.

Die Arbeit mit DNA, die Zehn- oder Hunderttausende von Jahren alt ist, stellt eine große Herausforderung dar. Wie Archäologen, die zerbrochene Töpfe rekonstruieren, müssen wir Archäogenetiker die zerbrochenen Fragmente alter Genome mühsam zusammensetzen, um ein vollständiges Bild der Vergangenheit zu rekonstruieren. Für diese Studie haben wir neue Analysewerkzeuge und Berechnungsmethoden entwickelt, um Milliarden von DNA-Fragmenten genetisch zu analysieren und die längst abgestorbenen Bakteriengemeinschaften zu identifizieren, die im archäologischen Zahnstein erhalten geblieben sind.

## Zahnstein vom Neandertaler

Dank dieser neuen Methoden ist es uns gelungen, menschliche Mikrobiome aus der Steinzeit zu rekonstruieren, darunter das 100.000 Jahre alte orale Mikrobiom eines Neandertalers aus der Pešturina-Höhle in Serbien.

**Erstaunlich viele Bakterien im Mundraum sind so wenig erforscht, dass sie nicht einmal einen Artnamen haben.**



*Zähne aus historischen Funden – genauer gesagt, die Beläge darauf – ermöglichen weitreichende Einblicke in die Mundflora unserer Vorfahren.*



Es ist damit das bisher älteste erfolgreich rekonstruierte orale Mikrobiom – mehr als doppelt so alt wie die ältesten zuvor rekonstruierten Mikrobiome. Die im Rahmen dieser Studie entwickelten Instrumente und Techniken eröffnen der Wissenschaft neue Möglichkeiten, um grundlegende Fragen zur mikrobiellen Archäologie und zur engen Beziehung zwischen dem Menschen und seiner Mundflora zu beantworten.

### Indizien für stärkehaltige Nahrung

Im versteinerten Zahnbelag konnten wir zehn Bakteriengruppen identifizieren, die seit über 40 Millionen Jahren zum oralen Mikrobiom der Primaten gehören und die der Mensch und seine nächsten Verwandten immer noch gemeinsam haben. Von vielen dieser Bakterien ist bekannt, dass sie wichtige nützliche Funktionen im Mundraum haben und zur Gesundheit von Zahnfleisch und Zähnen beitragen können. Erstaunlich viele dieser Bakterien sind jedoch so wenig erforscht, dass sie nicht einmal einen Artnamen haben. Die Tatsache, dass viele der wichtigsten Bakterienarten nur unzureichend charakterisiert sind, war für uns eine Überraschung. Anhand der Ergebnisse dieser Studie kann sich die Fachrichtung der oralen Mikrobiologie nun neue Ziele für die Erforschung von Mundgesundheit und -krankheiten stecken.

Obwohl der Mensch viele Mundbakterienarten mit anderen Primaten teilt, sind die oralen Mikrobiome von Homo sapiens und Neandertaler einander besonders



*Kiefer mit Zähnen aus archäologischen Funden werden zunächst sorgfältig gereinigt, um alten Zahnstein zu finden (links).*

*Die Schädel von Grauergorillas weisen auf den Zähnen typische dunkle Ablagerungen auf, die wohl durch pflanzliche Ernährung entstehen (rechts).*



ähnlich. Dennoch gibt es ein paar kleine Unterschiede, vor allem auf der Ebene der Bakterienstämme. Als die Forschenden diese Unterschiede genauer untersuchten, stellten sie fest, dass moderne Menschen in Europa während der Eiszeit bestimmte Bakterienstämme mit Neandertalern teilten. Da die Mundflora in der Regel in der frühen Kindheit von Bezugspersonen erworben wird, könnte diese Gemeinsamkeit auf frühere Mensch-Neandertaler-Paare und die gemeinsame Kindererziehung zurückzuführen sein, worauf auch die Entdeckung von Neandertaler-DNA in alten und modernen menschlichen Genomen hindeutet. Forschende fanden heraus, dass Neandertaler-ähnliche Bakterienstämme ab einer Zeit vor etwa 14.000 Jahren nicht mehr beim Menschen nachweisbar sind. Zu dieser Zeit, also gegen Ende der letzten Eiszeit, kam es in Europa zu erheblichen Bevölkerungsbewegungen.

Eine der größten Überraschungen war die Entdeckung, dass eine Untergruppe von Streptokokken-Bakterien, die sowohl bei modernen Menschen als auch bei Neandertalern vorkommt, sich offenbar schon früh in der Evolution des Homo sapiens speziell an den Verzehr von Stärke angepasst hat. Das deutet darauf hin, dass stärkehaltige Nahrung in der menschlichen Ernährung lange vor Einführung der Landwirtschaft und sogar noch

vor der Evolution des modernen Menschen eine wichtige Rolle gespielt hat. Stärkehaltige Nahrungsmittel wie Wurzeln, Knollen und Samen sind reiche Energiequellen. Frühere Studien haben gezeigt, dass der Übergang zum Verzehr stärkehaltiger Nahrung unseren Vorfahren dabei geholfen haben könnte, die für unsere Spezies typischen großen Gehirne zu entwickeln.

## Schnelle Evolution der Bakterien

Die Rekonstruktion des Speiseplans unserer ältesten Vorfahren ist eine schwierige Aufgabe, bei der Mundbakterien wichtige Hinweise zu frühen Ernährungsumstellungen liefern können, die uns Menschen so einzigartig gemacht haben. Bakteriengenome entwickeln sich schneller als das menschliche Genom, was unsere Mundflora zu einem besonders empfindlichen Indikator für wichtige Ereignisse in der menschlichen Entwicklungsgeschichte der frühen und jüngsten Vergangenheit macht. Die Ergebnisse der Studie sind ein wichtiger Denkanstoß. Sie verdeutlichen, dass die winzigen bakteriellen Beläge, die auf unseren Zähnen entstehen und die wir jeden Tag sorgfältig wegputzen, bemerkenswerte Informationen beisteuern, die nicht nur unsere Gesundheit, sondern auch unsere Evolution betreffen. o

# 4 Gelenke für kooperative Roboter

**CHRISTOPH  
KEPLINGER,  
PHILIPP ROTHMUND**

↳ *Max-Planck-Institut  
für Intelligente Systeme,  
Stuttgart*

Künftige Roboter werden autonom in unstrukturierten Umgebungen agieren und eng mit Menschen zusammenarbeiten müssen. Herkömmliche Roboter aus starren, metallischen Komponenten und Motoren eignen sich für diese Aufgaben in mancherlei Hinsicht nicht. Wir entwickeln stattdessen Komponenten aus weichen und intelligenten Materialien. Jüngst haben wir uns dabei von einem Spinnenbeingelenk inspirieren lassen.

**R**oboter werden heute meist aus festen Bauteilen konstruiert, angetrieben durch Elektromotoren aus Metall. Sehr gut eignen sie sich im stationären Einsatz als Industrieroboter im Autowerk oder in einem Recycling-Center. Im Umgang mit Menschen können sie indes ungeschickt oder gar gefährlich sein. Außerdem sind sie teuer und ungeeignet für unwägbares Terrain. Im Gegensatz dazu setzt die Natur auf weiche Materialien wie Muskeln und Haut. Deswegen sind unsere Hände wesentlich geschickter, beweglicher und anpassungsfähiger als eine Roboterhand. Mit ihrer Flexibilität verfügen Hände gewissermaßen über eine innere Intelligenz, denn sie können sich ohne gezielte Steuerung an verschiedene Formen und Kontakte mit unterschiedlichen Kräften anpassen. Unsere Forschung zielt darauf ab, weiche Materialien beim Bau von Robotern einzusetzen. Wir verfolgen einen interdisziplinären Ansatz, der Erkenntnisse aus Chemie und Physik der weichen Materie mit fortschrittlichen Ingenieurtechniken verbindet. Auf diese Weise entwickeln wir Robotik-Materialien, die nicht nur den Bau intelligenter Maschinen ermöglichen, sondern auch die erstaunlichen Fähigkeiten natürlicher Organismen nachahmen.

In den letzten Jahren haben wir zusammen mit Forschenden der University of Colorado in Boulder, USA, künstliche Muskeln entwickelt. Sie basieren auf einem Wechselspiel zwischen elektrischer Spannung und Hydraulik, weswegen wir sie *Hydraulically Amplified Self-healing Electrostatic* (Hasel) getauft haben. Diese

Aktuatoren funktionieren nach folgendem Prinzip: Ein Polymerbeutel wird mit einem flüssigen Dielektrikum, also einem Material, das in einem elektrischen Feld polarisiert wird, gefüllt. Wir verwenden im einfachsten Fall Pflanzenöl. Die gegenüberliegenden Seiten des Beutels beschichten wir mit Elektroden. Legen wir an diese eine Spannung an, so entsteht zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld. Das übt auf die Flüssigkeit eine Kraft aus mit der Folge, dass diese sich lokal umverteilt und den Beutel verformt. Der Trick besteht nun darin, den Beutel so mit einer Mechanik zu verbinden, dass diese sich wie gewünscht bewegt. Auf diese Weise haben wir beispielsweise sehr leichte, künstliche Sprunggelenke oder Bizepsmuskeln konstruiert. Die Frequenz, mit der sich diese Aktuatoren spannen und entspannen, lässt sich durch An- und Abschalten der Spannung kontrollieren. Mehr als hundert Zyklen pro Sekunde haben wir bereits realisiert.

## Von Spinnen inspiriert

Nun haben wir mit dieser Technik ein Gelenk entwickelt, das dem von Spinnen nachempfunden ist. Spinnen verfügen über ein biohydraulisches System. Ihre Beine besitzen sieben Gelenke, von denen zwei ohne Muskeln auskommen. Dies ist möglich, weil die Gliederfüßer ein offenes Blutgefäßsystem haben. Aus Arterien fließt die Hämolymphe frei ins Gewebe und sammelt sich dort in



ARACHNID

ROBOT



Zwischenräumen an. Durch Kontraktion des Vorderkörpers der Spinne erhöht sich der Hämolympfdruck in den Beinen, wodurch diese sich strecken. Ein integriertes hydraulisches Gelenk macht das Bein beweglich und verleiht Spinnen zudem eine große Sprungkraft.

Nach dem Vorbild dieses Tibia-Metatarsus-Gelenks haben wir ein auf der Hasel-Technik basierendes Gelenk gebaut. Dieses Spider-inspired Electrohydraulic Soft-actuated joint (SES) setzen wir in vielen verschiedenen Konfigurationen ein – auch bei der Entwicklung von spinnenartigen Arachno-Bots. Aufbauend auf einem zunächst bidirektionalen Gelenk haben wir anschließend eine mehrteilige Gliedmaße entwickelt. Das Gelenk eignete sich zum Beispiel, um einen Greifer mit drei Fingern zu bauen. Diese weiche Roboterhand kann selbst einen zerbrechlichen Gegenstand wie ein rohes Ei problemlos aufheben, bewegen und absetzen, ohne ihn zu beschädigen. Die Greifhand ist auch ein gelungenes Beispiel dafür, wie sich die weichen Elemente effektiv mit harten verbinden lassen – ein weltweit sehr aktives Forschungsgebiet.

## Leistungsstark und kostengünstig

Die SES-Gelenke können sich um bis zu 70 Grad drehen. Dadurch sind sie sehr agil und dynamisch. Die Weite der Drehung lässt sich über die angelegte Spannung exakt einstellen. Außerdem sind die Gelenke sehr robust, etwa gegen Schläge. Die leichten Gelenke sind trotz ihres einfachen Designs sehr leistungsstark: Sie können einen Roboter um das Zehnfache seiner Höhe hochkatapultieren. Dies alles geschieht – anders als bei Gelenken von harten Robotern – ohne Zahnräder und andere sperrigen und schweren Komponenten, die einen Roboter unbeweglich und langsam machen. Das macht sie ideal für Robotersysteme, die sich schnell bewegen und in einer unübersichtlichen Umgebung agieren müssen. Zudem verbrauchen sie wenig Energie und sind einfach und kostengünstig herzustellen. So verwenden wir hier Kunststoffe, mit denen auch Lebensmittel verpackt werden. Die Produktion der Gelenke wäre also leicht skalierbar. Das sind alles Kriterien, die beim Design von vielseitig einsetzbaren Robotern maßgeblich sind.

Für weiche Gelenke benötigen wir generell Materialien, die empfindlich und dauerhaft auf die elektrischen Felder reagieren, aber auch mechanisch robust sind. Schon mit handelsüblichen Kunststoffen überstehen die Gelenke mehr als eine Million Zyklen. Die Industrie bietet zudem sehr viele leistungsfähige Folien für spezielle Anwendungen, die wir nutzen können. Daneben entwickeln wir eigene Hochleistungsmaterialsysteme. Bei unseren Untersuchungen sind wir auch auf Materialeigenschaften beispielsweise der verwendeten Öle gestoßen, die dem bisherigen Lehrbuchwissen widersprechen. So funktionieren einige Öle noch bei zehn bis hundert Mal höheren Spannungen, als wir es erwartet hatten. Um das



zu verstehen, müssen wir noch tiefgreifende Grundlagenforschung betreiben. Wir erwarten, dass die dadurch gewonnenen Erkenntnisse erhebliche Leistungssteigerungen unserer künstlichen Muskeln ermöglichen werden.

## Eine Steuerung, die Fehler korrigiert

Nicht zuletzt erfordern weiche Roboter andere Steuerungsmechanismen als starre Systeme. Unsere Hände mit ihrer weichen Haut greifen oft nicht ganz exakt. Unser Gehirn hat es gelernt, mit dieser Ungenauigkeit umzugehen, und vermeidet oder korrigiert Fehler. Genauso werden weiche Roboter eine intelligente, lernfähige Steuerung benötigen. Aus diesem Grund arbeiten wir mit den Kollegen an dem Teilinstitut in Tübingen zusammen, die sich auf maschinelles Lernen spezialisiert haben.

Wir sind überzeugt, dass Roboter mit bioinspirierten Aktuatoren zunehmend in unser Leben integriert werden, angefangen vom Katastrophenschutz über die Medizin und die Alltagsrobotik bis hin zu tragbaren Systemen und lebensetzten Prothesen. Auch wenn es noch ein weiter Weg bis dahin ist: Wir nähern uns einer Welt, in der Mensch und Maschine miteinander zusammenwirken werden, wie man es heute nur aus Science-Fiction-Filmen kennt. Es ist nicht eine Frage, ob dies geschehen wird, sondern eher wann. o

*Beispiel einer weichen Roboterhand, deren Design auf Hasel-Aktoren basiert. Der Greifer ist sanft genug, um mit Himbeeren zu hantieren, ohne sie zu zerquetschen.*

# 5 Schwärmende Fresszellen

**TIM LÄMMERMANN**

↳ Max-Planck-Institut  
für Immunbiologie und  
Epigenetik, Freiburg

Als neutrophile Granulozyten werden manche „Fresszellen“ unseres Immunsystems bezeichnet. Sie patrouillieren durch die Blutgefäße und dringen bei Anzeichen einer Entzündung oder Infektion als Ersthelfer ins Gewebe ein, um unverzüglich Krankheitserreger zu eliminieren. Dazu schließen sich die verkürzt als Neutrophile bezeichneten Fresszellen zu beeindruckenden Zellschwärmen zusammen und greifen koordiniert die Erreger an. Unsere Forschung zeigt, dass Neutrophile für ihr koordiniertes Handeln ein molekulares Start-Stopp-System entwickelt haben und so ihre Schwarmaktivität kontrollieren, um Bakterien in den Körpergeweben effektiv und ohne Nebenwirkungen zu beseitigen.

