



HIGHLIGHTS
2019 AUS DEM JAHRBUCH DER
MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

ENGLISH VERSION →

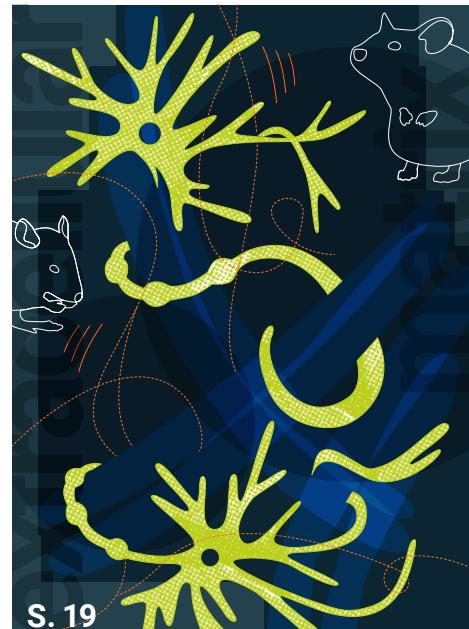
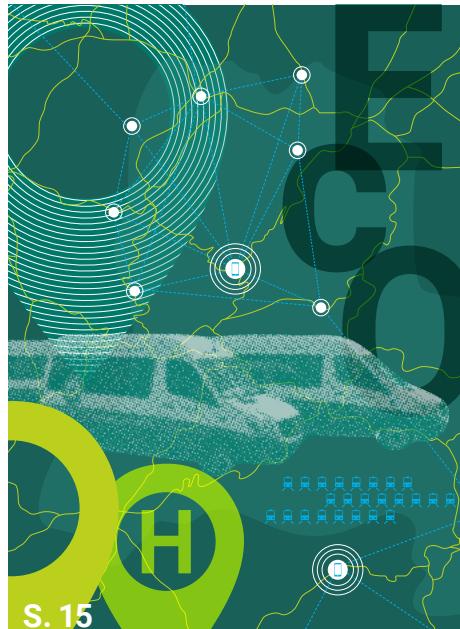
Editorial

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 veröffentlicht. Für den hier vorliegenden gedruckten Jahrbuchband wurden 15 aus Sicht der Wissenschaftskommunikation besonders geeignete und gerade auch für Nicht-Expert*innen interessante Beiträge herausgesucht und journalistisch aufbereitet.

Zu den Highlights des Jahrbuchs 2019 gehören zum Beispiel Forschungsergebnisse, die es erlauben, die Häufigkeit von Malaria-Parasiten in einer lokalen Mückenpopulation vorherzusagen. Sie schaffen die Grundlage für neue biotechnologische Strategien zur Bekämpfung von Malaria – eine Herkulesaufgabe angesichts fortschreitender Insektizid-Resistenzen und der schieren Größe der weltweiten Malaria-regionen. Mit Daten aus dem sozialen Netzwerk Facebook haben Forscher die Migrationsbewegungen nach dem Hurrikan Maria im Herbst 2017 von Puerto Rico in die USA nachvollzogen und dabei neue Informationen gewonnen, die traditionelle Datenquellen, etwa von statistischen Behörden, nicht liefern. Und dass die Entwicklung vom assistierten hin zum voll autonomen Fahrzeug nicht so schnell fortschreiten könnte, zeigen Studien einer Methode zur Bewegungsanalyse, die als eine wahrscheinliche Komponente zukünftiger autonomer Fahrzeuge gilt. Tatsächlich wird sie selbst durch kleine Störsignale verwirrt und reduziert damit die Zuverlässigkeit, mit der sich ein Fahrzeug in seiner Umwelt zurechtfindet.

Viel Spaß beim Lesen der Jahrbuch-Highlights von 2019!

Inhalt



1 Das Porträt
eines schwarzen
Lochs S. 4

4 Schützende
Mikroben
an der Wurzel S. 12

7 Synapsen setzen
auf regionale
Produkte S. 22

2 Tödliche
Stiche S. 7

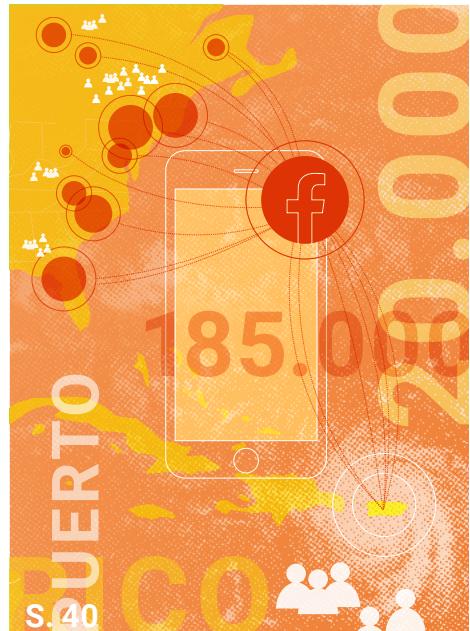
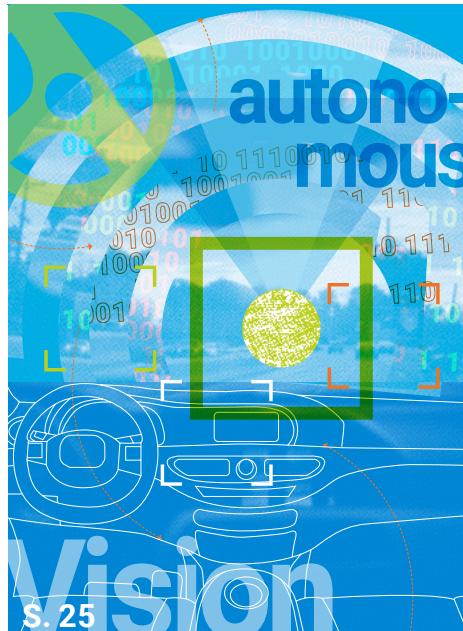
5 Ich bin die
Haltestelle! S. 15

8 Angriff auf den
Autopiloten S. 25

3 Hetze im
Netz besser
bekämpfen S. 9

6 Wie verletzte
Nerven wieder
wachsen können S. 19

9 Menschenrechte
contra Wirtschafts-
recht – das Beispiel
Lateinamerika S. 28



10 Raupenkot
schreckt
Nachtfalter ab
S. 30

13 Nachhaltige
Legierungen für
hohe Ansprüche S. 38

11 Einbruchs-
prognosen auf
Bewährung S. 33

14 Wie Facebook
hilft, Migration
zu erfassen S. 40

12 Gammastrahlen
aus dem All S. 35

15 Bauwerke
aus DNA S. 43

1 Das Porträt eines schwarzen Lochs

J. ANTON ZENSUS
MICHAEL KRAMER
KARL M. MENTEN
SILKE BRITZEN
Max-Planck-Institut
für Radioastronomie,
Bonn

Schwarze Löcher sind exotische Objekte, welche die Fantasie von Forschern und Science-Fiction-Autoren gleichermaßen herausfordern. Doch trotz vieler indirekter Hinweise auf ihre Existenz entzogen sich diese Massemonster im All bisher der Beobachtung. Erst moderne Techniken machten das Unsichtbare sichtbar: Mit dem Event Horizon Telescope – einer Kombination von sieben über die halbe Erdkugel verteilten Radioteleskopen – gelang das erste Bild eines schwarzen Lochs, das im Zentrum der Galaxie Messier 87 sitzt. An diesem Erfolg beteiligt waren auch mehr als 30 Mitarbeitende aus dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn.

Dass schwarze Löcher existieren müssen, folgt aus Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Diese beschreibt die Schwerkraft als Krümmung von Raum und Zeit. Schwarze Löcher stellen den Extremfall der Gravitation dar. Hier befindet sich sehr stark konzentrierte Masse auf so kleinem Raum und mit so großer Krümmung, dass nicht einmal Licht entweichen kann. Die äußere Grenze eines schwarzen Lochs bildet der Ereignishorizont. Alles, was diesen Ereignishorizont überschreitet, kann nicht mehr entkommen. Ein schwarzes Loch erscheint Beobachtern daher schwarz. Zwar kann man diese Objekte an ihrer gravitativen Wechselwirkung erkennen und so charakterisieren, aber sichtbar werden sie nur vor einem hellen Hintergrund als eine Art „Schatten“. Diese Tatsache haben wir uns zunutze gemacht.

Im Zentrum von Galaxien befinden sich supermassereiche schwarze Löcher, die Milliarden von Sonnenmassen in sich vereinen. Materie strömt auf die zentrale Schwerkraftfalle zu und stürzt schließlich in sie hinein. Bevor die Materie hinter dem Ereignishorizont verschwindet, wird eine enorme Energiemenge frei, die sich in Strahlung umwandelt. Dieser Vorgang ist etwa die

Ursache für die extreme Leuchtkraft von Radiogalaxien. Bei der rund 55 Millionen Lichtjahre entfernten Radiogalaxie Messier 87 (M 87) wurde ein solches supermassereiches schwarzes Loch erwartet – weshalb es als Beobachtungsziel ausgewählt wurde.

Entsprechende Hinweise gab der spektakuläre Materieausstoß der Quelle, der sogenannte Jet: Darin schießt Materie in zwei eng gebündelten Strahlen ins All. Schon vor mehr als hundert Jahren im optischen Licht entdeckt, wird der Jet seit mehreren Jahrzehnten intensiv bei verschiedenen Wellenlängen untersucht. Eine extrem hohe Detailschärfe lieferte die Radiointerferometrie mit sehr großer Basislänge, die Very Long Baseline Interferometry (VLBI).

Seit den 1970er-Jahren ist das Max-Planck-Institut für Radioastronomie am Ausbau des VLBI-Netzes und an den Beobachtungen bei immer höheren Frequenzen federführend beteiligt. Und in jahrelanger Arbeit hat eine weltweite Kollaboration von Astronomen ein Netzwerk mit bisher unerreichter Detailschärfe realisiert. Dieses Event Horizon Telescope (EHT) erzielt eine Auflösung von 20 Mikrobogensekunden. Damit könnte man – unter Vernachlässigung der Erdkrümmung – von einem

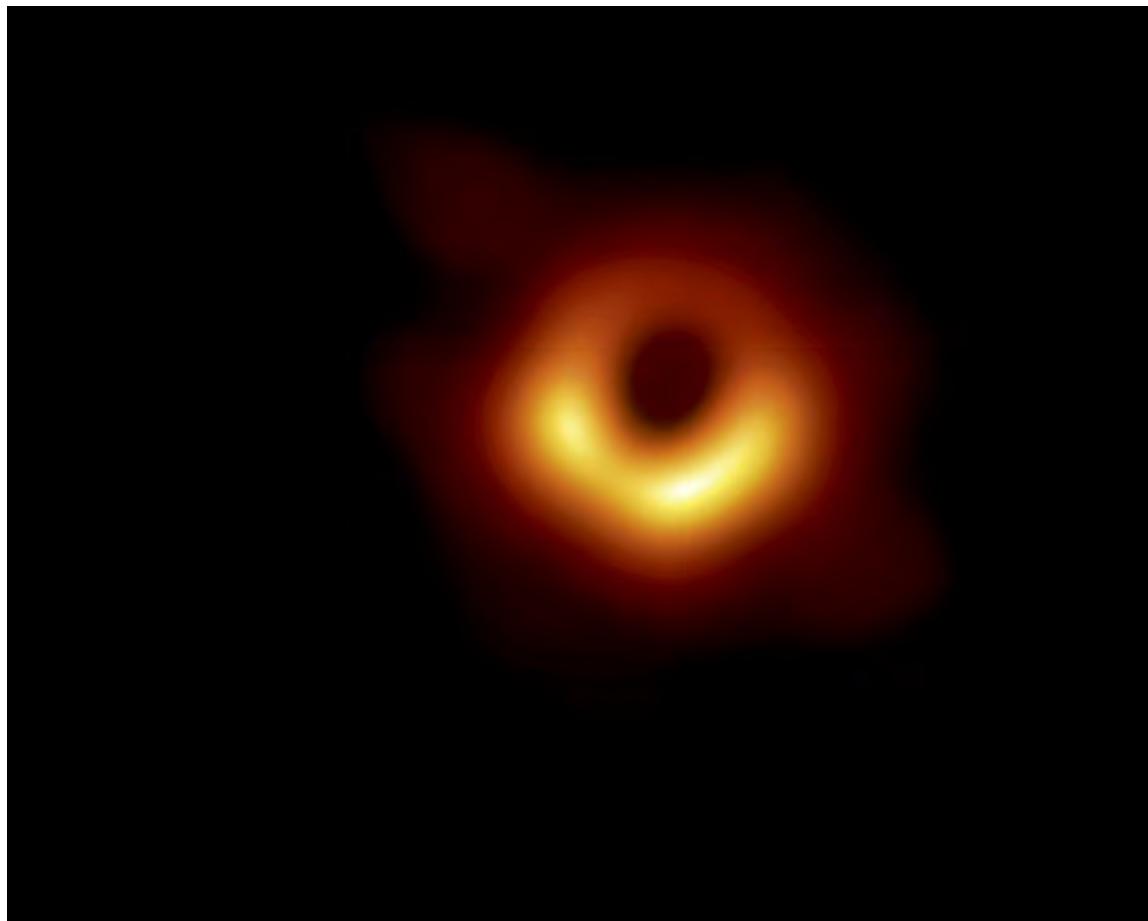
Straßencafé in Berlin aus eine Zeitung lesen, die jemand im Central Park in New York in Händen hält. Das EHT beobachtete die Galaxie M 87 mit sieben Radioteleskopen an fünf verschiedenen Standorten; ein achtes Instrument am Südpol half bei der Kalibration.

Alle Teleskope beobachten auf die Milliardstel Sekunde gleichzeitig

Unser Institut ist am Event Horizon Telescope beteiligt, auch unsere Radioantennen und technischen Einrichtungen haben wichtige Beiträge zu den Beobachtungen beigesteuert: So haben wir das APEX-Teleskop in den chilenischen Anden gebaut und es instrumentell ebenso ausgerüstet wie das ebenfalls dort stationierte Observatorium ALMA sowie das IRAM-30-Meter-Tele-

skop in Spanien. Die Datenanalyse zur Umwandlung der Rohdaten in ein fertiges Bild erfolgte an Spezialcomputern des Bonner Max-Planck-Instituts sowie am MIT-Haystack-Observatorium. Und nicht zuletzt lieferte das Effelsberger Radioteleskop wichtige Zusatzinformationen durch begleitende Untersuchungen bei längeren Wellenlängen.

Wie bei VLBI-Messungen üblich, haben alle Teleskope die Galaxie M 87 auf die Milliardstel Sekunde (!) genau gleichzeitig beobachtet. Die Messdaten wurden zunächst separat gespeichert und anschließend mit Supercomputern miteinander verglichen und kombiniert. Dadurch erreichten die Aufnahmen eine Detailauflösung, die durch den größten Abstand der Radioteleskope zueinander sowie durch die Frequenz der empfangenen Wellen bestimmt ist. Für die Beobachtungen bei 230 Gigahertz (entsprechend einer Wellenlänge von



*Massemonster im Blick:
Das Bild ist der erste
direkte visuelle Nachweis
eines schwarzen Lochs.
Es steckt im Zentrum der
Galaxie Messier 87 und
wurde mit dem Event
Horizon Telescope (EHT)
aufgenommen.*

Die Forschenden haben gezeigt, dass supermassive schwarze Löcher die zentralen „Maschinen“ der leuchtkräftigen Kerne von Galaxien bilden.

1,3 Millimetern) stand nur ein Zeitraum vom 5. bis 11. April 2017 zur Verfügung. Wir hatten Glück, dass das Wetter an diesen Tagen an allen Standorten hervorragend war.

Die Aufnahme zeigt die erste direkte Abbildung eines schwarzen Lochs und seiner unmittelbaren Umgebung. Man erkennt einen dunklen zentralen Bereich, den sogenannten Schatten. Dieser erscheint aufgrund von Effekten der Lichtablenkung im Schwerefeld des Massenmonsters tatsächlich größer als das schwarze Loch selbst – man sieht sozusagen auch dessen Rückseite. Die Helligkeitsvariation des leuchtenden Plasmarings um diesen Schatten entsteht durch die Rotation des heißen Gases um das schwarze Loch herum. Wo das Gas auf uns zukommt, erscheint es etwas heller; gegenüber entfernt es sich von uns, dort ist die Emission schwächer. Hierin zeigt sich ein bekannter relativistischer Effekt.