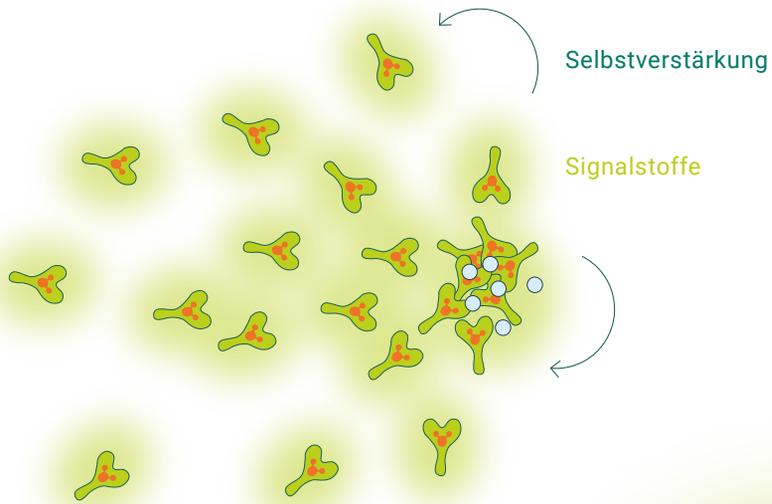
**U**nser Körper ist durch die Haut vor eindringenden Krankheitserregern weitestgehend geschützt. Krankheitserreger können jedoch durch Wunden in den Körper gelangen und schwere Infektionen verursachen. In solchen Fällen übernimmt unser angeborenes Immunsystem die erste Verteidigungslinie mit einem effektiven Arsenal verschiedener zellulärer Waffen. An vorderster Front kämpfen sogenannte neutrophile Granulozyten, die innerhalb weniger Stunden aus dem Blutkreislauf in das verletzte Gewebe eindringen. Dort identifizieren und zerstören sie die Eindringlinge.

Neutrophile patrouillieren im Blut durch fast alle Bereiche unseres Körpers. Mittels molekularer Sensoren auf ihrer Zelloberfläche sind sie darauf spezialisiert, die Alarmsignale derjenigen Zellen zu erkennen, die durch Verletzungen oder eindringende Mikroben geschädigt wurden. Sobald einzelne Neutrophile diese Signale erkennen, rufen sie mit chemischen Botenstoffen weitere Neutrophile zur Hilfe.

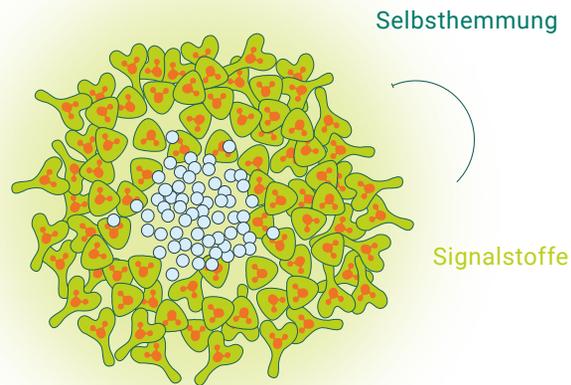
Unsere Untersuchungen zeigen, dass eine spezielle Substanz namens Leukotrien B<sub>4</sub>, die als Botenstoff bei Entzündungen auftritt, bei der Kommunikation zwischen den Neutrophilen eine entscheidende Rolle spielt. Leukotrien B<sub>4</sub> wird von aktivierten Neutrophilen ausgeschüttet, um anderen Neutrophilen die Richtung vorzugeben, der sie folgen sollen. Auf diese Weise bilden Neutrophile imposante Schwärme, die zum Teil mehrere Hundert Zellen umfassen und wie ein Zellkollektiv gemeinsam und fein abgestimmt im Gewebe agieren.

## Gefährlicher Inhalt

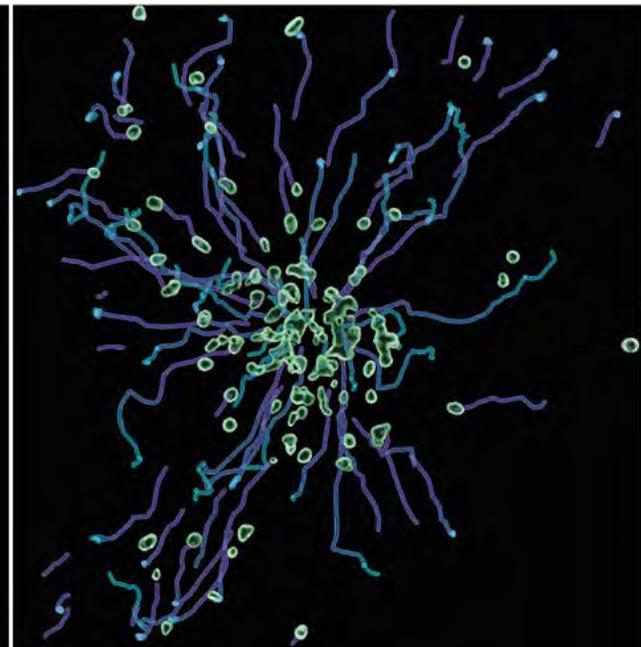
Das feine Austarieren ihrer Aktivität ist nötig, denn Neutrophile bergen in ihrem Zellinneren mehrere antibakterielle Substanzen, die die Krankheitserreger abtöten sollen. Gelangen diese Substanzen jedoch aus der Zelle hinaus in ihre Umgebung, können sie für die



Fresszellen geben Signalstoffe ab, die immer mehr Zellen anziehen. Übersteigt die Konzentration der Signale eine bestimmte Schwelle, kommt die Wanderung der Fresszellen zum Stillstand (Teilbild unten). Der so entstehende Schwarm kann eingedrungene Krankheitserreger (graue Kreise) abschirmen und bekämpfen.



Neutrophile Fresszellen (grün) bilden Schwärme und sammeln sich an Stellen, wo sie beschädigte Zellen oder Krankheitserreger beseitigen müssen. Die Linien in den Einzelbildern zeigen die Bewegungen der Zellen zu verschiedenen Zeitpunkten (rechts: 30 Minuten).



umliegenden Gewebegerüste schädlich sein. Eine solche überschießende Entzündungsreaktion hätte massive Gewebeschäden zur Folge und würde zu einer Gefahr für den Körper. Sie wird oft bei starken Entzündungsreaktionen beobachtet und könnte eine der Ursachen für Lungenschäden bei schweren Verläufen von Covid-19-Erkrankungen sein.

## Kontrollierte Schwarmbildung

In den letzten Jahren wurden viele neue Erkenntnisse zu den auslösenden Mechanismen von Neutrophilen-Schwärmen gewonnen. Wie diese die Schwärme kontrollieren oder auflösen, blieb bislang jedoch unerforscht. Wir widmeten uns deshalb der Frage, wie die unkontrollierte Anhäufung von Neutrophilen im Gewebe und die damit verbundene schädliche Entzündungsreaktion verhindert wird.

Unsere Studien zeigen, dass Neutrophile ihr Schwarmverhalten selbst steuern können und somit eine optimale Balance zwischen den Such- und Zerstörungsphasen im Kampf gegen Krankheitserreger herstellen. Diese Erkenntnisse sind überraschend, denn bisherige Annahmen gingen stets von externen Signalen aus der Gewebeumgebung aus, die die Aktivität der Neutrophilen am Ende einer Entzündung dämpfen oder

beenden. Durch den Einsatz spezieller Mikroskope in lebendem Gewebe konnten wir jedoch beobachten, dass schwärmende Neutrophile mit der Zeit gegenüber ihren eigenen Signalen wie dem Leukotrien B4 unempfindlich werden, mit denen sie den Schwarm ursprünglich initiiert haben.

## Molekulare Bremse

Die Ursache für die Unempfindlichkeit der zahlreich schwärmenden Neutrophilen ist eine molekulare Bremse, mit der sie ihre Bewegung stoppen, sobald sie zu hohe Konzentrationen der sich anhäufenden Lockstoffe wahrnehmen. Das die Bremswirkung vermittelnde Protein trägt den Namen „G-Protein-gekoppelte Rezeptor-kinase 2“. Es sorgt dafür, dass die Zellen bei hohen Konzentrationen nicht mehr auf diese Signale reagieren. In Experimenten mit Neutrophilen, denen der Start-Stopp-Mechanismus fehlt, beobachteten wir nämlich, dass diese Zellen ungebremst im Gewebe umhereilen und dadurch in viel zu großen Gewebebereichen nach Bakterien Ausschau halten. Dies aber hindert ihren Erfolg bei der Bekämpfung der meist eher punktuell wachsenden Erreger. Neutrophile agieren viel effektiver, wenn sie als Schwarm eine infizierte Zelle umzingeln und dort verharren. Auf diese Weise bilden sie eine Barriere, die nicht nur die Vermehrung, sondern vor allem die weitere Verbreitung krankheitserregender Bakterien eindämmt. Unsere Ergebnisse haben einen wichtigen Aspekt der Biologie von Neutrophilen entschlüsselt, der besonders für die Immunabwehr gegen Bakterien von Bedeutung ist. Unsere unerwarteten Erkenntnisse zu den Jagdstrategien der Immunzellen können wichtige Impulse für neue therapeutische Ansätze darstellen. Darüber hinaus könnten die hier beschriebenen Mechanismen zum Schwarmverhalten der Neutrophilen auch die Forschungen zum kollektiven Verhalten von Zellverbänden bis hin zum kollektiven Verhalten schwärmender Insektenarten vorantreiben. o



# Die Immunzellen können ihr Schwarmverhalten selbst steuern und somit eine Balance zwischen der Suche nach und der Zerstörung von Krankheitserregern einhalten.

# 6 Das virtuelle Fusionskraftwerk

## FELIX WARMER

↳ Max-Planck-Institut  
für Plasmaphysik,  
Greifswald

Die Energiequelle der Sonne auf der Erde nutzbar zu machen ist das ehrgeizige Ziel der Fusionsforschung. Derzeit gibt es vor allem zwei mögliche Varianten, ein Kraftwerk zu realisieren: Tokamak und Stellarator. Wir entwickeln seit Jahren eine Simulationsplattform, mit der sich sowohl die physikalischen als auch technischen Anforderungen an einen Stellarator ganzheitlich simulieren lassen. Dieser digitale Zwilling soll das Zusammenwirken aller Systemkomponenten beschreiben, um ein Fusionskraftwerk schneller zu entwickeln und zur Marktreife zu bringen.

**A**us der Fusion von Wasserstoff (genauer: dessen schweren Varianten Deuterium und Tritium) Energie zu gewinnen ist ein lang gehegter Traum. Mit einem nahezu unerschöpflichen Brennstoffreservoir und dem CO<sub>2</sub>-freien Betrieb könnte diese Technik eine der Stützen einer nachhaltigen Energieversorgung werden. Mit ihrer großen elektrischen Leistung würden Fusionskraftwerke vor allem die Grundlast bedienen und so in idealer Weise die von der Witterung abhängigen Wind- und Sonnenkraftwerke ergänzen.

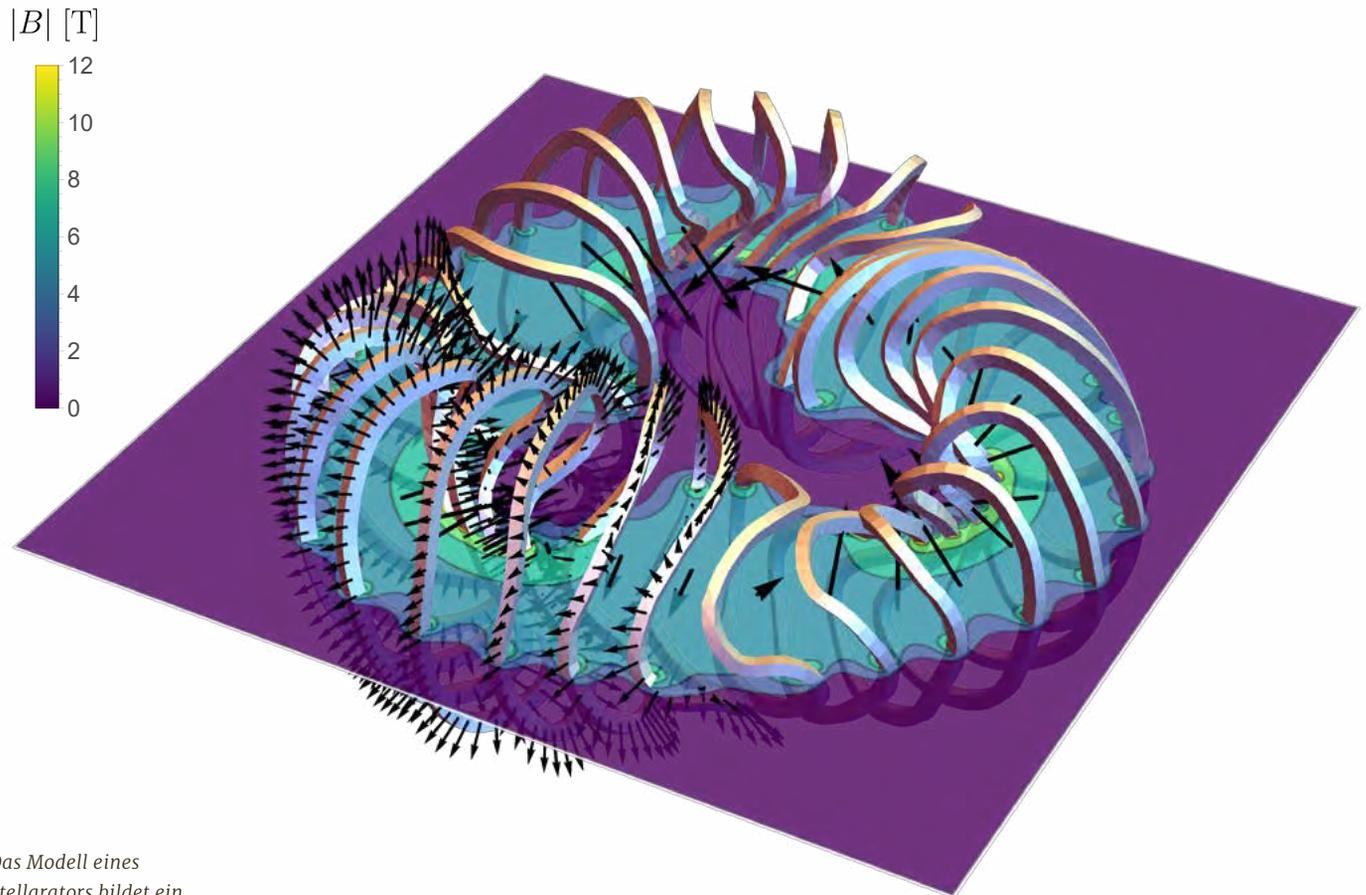
Im südfranzösischen Cadarache entsteht derzeit der Experimentalreaktor Iter. Er soll erstmals im großen Maßstab demonstrieren, dass diese Art der Energiegewinnung technisch möglich ist. Iter basiert auf dem Prinzip des sogenannten Tokamak. In ihm wird das rund hundert Millionen Grad heiße Plasma in einem Magnetfeldkäfig eingesperrt. Dieser wird indes auf eine Weise erzeugt, dass ein Tokamak ohne Zusatzmaßnahmen nur in gepulstem Betrieb, also mit regelmäßigen Unterbrechungen arbeiten kann.

Wegen dieser Einschränkung wird parallel dazu ein anderes Anlagenprinzip namens Stellarator erforscht. Es bietet eine attraktive Alternative, da Stellaratoren im Dauerbetrieb arbeiten können. Die größte und erfolgreichste Experimentieranlage dieses Typs ist der seit 2015 in Greifswald laufende Wendelstein 7-X.

Das Stellarator-Konzept erschien anfänglich herausfordernder, weil dabei zum Einschluss des Plasmas wesentlich komplexer geformte Magnetspulen nötig sind als in einem Tokamak. Wendelstein 7-X hat bewiesen, dass solche Spulen mit der erforderlichen Genauigkeit realisierbar sind. Diese Anlage hält den Stellarator-Weltrekord für das Fusionsprodukt aus Temperatur, Plasmadichte und Energieeinschlusszeit. Es gibt an, wie nahe man den Werten für ein selbstständig brennendes Plasma kommt.