Präzise Messungen erlauben Tests der allgemeinen Relativitätstheorie

Mit dem ersten Bild der unmittelbaren Umgebung des Ereignishorizonts stimmen die Messungen im Rahmen ihrer Genauigkeiten mit den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie überein. Es konnte zudem gezeigt werden, dass supermassereiche schwarze Löcher tatsächlich die zentralen „Maschinen“ der leuchtkräftigen Kerne von Galaxien bilden. Damit eröffnet das EHT ein neues Instrument für zukünftige Untersuchungen von schwarzen Löchern, und es bietet die Möglichkeit,

die allgemeine Relativitätstheorie im Bereich sehr starker Gravitation zu überprüfen.

Das schwarze Loch in M 87 ist ungefähr 55 Millionen Lichtjahre entfernt. In nur 26.000 Lichtjahren Abstand befindet sich das Zentrum unserer Milchstraße. Auch hier existiert ein supermassereiches schwarzes Loch, das mit der kompakten Radioquelle Sagittarius A* (Sgr A*) assoziiert ist. Dass es sich hierbei um ein schwarzes Loch handeln muss, lässt sich aus Beobachtungen von Sternbahnen ableiten, die insbesondere am Garching Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in der Gruppe um Reinhard Genzel vorgenommen werden. Aus der Bewegung der Sterne um Sgr A* herum hat man die Masse des schwarzen Lochs zu etwa vier Millionen Sonnenmassen bestimmt.

Mittlerweile sind präzise Messungen von Sternbewegungen sehr nahe am schwarzen Loch möglich, die aussagekräftige Tests der allgemeinen Relativitätstheorie erlauben. Daher ist – im Gegensatz zu M 87 – die Masse der Schwerkraftfalle in unserer Milchstraße präzise bekannt. Sie könnte zukünftig durch die Entdeckung von nahe gelegenen Pulsaren sogar noch genauer vermessen werden. Durch eine Kombination dieser Vorkenntnisse mit einem möglichen Bild des Schattens von Sgr A* könnten wir die allgemeine Relativitätstheorie dann weiteren genaueren Tests unterziehen. Zurzeit arbeitet die EHT-Kollaboration an der Erstellung eines Bildes von Sgr A*. Leider unterliegt dieses Objekt Helligkeitsschwankungen, die aufgrund der deutlich kleineren Masse erwartungsgemäß viel schneller sind als die in M 87. Das macht die Berechnung des Bildes schwieriger, aber auch spannender. o

2 Tödliche Stiche

ELENA A. LEVASHINA

Max-Planck-Institut
für Infektionsbiologie,
Berlin

Die meisten Mücken sind nur lästig. Der Stich einer Anopheles kann aber tödlich sein, wenn dabei Malariaerreger übertragen werden. Mit der Erforschung des Wechselspiels zwischen Überträger, Krankheitserreger und der Erkrankung selbst wollen wir die Grundlagen dafür legen, die Verbreitung der Erkrankung einzudämmen.

Malaria ist weltweit eine der häufigsten Infektionskrankheiten. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation gingen 2018 weltweit mehr als 400.000 Todesfälle auf das Konto der Erkrankung, knapp 70 Prozent davon waren Kinder unter fünf Jahren. Der Erreger ist ein mikroskopisch kleiner Einzeller im menschlichen Blut. Die sogenannten Plasmodien werden beim Stich infizierter weiblicher Anopheles auf den Menschen übertragen.

Weniger Mücken bedeuten in der Regel auch weniger Erkrankungen. So wurden in den Malariaregionen Italiens gezielt Pestizide gegen die Insekten eingesetzt. Mit Erfolg: Während die Krankheit in Italien zu Beginn des 20. Jahrhunderts noch jährlich 20.000 Todesopfer forderte, ist das Land seit 1973 malarialfrei.

Doch dieser Erfolg ist gefährdet: Nicht nur Medikamente gegen die Erkrankung selbst, auch Insektivenichtungsmittel werden unwirksamer. Seit 2010 sind Anopheles in über 70 Ländern gegen mindestens eines der am häufigsten verwendeten Insektizide resistent geworden, in 27 Ländern sogar gegen alle wichtigen Typen von Insektiziden. Wir brauchen also dringend neue Methoden zur Bekämpfung der Erkrankung.

Die Häufigkeit der Mücken ließe sich verringern, wenn wir sie gentechnisch so verändern würden, dass sie sich nicht mehr fortpflanzen könnten. Dadurch wäre auch die Übertragung der Erreger reduziert. Doch in der Natur würden sich genetisch veränderte Mücken wieder mit ihren Artgenossen kreuzen. Der Anteil fortpflanzungsunfähiger Mücken wäre bereits nach wenigen Generationen viel zu gering.

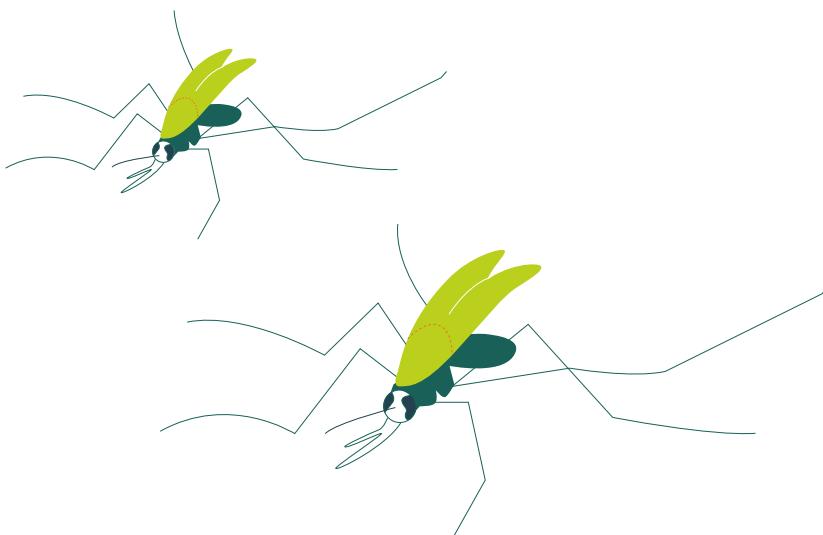
Erfolg versprechender ist die sogenannte Gene-Drive-Technologie mithilfe der Genschere CRISPR/Cas9. Die Genschere sorgt dafür, dass bei jeder Fortpflanzung alle Nachkommen die Unfruchtbarkeitsgene in sich tragen. Dadurch breiten sich die veränderten Gene rasant schnell unter den Mücken aus.

Anders als Insektizide ist eine Anwendung des Gene-Drive jedoch sehr spezifisch und auf einzelne Arten beschränkt, denn von den 360 bekannten Anopheles-Arten können nur 30 Menschen mit Malaria infizieren. Deshalb müssen wir genau wissen, welche Mückenart in einer bestimmten Region für Malaria verantwortlich ist und welche Bedingungen bei der Übertragung eine Rolle spielen. In vielen Gebieten Afrikas leben jedoch mehrere Arten gleichzeitig mit jeweils unterschiedlicher Malaria-Übertragungsrate.

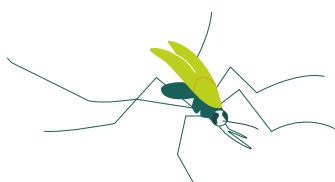
Daten von 17.000 Mücken erlauben Vorhersage der Parasiten-Häufigkeit

Mein Team und ich wollten herausfinden, welche Mosquitoart unter welchen Bedingungen eine Schlüsselrolle bei der Übertragung spielt. Dafür haben wir in Mali 2014 und 2015 während der Regenzeiten jeden Tag Moskitos gesammelt. Inzwischen besitzen wir Daten von mehr als 17.000 Mücken.

Als Nächstes haben wir untersucht, welche Einflussfaktoren wie zum Beispiel Temperatur, Gesamtzahl der Mücken oder das Verhältnis der Mückenarten zueinander die Häufigkeit von Plasmodium-Parasiten



360 *Anopheles*-Arten gibt es weltweit, 30 davon können den Malariaerreger auf den Menschen übertragen.



beeinflussen. Dafür haben wir den sogenannten Granger-Kausalitätstest eingesetzt, der normalerweise von Wirtschaftswissenschaftlern angewendet wird, um Börsenkurse zu prognostizieren. Mithilfe dieses Tests ist es uns tatsächlich gelungen, die Häufigkeit der Malariaparasiten in einer lokalen Mückenpopulation anhand der relativen Häufigkeit einer Moskitoart vorherzusagen.

Das Ergebnis hat uns überrascht: Nur eine Moskitoart, *Anopheles gambiae*, erlaubt eine genaue Vorhersage der Malariainfektionen in Moskitos. Zuvor galten *Anopheles gambiae* und ihre enge Verwandte, *Anopheles coluzzii*, beide als entscheidende Überträger der Krankheit. Unsere Ergebnisse aber zeigen, dass vor allem *Anopheles gambiae* eine höhere Parasitenhäufigkeit zulässt. Die zweite Art, *Anopheles coluzzii*, spielt eine eher untergeordnete Rolle. Aber da sie im Labor einfacher zu züchten ist, ist sie wesentlich besser untersucht. Alle derzeitigen Gene-Drive-Technologien wurden bislang für diese Art entwickelt.

Gene machen manche Mückenarten resistenter gegen Malaria

Warum aber können manche Mückenarten Malaria besser übertragen? Bei *Anopheles gambiae* und *Anopheles colluzzi* liegt ein Unterschied wahrscheinlich in dem Gen TEP1. *Anopheles colluzzi* verfügt über eine Variante dieses Gens, das die Mücke selbst resistenter gegenüber den Malariaerreger macht. Aber dies ist nicht der eigentliche Grund für ihre Existenz. Vielmehr bieten die verschiedenen Varianten von TEP1 den Mücken offenbar eine Anpassung an die regionalen Klimabedingungen. Derzeit sind wir auf der Suche nach weiteren Genen, die die Entwicklung der Erreger beeinflussen und die Unterschiede zwischen den beiden Arten erklären können.

Um sich fortzupflanzen, benötigt eine weibliche Mücke eine nährstoffreiche Mahlzeit: Blut. Beim Stich

eines bereits mit Malaria infizierten Menschen gelangen dabei auch die Krankheitserreger in den Insektenmagen. Damit sie sich im Moskito vermehren können, benötigen die Parasiten Energie – Energie, für die sie sich bei ihrem Wirt bedienen.

Mithilfe mathematischer Modelle haben wir untersucht, wie die Ernährung der Mücken Vermehrung und Infektionskraft beeinflussen. In unseren Modellen erhöht sich die Infektionskraft der Parasiten, die sogenannte „Virulenz“, wenn diese Nährstoffe nutzen, die eigentlich für die Fortpflanzung der Mücken vorgesehen sind. Anders sieht es aus, wenn die Moskitos alle Nährstoffe aufzehren: In diesem Falle reduziert sich die Zahl der Parasiten und diese sind nicht in der Lage, einen weiteren Wirt zu infizieren. Die Resultate aus den Modellversuchen haben wir an Mücken im Labor bestätigt.

Diese Erkenntnisse müssen bei der Entwicklung von Gene-Drive-Technologien berücksichtigt werden, denn hemmt man die Fortpflanzung der Mücken, haben die Parasiten mehr Nährstoffe zur Verfügung und können unseren Ergebnissen zufolge virulenter werden. Außerdem hängt die Wirksamkeit des Gene Drives von der jeweiligen Mückenart ab: Wird die falsche Malaria-mücke aus einem Ökosystem entfernt – zum Beispiel *Anopheles coluzzii* im Untersuchungsgebiet in Mali –, könnte die gefährlichere *Anopheles gambiae* sie schnell ersetzen.

Die Erfolgsgeschichte in Italien lässt sich wohl nicht so einfach wiederholen. Fortschreitende Insektizid-Resistenzen und die schiere Größe der weltweiten Malaria-regionen machen den Kampf gegen die Erkrankung zur Herkulesaufgabe. Die Zukunft gehört daher neuen biotechnologischen Strategien, die auf verschiedenen Ebenen eingreifen. Damit sie jedoch Aussicht auf Erfolg haben, müssen wir grundlegend verstehen, was eine Moskitoart zu einem starken Überträger macht. Nur wenn wir die Überträger der Malaria wirklich kennen, können wir sie auch gezielt bekämpfen. o

3 Hetze im Netz besser bekämpfen

FABIAN WINTER

Max-Planck-Institut
zur Erforschung von
Gemeinschaftsgütern, Bonn

Bedrohungen, Nötigungen, diskriminierende Äußerungen oder Beleidigungen – all das ist inzwischen Alltag im Internet, vor allem in den sozialen Netzwerken. Die Frage, wie sich die ausufernden Hasskommentare wieder eindämmen lassen, wird in der Öffentlichkeit vielfach diskutiert. Experimente unserer Forschungsgruppe haben eine eindeutige Antwort auf diese Frage ergeben.

Auf See und vor Gericht ist man in Gottes Hand, lautet ein bekanntes Sprichwort. Ob nun wirklich eine höhere Macht für überraschende Urteile zuständig ist, sei dahingestellt, sie sorgen trotzdem immer wieder für ungläubiges Kopfschütteln. So unter anderem das Urteil des Berliner Landgerichts im Fall Renate Künast im Sommer 2019. Die Politikerin hatte auf Herausgabe der Namen und Adressen von Personen geklagt, die sie im Internet wüst beschimpft hatten. Zur Überraschung sowohl von Laien als auch von Rechts-experten beurteilten die Richter diese Hasskommentare als sachliche Debattenbeiträge und sahen sie damit von der Meinungsfreiheit gedeckt. Allerdings revidierte das Gericht sein Urteil später teilweise.

Hasskommentare jeglicher Art treffen natürlich nicht ausschließlich Prominente, sondern mit der immer weiter fortschreitenden Digitalisierung unserer Kommunikation auch breitere Schichten der Gesellschaft. Zunehmend werden dabei Migranten oder religiöse und sexuelle Minderheiten beschimpft. Während diese Diagnose weithin geteilt wird, sind die genauen Mechanismen hinter der Ausbreitung wenig erforscht. In den vergangenen Jahren haben wir daher in der Forschungsgruppe „Mechanisms of Normative Change“ am Bonner Max-Planck-Institut zur Erforschung von

Gemeinschaftsgütern eine Reihe solcher Mechanismen genauer betrachtet.

Nach einer weitgehend unregulierten Anfangsphase von sozialen Netzwerken wie Facebook und Twitter und Co. rücken missbräuchliche Hasskommentare in den Fokus der öffentlichen Debatte. Eine wesentliche Frage dabei ist, wie mit diesen Kommentaren umgegangen werden soll, um eine weitere Ausbreitung zu verhindern. Kann man der Kommunikation freien Lauf lassen und darauf setzen, dass die Community eigene Normen des Umgangs etabliert, die Nutzer krasse Normverstöße erkennen und die Autoren der Kommentare darauf hinweisen? Oder sollten die Betreiber eingreifen, indem sie Negativbeispiele durch Löschung der Kommentare oder sogar durch das Sperren von Nutzerprofilen aus dem Verkehr ziehen?

Nutzer orientieren sich am negativen Ton einer Onlinedebatte

Um die Wirkung der verschiedenen Vorgehensweisen zu vergleichen, haben wir ein eigens eingerichtetes Online-forum gestartet. Dort konnten wir bestimmen, welche Art von Kommentaren die Nutzer zu sehen bekamen. In

HATE



HATE SPEECH



einer groß angelegten Reihe von Experimenten konnten wir beobachten, dass sich Nutzer tatsächlich am negativen Ton einer Onlinedebatte orientieren. Das führt dazu, dass viele ihrerseits negativere Kommentare verfassen – beispielsweise gegen Minderheiten. Wenn Hasskommentare gepostet wurden, führte das dazu, dass hasserfüllte Äußerungen danach noch negativer ausfielen, sich die Hasskommentare also steigerten. Interessanterweise änderte sich dieses Verhalten auch dann nicht, wenn die Verbreiter von Hass und Hetze von anderen Nutzern zurechtgewiesen wurden. Lediglich das Löschen von abfälligen, diskriminierenden und vulgären Äußerungen verhinderte einen weiteren Verfall der Debattenkultur.

heiten zu sehen waren und in anderen Fällen zusätzlich einzelne Hasskommentare. Während das Löschen der Hasskommentare vor dem Terroranschlag nur einen kleinen Effekt auf die Debattenkultur hatte, war der Unterschied in den Kommentaren nach dem Anschlag deutlich: Negativbeispiele wurden sehr viel bereitwilliger aufgenommen und verschärften gerade die extremen Kommentare noch weiter.

Große Wandlungen führen oft zu einem Gefühl der Normlosigkeit

Zur Erklärung dieses Effektes greifen wir auf einen klassischen Begriff der Soziologie zurück: Émile Durkheims These der Anomie besagt, dass große strukturelle Wandlungen in einer Gesellschaft häufig mit einem generellen Gefühl der Normlosigkeit einhergehen. In kleinerem Maßstab kann man auch im Fall der Terroranschläge diese Anomie beobachten. Während vor dem Anschlag eine Antidiskriminierungsnorm weithin anerkannt ist, fragen sich nach den Anschlägen viele, ob diese überhaupt noch gilt. Um Informationen über deren Gültigkeit zu bekommen, orientieren sich die Menschen an ihrem Umfeld: Sehen sie vor allem positive oder neutrale Aussagen über Ausländer, so schwingt das Pendel in Richtung Gültigkeit. Wiederholte Normbrüche haben jedoch genau den gegenteiligen Effekt: Die Norm scheint nicht mehr so streng zu gelten, sodass diejenigen, die vorher nicht öffentlich gegen Migranten Stellung bezogen haben, sich nun veranlasst fühlen, dies zu tun.

Unsere Forschung liefert in vielerlei Hinsicht wertvolle Erkenntnisse. Einerseits behandelt sie ein gesellschaftlich aktuelles und relevantes Thema: Sie identifiziert Situationen, in denen es auf ein engagiertes Einstehen gegen Diskriminierung ankommt, und zeigt Wege auf, wie dieses zu gestalten ist. Andererseits ist es auch für die Forschung zu sozialen Normen wichtig zu verstehen, wie sich normative Verunsicherung, oder eben Anomie, auf den Wandel sozialer Normen auswirkt. Schließlich zeigt unsere Forschung auch, wie man mit experimentellen Methoden gesellschaftliche Debatten analysieren und auf diese Weise quantitative Ansätze mit häufig qualitativen Fragestellungen verbinden kann. o

Normen werden in Frage gestellt, wenn außergewöhnliche Ereignisse ihre Gültigkeit ins Wanken bringen.

Soziale Normen des zivilen Umgangs scheinen also maßgeblich vom Verhalten anderer abzuhängen. Besonders stark scheinen hier sogenannte deskriptive Normen zu wirken, die aus dem konkreten Verhalten anderer abgeleitet werden. Weit weniger wirksam scheint jedoch die abschreckende Wirkung von informellen Sanktionen zu sein – im Fall der sozialen Medien die Gegenkommentare anderer Nutzer.

Allgemein werden soziale Normen oft dann infrage gestellt, wenn außergewöhnliche Ereignisse ihre Gültigkeit ins Wanken bringen. Wir sehen das zum Beispiel, wenn Horrornachrichten in den Medien die Runde machen. Vor diesem Hintergrund haben wir in einer weiteren Studie die Situation kurz vor und kurz nach zwei islamistischen Terroranschlägen in Deutschland im Frühjahr 2016 verglichen. Für Nutzer, die unser Onlineforum besuchten, stellten wir in diesem Fall den Ton der Debatte so zusammen, dass in einigen Fällen ausschließlich positive oder neutrale Aussagen zu Minder-

4 Schützende Mikroben an der Wurzel

THORSTEN
THIERGART,
FELIX GETZKE,
STÉPHANE
HACQUARD
Max-Planck-Institut
für Pflanzenzüchtungs-
forschung, Köln

Probiotische Lebensmittel und Mikroorganismen, die für die Gesundheit förderliche Substanzen produzieren, erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. Auch Pflanzen leben in enger Gemeinschaft mit einer großen Zahl von nützlichen Mikroorganismen. Mein Team und ich wollen solche Mikroorganismen identifizieren und herausfinden, wie sie das Wachstum von Pflanzen fördern und diese vor Krankheiten schützen.

Pilzerkrankungen verursachen in der Landwirtschaft erhebliche Schäden. Landwirte bekämpfen sie meist mit Anti-Pilzmitteln, sogenannten Fungiziden. Oder sie setzen auf Pflanzensorten, die resistent gegen die krank machenden Pilze sind. Doch vielleicht hält ja der Boden eine nachhaltigere Lösung bereit.

Der Boden beherbergt eine Vielzahl verschiedener Mikroorganismen, darunter Bakterien und Pilze. Einige dieser Mikroben besiedeln als Nützlinge die Wurzeln von Pflanzen. Ein Beispiel sind die schon seit Langem bekannten Stickstoff-fixierenden Bakterien, sogenannte Rhizobakterien: Sie dringen in die Wurzelzellen von Hülsenfrütlern ein und helfen der Pflanze in speziellen Symbioseorganen, Mineralstoffe aufzunehmen.

Pflanzen werden aber auch von krank machenden Mikroorganismen besiedelt. Als Konsequenz haben sie ein Abwehrsystem ausgebildet, das Erreger erkennen und in Schach halten kann. Anders als Tiere und Menschen besitzen Pflanzen kein adaptives Immunsystem. Sie verlassen sich daher ausschließlich auf Rezeptormoleküle außer- und innerhalb von Zellen, die

Krankheitserreger erkennen und eine Abwehrreaktion auslösen.

Könnten die „nützlichen“ Mikroorganismen zusätzlichen Schutz gegen Krankheitserreger bieten und wenn ja, wie? Mein Team und ich wollen herausfinden, ob und wie das Zusammenspiel verschiedener Organismen in der Mikrobengemeinschaft die Gesundheit einer Pflanze beeinflusst. Wir konzentrieren uns dabei auf die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*), eine unter Pflanzenforschern beliebte Modellpflanze.

Unterschiedliche Wurzelmikroben in Reinkultur

Wir haben dazu Bakterien, Pilze und sogenannte Oomyzeten untersucht, die als Ei- oder Scheinpilze eng mit Braunalgen verwandt sind. In einem ersten Schritt haben wir den Großteil der Mikroben auf den Wurzeln der Pflanze als Reinkulturen isoliert. Als Nächstes haben wir die einzelnen Mikroorganismen in unterschiedlicher



Mikroorganismen auf einer Pflanzenwurzel unter dem Elektronenmikroskop.



Kombination zusammen mit sterilen Pflanzen wachsen lassen. So konnten wir den Effekt der einzelnen Kombinationen unter kontrollierten Laborbedingungen bestimmen und herausfinden, ob ein Ungleichgewicht zwischen Bakterien, Pilzen und Oomyzeten das Wachstum und das Überleben der Pflanzen beeinflusst.

Bakterien hemmen das Wachstum von Pilzen und anderen Mikroben

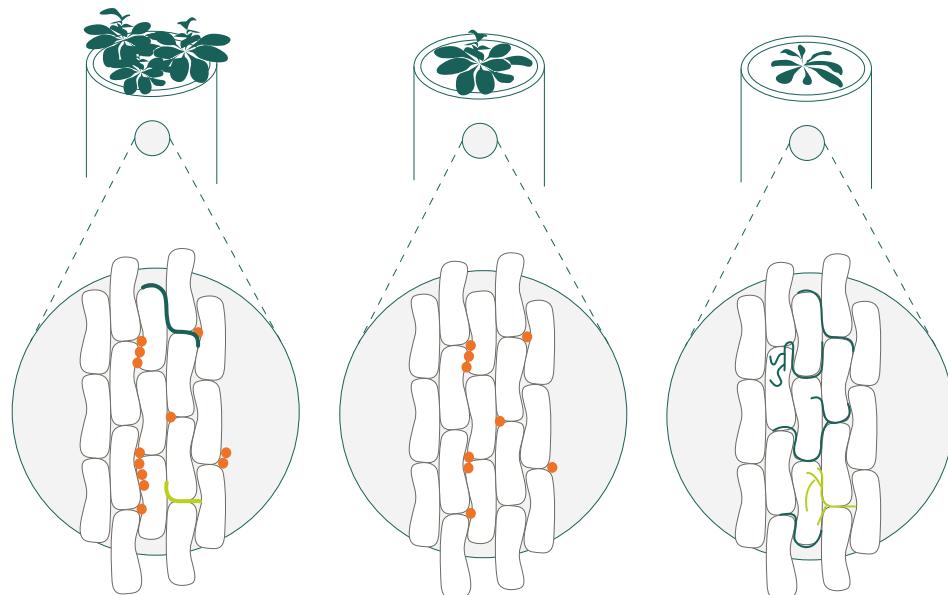
Unsere Versuchspflanzen konnten dabei potenziell schädliche Pilze und Oomyzeten nur in Anwesenheit von Bakterien überleben. Diese Bakterien scheinen das Aufkommen von Pilz- und Oomyzeten-Gemeinschaften an der Wurzel zu behindern und so das Wachstum und Überleben der Wirtspflanze zu unterstützen. Eine solche Schutzfunktion scheint eine unter Bakterien verbreitete Eigenschaft zu sein.

Unsere Experimente zeigen, dass das pflanzen-eigene Immunsystem alleine nicht ausreicht, um gegen

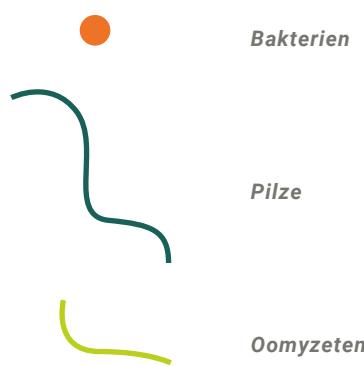
Werden die Wurzeln sterilisierter Pflanzen nur von Pilzen und Oomyzeten wiederbesiedelt (rechts), wachsen die Pflanzen schlechter, als wenn zusätzlich Bakterien darauf wachsen (links).

Sprosswachstum

Überlebensrate



Mikrobielle Vielfalt



schädliche Pilze und Oomyzeten bestehen zu können. Die Bakterien an den Wurzeln sind also gewissermaßen eine Erweiterung des Immunsystems der Pflanze. Interessanterweise wachsen Pflanzen besser, wenn alle drei Gruppen von Mikroorganismen anwesend sind. Bakterien, Pilze und Oomyzeten besitzen also offenbar Eigenschaften, die sich gegenseitig ergänzen und so die Gesundheit von Pflanzen in der Natur fördern. Damit wir die natürliche Schutzfunktion von Mikroorganismen für Pflanzen verstehen und nutzbar machen können, wollen wir als Nächstes herausfinden, wie diese Bakterien das Wachstum von krank machenden Pilzen und Oomyzeten begrenzen.

Unsere Forschungsergebnisse haben den Weg dafür geebnet, verschiedene Bakterien so miteinander zu kombinieren, dass sie Schadorganismen in Schach halten können. Die Entwicklung solcher künstlichen Bakteriengemeinschaften könnte dazu beitragen, dass sich die Produktivität im Ackerbau deutlich erhöhen lässt. o

5 Ich bin die Haltestelle!

**STEPHAN
HERMINGHAUS**
Max-Planck-Institut
für Dynamik und
Selbstorganisation,
Göttingen

Stellen Sie sich vor, ein Bus holt Sie direkt dort ab, wo Sie sich gerade befinden, und bringt Sie zu Ihrem gewünschten Ziel. Was sich aufwändig und unökonomisch anhört, leistet das von uns theoretisch entwickelte Ride-Pooling-System EcoBus. Inzwischen hat es sich auch in ersten Praxistests bewährt und könnte so dazu beitragen, unsere Mobilitätsprobleme zu lösen.

Das Auto steht seit Jahrzehnten für individuelle Mobilität. Die Emissionen von Kohlendioxid, Stickstoff und Feinstaub sowie die wachsende Verkehrsdichte vor allem in Städten machen den Individualverkehr jedoch zu einem immer größeren Problem. Deswegen suchen Verkehrsplaner nach neuen Fortbewegungskonzepten, die eine praktikable Alternative zum eigenen PKW darstellen und gleichzeitig die Umwelt schonen. Wir haben am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation ein Ride-Pooling-System namens EcoBus entwickelt, das zukünftig einen Teil des Individualverkehrs ersetzen könnte. Wir haben es theoretisch konzipiert und anschließend in Testkampagnen erprobt. Nach den hierbei gesammelten Erfahrungen sehen wir im EcoBus das Potenzial, den Individualverkehr zu verringern und gleichzeitig den öffentlichen Verkehr zu stärken.

In unserem Ride-Pooling-System fahren Kleinbusse auf Routen, die nur durch den Bedarf der Fahrgäste bestimmt werden. Diese geben mit einer App oder per Telefon vor jeder Fahrt den gewünschten Abhol- und

Zielort sowie die gewünschte Abholzeit an. Das System berechnet aus diesen Anfragen optimierte Routen für die Kleinbusse, die die Passagiere ungefähr zu der gewünschten Zeit dort abholen, wo sie sich befinden, und punktgenau zum Ziel bringen. Haltestellen gibt es nicht – jeder Passagier ist seine eigene Haltestelle. Der Ticketpreis entspricht dem jeweiligen ÖPNV-Tarif.

Der EcoBus will Menschen zum öffentlichen Nahverkehr bringen

Die Idee des Ride-Sharings oder -Poolings ist an und für sich nicht neu. So beruhen Fahrdienste wie Uber, UberPool, MOIA, CleverShuttle oder door2door ebenfalls darauf, dass man Fahrzeuge per Smartphone zu jeder Zeit an jeden Ort bestellen kann. Das Problem besteht jedoch darin, dass diese Dienste in der Praxis oft weitere Fahrzeuge auf die Straße bringen. Letztlich wird der Straßenverkehr dadurch nicht entlastet, stattdessen zie-



hen diese Dienste dem umweltfreundlichen öffentlichen Personennahverkehr die Gäste ab und verlagern den Transport auf viele Autos. Der EcoBus will das Gegenteil erreichen: Er soll die Menschen aus den Autos holen und zum öffentlichen Nahverkehr bringen. Das erreichen wir, indem wir die Routen der EcoBusse an das Netz und die Fahrpläne des öffentlichen Nahverkehrs andocken. EcoBus ergänzt also das bestehende Netz und agiert, wo immer dies möglich und sinnvoll ist, als Zubringer zum Linienverkehr, wodurch dieser merklich gestärkt wird.

Das Ride-Pooling ist verwandt mit dem mathematischen „Problem des Handlungsreisenden“ aus den 1930er-Jahren: Dabei besteht die Aufgabe darin, den kürzesten Weg zwischen mehreren Städten zu finden, die ein Handlungsreisender aufsuchen will.

Die Routenführung muss Linienverbindungen berücksichtigen, um sie mitzubenutzen.

Die 15 größten deutschen Städte etwa lassen sich mit 43 Milliarden verschiedenen Streckenkombinationen verbinden. Heute gibt es zahlreiche Algorithmen, die Lösungen für diese Optimierungsaufgabe liefern. Sie werden unter anderem in Navigationssystemen eingesetzt.

Wir haben es beim Ride-Pooling aber nicht mit einem Reisenden, sondern mit vielen Fahrgästen zu tun, die abgeholt und wieder abgesetzt werden wollen. Außerdem müssen wir die Routen von mehreren Bussen aufeinander abstimmen. So sollte zum Beispiel ein Bus, der gerade in einer Richtung unterwegs ist, nicht die Kunden mit einem Fahrtziel in der Gegenrichtung aufnehmen. Zudem ändert sich permanent die Route, weil ständig neue Fahrgäste einen Fahrwunsch schicken.

Und schließlich muss die Routenführung auch die Linienverbindungen berücksichtigen, um Parallelverkehr mit diesen zu vermeiden oder sie möglichst mitzubenutzen.