## Das Ziel: ein ökonomisches Kraftwerk

Die für die Planung des Stellarators verwendeten Computerprogramme wurden bereits in den 1990er-Jahren entwickelt. Sie berechnen das Magnetfeld, welches das heiße Fusionsplasma einschließt, sowie die Spulen, die das Feld erzeugen. Bislang existierte jedoch kein systematischer Rahmen, der weitere technische Anforderungen berücksichtigt, die für einen Betrieb große Bedeutung haben. Aufbauend auf den bisherigen erfolgreichen Codes haben wir in den vergangenen Jahren – weltweit erstmalig – neue Modelle entwickelt, die genau diese Randbedingungen in einer Simulationsplattform einbeziehen, um alle Komponenten eines Stellarators



Das Modell eines Stellarators bildet ein Spulensystem mit realistischen Abmessungen und Betriebseigenschaften ab und berücksichtigt die technischen Randbedingungen. Der Farbcode gibt die Magnetfeldstärke in Tesla an. Die kleinen Pfeile stellen lokale elektromagnetische Kräfte an den Spulen dar, die großen Pfeile zeigen die Richtung und, qualitativ, die Stärke der summierten Kräfte für eine Spule.

gewissermaßen ganzheitlich zu beschreiben. Unser Ziel ist es also, einen flexiblen digitalen Zwilling eines Fusionskraftwerks am Computer zu schaffen, mit dem man die Auswirkung neuer Techniken, physikalischer Erkenntnisse oder Unsicherheiten auf den Entwurf untersuchen und ein optimales Konzept für ein Stellarator-Fusionskraftwerk erstellen kann. Dieser digitale Zwilling optimiert dabei nicht nur die physikalischen, sondern auch die ingenieurtechnischen Aspekte einer solchen Anlage.

Die wissenschaftliche Herausforderung beim Erarbeiten eines Kraftwerkskonzepts besteht darin, aus laufenden Stellarator-Experimenten wie Wendelstein 7-X die physikalischen Erkenntnisse mit aktuellen technischen Entwicklungen zu verbinden, um daraus einen ökonomisch attraktiven Kraftwerksentwurf abzuleiten. Besonders anspruchsvoll ist es, alle technischen Komponenten miteinander in Einklang zu bringen: supraleitende Spulen, Stützstruktur, Kühlsysteme und viele weitere Systeme müssen aufeinander abgestimmt werden und genügend Platz für Vorrichtungen lassen, die eine Wartung aus der Ferne erlauben. Unsere Simulationsplattform öffnet neue Wege, um solch komplexe technische Herausforderungen virtuell darzustellen und zu bewältigen.

## Wir müssen alle physikalischen und technischen Aspekte im digitalen Zwilling zusammzuführen.



2016 und 2017 wurden in der Plasmakammer von Wendelstein 7-x unter anderem 8000 Graphitkacheln montiert. Daten, die Forschende in der Anlage seither gesammelt haben, fließen auch in das virtuelle Modell des Stellarators.

### Test für unterschiedliche Reaktoren

Wendelstein 7-X hat bereits experimentell bewiesen, dass das Stellarator-Konzept funktioniert. Ein zukünftiger Reaktor kann jedoch in sehr unterschiedlichen Formen gebaut werden, wobei die optimale räumliche Gestalt erst noch gefunden werden muss. Wir haben unseren Code namens Process daher auf zwei unterschiedliche Stellarator-Konzepte angewendet. Zum einen haben wir drei reaktorgroße Stellaratoren mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen simuliert. Zum anderen haben wir drei Spulensätze mit einer unterschiedlichen Zahl an Spulen durchgerechnet. Hierbei spielen Volumen und Oberfläche des Plasmas eine bedeutende Rolle, wenn es um weitere Berechnungen beispielsweise der Fusionsleistung, der Füllraten oder der Materialbelastung geht. Process berücksichtigt in

Magnetfeldrechnungen die Materialeigenschaften von Supraleitern und technische Randbedingungen, etwa die Regeln für eine Schnellabschaltung der Spulen. Das Modell erzeugt somit ein funktionstüchtiges Spulensystem mit realistischen Abmessungen und Betriebseigenschaften. Diese Simulationen ermöglichen zum ersten Mal den Vergleich verschiedener Stellarator-Konfigurationen innerhalb des gleichen ganzheitlichen Systemcodes und tragen somit zur Stellarator-Optimierung bei.

Ein weiterer Clou von Process ist die Geschwindigkeit: Die Ergebnisse liegen bereits nach wenigen Sekunden vor. Das ermöglicht es uns, eine nahezu endlose Zahl alternativer Entwürfe parallel zu untersuchen und den großen Parameterbereich entscheidend einzugrenzen. Bei der Konstruktion der Codes haben wir auf die Rechengeschwindigkeit geachtet, wobei dies mit einem Kompromiss zwischen Supergenauigkeit und Schnelligkeit einhergeht. Haben wir mit Process einen optimalen Bereich eingegrenzt, kann diese Konfiguration mit hochauflösenden Simulationen detaillierter untersucht werden. Dies geschieht innerhalb des EU-Projekts EUROfusion. Es vereint derzeit 30 Forschungseinrichtungen in 25 EU-Mitgliedstaaten sowie der Schweiz, dem Vereinigten Königreich und der Ukraine. Koordiniert wird es vom IPP in Garching. In diesem Forschungsverbund sind Fachleute versammelt, die sich auf bestimmte Teilaspekte spezialisiert haben und diese detailliert berechnen können. Mit ihnen kooperieren wir intensiv. Diese Forschung erzeugt daher starke Synergie-Effekte und fördert länderübergreifenden Austausch und Zusammenarbeit.

Bislang sind längst nicht alle technischen Aspekte eines Stellarator-Kraftwerks abgedeckt. So arbeiten wir derzeit an Modellen, welche die mechanischen Spannungen in den Spulen und ihrer Stützstruktur hinreichend genau vorhersagen können. Solche Spannungen entstehen vor allem durch die starken elektromagnetischen Kräfte zwischen den Spulen. Letztlich müssen wir alle physikalischen und technischen Aspekte in unserem digitalen Zwilling zusammzuführen. Wir sind davon überzeugt, dass unsere Strategie dazu beitragen kann, die Entwicklung eines Stellarator-Kraftwerks voranzutreiben. o

# 7 Wenn intelligente Maschinen schlecht beraten

**NILS KÖBIS,  
IYAD RAHWAN**

↳ Max-Planck-Institut  
für Bildungsforschung,  
Berlin

Maschinen, die auf künstlicher Intelligenz basieren, übernehmen immer mehr gesellschaftliche Aufgaben. Um diese neue Klasse von Akteuren und ihre Verhaltensmuster zu untersuchen, haben wir das interdisziplinäre Forschungsfeld „Maschinenverhalten“ initiiert. Es zielt darauf ab, die Auswirkungen künstlicher Intelligenz auf soziale, kulturelle, politische und ökonomische Prozesse zu analysieren. Eine zentrale Frage ist hierbei, wie das Verhalten von Maschinen die menschliche Moral beeinflusst.

**K**ünstliche Intelligenz (KI) wird immer mehr zu einem festen Bestandteil unseres Alltags. Algorithmen und KI-basierte Maschinen beraten uns bei Kaufentscheidungen und bei der Auswahl neuer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Sie empfehlen medizinische Behandlungen und Gerichtsurteile. Sie bieten psychologische Beratung und unterstützen ältere und gebrechliche Menschen. Kurz gesagt, sie übernehmen immer mehr Aufgaben, die früher uns Menschen vorbehalten waren. Maschinen wandeln sich von einem Medium für Datenspeicherung und -verarbeitung in aktive Akteure – ein Wandel mit enormen sozialen, kulturellen, wirtschaftlichen und politischen Auswirkungen. Doch wie lässt sich diese neue Art der Maschinen und ihr Verhalten am besten wissenschaftlich untersuchen?

Bereits 1969 stellte der Wirtschaftsnobelpreisträger Herbert Simon die Frage, ob es analog zu den Naturwissenschaften, die sich mit natürlichen Objekten und Phänomenen befassen, eine Wissenschaft des Künstlichen geben kann, die Erkenntnisse über künstliche Objekte und Phänomene gewinnt. Diese Vision von Herbert Simon haben wir aufgegriffen, um das interdisziplinäre Forschungsgebiet „Maschinenverhalten“ zu etablieren. In unserem neu gegründeten Center for Humans and Machines in Berlin betrachten wir intelligente Maschinen nicht als technische Artefakte und passive Objekte, sondern als Akteure mit autonomen Verhaltensmustern. Das Forschungsgebiet Maschinen-

verhalten überschneidet sich zwar mit der Informatik und der Robotik, wendet darüber hinaus jedoch Konzepte und Methoden aus der Verhaltensforschung auf intelligente Maschinen an.

Der Schwerpunkt liegt hierbei auf zwei Hauptaspekten: Wie verhalten sich intelligente Maschinen und welche Auswirkungen haben die Interaktionen zwischen Maschinen und Menschen? Und: Wie nehmen Menschen das Verhalten von Maschinen wahr und wie beeinflusst diese Wahrnehmung sowohl ihre Erwartungen und ihr Urteil über die Handlungen der Maschinen als auch ihr eigenes Verhalten?

## Korumpieren Maschinen die Moral?

Eine zentrale Frage ist, wie intelligente Maschinen die menschliche Moral beeinflussen. Es gibt die Sorge, dass intelligente Maschinen Menschen dazu verleiten könnten, ethische Regeln zu brechen und verstärkt eigennützig zu handeln. Wir haben die Stichhaltigkeit dieser Befürchtung analysiert, indem wir die verfügbaren Erkenntnisse aus der Verhaltensforschung, aus Mensch-Computer-Interaktionen und aus der KI-Forschung in einem Reviewartikel zusammengefasst haben. Die Untersuchung zeigt: Das Risiko, dass Maschinen die menschliche Moral korumpieren, hängt entscheidend davon ab, welche Rollen diese Maschinen in der Gesellschaft haben.



Excel



Replika  
Cogito



Bei einigen Rollen scheint man sich momentan keine Sorgen machen zu müssen. Die empirischen Belege deuten beispielsweise nicht darauf hin, dass Menschen unmoralisches Verhalten von KI-Vorbildern blind kopieren – etwa Kinder, die ihre intelligenten virtuellen Assistenten nachahmen. Solche Risiken könnten allerdings in der Zukunft durchaus noch entstehen, wenn die Technologien ausgefeilter werden. Wirklich Grund zur Sorge gibt es aktuell, wenn intelligente Maschinen andere Funktionen übernehmen, zum Beispiel als Berater – wie die KI-basierte Chatbot-App Replika, bei der bereits heute Millionen von Menschen privat um Rat fragen. Eine ähnliche Funktion könnte künftig die sprachgesteuerte persönliche Assistentin Alexa einnehmen, die schon jetzt einen festen Platz in über 100 Millionen Haushalten hat. Amazons leitender Wissenschaftler, Rohit Prasad, plant, dass sich Alexas Rolle wandeln soll „von einer Assistentin hin zu einer Beraterin“. Auch im Beruf existieren immer mehr KI-Beratungen: So folgen Vertriebsmitarbeitende in Callcentern KI-generierten Empfehlungen von Anbietern wie Cogito und Gong.io. Wenn es weiterhin keinerlei Regulierung gibt, könnten solche Formen der Beratung unmoralische Verhaltens-

Die Ergebnisse zeigen, dass die Beteiligten häufig Ratschläge ignorierten, die ihnen ehrliches Verhalten ans Herz legten. Anders verhielt es sich hingegen mit der Empfehlung, sich unehrlich zu verhalten und dafür einen Gewinn einzustreichen: Dieser Rat wurde von vielen bereitwillig befolgt. Auffallend ist, dass es keinen Unterschied machte, ob der Rat von einem Mitmenschen stammte oder von einem Algorithmus autonom generiert wurde. Selbst wenn man die Leute darüber informierte, dass ein Algorithmus und nicht ein Mensch sie beriet, verringerte sich dieser negative Einfluss nicht.

## KI kann auch positiven Einfluss haben

Abschließend ist anzumerken, dass intelligente Maschinen – wie wohl alle technologischen Innovationen – mehreren Zwecken dienen können. Zwar können KI-generierte Ratschläge Menschen negativ beeinflussen oder sogar korrumpieren. Es ist jedoch ebenso plausibel, dass Algorithmen in anderem Kontext dazu dienen können, ethisches Verhalten zu fördern, Einsamkeit zu reduzieren oder ein Gefühl der Zugehörigkeit zu schaffen. Unsere Verhaltensforschung an Maschinen soll dazu beitragen, den Schaden, den KI anrichten kann, möglichst gering zu halten und die positiven Seiten zu stärken. o

## Ein elektronisches Verkaufsberatungssystem kann autonom zu dem Schluss kommen, dass sich Betrug auszahlt.

weisen fördern. So kann beispielsweise ein KI-basiertes Verkaufsberatungssystem autonom zu dem Schluss kommen, dass sich betrügerische Strategien auszahlen, und anschließend solche Strategien vermehrt vorschlagen. Eine großangelegte Onlinestudie mit mehr als 1500 Teilnehmenden bestärkt diese Bedenken. In dem Experiment erhielten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer kurze schriftliche Empfehlungen, wie sie sich in einem ethischen Dilemma verhalten sollen. Dabei mussten sie entscheiden, ob sie ethische Regeln einhalten und die Wahrheit sagen oder ob sie lügen, um finanziell zu profitieren.

## 8

# Karambolagen im künstlichen Sternhaufen

**FRANCESCO  
PAOLO RIZZUTO,  
THORSTEN NAAB**

↳ *Max-Planck-Institut  
für Astrophysik,  
Garching*

Alle bekannten schwarzen Löcher gehören zwei getrennten Gruppen an: So existieren stellare schwarze Löcher, die bis zu mehrere Dutzend Sonnenmassen beinhalten, und supermassereiche Exemplare mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Vermutlich gibt es aber auch mittelschwere schwarze Löcher. Wir haben mithilfe von Computersimulationen herausgefunden, dass diese Population durch Zusammenstöße von Sternen und stellaren schwarzen Löchern in extrem dichten Sternhaufen des frühen Universums heranwachsen konnte.

**J**ulius Robert Oppenheimer entdeckte in den 1930er-Jahren, wie ein schwarzes Loch entsteht: Wenn ein großer, massereicher Stern am Ende seines Lebens den Brennstoff in seinem Innern verbraucht hat, setzt die Energieerzeugung aus. Der Kernbereich bricht daraufhin in sich zusammen, während die äußere Gashülle abgesprengt wird und als Supernova hell aufleuchtet. Wenn der Zentralteil mehr als etwa zweieinhalb Sonnenmassen schwer ist, kann nichts der Kraft der wachsenden Schwerkraft Einhalt gebieten: Der kollabierende Stern schnurrt theoretisch bis auf einen Punkt zusammen. Der Raum schließt sich gewissermaßen um ihn und bildet eine Falle, aus der nichts entweichen kann, nicht einmal Licht. Ein stellares schwarzes Loch ist geboren.

Bis zu den ersten Gravitationswellen-Messungen vor wenigen Jahren konnten mit ausgeklügelten Methoden rund 20 schwarze Löcher in unserer Milchstraße „gewogen“ werden. Sie rangieren in einem Bereich von etwa 2,5 bis 15 Sonnenmassen. Gleichzeitig sitzen in den Zentren von Galaxien supermassereiche schwarze Löcher. Für die Untersuchung eines solchen vier Millionen Sonnenmassen schweren Objekts im Herzen unserer Milchstraße wurden Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik und seine amerikanische Kollegin Andrea Ghez von der University of California mit dem Physik-Nobelpreis 2020 ausgezeichnet.

Es gibt mehrere Gründe, die für die Existenz einer dritten Gruppe, nämlich die der mittelschweren schwarzen

Löcher, sprechen. So haben die beiden Gravitationswellen-Detektoren Ligo in den USA und Virgo in Italien zwei schwarze Löcher mit jeweils 85 und 66 Sonnenmassen beobachtet. Deren Existenz lässt sich mit der klassischen Theorie nicht erklären. Außerdem wirft die Beobachtung von Milliarden von Sonnenmassen schweren schwarzen Löchern nicht einmal eine Milliarde Jahre nach dem Urknall bisher ungeklärte Fragen über deren Geburt auf. Gibt es vielleicht mittelschwere schwarze Löcher als Vorgänger, die auf einem nicht-klassischen Weg entstehen konnten?