Methoden statistischer Physik, um ein Ride-Pooling-System zu konzipieren

Eine große Herausforderung war die Schnelligkeit, mit der das System entscheiden muss, denn schließlich soll ein Fahrgast binnen weniger Sekunden eine Antwort auf sein Smartphone erhalten, wann sie oder er etwa abgeholt wird. Die diversen Anforderungen machen das System insgesamt sehr komplex. Unser Team mit mehr als 20 Mitgliedern benötigte gut zwei Jahre, um theoretisch zu untersuchen, wie ein Ride-Pooling-System konzipiert sein muss, damit es attraktiv und rentabel ist, um den Algorithmus zur Routenoptimierung zu entwickeln und die Apps (iOS und Android) für Kunden, Fahrer und Callcenter zu schreiben.

Für dieses vielschichtige Problem konnte unsere Gruppe auf theoretische Methoden der statistischen Physik zurückgreifen, die wir in der Vergangenheit erfolgreich für andersartige, aber verwandte Fragestellungen angewendet haben, wie etwa die Strömung von schwärmendem Plankton. Planktonorganismen werden zwar von großen Wasserströmungen in eine bestimmte Richtung transportiert, können aber durch Ruderbewegungen ebenfalls die Richtung variieren. In diesen Fällen spricht man von aktiven Fluiden. Auch der Autoverkehr lässt sich so verstehen: Auch in ihm folgen die Fahrzeuge in etwa einem Strom in eine bestimmte Richtung, können aber von dieser Hauptrichtung aktiv abweichen.

Unsere theoretischen Ergebnisse haben wir in mehreren Pilotprojekten in der Praxis getestet, in denen wir jeweils wertvolle neue Forschungserkenntnisse gewonnen haben. Die ersten beiden fanden mit bis zu neun Fahrzeugen von Juni 2018 bis Februar 2019 im Raum Bad Gandersheim parallel zu den Gandersheimer

Der intermodal optimierte Betrieb führt zu einer beträchtlichen Zunahme der Passagierzahlen im Linienverkehr.

Domfestspielen beziehungsweise im Oberharz in den Landkreisen Goslar und Göttingen statt. Hier stellten uns die geringe Einwohnerdichte in der Fläche, das Wetter (Winter im Harz) sowie die Topografie und die lückrige Mobilfunkabdeckung vor große Herausforderungen. Der EcoBus war bereits hier so ausgelegt, dass in einigen Städten Anschlussfahrten zu und von den Zügen sowie zu Regional- und Stadtbussen möglich waren, ansonsten handelte es sich noch um den Standard-Rufbusbetrieb.

Alle drei Testprojekte wurden von den Bewohnern sehr gut angenommen

Seit Mitte Oktober 2019 läuft nun in einem Vorort im Norden Leipzigs die Vollversion unter dem Namen Flexa: Kleinbusse und Linienverkehr werden zu einem Gesamtsystem integriert. Erste Auswertungen zeigen bereits, dass dieser intermodal optimierte Betrieb, nicht nur zu hoher Kundenzufriedenheit, sondern auch zu einer beträchtlichen Zunahme der Passagierzahlen auf den Linien führt.

Alle drei Testprojekte wurden von den Bewohnern sehr gut angenommen, die Zahl der registrierten Kunden stieg jeweils stetig. Am Ende des sieben Monate dauernden Projekts im Oberharz beispielsweise war

ein Marktanteil von deutlich über zehn Prozent erreicht. Aufgrund der beschränkten Zahl der Fahrzeuge war die Kapazität unseres Systems jeweils etwas oberhalb von 250 Fahrten pro Tag ausgeschöpft. Im recht dünn besiedelten Oberharz benötigten wir neun Fahrzeuge, um die Nachfrage bedienen zu können, im aktuellen Pilotprojekt im suburbanen Vorstadtgebiet von Leipzig genügen dafür vier Kleinbusse. Dort war die Vollast auch bereits nach zwei Wochen erreicht.

Die durchschnittliche Zahl der Passagiere pro Kleinbus, eine für die Rentabilität des Systems ganz wesentliche Zahl, entsprach innerhalb der Fehlergrenzen den Vorhersagen unserer Theorie. Im Oberharz hätten wir etwa mit der zehnfachen Zahl an Fahrzeugen den gesamten Mobilitätsbedarf, der derzeit noch größtenteils mit dem eigenen PKW erfüllt wird, abdecken können, bei einer für den öffentlichen Verkehr üblichen Kostendeckung. Unser Ziel liegt aber, wie oben beschrieben, in der Entwicklung des intermodalen Gesamtsystems aus Liniendiensten und den Kleinbussen als Service der „letzten Meile“, wie es jetzt bei Leipzig getestet wird. Wir hoffen, dieses System auch zeitnah auf den Markt bringen zu können. o

6 Ein Gerüst für heilende Nerven

CHRISTOPHER
V. SYNATSCHKE,
TANJA WEIL
 Max-Planck-Institut
für Polymerforschung,
Mainz

Durchtrennte Nervenbahnen sind nur schwer behandelbar. Wenn überhaupt, lassen sich die Schäden bisher nur durch aufwändige Operationen reparieren. Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung haben wir Materialien entwickelt, die verletzte Nerven zum Wachstum anregen. Erste Tests an Mäusen zeigen, dass sich Nervenstränge auf diese Weise regenerieren können.

Haben Sie schon einmal versucht, einen Stift ohne Ihren Daumen festzuhalten? Dann werden Sie festgestellt haben, wie schwierig das ist. Was wie eine nette Fingerübung klingt, ist für manche bittere Realität: Werden Nervenbahnen etwa bei einem Auto- oder Berufsunfall verletzt oder vollständig durchtrennt, werden einzelne Glieder oder ganze Körperteile taub und lassen sich oft gar nicht mehr bewegen. Die einzige Chance, ihre Funktionalität wiederherzustellen, bot bisher eine Operation: Bei einigen Operationen werden dazu Nervenstränge an einer anderen Körperstelle entnommen und an der durchtrennten Stelle eingefügt. So lässt sich zwischen den verletzten Nervenenden wieder eine Verbindung herstellen, und der Patient kann das betroffene Körperteil bis zu einem gewissen Grad wieder bewegen.

Wachstum braucht Struktur

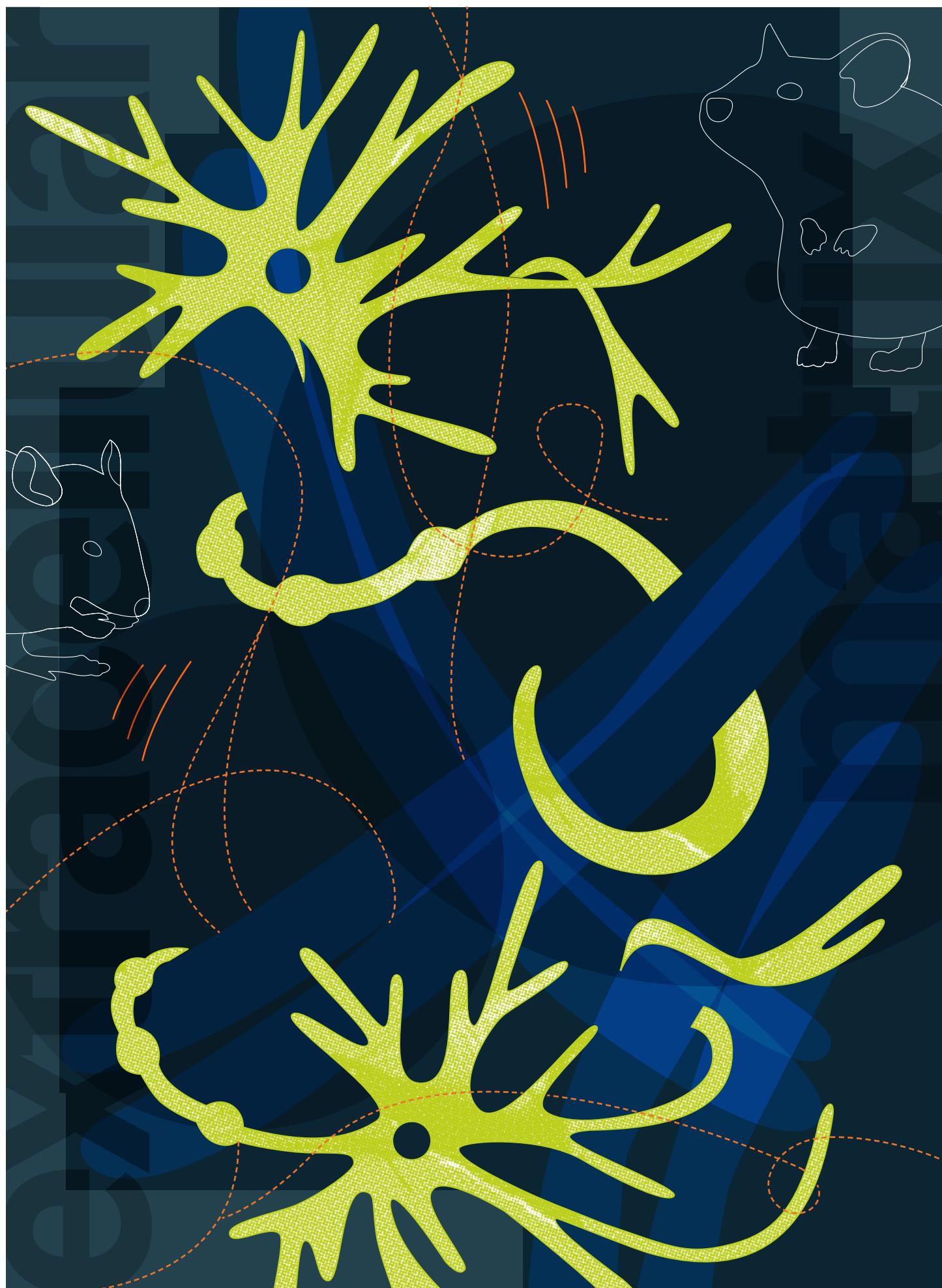
Zwar sind Nerven durchaus in der Lage, eine durchtrennte Stelle zu überbrücken. Doch der Prozess ist äußerst langwierig. Außerdem sind die verletzten Nervenfasern hierfür auf ein intaktes Gerüst aus Proteinen angewiesen, wie es gesunde Nerven umgibt. Bei Verletzungen wird jedoch neben der Nervenbahn selbst oft auch dieses Gerüst beschädigt. Diese sogenannte extrazelluläre Matrix bildet den Haftgrund für die Nervenbahnen.

Ähnlich wie Tomatenpflanzen ein Rankgitter benötigen, brauchen Nervenzellen diese Matrix, um daran entlangzuwachsen. Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung haben wir daher ein Material aus körpereigenen Bausteinen entwickelt, mit dem sich diese Matrix ersetzen lässt. Und wie sich gezeigt hat, ermöglicht es das künstliche Gerüst verletzten Nerven, sich zu regenerieren.

Die natürliche Matrix besteht aus speziellen Proteinen, langen Molekülketten, die sich scheinbar wirr wie Fäden in einem Wollknäuel anordnen. Viele dieser winzig kleinen Wollknäuel reihen sich nebeneinander auf und formen so lange Proteinschnüre. Ein Geflecht dieser Schnüre bildet dann die extrazelluläre Matrix, an der sich Nervenzellen festhalten können.

Fasern wie aus dem Legobaukasten

Damit sich Proteine bilden, finden im Körper viele komplexe biochemische Prozesse statt – zu komplex, um sie im Reagenzglas nachzuahmen. Daher gehen wir in unserer Forschung einen etwas anderen Weg: Wir verwenden zwar die gleichen Grundmaterialien, aus denen auch die extrazelluläre Matrix der Nervenfasern aufgebaut ist, setzen diese jedoch in einfacherer Form zusammen. Hierbei nutzen wir kurze Molekülketten, sogenannte Peptide, die wie Proteine aus Aminosäure-Bau-



Wir sind zuversichtlich, dass unsere künstliche extrazelluläre Matrix helfen könnte, kleine Verletzungen an Nervenbahnen zu heilen.

steinen bestehen. Diese Peptide stellen wir chemisch gezielt so her, dass sich die Position jedes Bausteins genau festlegen lässt.

Im übertragenen Sinn erzeugen wir durch die Synthese an den Molekülen Noppen und dazu passende Löcher, wie wir sie von Legosteinen kennen: Zwei so synthetisierte Peptid-Moleküle lagern sich am ehesten so aneinander an, dass die Noppen und Löcher aufeinandertreffen. Nur dann entsteht eine stabile Struktur. Auf diesem Weg stellen wir lange Fasern her, die in ihrer mikroskopischen Struktur zwar anders aufgebaut sind als die Proteine der extrazellulären Matrix der Nervenbahnen. In ihren Maßen und ihrer chemischen Zusammensetzung ähneln sie den natürlichen Proteinen aber sehr.

Vom Reagenzglas in die Maus

Wie verhalten sich Nervenzellen nun, wenn sie auf dieser künstlichen extrazellulären Matrix wachsen sollen? Und wie verändern sich diese Wachstumseigenschaften, wenn wir die verwendeten Peptide chemisch variieren? Diese Fragen haben wir gemeinsam mit unserem Kooperationspartner Bernd Knöll, Professor am Institut für Physiologische Chemie der Universität Ulm, untersucht. Hierzu haben wir viele verschiedene Peptidstrukturen hergestellt, auf Glasträger aufgebracht und hierauf Nervenzellen kultiviert. Während die Nervenzellen auf manchen Faserstrukturen quasi überhaupt nicht wuchsen, bildeten sich bei anderen nach kurzer Zeit sogenannte Axone – dünne Fortsätze, welche die Verbindung zu anderen Nervenzellen schaffen.

Diejenige Faserstruktur, auf der die Nervenzellen am besten wuchsen, haben wir dann mit unseren Kollegen an der Universität Ulm im Tierversuch getestet. Einer Maus wurde chirurgisch einseitig ein Gesichtsnerv durchtrennt, der die Bewegung der Schnurrhaare

steuert. An der so erzeugten Nervenlücke wurden die Peptide, nachdem sie die Faserstruktur ausgebildet hatten, injiziert. Nach 18 Tagen konnte die Maus ihre Schnurrhaare bereits wieder bewegen – die Nervenbahnen waren offenbar zusammengewachsen.

Da die Peptide unserer künstlichen Fasern den natürlichen Proteinen der extrazellulären Matrix sehr ähneln, hoffen wir, dass das Material für die Zeit der Heilung zwar an Ort und Stelle verbleibt, der Körper es danach aber abbauen kann. Bisher haben wir beobachtet, dass die Menge des Materials an der Injektionsstelle langsam abnimmt. Ob das jedoch auf den biologischen Abbau oder aber die Verteilung im Körper zurückzuführen ist, bedarf weiterer Untersuchungen.

Richtungsweisende Eigenschaften

Wie das Laborexperiment mit einer Maus gezeigt hat, lassen sich mit unserer künstlichen Matrix Schädigungen an Nervenbahnen reparieren. Bis zum Einsatz in der Klinik sind allerdings noch weitere Optimierungen nötig, weil die Nervenzellen auf unserem Material noch nicht so gut wachsen wie in der natürlichen Matrix, und zudem recht ungeordnet in alle Richtungen. In einem nächsten Schritt wollen wir daher in die künstliche Matrix noch Wachstumsfaktoren einbetten, um die Heilung weiter zu beschleunigen. Weiterhin möchten wir die injizierten Faserstrukturen ausrichten, damit die Nervenzellen in eine Richtung wachsen.

Wir sind zuversichtlich, dass unsere künstliche extrazelluläre Matrix in Zukunft helfen könnte, zumindest kleine Verletzungen an Nervenbahnen zu heilen. Sie böte dann in einigen Fällen eine Alternative zu aufwändigen Operationen. Und vielleicht lassen sich nach weiterer Forschung so einmal nicht nur Verletzungen am peripheren Nervensystem, sondern auch am zentralen Nervensystem behandeln. o

7 Synapsen setzen auf regionale Produkte

**SUSANNE TOM DIECK,
ANNE-SOPHIE HAFNER,
PAUL DONLIN-ASP,
VIDHYA RANGARAJU,
ERIN SCHUMAN**
Max-Planck-Institut
für Hirnforschung,
Frankfurt am Main

Wer Fahrradfahren einmal gelernt hat, beherrscht es in der Regel ein Leben lang. So dauerhaft erlernte Fähigkeiten sein können, so kurzlebig sind die Moleküle, auf denen Lernvorgänge beruhen. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Produktion neuer Proteine an den Kommunikationsstellen von Nervenzellen, den Synapsen. Diesen Proteinen sind wir auf der Spur, um die zellulären Abläufe von Lernen und Gedächtnis besser zu verstehen.