## Simulationen auf Supercomputern

Junge, massereiche Sternhaufen könnten die Wiege dieser hypothetischen Population sein. In solchen Ansammlungen sind Sterne mehrere Millionen Mal dichter gepackt als in unserer galaktischen Nachbarschaft. Deshalb können darin Sterne und bereits gebildete stellare schwarze Löcher miteinander kollidieren und zu größeren Körpern heranwachsen. Zu welchen Wechselwirkungen es zwischen den Mitgliedern solcher Verbände kommen kann, haben wir zusammen mit einem internationalen Team mittels Simulationen auf Supercomputern untersucht.

Wir starteten mit 110.000 Simulationsteilchen, die jungen Sternen in einem Haufen mit einem Radius von etwa drei Lichtjahren entsprachen. Die Population besaß eine chemische Zusammensetzung, wie man sie für das

frühe Universum annimmt, und deckte einen Bereich von 0,08 bis 100 Sonnenmassen mit den entsprechenden bekannten Häufigkeiten ab; zehn Prozent davon befanden sich in Doppelsystemen. Die virtuellen Sterne entwickelten sich dann nach bekannten Modellen, das heißt, je massereicher einer war, desto kürzer war seine Lebensdauer. Während die schwersten Mitglieder bereits nach wenigen Millionen Jahren als Supernova explodierten und zu stellaren schwarzen Löchern zusammenbrachen, lebten die leichteren wesentlich länger.

Gleichzeitig verfolgten wir, wie sich die Mitglieder des Haufens unter dem Einfluss der Schwerkraft bewegten, wobei es immer wieder zu Zusammenstößen kam. Zusätzlich zu den Wechselwirkungen der Sterne berücksichtigten wir auch das Abstrahlen von Gravitationswellen von zwei sich umkreisenden schwarzen Löchern, was letztendlich zum Verschmelzen der beiden Körper führte, wie man das mit den Ligo-/Virgo-Gravitationswellen-Detektoren beobachtet.

## Schwarze Löcher wachsen heran

Insgesamt ließen wir 80 Simulationen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen über einen Zeitraum von 300 Millionen Jahren laufen. Danach waren alle Sterne mit mindestens acht Sonnenmassen zu schwarzen Löchern kollabiert. Diese extrem genauen Simulationen liefen mit der Software NBODY6++GPU auf den Supercomputern der Max Planck Computing and Data Facility in Garching und JUWELS am Jülich Supercomputing Center.

Tatsächlich bildeten sich in diesen ultradichten künstlichen Sternhaufen mittelschwere schwarze Löcher mit bis zu 350 Sonnenmassen. Dies geschah häufig in mehreren Schritten. Zunächst stießen bevorzugt Doppelsternsysteme zusammen, woraus sehr massereiche Sterne hervorgingen. Diese wiederum kollidierten untereinander und mit den ersten stellaren schwarzen Löchern, die dadurch schwerer wurden. So entstanden im Laufe der Zeit mittelschwere schwarze Löcher. Nach unseren Modellen ist der dominante Prozess für die Bildung dieser Gewichtsklasse von Schwerkraftfallen die Kollision zwischen einem extrem massereichen Stern und einem stellaren schwarzen Loch.

Doch selbst wenn alle massereichen Sterne aus dem Haufen verschwunden sind, können die mittelschweren schwarzen Löcher immer noch mäßig an Masse zunehmen, indem sie mit stellaren schwarzen Löchern und kleineren Sternen kollidieren und verschmelzen. Unsere kompaktesten Modelle registrieren etwa 300 Kollisionen innerhalb von 300 Millionen Jahren, von denen 40 Prozent in den ersten 15 Millionen Jahren stattfanden. In einem Fall verfolgten wir, wie in drei Schritten jeweils zwei schwarze Löcher mit 17 und 28, dann 25 und 45 und schließlich 68 und 70 Sonnenmassen zu einem Riesen mit fast 140 Sonnenmassen verschmolzen. Dies geschah binnen 90 Millionen Jahren – ein Wimpernschlag im gesamten Weltalter

von ungefähr 13,8 Milliarden Jahren. Allerdings geht die Verschmelzungsrate über die Jahrmilliarden zurück, weil die Dichte der Sternhaufen durch verschiedene Vorgänge abnimmt.

Unsere Simulationen berücksichtigen die Gesetze der Sternentwicklung, aber sie können nicht die physikalischen Vorgänge bei einer Kollision im Detail berechnen. Vielmehr müssen wir diese Vorgänge parametrisieren. Insbesondere ist nicht ganz klar, was passiert, wenn ein Stern mit einem schwarzen Loch zusammenstößt. Geht das schwarze Loch leer aus, wenn der Stern in der Kollision zerrissen wird? Oder verschluckt es das Sternmaterial komplett? Um diese Unsicherheit abzuschätzen, ließen wir die Simulationen mit unterschiedlicher „Vertilgungseffizienz“ laufen. Dabei gab es drei Möglichkeiten: Entweder das schwarze Loch verschlang gar keine Materie, 50 Prozent oder den gesamten Stern. Hierbei zeigte sich, dass nur in den beiden letzten Fällen mittelschwere schwarze Löcher entstanden.

Die mit unseren Simulationen berechnete Massenverteilung der verschmelzenden schwarzen Löcher kann die bisherigen Ergebnisse der mit den Ligo/Virgo-Detektoren gemessenen Gravitationswellen-Ereignisse gut erklären. Es gibt darüber hinaus Vermutungen und ein paar wenige unsichere Beobachtungshinweise, dass auch mittelschwere schwarze Löcher mit einigen tausend oder zehntausend Sonnenmassen existieren könnten. Um dies zu überprüfen, wollen wir zukünftig dichte Sternhaufen mit mehreren Millionen Sternen simulieren, in denen dann mehr Karambolagen und Verschmelzungen stattfinden könnten. o

*Virtueller Doppelgänger: Dieser am Computer simulierte kompakte Kugelsternhaufen sieht einem Objekt in der Natur täuschend ähnlich. Die Zentralregion ist so dicht bevölkert, dass Sterne und stellare schwarze Löcher darin zusammenstoßen und miteinander verschmelzen. Auf diese Weise entstehen schließlich eine Reihe von mittelschweren schwarzen Löchern.*



# 9 Patentrechte in pandemischen Zeiten

**RETO M. HILTY,  
SUELEN CARLS,  
DARIA KIM**

↳ *Max-Planck-Institut  
für Innovation  
und Wettbewerb,  
München*

Die Bereitstellung ausreichender Mengen an Impfstoffen gehörte in der Covid-19-Pandemie über Monate hinweg zu den größten Herausforderungen. Während reiche Industriestaaten schon früh riesige Mengen bestellten, litten ärmere Staaten unter eklatanter Unterversorgung. Mehrere von ihnen forderten in der Welthandelsorganisation (WTO) die vorübergehende Aussetzung unter anderem der Patentrechte. Unser Team hat die rechtliche Lage dazu analysiert.

**A**uf den ersten Blick mag der Gedanke einleuchten, den Rechtsschutz auszusetzen, um die Produktion von patentgeschützten Impfstoffen zu beschleunigen. Aus der Nähe betrachtet erweist sich der Fokus auf Patente als Ursache der Impfstoffknappheit in der Covid-19-Pandemie aber als wenig hilfreich und kurzsichtig – nicht zuletzt im Hinblick auf Innovationen, die auch künftig zur Bewältigung gesundheitlicher Herausforderungen notwendig sein werden.

Die Entwicklung von Medikamenten und Impfstoffen ist enorm kostspielig. Die Forschung, aber auch die Marktzulassung erfordern außerdem einen langen Atem der Investoren. Erfolgsgarantien gibt es keine. Gelingt eine Marktzulassung, benötigt ein Unternehmen eine gewisse Zeit, um die Kosten zu amortisieren und grundsätzlich auch etwas zu verdienen – auch wenn in außerordentlichen Situationen wie einer Pandemie abweichende Gesichtspunkte eine Rolle spielen mögen. Patente verschaffen Marktexklusivität, schaffen Rechtssicherheit und sind insoweit Voraussetzung dafür, dass Investitionen überhaupt getätigt werden.

Patente allein reichen freilich nicht aus. Investiert wird nicht, um ein Patent zu erhalten, sondern um Gewinne zu erzielen. Man sollte sich daher nicht der Illusion hingeben, dass marktwirtschaftliche Anreize – für deren Wirkung das Patentrecht freilich eine Schlüsselrolle spielt – sich ohne Weiteres ersetzen lassen. Auch

bei den Covid-19-Impfstoffen wurde der Löwenanteil der Kosten von privater Seite gedeckt. Bereits Jahre vor Ausbruch der Pandemie setzten einzelne Investoren auf das Potenzial der mRNA-Technologien – zu Zeiten, als kein Staat bereit gewesen wäre, ohne sichere Perspektiven auf einen konkreten Nutzen Steuermittel einzusetzen.

## Komplexe Anlagen für die Produktion

Zudem entspricht die Vorstellung, es reiche aus, eine geschützte Technologie nutzen zu dürfen, um die entsprechenden Produkte in ausreichender Anzahl produzieren und verbreiten zu können, in keiner Weise der Realität – insbesondere bei mRNA-Impfstoffen nicht. Bei ihnen handelt es sich um Hightech-Produkte, deren Herstellung nicht in irgendeiner Chemiefabrik möglich ist. Erforderlich sind vielmehr spezielle, hochkomplexe Produktionsanlagen und spezifisch qualifiziertes Personal. Außerdem sind besondere, begrenzt verfügbare Rohstoffe nötig, was das Produktionsvolumen von vornherein faktisch limitiert.

Selbst mit Produktionsstätten in Ländern mit hohem Bedarf wäre es nicht getan. Impfstoffe benötigen dort, wo sie auf den Markt gebracht werden sollen, behördliche Zulassungen. Ungeachtet dessen, ob der Originalhersteller über eine solche verfügt, muss jeder

unabhängige Hersteller selbst nachweisen, dass seine Produkte den Anforderungen genügen. Anders ist dies nur bei einer Produktion unter Lizenz, das heißt mit Zustimmung des Patentinhabers: In diesem Fall erstreckt sich dessen Zulassung auf die so hergestellten Produkte. Mit vertraglichen Lizenzen gehen üblicherweise Wissenstransfers sowie technische Unterstützung einher. All dies spart wertvolle Zeit, die verloren ginge, wenn einzig der Patentschutz ausgesetzt würde.

Der effizienteste Weg liegt folglich in Kooperationen. Die derzeitige Bereitschaft der Pharmaindustrie, Lizenzen selbst an Wettbewerber zu erteilen, ist beispiellos. Genau dafür sind Patente aber unausweichliche Voraussetzung; nur sie erlauben es, rechtssicher zu vereinbaren, was im Rahmen einer Zusammenarbeit wem erlaubt sein soll. Entfielen diese Möglichkeit bei einem Aussetzen von Schutzrechten, würde die jetzige Kooperationsbereitschaft sofort erlahmen. Mangels Unterstützung durch die Patentinhaber könnten dann sogar mangelhafte, nicht wirksame Impfstoffe auf den Markt kommen. Damit wäre niemandem geholfen.

Der Vorschlag auf Aussetzung unter anderem von Patentrechten richtet sich gegen die grundsätzliche Verpflichtung der Mitgliedstaaten der Welthandelsorganisation (WTO), im Rahmen ihrer nationalen Gesetzgebung die im sogenannten TRIPS-Abkommen vorgesehenen Mindestschutzstandards einzuhalten. Allerdings erlaubt es jenes Abkommen den Mitgliedstaaten schon heute, Dritten unter gegebenen Voraussetzungen auch gegen den Willen der betroffenen Rechteinhaber gewisse Nutzungen zu erlauben. Vor allem können sie Zwangslizenzen für Patente erteilen, wobei jedes einzelne Land diese Möglichkeit in seinen nationalen Gesetzen genauer konkretisieren kann.

## Ein flexibler Rechtsrahmen

Dies hilft natürlich primär dann, wenn es überhaupt lokale Unternehmen gibt, die in der Lage sind, die erforderlichen Produkte herzustellen, was aber auch beim Aussetzen von Schutzrechten nicht anders ist. Ist diese Voraussetzung erfüllt und verweigert ein Patentinhaber einem Unternehmen die Lizenzerteilung in ungerechtfertigter Weise, kann das Unternehmen vor nationalen Gerichten eine Nutzungserlaubnis einklagen. Das kann allerdings kostspielig und zeitraubend sein. Den Mitgliedstaaten steht es daher auch frei, lokalen Industrien direkt Nutzungsrechte zu erteilen, ohne dass jene prozessieren müssen. Damit lassen sich ganze Patentgruppen erfassen, womit ähnliche Wirkungen erzielt werden können wie mit der vorgeschlagenen Aussetzung des Patentschutzes.

Dem internationalen Rechtsrahmen mangelt es also nicht an Flexibilität. Das Problem dürfte eher darin liegen, dass das nationale Recht in etlichen Staaten nicht angemessen ausgestaltet wurde, um den außergewöhnlichen Umständen einer Pandemie Rechnung zu tragen. Würde das rasch nachgeholt, dürfte alleine dies Patentinhaber motivieren, vertragliche Lizenzen zu erteilen, um Zwangsmaßnahmen und damit einen Kontrollverlust zu vermeiden.

Hinweis: Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Beitrags zeichnete sich eine Einigung der Mitgliedstaaten der WTO ab. Danach sollen die im TRIPS-Abkommen enthaltenen Möglichkeiten zur Nutzung von Impfstoffpatenten zeitlich befristet erweitert werden. Zudem sollen sie unter gewissen Bedingungen auch dann erlaubt werden können, wenn das nationale Recht dies nicht explizit vorsieht. o

*Patente schaffen Rechtssicherheit und sind insofern eine Voraussetzung dafür, dass Investitionen in die Entwicklung von Impfstoffen und Medikamenten überhaupt getätigt werden.*



**PATENTED**



# 10 Kontakte in der Leber

**MERITXELL HUCH,  
LUCÍA CORDERO-  
ESPINOZA,  
ANNA M. DOWBAJ**

↳ *Max-Planck-Institut  
für molekulare Zellbiologie  
und Genetik, Dresden*

Damit sich Körpergewebe erneuern kann, müssen sich Zellen ausreichend vermehren. Bei unkontrolliertem Wachstum entsteht jedoch Krebs, bei zu geringem Wachstum kann das Gewebe unter Umständen nicht mehr richtig funktionieren. Durch die Untersuchung der von uns entwickelten Leber-Organotide haben wir herausgefunden, wie die Zellen dieses feine Gleichgewicht beibehalten.

**D**ie Leber ist ein faszinierendes Organ: Selbst nach größeren Verletzungen kann sie sich nahezu vollständig regenerieren. Bereits die Griechen in der Antike wussten von dieser Fähigkeit: Die Sage des Prometheus erzählt, wie dessen Leber trotz täglicher Angriffe durch einen Adler unermüdlich nachwächst, bis ihn der Held Herakles endlich rettet.

Ganz gleich, ob Moleküle, Gewebe oder Organe – all diese Ebenen müssen sich erneuern, damit der Aufbau und die Funktion wiederhergestellt werden können. Bei Geweben, die sich laufend erneuern, wie dem Darmepithel oder der Haut, sind die Zellprogramme für Wachstum und Reifung immer aktiv. Die meisten Gewebe befinden sich jedoch in einem „ruhenden“ Zustand. Um Schäden zu reparieren, wird zunächst das Regenerationsprogramm eingeschaltet. Anschließend können die Gewebe wieder in den Ruhezustand zurückkehren.

Die Leber ist ein hervorragendes Modell für die Geweberegeneration bei Säugetieren. Die kompliziert aufgebauten Leberläppchen bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Zelltypen. Neben den eigentlichen Leberzellen enthält das Gewebe winzige Gallenröhrchen, die von Lebergangzellen ausgekleidet sind. Diese Zellen

wiederum arbeiten mit unterstützenden Zelltypen des Bindegewebes zusammen. In den Leberläppchen bestehen also über die gesamte Lebensspanne des Organismus vielfältige Wechselwirkungen zwischen gleichen und unterschiedlichen Zellen.