Nervenzellen empfangen Signale über Tausende von Synapsen: Verbindungsstellen, die Informationen nicht mittels elektrischer Impulse, sondern über Botenstoffe weitergeben. Sie können die Stärke eines Signals individuell verstärken oder abschwächen – eine Fähigkeit, die man als synaptische Plastizität bezeichnet. Außerdem können sich auch komplett neue Synapsen bilden.

Damit die Signale schnell große Entfernungen überbrücken können, sind Nervenzellen ungewöhnlich aufgebaut: Von einem kugeligen Zellkörper zweigen baumartige Ausläufer (Dendriten) für den Empfang von Signalen sowie ein langer Fortsatz zum Versenden ab. In Wirbeltieren kann ein solches Axon Hunderte Millimeter lang sein. Im Falle einer Nervenzelle des Bewegungssystems, die mit die längsten Axone besitzt, bedeutet das: Hätte der Zellkörper die Größe eines Tischtennisballs, wären seine entlegensten Synapsen fast 400 Meter weit von ihm entfernt.

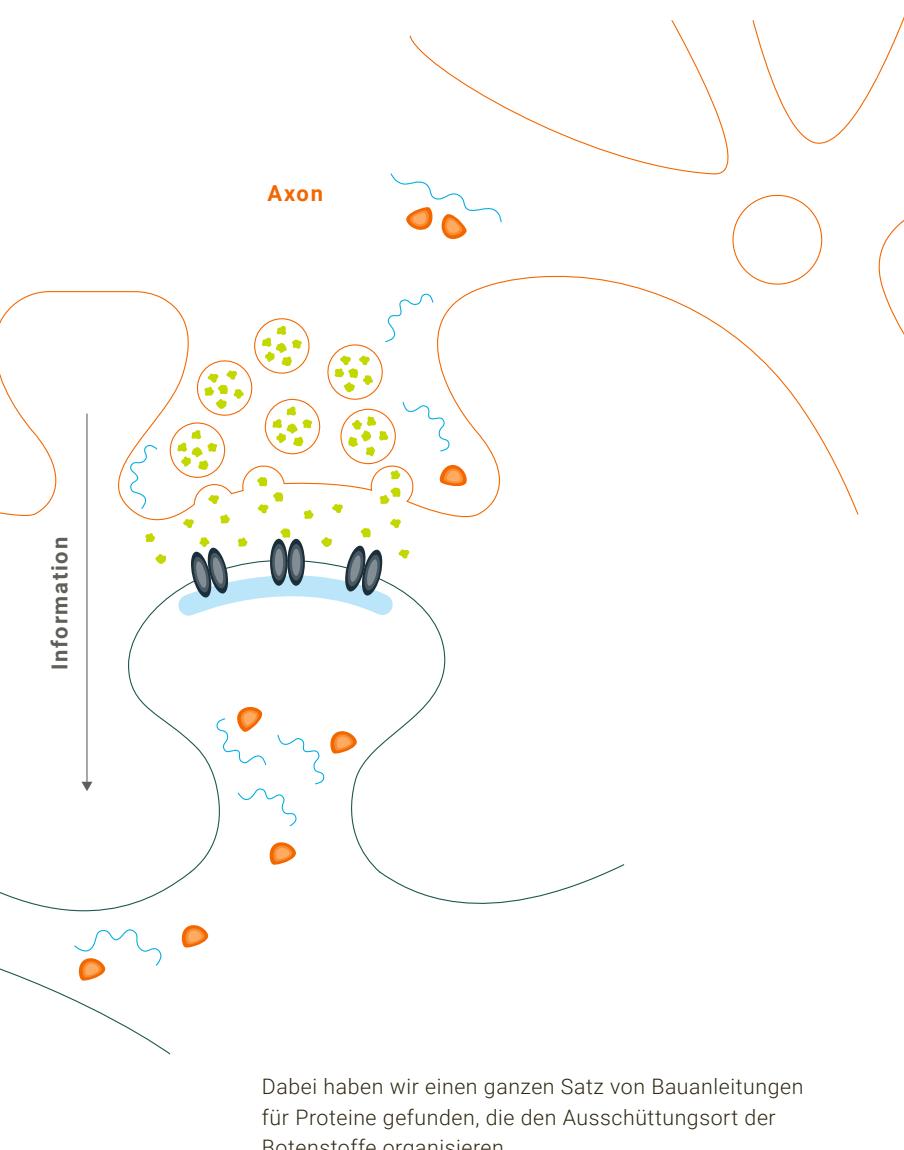
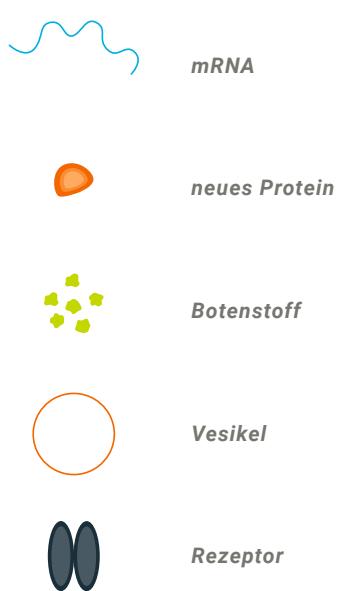
Zwischen Synapsen und dem Zellkörper liegen also oft große Entfernungen. Im Zellkörper befindet sich der Zellkern und in der Regel auch die Bauanleitungen für Proteine. Diese sind für die Lernvorgänge in den Synapsen unverzichtbar: Ohne die Produktion neuer Proteine lässt sich die Übertragungsstärke an Synapsen

nicht langfristig verstetigen und dadurch nichts Neues lernen. Heute wissen wir, dass eine Synapse im Mittel rund 50 Moleküle einer bestimmten Proteinart enthält. Bei bis zu 500 unterschiedlichen Arten kommen so insgesamt 25.000 Proteine pro Synapse zusammen. Da eine Nervenzelle im Durchschnitt 10.000 Synapsen besitzt, müssen bis zu 250 Millionen Proteine wegen ihrer Kurzlebigkeit nach wenigen Tagen ersetzt werden.

Normalerweise werden Proteine anhand von im Zellkörper erstellten Bauanleitungen gebildet, den sogenannten Boten-RNA-Molekülen – kurz: mRNAs –, und danach in der Zelle verteilt. Wie schafft es die Nervenzelle, die vielen Proteine trotz ihrer Größe und Komplexität schnell zu den einzelnen Synapsen zu transportieren? Wie erkennen die Proteine ihren Bestimmungsort? Und wie kann die Zelle unter Tausenden Synapsen eine ganz bestimmte gezielt verändern?

Bereits in den 1990er-Jahren haben wir erstmals nachgewiesen, dass neue Proteine dezentral, also in der Nähe der Synapsen, produziert werden können, wenn diese aktiv sind. Später haben wir Tausende von mRNAs fernab des Zellkörpers in Axonen und Dendriten entdeckt. Um diesem aufregenden Befund nachzugehen, haben wir nun die mRNA aus dem Teil der Synapsen isoliert, die die Signale an die nächste Zelle senden.

Sowohl im Sende- (rot) als auch im Empfängerteil (schwarz) einer Synapse sind Bauanleitungen für Proteine in Form von mRNA-Molekülen vorhanden. Neue Proteine ermöglichen eine bessere Informationsübertragung und schaffen so die Voraussetzung für zelluläres Lernen.



Dabei haben wir einen ganzen Satz von Bauanleitungen für Proteine gefunden, die den Ausschüttungsort der Botenstoffe organisieren.

Wie lokal werden die Proteine an Synapsen hergestellt?

Doch wie läuft die lokale Proteinproduktion im Detail ab? Bildlich gesprochen: Heißt „lokal“, dass zum Beispiel für ganz Hessen produziert wird oder nur für Frankfurt? Wo genau steht die dezentrale Fabrik? Welche Produkte werden zu einem bestimmten Zeitpunkt gefertigt, und woher stammt die Energie dafür?

Zunächst haben wir uns der Frage gewidmet, wo genau die Proteine gebildet werden. Wissenschaftler können eine solche Frage normalerweise mithilfe von Mikroskopen beantworten. In unserem Falle war dies jedoch eine Herausforderung, da die Entfernungen zwischen den möglichen Produktionsorten an der Auflösungsgrenze der Lichtmikroskopie liegen. Wir benötigten zudem eine Methode, um neu gebildete Proteine als solche identifizieren zu können.

Nachdem wir eine solche Technik entwickelt hatten, haben wir sie mit einem Trick kombiniert: Wirbetteten

Ohne die Produktion neuer Proteine lässt sich die Übertragungsstärke an Synapsen nicht dauerhaft verstellen und dadurch nichts Neues lernen.

Nervenzellen in eine Matrix ein, die wie eine Windel Feuchtigkeit aufnimmt und aufquillt. Verankert man die Proteine vor dem Quellvorgang an dieser Matrix, vergrößern sich im Idealfall alle ursprünglichen Strukturen gleichmäßig. Dadurch haben wir das Gewebe quasi um das Vierfache vergrößert und die für uns wichtigen Strukturen für Lichtmikroskope sichtbar gemacht.

Jede Form des zellulären Lernens produziert Proteine an anderen Orten

Nun wollten wir wissen, ob Proteine im Sender- oder Empfänger-Teil einer Synapse hergestellt werden. Dazu haben wir die Nervenzellen mit Substanzen behandelt, die verschiedene Arten zellulären Lernens auslösen. Erstaunlicherweise scheint es für jede Art des Zell-Lernens eine eigene Konstellation von Orten für die Proteinproduktion zu geben.

Nervenzellen benötigen viel Energie, auch für das zelluläre Lernen. Diese wird in besonderen Zellorganellen erzeugt, den sogenannten Mitochondrien. Wir haben die Kraftwerke der Zelle live unter dem Mikroskop verfolgt und beobachtet, dass sie sich in Axonen und Dendriten unterschiedlich verhalten: In Dendriten bleiben Mitochondrien in Ansammlungen von circa 30 Mikrome-

tern stabil an einem Ort, in Axonen bilden sie dagegen kleine mobile Pakete.

In einem Experiment haben wir gezielt einzelne Kraftwerk-Cluster außer Gefecht gesetzt. Es zeigte sich: Unter Normalbedingungen beeinflusst ein lokaler Ausfall die Proteinproduktion nicht. Aber für zelluläres Lernen konnten die Synapsen im Bereich der lahmgelegten Kraftwerke die dafür notwendige Proteinproduktion nicht mehr hochfahren. Lernen war nun nicht mehr möglich.

Die Klärung dieser Details ist auch deshalb von Bedeutung, weil fehlerhaft funktionierende Mitochondrien und Probleme bei der Proteinproduktion typisch für neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer oder Parkinson sind. Störungen der synaptischen Plastizität hängen unmittelbar mit Erkrankungen des Nervensystems wie Depression, Angststörungen und Suchtverhalten zusammen. Auch für die Rehabilitation nach Hirnschädigungen muss die Kommunikation und Plastizität an den Synapsen fehlerfrei funktionieren. Unsere Forschung kann dazu beitragen, bei Schädigungen des Gehirns zwischen Ursache und Wirkung unterscheiden zu können, und helfen, Fehlfunktionen zu korrigieren. o

8 Angriff auf den Autopiloten

MICHAEL BLACK
Max-Planck-Institut
für Intelligente Systeme,
Tübingen

Wie schnell die Entwicklung vom assistierten hin zum vollautonomen Fahrzeug forschreiten wird, ist ungewiss. Ein entscheidender Faktor ist hierbei die Zuverlässigkeit, mit der sich ein Fahrzeug in seiner Umwelt zurechtfindet und mit der es auf unvorhersehbare Ereignisse reagiert. Unsere Gruppe am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme zeigte, dass eine auf tiefen neuronalen Netzen basierende Methoden zur Bewegungsanalyse – eine wahrscheinliche Komponente zukünftiger autonomer Fahrzeuge – selbst durch kleine Störsignale verwirrt werden.

Selbstfahrende oder teilautonome Autos orientieren sich, indem sie ihre Umwelt mit verschiedenen Sensoren analysieren. Um eine Szene zu analysieren, nutzen Hersteller unter anderem den optischen Fluss. Er wird auch in der Robotik, Medizin, bei Videospielen und in der Navigation verwendet, um nur einige Beispiele zu nennen.

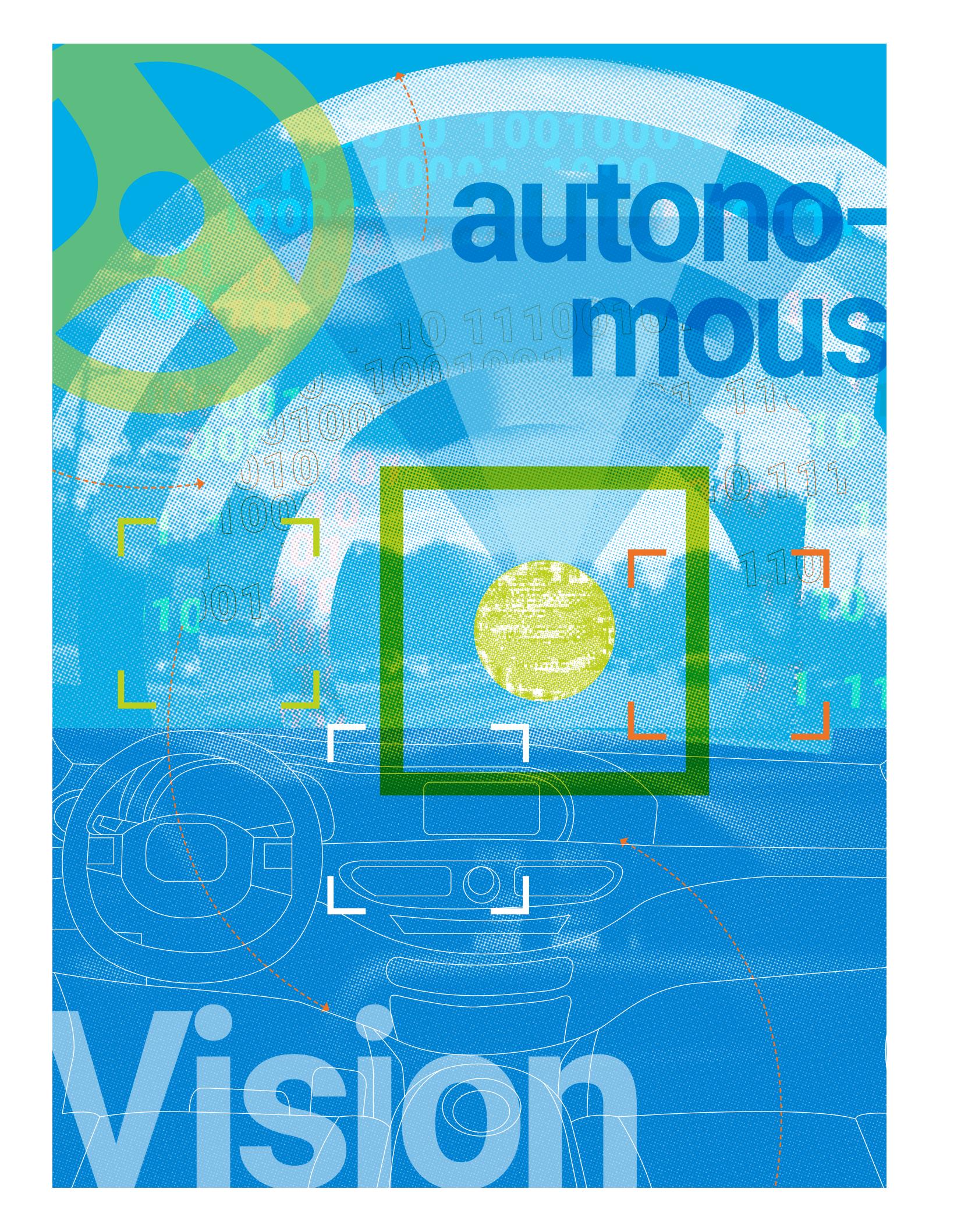
Der optische Fluss beschreibt die verschiedenen Bewegungen in einer Szene, die ein Mensch mit seinen Augen und ein Auto mittels der Bordkameras wahrnimmt. Fährt oder geht man, so scheinen statische Objekte wie Bäume, Häuser oder Hochspannungsmasten in entgegengesetzte Richtung zu driften. Die Bewegungsgeschwindigkeit ermöglicht es uns unter anderem, die Entfernung zu den Gegenständen einzuschätzen: Während ein naher Baum rasch nach hinten verschwindet, stehen entfernte Objekte wie Wolken und Berge scheinbar still. Außerdem sehen wir oder eine Kamera auch sich selbst bewegende Fahrzeuge, Menschen oder Tiere.

Um die verschiedenen Bewegungen zu analysieren, nehmen die Bordkameras eines Autos dabei schnell hintereinander zahlreiche Bilder auf; ein Computer schließt mit komplexen mathematischen Methoden aus den Unterschieden zwischen den Bildern auf die Bewegung

der einzelnen Objekte. Für jedes Pixel berechnet er einen Geschwindigkeitsvektor, der angibt, wie schnell und in welche Richtung sich das, was sich in diesem Pixel befindet, durch das Bild bewegt. Ein wichtiger Aspekt dabei ist: Sowohl die Bewegung des Fahrzeugs als auch die Bewegung der umgebenden Gegenstände, Personen oder anderen Autos verursachen einen optischen Fluss. Der Bordcomputer muss daher seine eigene Bewegung von der der anderen Objekte unterscheiden können – eine sehr komplexe Aufgabe.

Einfach zu erzeugende Farbmuster irritieren die Bewegungsanalyse

Jüngste Fortschritte im maschinellen Lernen haben zu schnelleren und besseren Verfahren geführt, die Bewegungen berechnen. In einem Gemeinschaftsprojekt unserer Abteilung für Perzeptive Systeme am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Tübingen und der Forschungsgruppe Autonomous Vision der Universität Tübingen zeigen wir jedoch, dass derartige Verfahren anfällig sind, wenn Störsignale im Spiel sind. Wenn in einer Szene zum Beispiel ein buntes Muster erscheint, sei es durch Zufall oder sei es durch einen Hackerangriff



autono-mous

Vision

Ziel war es, die Hersteller von selbstfahrenden Fahrzeugen vor der Bedrohung zu warnen.

absichtlich in den Bilddaten platziert. Selbst wenn sich das Muster nicht bewegt, kann es dazu führen, dass tiefe neuronale Netze, wie sie heute zur Flussberechnung weit verbreitet sind, falsch rechnen: Das Netzwerk kalkuliert plötzlich, dass sich große Teile der Szene in die falsche Richtung bewegen. Manchmal konnte der Farbfleck ein System komplett stören. Ein Blackout, der hochriskant ist.

Die Gefahr, dass aktuell auf dem Markt verfügbare Serienfahrzeuge betroffen sind, ist gering. Dennoch haben wir vorsichtshalber einige Automobilhersteller informiert, die derzeit selbstfahrende Modelle entwickeln, auch wenn wir wissen, dass die Störungsanfälligkeit solcher Netze den Herstellern höchstwahrscheinlich bereits bekannt ist. Das Thema wird auf den führenden Konferenzen zu Maschinellem Sehen immer wieder diskutiert. Das Ziel unseres Projekts war es, die Hersteller von selbstfahrenden Fahrzeugen vor der potenziellen Bedrohung zu warnen. Wenn sie davon wissen, können sie ihre Systeme so trainieren, dass sie gegenüber derartigen Störungen robust sind. Bislang gab es keine Studie, in der neuronale Netze auf ihre Störanfälligkeit für Bewegungsschätzungen hin untersucht wurden. Diese Lücke haben wir nun geschlossen.

Wir testeten in unserer Forschungsarbeit fünf frei verfügbare neuronale Netze auf optische Attacken. Hierfür kreierten wir zunächst die Farbmuster, die ein neuronales Netz durcheinanderbringen können. Solche Muster zu finden dauerte dabei nur wenige Stunden.

Die Farbmuster platzierten wir während der Testläufe an einer beliebigen Stelle in einer Szene. Überraschenderweise ließen sich alle fünf neuronalen Netze sehr leicht irritieren. Die Muster lösten manchmal sogar so viele Störsignale aus, dass sie zum Sicherheitsrisiko wurden. Dabei reichte in unserem Versuch selbst ein kleiner Fleck mit einer Größe von weniger als ein Prozent des Gesamtbildes aus, um das System so zu verwirren, dass die Hälfte des Bildbereichs betroffen war. Und je größer der Fleck, desto verheerender die Auswirkungen. Die Farbmuster sind also sehr effektiv. Doch was genau in den neuronalen Netzen abläuft, wenn sie solche Farbflecke sehen, können wir nicht sagen.

Was wir wissen: Neuronale Netze sind von der Arbeitsweise unseres Gehirns inspiriert. In dem Netz-

werk werden ankommende Daten analysiert, wobei diese unterschiedlich gewichtet werden. Am Ende gibt das System die ermittelte Bewegung jedes Objekts aus. Macht das Netzwerk Fehler, ist das vergleichbar mit optischen Täuschungen und Illusionen, auf die auch das menschliche Gehirn hereinfallen kann.

Von sich aus kann ein neuronales Netz die antrainierten Gewichtungen, die zu den Fehleinschätzungen führen, nicht ändern. Es sollte aber möglich sein, es neu zu trainieren, damit es nicht mehr solchen Irrtümern erliegt. Das ist jedoch eine komplexe Aufgabe, weil man dafür alle denkbaren Mustervariationen kennen müsste, die das System stören können.

Zuverlässige neuronale Netze werden autonomes Fahren sicherer machen

Dass neuronale Netze noch stark Verbesserungswürdig sind, zeigte schon ein viel einfacherer Versuch, den wir neben den Experimenten mit den Farbmustern anstellen. Wir zeigten dem System zwei identische Bilder. Obwohl es darin also keinerlei Bewegung oder Veränderung gab, stellte das Netzwerk einen Unterschied fest. Das darf nicht sein. Dass es hier schon Probleme gibt, zeigt: Neuronale Netze sind noch nicht ausgereift genug. Unsere Forschungsarbeit soll dazu beitragen, das Bewusstsein für diese Problematik zu schärfen.

Wenn neuronale Netze zuverlässig sind, werden sie das autonome Fahren sicherer machen. Dazu wird auch beitragen, dass die Fahrzeuge neben Kameras noch andere Sensoren zur Orientierung nutzen. Zum anderen dürften Bordcomputer von Autos Straßen-szenen leichter analysieren können, wenn mehrere autonome Fahrzeuge unterwegs sind, die miteinander kommunizieren. Dann ist ein Auto dabei nämlich nicht nur auf die Signale seiner eigenen Sensoren angewiesen, sondern empfängt auch von anderen Fahrzeugen Daten zu deren Position und Geschwindigkeit. Wir sind überzeugt, dass das autonome Fahren den Straßenverkehr trotz der technischen Schwachstelle, die wir hier offenlegen, sicherer machen kann. Denn für immerhin 90 Prozent aller Unfälle ist menschliches Versagen die Ursache. o

9

Menschenrechte contra Wirtschaftsrecht – das Beispiel Lateinamerika

ARMIN VON
BOGDANDY,
MARIELA MORALES
ANTONIAZZI,
FRANZ CHRISTIAN
EBERT

Max-Planck-Institut
für ausländisches
öffentliches Recht und
Völkerrecht, Heidelberg

Wenn Regelungen des internationalen Wirtschaftsrechts auf nationale oder regionale Verfassungsgarantien treffen, kommt es nicht selten zu Konflikten. Unser Projekt analysiert am Beispiel Lateinamerikas die auftretenden Spannungen und arbeitet an Lösungen, die sich möglicherweise auch als Anregungen für Diskussionen in anderen Regionen der Welt eignen.

Lateinamerika ist die am stärksten von Ungleichheit geprägte Region der Welt; das bestätigen die Zahlen der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Lateinamerika und die Karibik. Vielerorts sind weite Teile der Bevölkerung von den zentralen sozialen Systemen wie dem Gesundheits- und Bildungssystem ausgeschlossen. Zugleich ist die Region von struktureller Gewalt und Unsicherheit betroffen, oftmals als Folge von schwachen staatlichen Institutionen. Als ein Weg zur Überwindung dieser Ungleichheiten wird der sogenannte transformative Konstitutionalismus gesehen. Die Idee dahinter ist, Normen verfassungsrechtlicher Natur so auszulegen und anzuwenden, dass sie tiefgreifenden sozialen Wandel im Lichte der in den Verfassungen niedergelegten Ziele fördern und insbesondere systemische Defizite bekämpfen. So nutzen beispielsweise Nichtregierungsorganisationen die Instrumente strategischer Prozessführung, um über den juristischen Weg anhand von Einzelfällen und oftmals begleitet durch Bildungs- und Aufklärungsarbeit den nationalen und übernationalen Grund- und Menschenrechten zu einer besseren Geltung zu verhelfen und die Teilhabe an demokratischen Prozessen für alle Bevölkerungsgruppen zu ermöglichen.

Diese besondere Form des Konstitutionalismus ist in zahlreichen Staaten Lateinamerikas und oft nach Überwindung von diktatorischen Verhältnissen entstanden. Auch wenn es in den einzelnen Ländern Unterschiede bei der Richtung und Geschwindigkeit der Entwicklungen gibt, kann dabei ein Trend beobachtet werden: Nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Erfahrungen der diktatorischen Gesellschaften hat sich auf die ein oder andere Art ein besonders enges Geflecht von Grund- und Menschenrechten herausgebildet. Sie beruhen sowohl auf den jeweiligen nationalen Verfassungen als auch auf internationalen Übereinkommen wie der Amerikanischen Menschenrechtskonvention. Auf justizieller Seite werden sie durch die Rechtsprechung der nationalen Verfassungsgerichte und die Entscheidungen des Interamerikanischen Gerichtshofes für Menschenrechte gestützt. Vor allem die in vielen nationalen Verfassungen enthaltenen weitgehenden Öffnungsklauseln haben den überstaatlichen Menschenrechten dabei einen innerstaatlichen Status verliehen, der weit über jenen hinausgeht, den beispielsweise die Europäische Menschenrechtskonvention in vielen europäischen Staaten genießt. Dementsprechend hat der Interamerikanische Menschenrechtsgerichtshof über den jeweils

Die Relevanz des internationalen Wirtschaftsrechts hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen.

zu entscheidenden Einzelfall hinaus zahlreiche politische Prozesse in der Region wesentlich beeinflusst. So hat er unter anderem bezüglich der Rechte indigener Völker, der Rechte von Migranten sowie im Bereich der sozioökonomischen Rechte wichtige Impulse gesetzt. Aber auch die nationalen Verfassungsgerichte haben die Entwicklungen des transformativen Konstitutionalismus entscheidend mitgeprägt. In Kolumbien zum Beispiel hat das Verfassungsgericht auf der Grundlage des in der dortigen Verfassung verbrieften Rechtes auf Gesundheit das frühere, von zahlreichen strukturellen Mängeln geprägte staatliche Gesundheitssystem für verfassungswidrig erklärt. Daraufhin folgten – im Zusammenwirken mit zivilgesellschaftlichem Druck – eine Reihe an Reformen im kolumbianischen Gesundheitswesen, die trotz weiterhin bestehender Probleme zu erheblichen Verbesserungen geführt haben.

Der Abbau von Lithium gefährdet die Lebensgrundlagen der Bevölkerung

Dieser Konstitutionalisierungsprozess kann allerdings, so die These unseres Projektes, durch Regelungsinstrumente aus anderen Rechtsgebieten erheblich behindert werden. In einem ersten Schritt analysieren wir, wo derartige Konflikte entstehen. Im Fokus steht das internationale Wirtschaftsrecht. Dessen Relevanz für die Region hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Sichtbar wird das an den zahlreichen abgeschlossenen Freihandels- und Investitionsschutzabkommen. Dem nachvollziehbaren Streben nach einer prosperierenden Wirtschaft stehen nicht selten ganz konkrete individuelle oder kollektive Grund- und Menschenrechte gegenüber. Ein Beispiel ist der Abbau von Rohstoffen: Das Dreiländereck Argentiniens, Boliviens und Chiles etwa soll einen Großteil der globalen Lithiumvorkommen beherbergen. Lithium wird unter anderem für die Herstellung von Akkus für Elektroautos benötigt, doch der Abbau des Rohstoffs gefährdet die Lebensgrundlagen der lokalen

indigenen Bevölkerung und missachtet oftmals deren Rechte. Die nationalen Verfassungsgerichte und der Interamerikanische Menschenrechtsgerichtshof können die Interessen der Grundrechtsträger nur eingeschränkt durchsetzen, wenn beispielsweise durch Investitionsabkommen die jeweiligen Staaten in eine milionschwere Haftung getrieben werden. Auch internationale Institutionen wie der Internationale Währungsfonds IWF oder die Weltbank üben durch die Bedingungen, an die sie ihre finanziellen Hilfen knüpfen, erheblichen ökonomischen und politischen Einfluss in den jeweiligen Ländern aus – oft mit erheblichen Menschenrechtsauswirkungen.

Die Weltbank könnte ihrer Rolle als UN-Sonderorgan gerecht werden

In einem zweiten Schritt untersuchen wir, wie sich dieses Spannungsfeld auflösen lässt. Die zentrale Frage ist, wie Mechanismen des internationalen Wirtschaftsrechts so gestaltet werden können, dass sie nicht zulasten, sondern zugunsten einer effektiven Durchsetzung von Verfassungsrechten wirken. So sollte unserer Ansicht nach die Weltbank die in den letzten Jahren begonnene Wende weg von einer eher neoliberalen Förderungskultur fortsetzen und mit einer stärkeren Berücksichtigung regionaler Besonderheiten im Grund- und Menschenrechtsschutz verbinden. Diese Belange sollten sich auch im rechtlichen Rahmen für die Aktivitäten der Weltbank widerspiegeln, sodass diese eine nachhaltig sozial und menschenrechtlich geprägte Wirtschaftspolitik stützen. Damit könnte die Weltbank nicht zuletzt auch ihrer Verantwortung als Sonderorgan der Vereinten Nationen besser gerecht werden.

Neben dem Recht der internationalen Finanzinstitutionen haben wir uns mit dem Welthandelsrecht, bilateralen Freihandelsabkommen sowie der Regulierung transnationaler Unternehmen weitere zentrale Themen gesetzt. Dazu kommt das internationale Investitionsrecht, das in Lateinamerika besonders umstritten ist. Auch hier halten wir Änderungen bei der Ausgestaltung der verschiedenen Rechtsinstrumente und insbesondere bei deren Auslegung für nötig, um negative Auswirkungen des internationalen Investitionsschutzes auf die Prinzipien und Ziele des transformativen Konstitutionalismus zu verhindern oder abzufedern. Überlegungen, wie wirtschaftsrechtliche Akteure und Instrumente zur Stärkung dieser Prinzipien und Ziele beitragen können, sind in Arbeit. In einem Folgeprojekt werden wir zudem den konzeptionellen Rahmen ausbauen und auf weitere Teilbereiche des internationalen Wirtschaftsrechts anwenden. o

10 Raupenkot schreckt Nachtfalter ab

MARKUS KNADEN,
JIN ZHANG,
BILL S. HANSSON

Max-Planck-Institut
für chemische Ökologie,
Jena

Die Weibchen des Tabakschwärmerfalters (*Manduca sexta*) wählen ihre Eiablageplätze sorgsam aus, um Konkurrenz für ihren Nachwuchs zu vermeiden. Dabei leitet sie nicht nur der Duft der Pflanze, sondern auch der Geruch der Hinterlassenschaften der Raupen. Am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie erforscht unsere Forschungsgruppe, was dieses Verhalten auslöst.