## Gestörte Zusammenarbeit

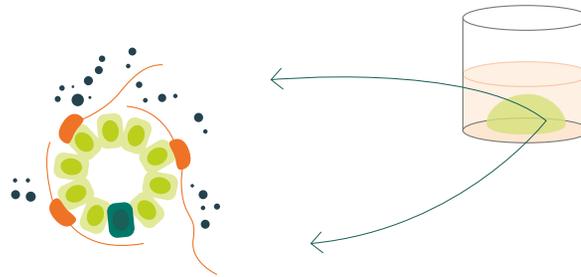
Bei Schäden, zum Beispiel durch Giftstoffe, werden diese Wechselwirkungen zwischen den Zellen gestört. Bei chronisch Schädigungen wie Drogen- oder Alkoholmissbrauch entsteht ein funktionsuntüchtiges Gewebe, das durch eine Verhärtung des Bindegewebes vernarbt oder sich unbegrenzt vermehrt und Krebs entwickelt. Die dafür verantwortlichen Mechanismen, insbesondere der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Zelltypen, sind bisher jedoch kaum verstanden.

Unsere Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik arbeitet mit einem mehrstufigen und interdisziplinären Ansatz. Uns interessiert vor allem, welche Mechanismen die Erneuerung von Geweben steuern. Dabei ist es leider un-



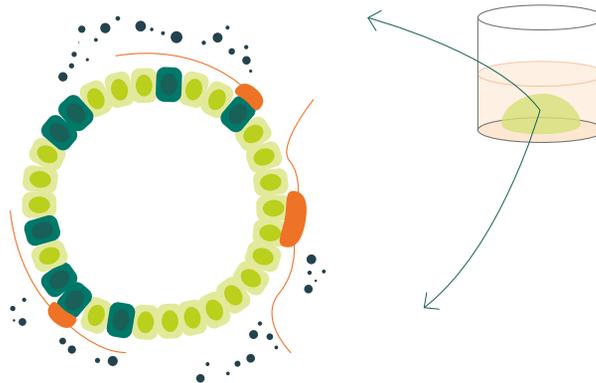
**IN VITRO**

Verhältnis 1:3



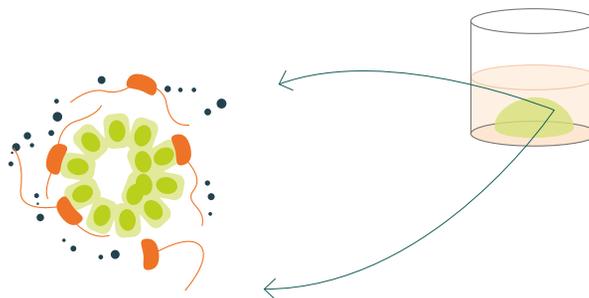
*Oben: Kommt in einer Zellkultur eine Bindegewebszelle (rot) auf drei Lebergangszellen (grün), wird fast jede Gang- von einer Bindegewebszelle kontaktiert. Die Gangzellen befinden sich dann wie in einer gesunden Leber im Ruhezustand (hellgrün).*

Verhältnis 1:10



*Mitte: Ein geringeres Verhältnis von 1:10 entspricht dem in einer geschädigten Leber. Unter diesen Bedingungen vermehren sich die Gangzellen (dunkelgrün) und die meisten von ihnen verlieren den Kontakt zu einer Bindegewebszelle.*

Verhältnis 1:2



*Unten: Bei einem höheren Verhältnis von 1:2 hören die Gangzellen auf sich zu vermehren. Einige der Zellen werden sogar ins Innere des Leberganges abgestoßen, sodass der Gang wieder kleiner wird und die Zellen in ihren Ruhezustand zurückkehren. Dies entspricht dem Zustand in einer Leber nach Ausheilung einer Verletzung.*

möglich, diese zellulären Wechselbeziehungen und ihre Dynamik direkt im lebenden Tier zu erforschen. Wir müssen deshalb zumindest einen Teil der Wechselwirkungen in einer Petrischale nachahmen.

Vor zehn Jahren haben wir die ersten dreidimensionalen Kulturen von Lebergewebe entwickelt. Diesen fehlte allerdings noch das Bindegewebe. Zusammen mit Kolleginnen und Kollegen an der Universität Cambridge haben wir die Kulturen nun so weit verbessert, dass sie auch Bindegewebe enthalten. Diese sogenannten Leber-Organoide bilden sowohl die Gewebearchitektur als auch die Wechselbeziehungen der Lebergang- und Bindegewebszellen in der Petrischale nach.

Um die Zellen miteinander in Kontakt zu bringen, arbeiten wir mit semi-flüssigen Hydrogelen. Mithilfe der sogenannten Mikrofluidik-Technik kapseln wir die Zellen in zahlreiche winzige Hydrogel-Tröpfchen ein. Im begrenzten Innenraum der Tröpfchen stellen die Zellen die typischen Zellkontakte her – eine Voraussetzung für die Gewebeentwicklung in der Petrischale. Mittlerweile haben wir unsere Leber-Organoid-Kulturen so verfeinert, dass sich weitere Zelltypen einbinden lassen und komplexe Mikrostrukturen entstehen. Diese können wir lebend unter dem Mikroskop untersuchen und damit die Abläufe direkt und in Echtzeit beobachten.

Zu unserer Überraschung haben wir beim erstmaligen Filmen der Wechselwirkungen ein völlig unerwartetes Verhalten des Organoid-Gewebes entdeckt: Bei Berührung mit Bindegewebszellen schrumpfte es, wuchs aber, wenn kein Kontakt bestand. Dieses paradoxe Verhalten hatten wir nicht erwartet – und doch entspricht

es der Reaktion von verletztem Gewebe nach einer Schädigung. Unsere Hoffnung war, dass uns die Zellkontakte einen Hinweis darauf geben könnten, warum das Gewebe während des Regenerationsprozesses entweder wächst oder aufhört zu wachsen. In unseren Organoiden konnten wir die Kontakte zwischen den Zellen erstmals sichtbar machen. Dabei stellten wir fest, dass nicht die Anzahl von Lebergang- und Bindegewebszellen darüber entscheidet, wie viele Zellen zur Reparatur des beschädigten Gewebes produziert werden, sondern vielmehr die Anzahl ihrer Kontakte untereinander.

## Anzahl der Zellkontakte steuert Reparatur

Im intakten Gewebe halten die Bindegewebszellen das Lebergewebe offenbar im Ruhezustand. Eine bestimmte Anzahl von Kontakten zwischen den Zelltypen signalisiert den Lebergangzellen, dass sie sich nicht vermehren, sondern einfach so bleiben, wie sie sind. Bei einer Verletzung vermehren sich zuerst die Gangzellen. Dadurch verringert sich die Zahl der Zellkontakte mit dem benachbarten Bindegewebe. Ist die Verletzung verheilt, vermehren sich die Bindegewebszellen, bis die ursprüngliche Anzahl von Kontakten wiederhergestellt und der Schaden behoben ist. Mehr Berührungen durch Bindegewebszellen bewirken wiederum, dass weniger oder keine neuen Lebergangzellen gebildet werden – die Zellvermehrung stoppt.

Diese Steuerung könnte von entscheidender Bedeutung sein, denn ein fehlendes Stoppsignal für die Gangzellen würde zu Krebs führen. Vermehren sich wiederum die Bindegewebszellen ungebremst, können Narben und eine Leberzirrhose die Folge sein.

Bislang konzentrierte sich unsere Forschung auf die Wechselwirkungen zwischen den Zellen in der Leber. Wir möchten aber darüber hinaus die grundlegenden Prinzipien verstehen, welche die Vermehrung und Reifung von Zellen in Organen und Geweben bestimmen. Die von uns beobachteten Mechanismen könnten auch in anderen Geweben wirken, wie beispielsweise im Lungen- oder Brustgewebe. Auch diese reagieren auf chronische Schädigung mit zu geringer oder übermäßiger Zellteilung, sodass entweder eine Fibrose oder Krebs entsteht.

Organoiden bieten eine einzigartige Möglichkeit, die Entwicklung menschlicher Organe in einem System zu nachzustellen, das der natürlichen Entwicklung bemerkenswert ähnlich ist. Daher wollen wir in Zukunft auch Organoiden mit anderen Zelltypen entwickeln. Unser langfristiges Ziel ist es, die Regenerationsfähigkeit von Geweben zu aktivieren oder zu verbessern. Dies könnte die Grundlage dafür zu schaffen, Krankheiten zu lindern. o

**Organoiden bieten eine einzigartige Möglichkeit, die Entwicklung menschlicher Organe nachzustellen.**

# 11 Optischer Datenverkehr in der Cloud

YITING XIA

Max-Planck-Institut  
für Informatik,  
Saarbrücken

Die meisten Onlinedienste werden heute in Cloud-Rechenzentren betrieben, in denen die Anwendungen auf vielen Servern ausgeführt werden. Optischer Datenverkehr zwischen diesen Servern könnte die Arbeit der Rechenzentren effizienter machen. Wir entwickeln Software, um die dafür nötigen optischen Schalter, die prinzipiell anders arbeiten als die gängigen elektronischen Schalter, in die Rechenzentren zu integrieren. Darüber hinaus testen wir die optischen Schalter und die Software in einer realen Umgebung.

**S**uchmaschinen, soziale Netzwerke, Online-shopping oder Videostreaming – fast alle Onlinedienste, die wir heute nutzen, werden in Cloud-Rechenzentren auf der ganzen Welt gehostet. Für diese Dienste sind anspruchsvolle Berechnungen nötig, welche die Rechenleistung eines einzelnen Computers weit übersteigen. Daher arbeiten in den Rechenzentren Hunderttausende von Computerservern, die koordiniert werden müssen. Ein leistungsfähiges Netz, das so genannte Rechenzentrumsnetzwerk, verbindet die Server miteinander, um zwischen diesen eine Datenkommunikation in Hochgeschwindigkeit zu ermöglichen.

Das Netz eines Rechenzentrums ist dabei mit einem Autobahnnetz vergleichbar. In dieser Analogie entsprechen die Server Städten, die Netzverbindungen den Autobahnen, die elektrischen Netzschalter den Verbindungspunkten zwischen den Autobahnen und die über die Netzverbindungen übertragenen Daten dem Verkehr auf den Autobahnen. Die Schalter steuern den Datenaustausch, um Verzögerungen bei der Datenver-

arbeitung etwa durch Staus in den Verbindungen zu vermeiden.

Da der jährliche Datenverkehr mit der wachsenden Zahl von Benutzern und Diensten exponentiell zunimmt, werden die Netzwerke der Rechenzentren ständig mit Servern, Netzwerkverbindungen und Netzwerkschaltern erweitert, um mehr Bandbreite zu ermöglichen. Dafür war in den vergangenen zehn Jahren entscheidend, dass sich die Bandbreite elektronischer Schalter alle zwei Jahre bei gleichen Kosten und gleichem Stromverbrauch verdoppelt hat. In jüngster Vergangenheit erweiterte sich die Bandbreite elektronischer Schalter jedoch langsamer, sodass die Schalter bei der Weiterentwicklung von Rechenzentrumsnetzen zum Engpass wurden. Dieses Problem ließe sich durch optische Netzwerke mit optischen Schaltern lösen, die deutlich leistungsfähiger und energieeffizienter sind als elektronische Schalter und auch einen kostengünstigeren Betrieb der Rechenzentren erlauben. In der Forschungsgruppe für Cloud- und Netzwerksysteme am Max-Planck-Institut für

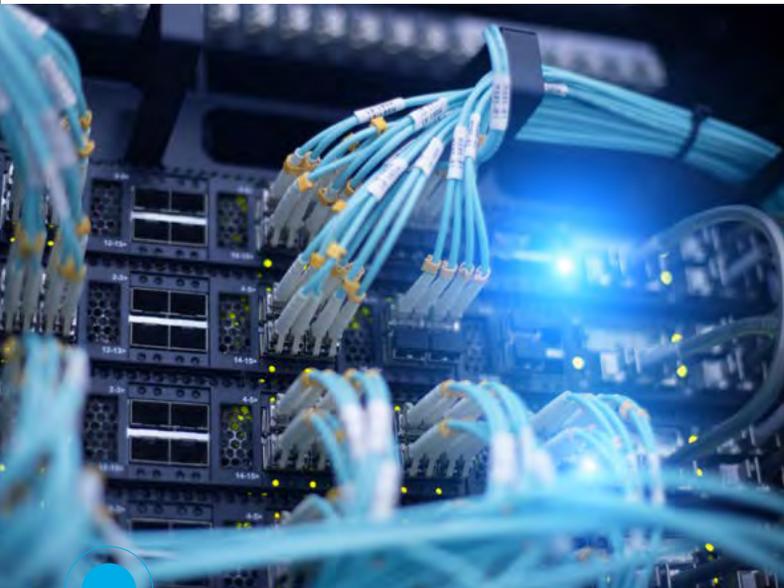


Informatik erforschen wir, wie sich in Rechenzentren ein optischer Datenverkehr realisieren lässt und vor allem, wie die Datenverarbeitung an die besonderen Eigenschaften optischer Schalter angepasst werden muss. So wollen wir dazu beitragen, dass die wachsende Nachfrage nach Cloud-Diensten auch künftig bedient werden kann.

Heute gibt es bereits die Komponenten für optische Rechenzentren, die Daten mit Raten von 400 Gigabit pro Sekunde zwischen den Servern hin und her schicken. Das ist 8000-mal schneller als das typische DSL-Internet mit 50-Megabit pro Sekunde zu Hause! Auch optische Schalter gibt es schon. Dabei handelt es sich um passive Geräte, die im Betrieb nur wenig Strom verbrauchen. Sie funktionieren prinzipiell anders als elektronische Schalter: Diese erlauben es, dass die zur Verfügung stehende Bandbreite von verschiedenen Datenpaketen gleichzeitig genutzt werden kann, und greifen ordnend ein, wenn sich der Datenverkehr staut. Elektrische Schalter übernehmen für den Datenverkehr also eine ähnliche Rolle wie Polizisten, die mancherorts den Verkehr auf überfüllten Straßen regeln und bestimmen, wer wann fahren und wann stoppen muss. Optische Schalter arbeiten dagegen ganz anders: Sie weisen jedem Datenpaket ein genaues Zeitfenster zu, in dem es eine Netzwerkverbindung exklusiv nutzen kann. Das ist so, als könnte man im Straßenverkehr auf einer Privatspur fahren, die man ganz für sich allein hat, aber nur in einem zugewiesenen Zeitraum. So unflexibel, wie es klingt, wird der Zeitplan allerdings nicht gehandhabt. Es gibt vielmehr dynamische Zeitpläne, die Datenpaketen auch kurzfristig eine freie Passage über eine Netzwerkverbindung reservieren.

### Keine Begrenzung der Bandbreite

Die Eigenschaften optischer Schalter bringen viele Vorteile mit sich. Sie haben anders als elektronische Schalter keine Bandbreitenbegrenzung, und ihre Kapazität wird allein durch die Sendegeschwindigkeit der angeschlossenen Server bestimmt. Das entspricht einer nie überfüllten Autobahn, die den Verkehr so schnell fließen lässt, wie die Autos fahren können. Zudem können an optische Schalter mehr Server angeschlossen werden als an herkömmliche elektrische Schalter, sodass die Kosten für den Anschluss jedes Servers niedriger sind. Wie jüngste Studien zeigen, können optische Rechenzentrumsnetzwerke etwa 50 Prozent der Kosten und 75 Prozent des Stromverbrauchs einsparen.