Die leuchtend grünen Raupen des Tabakschwärmers entwickeln sich auf Nachtschattengewächsen, zu denen neben Tabak auch Tomate, Aubergine und Paprika gehören. Nachtschattengewächse sind normalerweise durch Giftstoffe gut gegen Raupenfraß geschützt. Die Tabakschwärmerraupen vertragen diese Giftstoffe jedoch bestens und reichern sie sogar im Körper an, um sie als chemische Waffe gegen Fressfeinde zu benutzen.

Im Gegensatz zur Raupe ist der ausgewachsene Falter eher unscheinbar gefärbt. Mit seinem schwirrenden Flugverhalten ähnelt er einem Kolibri. Er lebt von Pflanzennektar und trägt wesentlich zur Bestäubung der besuchten Blüten bei.

Die Raupen sind äußerst gefräßig: Im Laufe ihrer Entwicklung verspeist eine einzelne Raupe oft sämtliche Blätter ihrer Wirtspflanze. Dann sucht sie eine weitere Pflanze und frisst auch diese komplett kahl. Dies wiederholt sie mehrere Male, bis sie ausgewachsen ist und sich im Boden verpuppt.

Legt ein Falterweibchen ein Ei auf eine Pflanze, auf der bereits eine Raupe heranwächst, kann die Pflanze unter Umständen vollständig aufgefressen sein, bevor die aus dem Ei schlüpfende Raupe groß genug ist, um den weiten Weg zu einer anderen Pflanze zu überleben. Daher sollten

Falterweibchen ihre Eiablageplätze sehr umsichtig wählen, um Konkurrenz für ihren Nachwuchs zu vermeiden.

Wir wissen inzwischen, dass weibliche Falter den Raupenbefall an Veränderungen im Duftmuster der Pflanzen erkennen. Unklar war bislang jedoch, ob sie auch Duftinformationen von Raupen berücksichtigen, die bereits auf den Tabakpflanzen leben und die Konkurrenten ihrer eigenen Nachkommen sind.

Andere Raupen halten Falterweibchen vom Eierlegen ab

In Experimenten haben wir überprüft, ob die Falter bei der Eiablage auch auf andere Gerüche als die der Pflanzen achten. Dabei haben wir entdeckt, dass die Falter bei der Eiablage tatsächlich nicht nur Pflanzendüfte berücksichtigen. Bei der Entscheidung für oder gegen eine Eiablage werden sie zusätzlich durch den Geruch von Raupenkot beeinflusst. Wenn bereits eine Raupe auf einer Pflanze heranwächst, sammeln sich große Mengen ihrer Hinterlassenschaften. Ihr Geruch hält die Falterweibchen von der Eiablage ab.

Die Falter riechen den Kot der Raupen mit Geruchsrezeptoren auf ihren Antennen. Der Geruchssinn ist bei



Eines Tages könnten Insekten mit Duftstoffen von Feldern ferngehalten werden.

Insekten besonders stark ausgeprägt, entsprechend gibt es eine riesige Zahl von Geruchsrezeptoren, die jeweils auf unterschiedliche Düfte reagieren. Diese reicht von zehn Genen für Geruchsrezeptoren bei Kopfläusen bis zu mehr als 300 bei Ameisen. Wie viele und welche Rezeptoren ein Insekt besitzt, bestimmt, für welche Geruchsstoffe das Tier empfänglich ist. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Rezeptoren auch im Hinblick darauf, welche chemischen und elektrischen Signale im Gehirn des Insektes verarbeitet werden und welches Verhalten sie auslösen.

Ein Geruchsrezeptor steuert die Reaktion der Falter auf Raupenkot

Beim Tabakschwärmer sind knapp 100 Gene für unterschiedliche Typen von Geruchsrezeptoren bekannt. Mit der Genschere CRISPR/Cas9 haben wir genetische Varianten erzeugt, in denen einzelne Rezeptorproteine ausgeschaltet sind. Unsere Experimente haben ergeben, dass Tiere, denen bestimmte dieser Proteine fehlen, den Kot der Raupen bei der Eiablage immer noch vermeiden. Diese Proteine sind folglich nicht an der Wahrnehmung dieses Geruchs beteiligt.

Als wir daraufhin einen anderen Rezeptor, den sogenannten ionotropen Rezeptor 8a (IR8a) ausschalteten, zeigte sich, dass dieser die Reaktion auf Raupenkot steuert. Falter ohne IR8a können den Geruch nicht wahrnehmen und sich somit von den Hinterlassenschaften ihrer Artgenossen nicht fernhalten. Dadurch ist es uns gelungen, den an dieser Konkurrenzvermeidung beteiligten Signalweg bis in seine molekularen Einzelheiten aufzuklären.

Das Zusammenspiel von Pflanzen und Insekten ist vielfältig und hochkomplex. Es hat sich im Laufe der Evolution über Jahrtausende entwickelt und ist immer wieder an neue Umweltbedingungen angepasst worden. So kann der Geruch von Raupenkot auch Feinde der Raupen anlocken und auf diese Weise den Tabak vor dem Gefressenwerden schützen. Auf der anderen Seite helfen die Duftstoffe eierlegenden Mottenweibchen, Konkurrenz für ihren Nachwuchs aus dem Weg zu gehen.

Dank neuer Techniken wie beispielsweise CRISPR/Cas9 können wir in Zukunft das geruchsgesteuerte Verhalten des Tabakschwärmer und anderer Insekten noch genauer untersuchen. Dabei interessiert uns besonders, welche Faktoren die Insekten noch zu ihren Wirtspflanzen führen: Blütendüfte, Feuchtigkeit oder Kohlendioxid? Welche Signalproteine steuern die Reaktionen auf Düfte und welche Gene sind an diesem Verhalten beteiligt?

Antworten auf diese Fragen könnten dazu beitragen, Alternativen zu Insektenvernichtungsmitteln zu finden. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise, Insekten gezielt mit Geruchsstoffen von einem Feld abzuschrecken oder ihre Feinde anzulocken. Darüber hinaus müssen wir den Herausforderungen begegnen, die die Klimakrise für die Landwirtschaft mit sich bringen wird. ☠

11 Einbruchsprognosen auf Bewährung

DOMINIK GERSTNER

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

„Vor dem Täter am Tatort.“ Damit wird oft für sogenannte Predictive-Policing-Software geworben. Wie gut das tatsächlich funktioniert, haben wir an einem Pilotprojekt in Baden-Württemberg erstmals wissenschaftlich untersucht. Dort setzte die Polizei eine Software ein, um sich für bestimmte Gebiete eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Wohnungseinbrüche vorhersagen zu lassen.

Predictive Policing bedeutet, dass eine Software durch die Auswertung von Daten und die Anwendung statistischer Verfahren Prognosen über zukünftige Kriminalität erstellt. Ziel ist, auf dieser Basis polizeiliche Maßnahmen zu ergreifen, um diese vorhergesagten Straftaten präventiv zu verhindern. Die Prognosemethoden können von einfachen statistischen Analysen bis zur Anwendung künstlicher Intelligenz reichen und unterschiedliche Deliktsbereiche abdecken. Dabei geht es immer nur um die Vorhersage von Wahrscheinlichkeiten und nicht um konkrete Taten. Obwohl in zahlreichen Ländern verschiedenste Predictive-Policing-Strategien angewendet werden und diese mitunter stark umstritten sind, gibt es kaum wissenschaftliche Untersuchungen zu ihrer Wirksamkeit. Unsere Evaluation des Pilotprojekts Predictive Policing in Baden-Württemberg ist die erste wissenschaftliche Überprüfung in diesem Bereich auf dem europäischen Kontinent.

Wie auch in anderen Regionen Deutschlands war in Baden-Württemberg die Anzahl der Wohnungseinbruchdiebstähle in den Jahren 2007 bis 2014 stark angestiegen. Um dem entgegenzuwirken, startete die baden-württembergische Polizei unter Leitung des Landeskriminalamts Baden-Württemberg das genannte Pilotprojekt. Im Bereich der Polizeipräsidien Karlsruhe

und Stuttgart kam eine kommerzielle Computersoftware zum Einsatz. Sie sagt voraus, ob in bestimmten Gebieten erhöhte Wahrscheinlichkeiten für Einbrüche bestehen, worauf ein Alarm generiert wird, auf den entsprechende polizeiliche Maßnahmen folgen. Die Prognosen basieren auf simulationsbasierten „Wenn-dann-Entscheidungen“ und nicht auf künstlicher Intelligenz. Ziel war es, sogenannte Near-Repeat-Delikte zu verhindern, das sind Wohnungseinbrüche, die häufig in räumlicher und zeitlicher Nähe auf einen ersten Einbruch folgen.

Zwei Testphasen mit Onlinebefragung und Experteninterviews

Inwieweit das funktioniert, haben wir für das Landeskriminalamt Baden-Württemberg wissenschaftlich überprüft. In zwei Testphasen in den Jahren 2015/16 und 2017/18 analysierten wir zum einen prozessgenerierte Daten. Zum anderen gewannen wir durch eine Onlinebefragung mit rund 700 Teilnehmern sowie durch Experteninterviews Erkenntnisse über die Praktikabilität und Akzeptanz innerhalb der beteiligten Polizeidienststellen. In der zweiten Evaluationsphase führten wir außerdem ein experimentelles Forschungsdesign ein, um die Wirksamkeit der

Vorhersagen besser bestimmen zu können. Dabei wurden die auf Vorhersagen basierenden Alarne zufällig einer Experimental- oder Kontrollgruppe zugewiesen, was einen Vergleich zwischen den beiden Gruppen ermöglichte.

Die Erkenntnisse lassen allerdings keine eindeutige Bewertung zu, ob sich der Einsatz von Predictive Policing-Software lohnt. Es gibt zwar einige positive Hinweise, dass die Methode zu einer Verminderung von Wohnungseinbrüchen beitragen kann, die Wirkung scheint aber begrenzt zu sein.

Das spiegelt sich zum einen in den Einschätzungen der beteiligten Polizeidienststellen wider. Dort divergieren die Ansichten über den Nutzen der Methode. In der

Zum anderen lassen sich aus der Auswertung der Falldaten einige wichtige Schlussfolgerungen ziehen: So zeigte es sich, dass Near-Repeat-Delikte, also Wohnungseinbrüche in räumlicher und zeitlicher Nähe zu einem vorhergehenden Einbruch, in erster Linie in Städten auftreten. So ließen sich vor allem dort relevante Prognosegebiete definieren, in denen die Folgedelikte dann auch entsprechend verringert werden konnten. Im ländlichen Raum zählten dagegen nur wenige Orte zu den relevanten Prognosegebieten. Entsprechend wenige Einbrüche fielen insgesamt in diese Gebiete: Im eher dörflich strukturierten Landkreis Calw traf das beispielsweise im Winterhalbjahr 2015/16 nur auf drei von 70 Einbrüchen zu. Dagegen waren es in Stuttgart im selben Zeitraum 260 Fälle von insgesamt 424.

Während der ländliche Raum also kaum von Predictive Policing profitierte, konnte die Prognose-Software in städtischen Gebieten zumindest teilweise dazu beitragen, die Einbrüche zu reduzieren. Im Pilotprojekt war vorgegeben, bei einer Alarmmeldung der Software in einem Radius von 500 Metern um den ersten Einbruchsort eine Woche lang verstärkt Polizeistreifen einzusetzen und Maßnahmen zur Prävention und Bekämpfung von Wohnungseinbrüchen durchzuführen. Im Ergebnis hatte das aber nur einen moderaten Effekt. In der zweiten Evaluationsrunde 2017/18 konnten wir eine Experimentalgruppe, die das genannte Vorgehen befolgte, mit einer Kontrollgruppe vergleichen, die nach dem Einbruch wie gewöhnlich vorging. In der Gruppe, die Predictive Policing nutzte, war die Zahl der Folgedelikte, unter Kontrolle der Polizeidichte und weiterer struktureller Parameter wie zum Beispiel der Distanz zu Schnellstraßenanschlüssen, nur um durchschnittlich 0,3 Einbrüche niedriger. Eine auffallend rückläufige Entwicklung von Wohnungseinbruchdiebstählen, die sich auf den Einsatz der Prognose-Software zurückführen ließe, konnten wir also in dem Pilotprojekt letztlich nicht feststellen. o

Im Gegensatz zu städtischen Gebieten profitierte der ländliche Raum kaum von Predictive Policing.

Onlinebefragung, die Meinungen und Erfahrungen der Polizistinnen und Polizisten einholte, sah ungefähr die Hälfte der Befragten in der erprobten Form des Predictive Policing ein erfolgversprechendes Modell, die andere Hälfte war jedoch der entgegengesetzten Meinung. Vor allem diejenigen, die im täglichen Dienst mit besonders vielen Alarmen konfrontiert waren, schätzten den Nutzen vergleichsweise gering ein. Das ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass durch die Computerprognosen Handlungsautonomie verringert wird oder aber auch darauf, dass die Maßnahmen infolge der Vorhersagen präventiv wirken und der Nutzen nur schwer fassbar ist.

12 Gammastrahlen aus dem All

MORITZ HÜTTEN,
MARTIN WILL

Max-Planck-Institut
für Physik, München

Im Januar 2019 haben die beiden MAGIC-Teleskope auf der Kanareninsel La Palma den bisher energiereichsten Gamma-blitz gemessen. Damit gelang es, neue Erkenntnisse über diese geheimnisvollen kosmischen Ereignisse zu erhalten. Wir hoffen, noch viele weitere Himmelskörper im höchsten Energiebereich ausfindig zu machen: Dafür entsteht derzeit auf La Palma und in Chile das zukünftige Cherenkov Telescope Array (CTA) mit mehr als 100 Einzelteleskopen.

Was wir mit bloßen Augen am Nachthimmel sehen, entspricht nur einem kleinen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums, das von langen Radiowellen bis zu hochenergetischen Röntgen- und Gammastrahlen reicht. Erst seit etwa 30 Jahren wissen wir, dass kosmische Objekte auch Strahlung aussenden, die billionenfach energiereicher ist als sichtbares Licht. Dabei handelt es sich um Strahlung mit einer Energie im Teraelektronenvolt-Bereich. Zur Erklärung: Ein Elektronenvolt entspricht der Energie, die ein Elektron beim Durchgang durch ein elektrisches Feld mit der Spannung von einem Volt erhält; ein Teraelektronenvolt wiederum ist eine Billion Elektronenvolt.

Diese Strahlung wird vollständig von der Atmosphäre absorbiert. Dennoch lässt sie sich indirekt mit einem Trick von der Erde aus beobachten: Wenn ein Gamma-Teilchen in die Atmosphäre eintritt, löst es bei der Wechselwirkung mit den Atomen der Luft einen Schauer aus Sekundärteilchen aus, die sich kilometerweit durch die Atmosphäre bewegen. Dabei entsteht bläuliches Cherenkov-Licht, das sich mithilfe spezieller Spiegel und

Lichtsensoren nachweisen lässt. Übrigens bewegen sich diese Sekundärteilchen mit Überlichtgeschwindigkeit – was aber kein Widerspruch zu Einsteins Postulat ist. Denn dieses gilt nur für ein Vakuum; in einem Medium wie Luft oder Wasser hingegen ist die Lichtgeschwindigkeit geringer. Die geladenen Partikel in den kosmischen Schauern haben beinahe Vakuumlichtgeschwindigkeit und rasen daher mit einem Tempo dahin, das größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre.

Unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Physik betreiben Wissenschaftler aus zwölf Ländern seit 16 Jahren die beiden MAGIC-Teleskope auf der Kanareninsel La Palma. Ein bedeutendes Ziel für den Bau von MAGIC – Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes – war von Anfang an die Beobachtung von Gammablitzen. Das sind plötzliche, Sekundenbruchteile bis Minuten dauernde Strahlungsausbrüche, die irgendwo am irdischen Himmel auftauchen und uns aus den Tiefen des Kosmos erreichen. Das Phänomen der Gamma-blitze kennen die Astronomen seit mehr als 50 Jahren. Ihr Ursprung ist aber bis heute nicht vollständig geklärt.