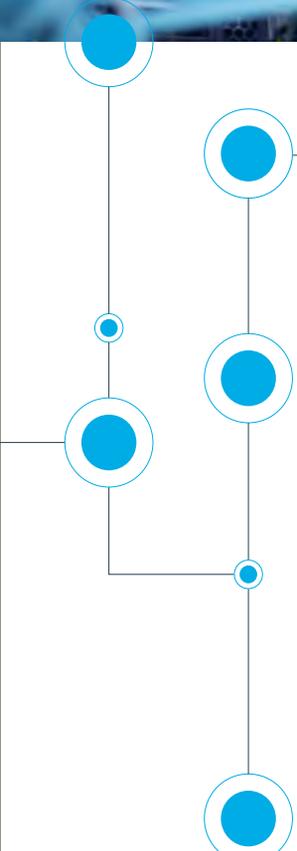


*Durch optische Kommunikation zwischen Servern könnten Cloud-Rechenzentren Daten effizienter verarbeiten. Dafür entwickeln Max-Planck-Forschende die passende Software.*

Um unsere Software und die Funktion optischer Rechenzentrumsnetze unter realen Bedingungen zu testen, bauen wir zudem ein optisches Netz auf, in dem auch Server integriert sind. Da diese bei Tests bislang nicht einbezogen werden, sind viele potenzielle Probleme noch unbekannt. Damit wollen wir ein „Henne-Ei“-Dilemma auflösen: Ohne vollständige Tests werden sich Cloud-Anbieter nicht davon überzeugen lassen, optische Rechenzentrumsnetze einzusetzen. Doch ohne einen Einsatz unter realen Bedingungen können viele praktische Probleme nicht aufgedeckt werden, sodass sich die Technik nicht verbessern lässt.

## Software als Open Source Code

Sobald sich optische Rechenzentrumsnetze unter realen Bedingungen bewährt haben, werden Cloud-Anbieter sie vermutlich schrittweise einführen. Optische Komponenten müssen sich daher zunehmend in bestehende Netzwerkhardware integrieren lassen; optische Komponenten müssen also trotz ihrer prinzipiell unterschiedlichen Funktionsweise gemeinsam mit elektronischer Hardware betrieben werden können. Daher erforschen wir zum einen die grundlegenden Prinzipien optischer Rechenzentrumsnetzwerke und passen die Kommunikationssoftware an die Erfordernisse heutiger Netzwerkhardware an, um deren Leistung zu maximieren. Zum anderen binden wir diese Änderungen in die vorhandenen Server ein, um sie an die neue optische Netzwerkinfrastruktur anzupassen. Wenn die beiden Seiten zusammentreffen, werden wir unser Softwaresystem als Open Source Code zur Verfügung stellen, um es Cloud-Anbietern und akademischen Forschungsgruppen zu ermöglichen, optische Rechenzentrumsnetzwerke in der praktischen Anwendung und im Labor aufzubauen. Auf diese Weise werden mehr Probleme zutage treten und neue Erkenntnisse gewonnen, mit denen sich die Technik mit der Zeit weiter optimieren lässt. o



Darüber hinaus sind optische Rechenzentren in hohem Maße erweiterbar. Und im Idealfall sind sie sehr flexibel. Denn optische Schalter können Schaltkreise nach Bedarf aufbauen, und zwar dort, wo die Datenübertragung benötigt wird. Stellen Sie sich ein flexibles Autobahn-system vor, bei dem die Straßen beliebig verlegt werden können. In einigen unserer Arbeiten haben wir uns diese Eigenschaft zunutze gemacht, um die Leistung des Netzes zu verbessern: Während der Hauptverkehrszeit können nicht ausgelastete Straßen an eine überlastete Stelle verlegt werden, um den Datenverkehr zu beschleunigen. Und auch wenn eine Straße kaputt ist, können dorthin ungenutzte Straßen verlegt werden, anstatt die Autos zu zwingen, Umwege zu fahren.

Optische Netzwerke in Rechenzentren bringen allerdings nicht nur viele Vorzüge, sondern auch grundlegende Veränderungen bei der Datenübertragung mit sich. Denn die exklusiven Verbindungen zwischen Datensender und -empfänger machen die herkömmlichen Netzkonzepte, die auf eine gemeinsam genutzte Bandbreite ausgelegt sind, für optische Rechenzentrumsnetze unbrauchbar. Wir entwickeln Software für die Netzwerkverbindungen, die nach Bedarf geknüpft werden. Konkret untersuchen wir, wie die Server im gesamten Netz koordiniert werden können, um zu wissen, wann sie mit wem und wie lange sprechen können. Das ist genauso schwierig, wie allen Autofahrern in einer Stadt einen Fahrplan mitzuteilen und sicherzustellen, dass ihre Uhren genau gleich gehen.

# 12 Sind Organisationen offen für Diversität?

**SANJA BÖKLE,  
KAREN  
SCHÖNWÄLDER**

↘ *Max-Planck-Institut  
zur Erforschung  
multireligiöser und  
multiethnischer  
Gesellschaften,  
Göttingen*

Die Repräsentation von Eingewanderten in der deutschen Gesellschaft ist ein umkämpftes Feld. Ausgrenzung und Diskriminierung werden immer weniger als normal hingenommen. Doch in welchem Maß waren und sind wichtige zivilgesellschaftliche Organisationen bereit und in der Lage, die Interessen der migrantischen Bevölkerung aufzugreifen, sich für diese zu öffnen und gleichberechtigte Mitgestaltung zu gewährleisten? Diesen Fragen sind wir in einem Forschungsprojekt nachgegangen.

In unserer Gesellschaft gibt es eine Fülle von Organisationen, die sich für bestimmte Interessen und Anliegen einsetzen. Egal, ob es um Klimaschutz, die Rechte von Patientinnen und Patienten, die Interessen von Mieterinnen und Mietern oder von Kulturschaffenden geht – zivilgesellschaftliche Organisationen mischen sich in gesellschaftliche Diskussionen ein, um die Interessen ihrer Mitglieder zur Geltung zu bringen. Wie reagieren solche Organisationen darauf, dass sich die Gesellschaft durch Migration wandelt? Reagieren sie offen? Abwehrend? Proaktiv? Verändern sich die Organisationen überhaupt?

Diese Fragen haben wir gemeinsam mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Ludwig-Maximilians-Universität München und der Humboldt-Universität Berlin in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekt ZOMiDi untersucht. Unser Forschungsteam hat sich dazu beispielhaft die Lebenshilfe, die Vereinte Dienstleistungsgewerkschaft Verdi, den Lesben- und Schwulenverband in Deutschland sowie die Deutsche Aidshilfe angesehen – also Organisationen, welche die Interessen von Menschen mit einer Behinderung, von Beschäftigten in Dienstleistungsberufen, von sexuellen und geschlechtlichen Minderheiten und von aufgrund einer Krankheit potenziell diskriminierten Menschen vertreten.

Zivilgesellschaftliche Organisationen sind gewissermaßen ein Netzwerk, das die Zivilgesellschaft organisiert und mit der Politik verbindet. Damit haben sie eine zentrale Bedeutung für Demokratie und Gesellschaft. Von ihnen hängt es mit ab, welche Anliegen und Interessen in Gesellschaft und Politik gehört und zum Beispiel in öffentlichen Förderprogrammen und Gesetzen berücksichtigt werden. Tritt zum Beispiel eine Organisation für Behindertenrechte auch dafür ein, dass die Interessen von Geflüchteten mit einer Behinderung berücksichtigt werden? Sorgt eine Lesben- und Schwulenorganisation dafür, dass es Beratung und Hilfe gibt, die auch Menschen mit Migrationsgeschichte erreicht? Wer redet eigentlich mit in diesen Organisationen und legt fest, welche Kampagnen gestartet, welche Hauptforderungen gestellt werden? Sind die Mitglieder, die Angestellten, die Vorstände so divers wie unsere Gesellschaft?

## Minderheiten sind unterrepräsentiert

Um diese Fragen zu beantworten, rekonstruierten wir im Projekt mithilfe von Dokumentenanalysen und Interviews detailliert die Entwicklung der vier Organisationen. Festgestellt wurde, dass alle vier prinzipiell offen dafür sind, Eingewanderte aufzunehmen und zu vertreten. Das



## Ein Selbstverständnis, das Einheit und Gemeinsamkeit betont, erschwert die Anerkennung von Differenz.

gilt sicher nicht für alle zivilgesellschaftlichen Organisationen in Deutschland. Wir haben bewusst Organisationen untersucht, die selbst eine benachteiligte Gruppe vertreten und daher sensibel sein sollten für andere Benachteiligungen, etwa solche, die mit Migrationsprozessen und Rassismus zusammenhängen.

Aber auch diese Organisationen haben sich nicht kontinuierlich darum bemüht, Menschen mit Migrationsgeschichte zu gewinnen. Nicht überall gibt es Abteilungen oder Verantwortliche, die dafür sorgen könnten, dass die Anliegen von Menschen mit Migrationsgeschichte kontinuierlich und wirkungsvoll in die Arbeit eingebracht werden. Und wenn vorhanden, sind sie unzureichend ausgestattet.

Haben die Organisationen es geschafft, Menschen mit und ohne Migrationsgeschichte gleichermaßen einzubeziehen? Reden Menschen mit Migrationsgeschichte, Menschen, die vielleicht auch rassistische Diskriminierungen erfahren, gleichberechtigt mit? Diese Frage muss für alle untersuchten Organisationen verneint werden. Migrantinnen und Migranten sind vor allem in Vorständen und meist auch in der Mitgliedschaft unterrepräsentiert. In Interviews und Gruppendiskussionen wurde uns auch von Rassismus und Diskriminierungserfahrungen berichtet.

### Konzepte für mehr Vielfalt fehlen

Keine der Organisationen sammelt systematisch Informationen über ihre Mitgliederstruktur. Soweit von uns feststellbar, sind allenfalls bei der Gewerkschaft Verdi Menschen mit Migrationsgeschichte in gleichem Maße vertreten wie bei den Beschäftigten im Dienstleistungsgewerbe. Bei Verdi sind auch am ehesten Repräsentation und Beteiligung von Mitgliedern mit Migrationsgeschichte formell abgesichert. Keine der vier

Organisationen hat jedoch ein Konzept zur Herstellung von mehr Vielfalt unter ihren Beschäftigten. In manchen Organisationen existieren migrantische Selbsthilfestrukturen, doch die Beteiligungsrechte bleiben bislang informell. Trotz einiger Öffnungsschritte sind also Menschen mit Migrationsgeschichte in den vier Organisationen insgesamt noch unzureichend beteiligt und viel zu wenig in wichtigen Positionen vertreten.

Wovon hängt es ab, ob sich zivilgesellschaftliche Organisationen für Menschen mit Migrationsgeschichte öffnen und sich umfassend in die Gestaltung der vielfältigen Gesellschaft einmischen? Hier knüpfte unser Projekt an Konzepte der institutionalistischen Organisationsforschung an und erweitert diese.

Wie in der institutionalistischen Theorie postuliert, beeinflussen Erwartungen des Umfeldes, des sogenannten „organisationalen Feldes“ das Handeln der Organisationen. Zivilgesellschaftliche Organisationen befinden sich immer in einem Austausch mit anderen Akteuren. Sie wollen beispielsweise auf Regierungen und Parlamente Einfluss nehmen oder Bündnisse schließen, dazu brauchen sie die Anerkennung anderer Akteure. Werden im Umfeld der Organisationen die Förderung migrantischer Teilhabe, die Bekämpfung von Rassismus oder interkulturelle Öffnung zur Norm, dann neigen zivilgesellschaftliche Organisationen zur Anpassung.

### Mitgliederzahlen als starkes Argument

Ein zweiter Faktor sind die Interessen und „funktionalen Erfordernisse“ der Organisation, also Bedingungen, die für die Existenz und die alltägliche Arbeit wesentlich sind. Engagement in Migrationsfragen und eine aktive Einbeziehung von Menschen mit Migrationshintergrund sind dann wahrscheinlicher, wenn dies den Organisationsinteressen entspricht. Dabei sind Mitgliederzahlen ein starkes Argument dafür, neue Mitgliedergruppen zu werben und unter Umständen bestehende Barrieren zu beseitigen.

Weiterhin ist auch das Selbstverständnis der Organisationen wichtig: Offen für Unterschiede sind Organisationen eher, wenn ihr Selbstverständnis Pluralität beinhaltet. Ein Selbstverständnis, das Einheit und Gemeinsamkeit betont, erschwert eine Anerkennung von Differenz und begünstigt eine Vernachlässigung besonderer Anliegen.

Viertens können migrantische Mitglieder und deren Netzwerke eine entscheidende Rolle spielen. Fehlt ihr Druck im Inneren, ist Veränderung weniger wahrscheinlich. Wo Mitglieder mit Migrationsgeschichte präsent sind, können sie mit ihren Erfahrungen wesentliche Anstöße geben und in Netzwerken Druck machen für eine gleichberechtigte Mitsprache. o

# 13 Blutversorgung in künstlichen Geweben

**BRITTA TRAPPMANN**

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

Die Implantation künstlicher Gewebe ist eine Zukunftsvision der Medizin. Für eine erfolgreiche Implantation müssen Blutgefäße in das Gewebe vordringen und es mit Nährstoffen und Sauerstoff versorgen. Wir haben erstmals ein künstliches Gewebemodell entwickelt, in dem Blutgefäße wachsen können.

**T**ausende von Menschen stehen auf Wartelisten für Spenderorgane. Für viele ist eine Transplantation die einzige Chance auf Heilung. Die Zahl der zur Verfügung stehenden Spenderorgane reicht jedoch bei Weitem nicht aus: Nicht einmal die Hälfte der Erkrankten erhält jedes Jahr ein neues Organ.

Daher wird fieberhaft nach Lösungen geforscht. Weltweit arbeiten zahlreiche Labore an der Herstellung künstlicher Ersatzorgane, jedoch sind diese noch weit von einem Einsatz im Körper entfernt. Eine Alternative wäre, die geschädigten Geweberegionen vor Ort durch ein künstliches Gerüst zu ersetzen. Dieses könnte von den Zellen des umliegenden gesunden Gewebes wieder besiedelt und so die natürliche Struktur wiederhergestellt werden.

Dafür würden sich künstliche Materialien besonders gut eignen, da sie anders als natürliche Gewebebestandteile im Körper lange genug stabil bleiben, damit sich Zellen auf ihnen ansiedeln können. Doch mit der Besiedelung alleine ist es nicht getan. Die verwendeten Materialien müssen einerseits die Funktion der gewebespezifischen Zelltypen unterstützen und außerdem Raum für das Einwachsen von Blutgefäßen aus dem umliegenden gesunden Gewebe bieten. Dies ist die Voraussetzung für eine dauerhafte Versorgung des Gewebes mit Nährstoffen und Sauerstoff.

Aber wie müssen Materialien beschaffen sein, damit sie das Blutgefäßwachstum unterstützen? Um diese Frage beantworten zu können, haben wir das weltweit erste Zellkulturmodell entwickelt, das die wichtigsten Abläufe des Blutgefäßwachstums in einem künstlichen Material nachbildet. Das Herzstück unseres Modells ist ein von uns selbst entworfenes zuckerbasiertes Hydrogel.

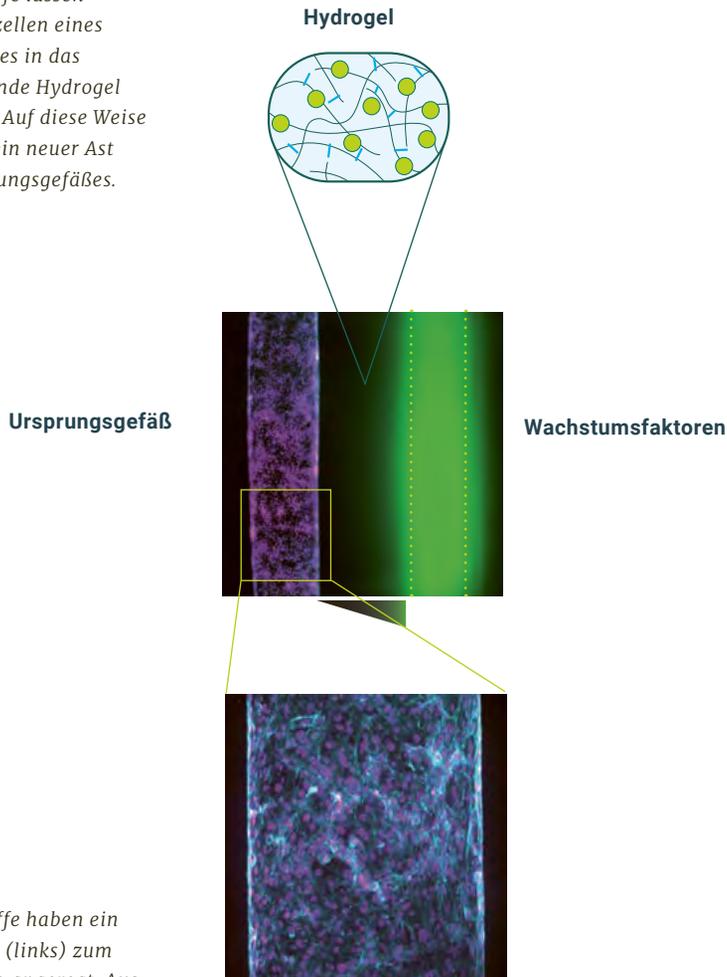
## Hydrogele geben Form vor

Hydrogele enthalten viel Wasser und halten die Zellen dadurch feucht; gleichzeitig sind sie starr genug, um eine Form vorzugeben. Wir können sie mit Nährstoffen und anderen Stoffen ausstatten, um ihre Eigenschaften kontrolliert und unabhängig voneinander zu steuern. Das Prinzip ist einfach: Die Zellen bauen die Verbindungen zwischen den einzelnen Zuckermolekülen mit Enzymen ab und wandern so durch das Hydrogel.

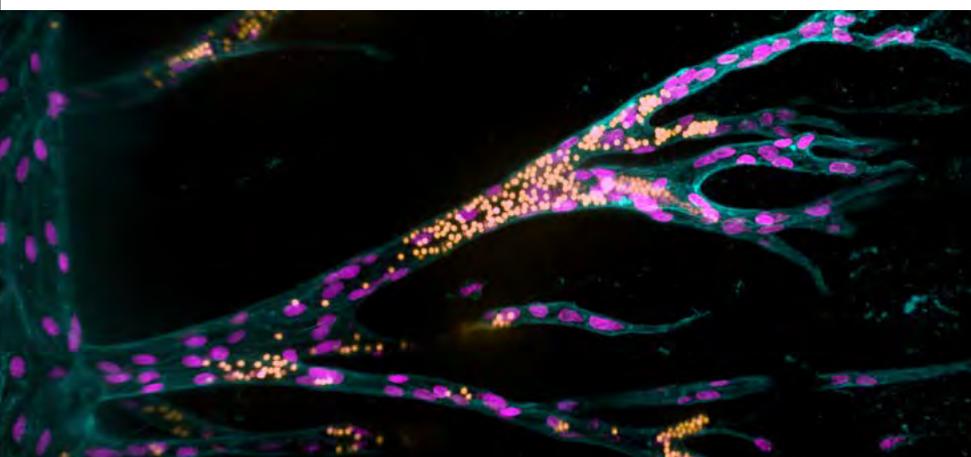
Mit feinen Akupunkturnadeln bilden wir die Röhren der Blutgefäße nach. Dazu stechen wir im Abstand von etwa einem Millimeter zwei parallel verlaufende Kanäle mit etwa 0,4 Millimetern Durchmesser in das Hydrogel. In einen Kanal säen wir die gleichen Zellen, wie sie auch in natürlichen Geweben die Blutgefäße auskleiden. Und tatsächlich: Diese sogenannten Endothelzellen bilden untereinander Kontakte, heften sich in dem Kanal an die künstliche Gewebeumgebung an und formen nach etwa einem Tag ein Ursprungsblutgefäß.

Nun schicken wir durch den zweiten Kanal einen Cocktail aus denselben Wachstumsfaktoren, die auch in echten Geweben das Wachstum von Gefäßen vorantreiben. Diese diffundieren zu den Endothelzellen im ersten Kanal und bewirken dadurch, dass die Zellen in die umgebende Hydrogel-Matrix wandern. Unter dem Mikroskop lässt sich beobachten, wie winzige, mit Farbstoffen markierte Kügelchen in die neu gebildeten Gefäße einströmen. Die Endothelzellen bilden also durchlässige Röhren.

Signalstoffe lassen Endothelzellen eines Blutgefäßes in das angrenzende Hydrogel wandern. Auf diese Weise entsteht ein neuer Ast des Ursprungsgefäßes.



Signalstoffe haben ein Blutgefäß (links) zum Wachstum angeregt. Aus dem Ursprungsgefäß sind Kügelchen (gelb) in das neue Gefäß geströmt. Zwischen beiden ist also eine durchlässige Verbindung entstanden. (Zellkerne der Epithelzellen in Magenta)



## Haftproteine zum Festhalten

Doch wovon hängt es ab, ob Endothelzellen wandern und neue Gefäße bilden, und wie können wir die Einwanderung der Endothelzellen in das Hydrogel-Gerüst beeinflussen? Wir haben uns zunächst auf den Einfluss sogenannter Adhäsions-Proteine konzentriert – also Proteine, durch die sich die Zellen an Gewebe in der Umgebung anheften und die unter anderem Signale für die Wanderung oder das Wachstum weitergeben.

Dabei haben wir festgestellt, dass je höher die Konzentration dieser Proteine ist, desto mehr Endothelzellen nicht einzeln, sondern als zusammenhängende Stränge durch das Hydrogel wandern. Diese kollektive Wandererschaft ist wiederum die Voraussetzung dafür, dass die Zellen im folgenden Schritt Röhren bilden können, die mit dem Ursprungsgefäß verbunden sind.

Unsere künstlich entstandenen Gefäßstrukturen waren allerdings zunächst kleiner als die in natürlichen Geweben. Wir erklärten uns den Unterschied damit, dass die Bestandteile unserer Hydrogele schwerer abzubauen sind als natürliche Gewebegerüste. Um das Problem zu umgehen, haben wir das Hydrogel biochemisch so verändert, dass es von den Zellen leichter enzymatisch gespalten werden kann. Und tatsächlich: Durch diese Optimierung haben wir es zum ersten Mal geschafft, Gefäßstrukturen kontrolliert in künstlichen Materialien wachsen zu lassen. In abschließenden Experimenten konnten wir zeigen, dass diese nicht nur in der Größe echten Blutgefäßen ähneln, sondern auch viele ihrer Eigenschaften besitzen.

Als Nächstes wollen wir unser Modell erweitern. So planen wir den Einsatz weiterer Moleküle, die wichtige Signale an die Endothelzellen weitergeben. Unser Fernziel ist es, den Prozess des natürlichen Blutgefäßwachstums bestmöglich in Zellkultur nachzubilden. Hierfür lieferten uns die beschriebenen Experimente wertvolle Grundlagen: Nur wenn ein Hydrogel die richtigen Andockstellen bietet und leicht abbaubar ist, können Endothelzellen kollektiv hindurchwandern und Blutgefäße bilden.

Wenn wir wissen, welche Faktoren für das erfolgreiche Blutgefäßwachstum erforderlich sind, wird es in Zukunft vielleicht möglich sein, die Versorgungslücke in der Transplantationsmedizin mittels künstlicher Gewebe zu schließen. Außerdem wären Medikamente zur Vermeidung von Abstoßungsreaktionen überflüssig, denn die Organe regenerieren sich aus körpereigenen Zellen. o

# 14 Vielseitige Speicher für Lichtenergie

FILIP PODJASKI,  
BETTINA VALESKA  
LOTSCH

↳ Max-Planck-Institut  
für Festkörperforschung,  
Stuttgart

Pflanzen machen es vor: Sie bauen mit Sonnenenergie Zucker auf. Ein chemisch robustes und vielfältig einsetzbares Kohlenstoffnitrid kann die Fotosynthese jedoch nachahmen. Und mehr noch: Es kann die Energie des Lichts auch elektrisch speichern. Wir versuchen diese Prozesse zu verstehen und zu optimieren. Anwendungen könnten sie in der Mikrorobotik, in neuartigen Sensoren, neuromorphen Computern und nicht zuletzt in Sonnenbatterien finden.

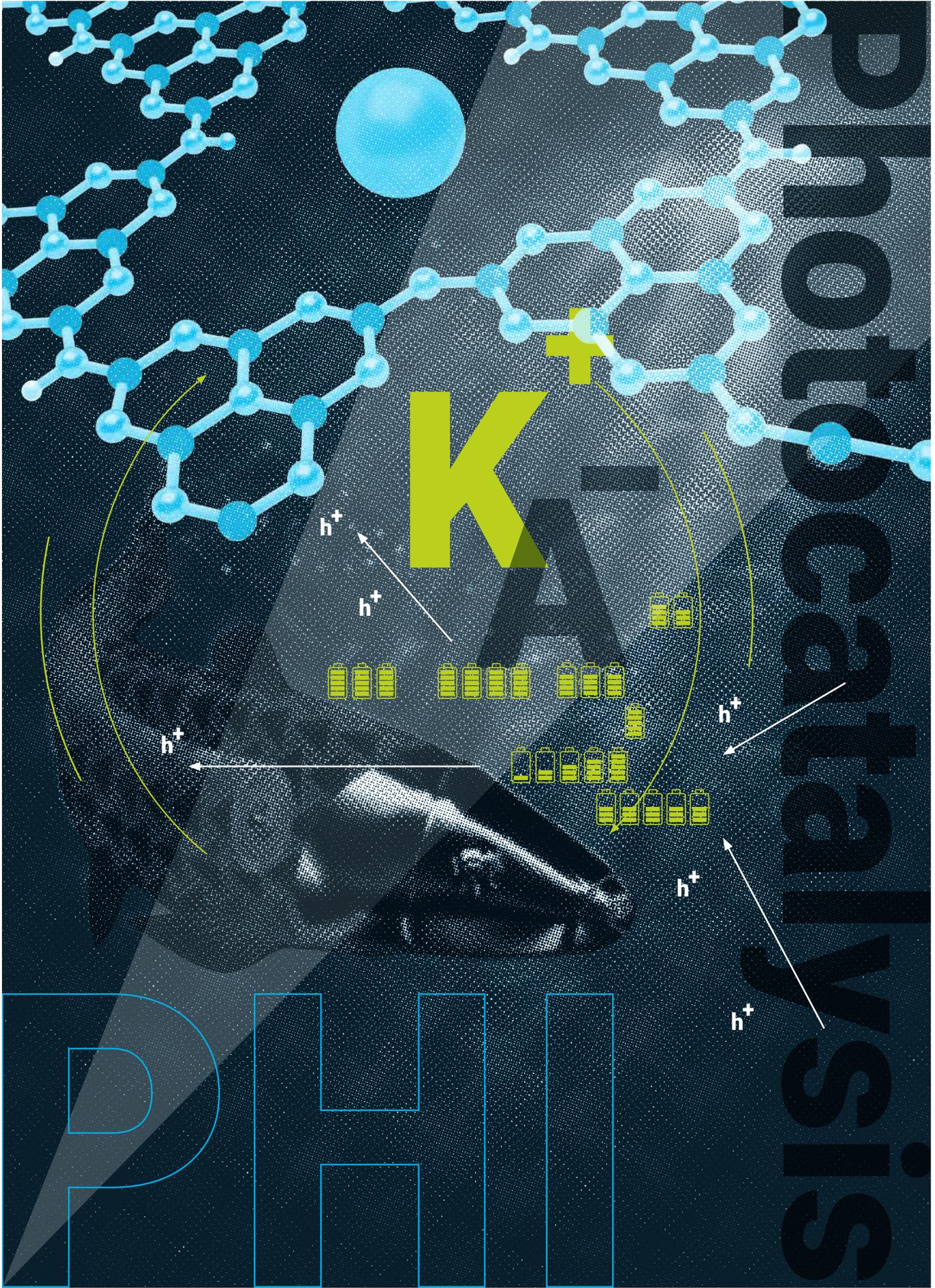
**B**ei der Nutzung von Sonnenenergie setzt die Natur immer noch Maßstäbe. In der Fotosynthese bauen Pflanzen mit der Energie des Sonnenlichts chemische Energieträger, nämlich Zucker auf. Technisch werden regenerative Energieträger wie etwa Wasserstoff, der bei der Abkehr von fossilen Rohstoffen eine essenzielle Rolle spielt, durch die Elektrolyse mit fotovoltaisch erzeugtem Strom produziert. Durch künstliche Fotosynthese lässt sich Wasserstoff jedoch auch direkt mit der Energie des Lichts, also ohne den Umweg über die Elektrolyse, erzeugen. Möglich machen das Kohlenstoffnitride, welche die Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser katalysieren.

Kohlenstoffnitride sind bereits seit Anfang des 19. Jahrhunderts bekannt und lassen sich aus einfachen und weltweit gut verfügbaren Ausgangsmaterialien wie Harnstoff kostengünstig herstellen. Üblicherweise entsteht bei der Polymerisation von Harnstoff ein kettenartiges Kohlenstoffnitrid-Polymer. In unserer Forschung haben wir jedoch einen Weg gefunden, in Salzschnmelzen schichtartige Strukturen zu erzeugen. An diesem zweidimensionalen Kohlenstoffnitrid, genannt Polyheptazinimid (PHI), beobachteten wir eine Eigenschaft, die bis dato weder von Kohlenstoffnitriden noch von anderen organischen Materialien bekannt war: PHI kann Sonnen-

energie nicht nur per Fotokatalyse direkt in chemische Energieträger umwandeln, sondern auch über mehrere Stunden hinweg speichern. Die elektrische Aufladung des Materials lässt sich dabei an einem Farbwechsel von Gelb nach Blau erkennen. Dank der Speichermöglichkeit für Elektronen bildet PHI ein vielseitiges Bindeglied zwischen der solaren Energieumwandlung und der Speicherung von Sonnenenergie, ähnlich einer mit einer Batterie kombinierten Solarzelle. Das eröffnet neue Konzepte für den Umgang mit der wechselnden Verfügbarkeit von Sonnenlicht.

## Fotochemisch angetriebene Mikroschwimmer für die Medizin

So lässt sich die Speicherfunktion nutzen, um die Wasserstoffproduktion vom Lichteinfall zu entkoppeln – wir sprechen vom Paradoxon der dunklen Fotokatalyse. Die Zugabe eines Katalysators – zum Beispiel in Form von wiederverwendbaren Platin-Nanopartikeln – im Dunklen wirkt dann wie ein Schalter, der die Freisetzung von Wasserstoff quasi auf Abruf ermöglicht. Anwendungen könnten sich dort ergeben, wo sich Wasserstoff nur bedingt speichern lässt oder wo er flexibel und unabhängig vom Lichteinfall produziert werden soll.



Den praktischen Einsatz der dunklen Fotokatalyse haben wir beispielhaft gemeinsam mit der Abteilung für Physikalische Intelligenz am MPI für Intelligente Systeme studiert. In dieser Kooperation entwickelten wir erstmals lichtgetriebene PHI-Mikroschwimmer, die sich ähnlich wie manche Mikroorganismen in Flüssigkeiten selbstständig fortbewegen. Um das zu ermöglichen, haben wir Teile der Schwimmeroberfläche so modifiziert, dass fotokatalytische Reaktionen gezielt auf unterschiedlichen Seiten der PHI-Partikel angestoßen werden können. Die Umverteilung der Reaktionsprodukte entlang der Oberfläche erzeugt dann einen Schub und treibt den Mikroschwimmer an.

Durch die Akkumulation von Elektronen auf einseitig mit Platin beschichteten PHI-Partikeln können sich diese im Licht aufladen und dann sogar im Dunklen weiter fortbewegen. Dabei reichen gerade einmal 30 Sekunden Aufladung, um eine halbe Stunde gerichtete Bewegung in der Dunkelheit zu ermöglichen. Durch Fotokatalyse angetriebene Mikroschwimmer könnten sich einsetzen lassen, um medizinische Wirkstoffe gezielt zu Krankheitsherden wie etwa Tumoren zu transportieren. Denn PHI ist nicht nur biokompatibel und tolerant gegenüber salzhaltigen Umgebungen, wie sie in allen biologisch

## PHI bildet ein Bindeglied zwischen der solaren Energieumwandlung und der Speicherung von Sonnenenergie, ähnlich einer mit einer Batterie kombinierten Solarzelle.

relevanten Medien, also etwa im Blut, vorliegen; es bindet auch sehr gut medizinische Wirkstoffe. Wir haben zudem gezeigt, dass PHI die Wirkstoffe besser abgibt, wenn es in einem sauerstoffarmen Milieu, wie es etwa bei Krebszellen herrscht, mit Licht elektrisch aufgeladen wird. So könnten PHI-Partikel in Zukunft als quasi-autonome Wirkstoff-Shuttles, die auf ihre Umgebung reagieren, eingesetzt werden. Solche medizinischen Transporter würden ihre Fracht am Zielort durch externe Stimuli wie eine Änderung des pH-Werts oder Licht freisetzen.

## Batterien, die sich direkt mit Licht laden lassen

Die auf PHI gespeicherten Elektronen können jedoch nicht nur chemische Reaktionen antreiben, sondern über einen leitfähigen Kontakt auch elektrisch entladen werden. So ergibt sich eine Batterie, die direkt mit Sonnenlicht geladen werden kann: eine Sonnenbatterie. Diese Kombination aus Lichtabsorption und Ladungsspeicherung ermöglicht es, die sonst getrennten Prozesse der photovoltaischen Stromerzeugung und der Speicherung in Batterien kompakt zu vereinen. Dabei ist interessant, dass PHI auch rein elektrisch oder durch eine Kombination von Sonnenlicht und Strom geladen werden kann, was neuartige Hybridkonzepte für die licht-assistierte Energiespeicherung ermöglicht. Wir suchen derzeit Möglichkeiten, die Effizienz von PHI als Speicher für Sonnenenergie zu steigern. Es wäre vor allem dort als Energiespeicher interessant, wo ein kostengünstiges Material benötigt wird und große Flächen zur Verfügung stehen.

Die Möglichkeiten, die PHI bietet, beschränken sich jedoch nicht auf die Erzeugung chemischer Energieträger und die Energiespeicherung. In aktuellen Arbeiten stellen wir auch neuartige fotomemristive Sensorkonzepte vor. Dafür nutzen wir die Fähigkeit von PHI, unter Beleuchtung diverse organische Substanzen wie etwa Glucose zu oxidieren und die dabei extrahierte Ladung zu speichern. So lässt sich aus dem Grad der Aufladung oder seiner anschließenden Entladung ablesen, wieviel Glucose in einer Probe enthalten war. PHI kodiert das Analyseergebnis dabei in seinem Ladungszustand, der sich in der Veränderung diverser optischer oder elektronischer Eigenschaften widerspiegelt. So ermöglicht PHI nicht nur neue analytische Konzepte, sondern könnte auch im neuromorphen Computing Anwendung finden. Diese Form der Datenverarbeitung ahmt die Funktion von Nervenzellen nach, indem Signale für logische Operationen nicht nur binär (wie bei heutigen Computern), sondern mithilfe physikalisch-chemischer Zustandsänderungen in variabler Stärke weitergegeben werden.

Die Bandbreite der hier vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten lässt das weitreichende Potenzial erkennen, das die historische Verbindungsklasse der Kohlenstoffnitride bietet und das sich teilweise erst nach 200 Jahren erkenntnisgetriebener Forschung eröffnet hat. o

# 15 Wege in eine grüne Metallwirtschaft

**DIERK RAABE**

Max-Planck-Institut  
für Eisenforschung GmbH,  
Düsseldorf

Metalle sind seit Jahrtausenden Garanten des Fortschritts in menschlichen Zivilisationen. Mit einem Drittel aller industriellen Treibhausgasemissionen ist die Metallwirtschaft heute aber auch der größte Einzelverursacher der Erderwärmung. Um den weiter steigenden Bedarf an Metallen vom Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu entkoppeln, verfolgen wir am Max-Planck-Institut für Eisenforschung verschiedene Ansätze. Unsere Ziele sind dabei eine grüne Stahlproduktion mithilfe von Wasserstoff, Plasma oder Elektrolyse sowie Aluminiumlegierungen, die sich besser recyceln lassen als heutige Aluminiumwerkstoffe.

**M**etalle bilden das Rückgrat unserer Gesellschaft. Sie haben den Erfindungen der menschlichen Zivilisation vom Pflug bis zum Raumfahrzeug den Weg geebnet. Nur metallische Werkstoffe verfügen über so unterschiedliche mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Härte, Schadenstoleranz, Fügbarkeit und Zähigkeit, oft verbunden mit Funktionen wie Korrosionsbeständigkeit, thermischer und elektrischer Leitfähigkeit sowie Magnetismus.

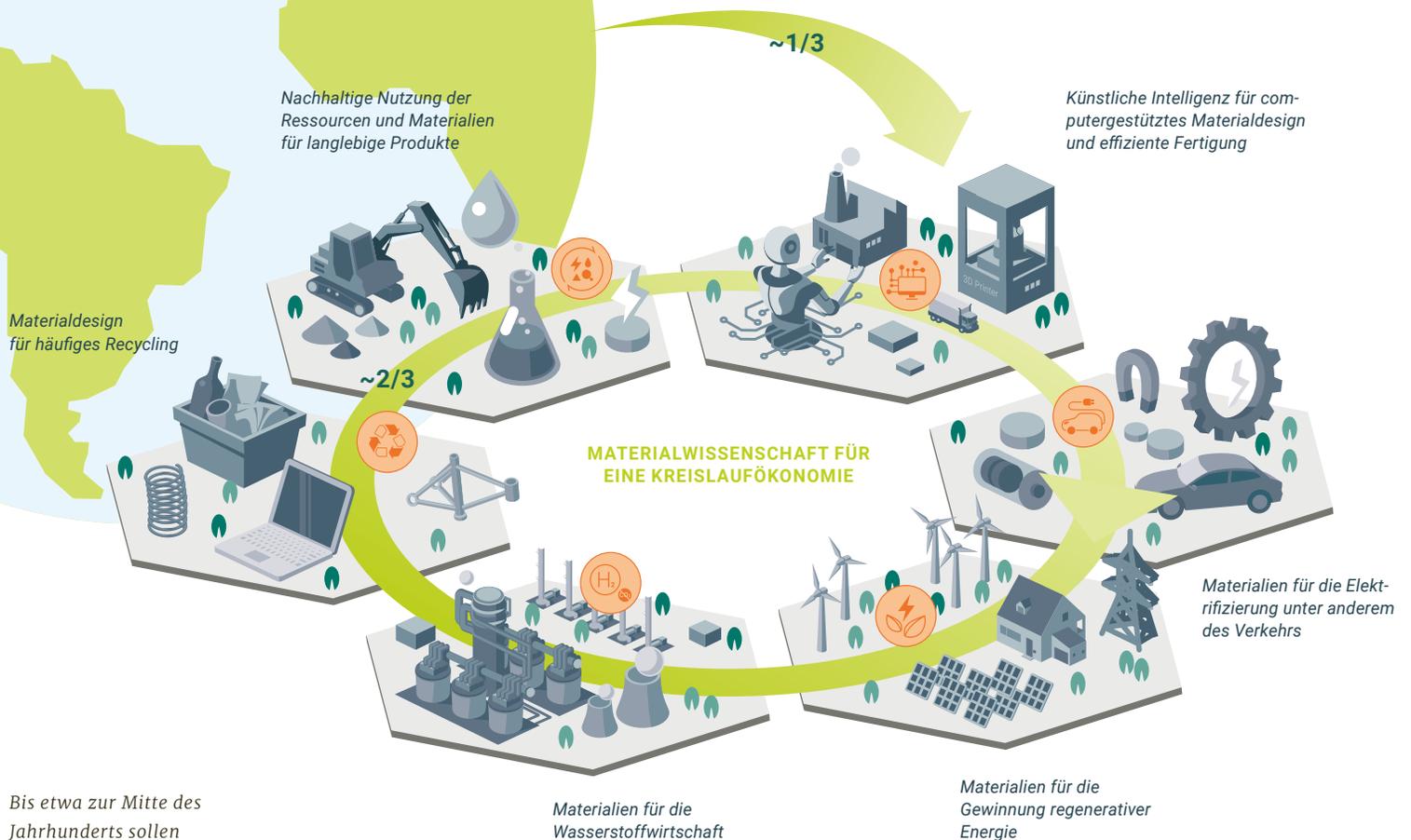
Bei der Bewältigung der Klimakrise spielen Metalle eine ambivalente Rolle: eine hilfreiche, als Werkstoffe, die in Windturbinen, Elektromotoren und im Leichtbau zu einer nachhaltigen Wirtschaft beitragen. Sie wirken sich aber auch schädlich aus, nämlich als weltweite Hauptverursacher von Treibhausgasen. Die Metallproduktion verbraucht acht Prozent der global genutzten Energie und führt zu rund einem Drittel der industriellen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen, wenn man nur Stähle und Aluminiumlegierungen betrachtet. Und da das weltweite Wachstum in der Industrie, im Verkehr, in der Energiewirtschaft und im Bau die Nachfrage nach Metallen in den nächsten 25 Jahren verdoppeln wird, drohen die Treibhausgasemissionen weiter zu steigen – wenn wir nicht mit disruptiven Konzepten gegensteuern. Hier ist es mit kleinen Entwicklungsschritten und Effizienzsteigerungen nicht getan: Nach über 5000 Jahren Erfolgs-

geschichte der Metalle muss ihre Herstellung praktisch komplett neu erfunden werden, und zwar ohne Beteiligung von fossilen Brennstoffen und Reduktionsmitteln sowie mit einem Höchstmaß an Wiederverwertbarkeit.

## Grundlagenforschung für eine nachhaltige Eisen- und Stahlproduktion

Mit mehr als 1,8 Milliarden Tonnen Jahresproduktion ist Stahl das wichtigste metallische Material. Er kann durch Einschmelzen von Schrott recycelt werden, eine Ressource, die aber höchstens 30 Prozent der Nachfrage deckt. Daher muss frisches Eisen in riesigen Mengen aus Erzen hergestellt werden. Diese Oxide werden zumeist in Hochofen durch Kohlenmonoxid vom Sauerstoff befreit. Daraufhin werden Teile des zurückbleibenden Kohlenstoffs in Konvertern mit Sauerstoff entfernt. Bei diesen Prozessen entstehen pro Tonne Stahl rund 2,1 Tonnen CO<sub>2</sub>. So ist die Stahlherstellung mit etwa 28 Prozent aller CO<sub>2</sub>-Emissionen die größte industrielle Quelle von Treibhausgasen.

Wir erforschen, wie diese gewaltigen CO<sub>2</sub>-Mengen um mehr als 80 Prozent reduziert werden können: Das ist der größte einzelne Hebel zur Bekämpfung der globalen Erwärmung. Statt Eisenerze mit Kohlenstoff



Bis etwa zur Mitte des Jahrhunderts sollen in einer nachhaltigen Metallwirtschaft zwei Drittel der Metalle durch Recycling gewonnen werden, nur ein Drittel würde dann aus Erzen neu produziert.

zu reduzieren, nutzen wir Elektrolyse oder kohlenstofffreie Reduktionsmittel in unterschiedlichen Formen und können Kohlenstoff so fast komplett aus dem Herstellungsprozess eliminieren.

Die Elektrolyse, bei der Eisenoxid im flüssigen Zustand zusammen mit anderen Oxiden reduziert wird, ist in diesem Zusammenhang eine attraktive Technik, da sie effizient ist und nachhaltige Stromquellen unmittelbar genutzt werden können. Insbesondere wird der Umweg über die energieintensive Erzeugung eines alternativen Reduktionsmittels wie etwa Wasserstoff vermieden. Allerdings erfordert die Elektrolyse Temperaturen von etwa 1600 Grad Celsius, um das Eisenoxid zu schmelzen. Wir erforschen daher einerseits die grundlegenden Elektrodenreaktionen bei der Elektrolyse sowie deren Zwischenprodukte und geeignete Elektrodenmaterialien. Andererseits untersuchen wir die Tieftemperatur-Elektrolyse, bei der die Oxidpulver in ionischen Flüssigkeiten bei geringen Temperaturen in Eisen und Sauerstoff aufgespalten werden.

## Eisenreduktion mit Wasserstoff und Wasserstoffplasma

Auch wenn grüner Wasserstoff oder ein Wasserstoffträger wie Ammoniak mithilfe regenerativen Stroms erst hergestellt werden muss, bietet dieser Ansatz der Direktreduktion Vorteile gegenüber anderen Wegen zu einer nachhaltigen Stahlproduktion. So muss das Eisenerz dabei nicht mit hohem Energieaufwand geschmolzen werden. Zudem können dafür Anlagentypen genutzt werden, die heute bereits für die Direktreduktion mit Erdgas eingesetzt werden. Schließlich eignet sich für die Direktreduktion auch „verunreinigter“ Wasserstoff, der kostengünstig ist. Ammoniak als Wasserstoffträger hat gegenüber Wasserstoff den Vorteil, dass er sich viel energiesparender transportieren lässt als Wasserstoff selbst. So kann er aus sonnenreichen Ländern etwa in Nordafrika oder auf der arabischen Halbinsel, die für die Produktion von Wasserstoff prädestiniert sind, leichter zu den Standorten der Stahlproduktion gelangen.



# 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 Mitarbeitenden. In den 86 Max-Planck-Einrichtungen betreiben über 6.700 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sowie 6.000 Nachwuchs- und Gastforschende 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 zukunftssträngige wissenschaftliche Fragen zu finden. Diese ständige Erneuerung erhält der Max-Planck-Gesellschaft den Spielraum, neue wissenschaftliche Entwicklungen rasch aufzugreifen zu können.

Entstanden ist sie 1948 als Nachfolgeorganisation der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Seither sind 29 Nobelpreisträger und Nobelpreisträgerinnen aus ihren Reihen hervorgegangen. Neben fünf Auslandsinstituten betreibt die Max-Planck-Gesellschaft weitere 24 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 2,0 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 Mediocenter, Kienberg

Mai 2022

## Bildnachweis

### Anfang ohne Fehler

S. 5: MPI für Multidisziplinäre Naturwissenschaften /  
Tommaso Cavazza, Melina Schuh

### Computer werden neugierig

S. 6: Illustration: mattweis

### Die erstaunliche Geschichte unserer Mundflora

S. 10: Julie Arnaud; Werner Siemens Foundation /  
Felix Wey

S. 11: Katerina Guschanski

### Gelenke für kooperative Roboter

S. 13: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für Intelligente  
Systeme, Stuttgart)

S. 14: MPI für Intelligente Systeme, Stuttgart

### Schwärmende Fresszellen

S. 16: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für  
Immunbiologie und Epigenetik / Tim Lämmermann,  
Korbinian Kienle); MPI für Immunbiologie und  
Epigenetik / Tim Lämmermann

### Das virtuelle Fusionskraftwerk

S. 19: Illustration: MPI für Plasmaphysik, Greifswald

S. 20: Jan Michael Hosan / MPI für Plasmaphysik,  
Greifswald

### Wenn intelligente Maschinen schlecht beraten

S. 22: Illustration: mattweis

### Karambolagen im künstlichen Sternhaufen

S. 25: MPI für Astrophysik

### Patentrechte in pandemischen Zeiten

S. 27: Unsplash / Braño

### Kontakte in der Leber

S. 29: Illustration: mattweis

S. 30: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für Zellbiologie  
und Genetik)

### Optischer Datenverkehr in der Cloud

S. 34: Adobe Stock / Funtap

### Sind Organisationen offen für Diversität?

S. 36: Illustration: mattweis

### Blutversorgung in künstlichen Geweben

S. 39: MPI für molekulare Biomedizin / Jifeng Liu,  
Britta Trappmann et al.

### Vielseitige Speicher für die Energie des Lichts

S. 41: Illustration: mattweis (Vorlage e-conversion /  
Vera Hiendl)

### Wege in eine grüne Metallwirtschaft

S. 44–45: Illustrationen: mattweis (Vorlage Max-Planck-  
Institut für Eisenforschung GmbH)