Erfolgsduo: Mit GRB190114C beobachteten die beiden MAGIC-Teleskope auf der Kanareninsel La Palma den ersten Gammablitz. Er hatte zudem die höchste bisher bekannte Energie.

Gammablitze sind die leuchtstärksten Ereignisse im All und bis in Entfernen von Milliarden von Lichtjahren sichtbar. Es wird vermutet, dass sie entstehen, wenn ein massereicher Stern am Ende seines Lebens kollabiert oder zwei kompakte Objekte – etwa Neutronensterne – miteinander verschmelzen. Da sich nicht vorhersehen lässt, wann und wo am Himmel diese kurzen Gamma-Blitze auftreten, kann man sie lediglich mit Weltraumteleskopen aufspüren, die rund um die Uhr den Himmel scannen. Allerdings sind diese Satelliten nicht in der Lage, Teraelektronenvolt-Strahlung zu messen. Dieses Spektrum lässt sich nur mit bodengebundenen Teleskopen beobachten. Gerade der Nachweis der Strahlung im höchsten Energiebereich trägt aber wesentlich zum Verständnis der Vorgänge in einem Gammablitz bei.

Um die flüchtigen Ereignisse einzufangen, wurden die MAGIC-Teleskope so gebaut, dass sie sich innerhalb kürzester Zeit in die Richtung eines solchen Blitzen ausrichten lassen. So konnte MAGIC nach einem Alarm durch zwei Weltraumteleskope am Abend des 14. Januar 2019 innerhalb von nur 25 Sekunden zu

dem Gammablitz GRB190114C schwenken. Unmittelbar nach Beginn der Messung detektierte MAGIC Gammastrahlung im Teraelektronenvolt-Bereich. Nie zuvor haben wir derart energiereiche Strahlung von einem Gammablitz beobachtet. Die Analyse des Signals und der Abgleich mit den Daten anderer Teleskope ergab schließlich, dass es sich bei GRB190114C wahrscheinlich um einen massereichen Stern handelte, der in einer gigantischen Supernovaexplosion zu einem schwarzen Loch kollabierte.

Teilchen in Magnetfeldern senden Synchrotronstrahlung aus

Die Gammastrahlung stammte aus dem Nachglühen der Explosion, als die ins All geschleuderte Materie das interstellare Medium durchquerte. Nach unseren Modellen erzeugen solche astrophysikalischen Stoßwellen Gammastrahlung: Dabei bewegen sich auf hohe Energien beschleunigte geladene Teilchen in starken

Magnetfeldern und senden dabei sogenannte Synchrotronstrahlung aus. Allerdings entsteht auf diese Weise keine Gammastrahlung mit den höchsten Energien. Daher vermuten wir, dass MAGIC im Fall von GRB190114C den Effekt der inversen Comptonstreuung beobachtet hat: Dabei übertragen die hochenergetischen Teilchen einen Teil ihrer Energie auf die nahen Synchrotronphotonen. Dieser Mechanismus ist bei anderen Objekten bekannt; dass er auch bei Gammablitzen zum Tragen kommt, war lange vermutet, aber nie nachgewiesen worden.

Der Blitz war nicht weit entfernt und erschien daher besonders hell

Interessanterweise war die insgesamt freigesetzte Energie von GRB190114C über alle beobachteten Wellenlängen hinweg nicht außergewöhnlich hoch. Allerdings war seine Entfernung für kosmische Maßstäbe ziemlich gering, weshalb der Blitz besonders hell erschien und MAGIC so hohe Gammaenergien registrieren konnte. Daher bleibt die spannende Frage, ob das Teleskop einen sehr speziellen Sternkollaps beobachtet hat, oder ob inverse Comptonstreuung immer im Nachglühen von Gammablitzen einsetzt. Dies lässt sich nur beantworten, wenn wir viele weitere – auch entferntere – Gammablitze im Teraelektronenvolt-Bereich beobachten.

Große Chancen dafür bietet das Cherenkov Telescope Array (CTA), das sich derzeit im Bau befindet.

CTA wird mehr als 100 Einzelteleskope zählen, die an zwei Standorten errichtet werden: Auf der Südhalbkugel in der chilenischen Atacama-Wüste und im Norden auf La Palma, direkt neben den MAGIC-Teleskopen. Geplant sind drei Teleskotypen, wobei acht vorgesehene Large-Size-Teleskope (LST) für die Jagd nach Gammablitzen perfektioniert sind: Ihre Spiegel besitzen Durchmesser von jeweils 23 Metern, sie können fast doppelt so schnell wie MAGIC ausgerichtet werden. Im Verbund werden die LST in der Lage sein, nur ein Zehntel so leuchtstarke Signale von Gammablitzen zu messen als MAGIC. Damit kann es mit dem CTA gelingen, Strahlung von Gammablitzen einzufangen, die vor dem Nachglühen nur maximal wenige Sekunden aufflackern. Diese kurzen Gammablitze sind besonders interessant, weil sie vermutlich durch dieselben Ereignisse ausgelöst werden wie Gravitationswellen.

Das Max-Planck-Institut für Physik ist an der Konstruktion der LST beteiligt. Das erste derartige Teleskop auf La Palma wurde im Oktober 2018 eingeweiht, die ersten Messungen verliefen erfolgreich. Voraussichtlich im Sommer 2020 beginnt die Konstruktion der drei weiteren LST auf La Palma; mit ihrer Fertigstellung rechnen wir in wenigen Jahren. Parallel dazu werden alle anderen Teleskope auf La Palma und in Chile errichtet, im Jahr 2026 soll der gesamte CTA-Park stehen. Spätestens dann werden uns die neuen Tscherenkow-Teleskope spannende neue Erkenntnisse über die energiereichsten Strahlungsphänomene im Universum liefern. [o](#)

**Die spannende Frage bleibt,
ob das Teleskop einen sehr speziellen
Sternkollaps beobachtet hat.**

13 Nachhaltige Legierungen für hohe Ansprüche

MARTIN PALM,
FRANK STEIN,
ANGELIKA GEDSUN,
GERHARD DEHM
↓ Max-Planck-Institut
für Eisenforschung GmbH,
Düsseldorf

Werkstoffe in Windkraftanlagen, Flugzeugtriebwerken oder Turbinen müssen großen mechanischen Belastungen bei hohen Temperaturen standhalten. Am Max-Planck-Institut für Eisenforschung haben wir Legierungskonzepte entwickelt, die diesen Anforderungen optimal entsprechen und zudem kostengünstig und nachhaltiger sind als bisher verwendete Materialien. Gemeinsam mit Partnern aus der Industrie optimieren wir diese Herstellungsprozesse derzeit für die Anwendung.

Salige und feuchte Seeluft, Wetterschwankungen und extreme Temperaturen: Unter diesen unwirtlichen Bedingungen erzeugen Offshore-Windkraftanlagen umweltfreundlich Strom. Doch viele Bauteile der Windräder verschleißt und korrodieren mit der Zeit, sodass die Anlagen nach rund 20 Jahren ausgewechselt werden. Ähnliche Herausforderungen stellen sich bei Rohren in Biomassekraftwerken, Flugzeugtriebwerken oder Kompressorschaufern in Dampfturbinen. Um die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Anwendungen zu erhöhen, braucht es daher robuste Materialien, die sich zugleich kostengünstig herstellen lassen. Am Max-Planck-Institut für Eisenforschung haben wir Legierungen entwickelt, die genau diese Anforderungen erfüllen.

Eisenaluminide sind korrosionsbeständig, verschleißfest und leicht

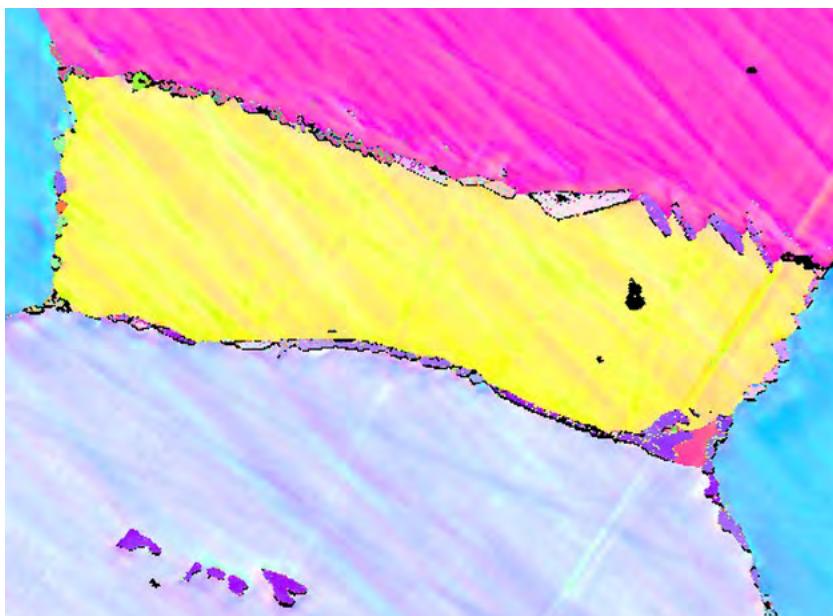
Als besonders nachhaltig erweisen sich Legierungen auf Basis von Eisen und Aluminium, den beiden häufigsten Metallen in der Erdkruste. Zudem können solche Legierungen in geringeren Mengen weitere Zusätze wie etwa Bor enthalten. Diese Eisenaluminide zeichnen sich durch mehrere für die Industrie interessante Eigenschaften aus: Sie sind sehr korrosionsbeständig, haben eine hohe Verschleißfestigkeit und sind aufgrund ihrer geringen

Dichte besonders leicht. Außerdem benötigen sie keine zusätzlichen teuren Legierungselemente, um die Werkstoffeigenschaften zu verbessern, und lassen sich in herkömmlichen Prozessrouten wie Gießen, Walzen und Schmieden herstellen.

Zwar gibt es Eisenaluminid-Legierungen bereits seit den 1930er-Jahren, und wesentliche Anwendungen etwa für Industriöfen, Turbinen oder in der chemischen Industrie wurden auch schon in den 1950er-Jahren getestet. Doch bislang hatten diese Legierungen neben ihren vielen Vorteilen einen entscheidenden Nachteil: Bei Temperaturen von über 700 Grad Celsius waren sie nicht fest genug. Deshalb ließen sich solche Legierungen bisher nicht in Flugzeugtriebwerken, Biomassekraftwerken oder als Bremsscheiben in Windkraftanlagen nutzen.

Am Max-Planck-Institut für Eisenforschung haben wir unsere neuen Legierungen so konzipiert, dass sie sich auch bei hohen Temperaturen gut einsetzen lassen, ohne ihre anderen Vorteile einzubüßen. Unterstützt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie arbeiten wir mit Siemens, Rolls Royce Deutschland, Leistritz Turbinentechnik und Otto Junker sowie dem Karlsruher Institut für Technologie und dem mit der RWTH Aachen assoziierten Forschungszentrum Access daran, unsere Legierungen für industrielle Prozesse und Anwendungen zu optimieren.

Unterschiedliche Kristallkörper im Eisenaluminid-Gefüge sind hier verschiedenfarbig dargestellt. An den Korngrenzen sind kleine Partikel anderer chemischer Zusammensetzung zu erkennen. Sie beeinflussen die Eigenschaften des Werkstoffs wesentlich.



Hohe Festigkeit bei hohen Temperaturen

Dazu forschen wir an Prozessen, durch die sich das sogenannte Gefüge, also der innere Aufbau eines Werkstoffs gezielt beeinflussen lässt. Die Eigenschaften eines Werkstoffs werden abgesehen von der chemischen Zusammensetzung der Gefügebestandteile wesentlich durch deren Größe, Form und Verteilung bestimmt, wobei auch die Grenzflächen zwischen den einzelnen Bestandteilen eine große Rolle spielen. Über das Legierungsdesign können wir die Eigenschaften eines solchen Werkstoffs für unterschiedliche Anwendungen maßschneidern, sodass er sich für den Einsatz bei hohen Temperaturen eignet und zugleich mechanisch stark belastbar ist.

Die mechanische Festigkeit einer solchen Legierung bei hohen Temperaturen erreichen wir, indem wir kleinere Mengen weiterer Elemente hinzufügen, die wir dann gezielt in den Gefügebestandteilen verteilen können oder aber in Form chemisch anders zusammengesetzter feiner Partikel in den Werkstoff einbringen. Deren Größe und Verteilung lässt sich über verschiedene Temperatur-

programme oder mechanisches Prozessieren kontrollieren. Es ist so beispielsweise möglich, sehr feine, nur nanometergroße Partikel gleichmäßig auf die Grenzflächen der Gefügebestandteile zu verteilen. Zudem gelingt es in solchen Verfahren, die Eigenschaften eines Werkstoffs an das Bauteil, in dem er verwendet werden soll, anzupassen.

Eine spezielle Wärmebehandlung macht Bauteile besonders fest

Für Bauteile, die wir im Guss herstellen, können wir beispielsweise über den Zusatz von Bor feine Ausscheidungen aus Borverbindungen gleichmäßig entlang der Grenzflächen im Material anlagern. Dadurch wird ein Bauteil insbesondere bei tiefen Temperaturen besser verformbar. Diese Eigenschaft ist gerade dann wichtig, wenn die Materialien später regelmäßig größeren Temperaturunterschieden ausgesetzt sind. So heizen sich etwa Bremsscheiben für Windkraftanlagen an der Oberfläche auf bis zu 900 Grad Celsius auf, wenn der Rotor abbremst.

Andere Bauteile wie Turbinenschaufeln, die mechanisch hoch belastet sind, lassen sich am besten durch Schmieden herstellen. Hier kombinieren wir gezielt Schmiedetemperatur und Verformbarkeit und unterziehen das Produkt gegebenenfalls noch einer speziellen Wärmebehandlung, sodass innerhalb der Legierung eine zusätzliche, fein verteilte intermetallische Verbindung entsteht, die den Bauteilen die gewünschte Festigkeit verleiht.

Kostengünstig und nachhaltig

Die Industrie rechnet mit Einsparungen im zweistelligen Prozentbereich, wenn sie vergleichsweise teure Nickel-Chrom-Stähle oder noch kostspieligere Legierungen auf der Basis von Nickel gegen unsere Eisenaluminid-Legierungen austauschen kann. Und was noch viel wichtiger ist: Unsere Legierungen sind durch ihre hohe Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit auch langlebiger. Zudem sind sie recyclebar und leichter. Momentan arbeiten wir mit unseren Projektpartnern daran, die optimalen Legierungskonzepte für die verschiedenen Prozessrouten festzulegen. Neben unserem Know-how in Sachen Legierungen sind die am Max-Planck-Institut verfügbaren, hochauflösenden Charakterisierungsmethoden entscheidende Faktoren für unsere kooperierenden Industriepartner.

Unsere kostengünstigen und nachhaltigen Eisenaluminid-Legierungen könnten künftig also in Anwendungen hochlegierte Stähle und Legierungen auf der Basis von Nickel ersetzen, vor allem wenn es um den Einsatz bei hohen Temperaturen in korrosiven Umgebungen geht. o

14 Wie Facebook hilft, Migration zu erfassen

EMILIO ZAGHENI

Max-Planck-Institut
für demografische
Forschung, Rostock

Nach Naturkatastrophen ist es fast unmöglich, schnell Zahlen über Migrationsbewegungen zu bekommen, vor allem wenn man nur traditionelle Quellen wie die Statistiken von Behörden nutzt. Ganz neue Möglichkeiten bieten Daten von sozialen Netzwerken wie Facebook. Damit konnten wir nach dem Hurrikan Maria im Herbst 2017 die Wanderungsbewegungen von Puerto Rico in die USA nachvollziehen.

m September 2017 wütete Hurrikan Maria in Teilen der Karibik. Besonders schwer wurde die Insel Puerto Rico getroffen, die zu den Vereinigten Staaten gehört: Zahllose Häuser wurden zerstört, die Versorgung mit Strom und Wasser brach zusammen, die medizinische Infrastruktur wurde stark in Mitleidenschaft gezogen. Allein in Puerto Rico starben in der Folge fast 3.000 Menschen.

Naturkatastrophen wie diese führen oft dazu, dass ein Teil der Bevölkerung auswandert. Aber wer wann wohin geht, ließ sich bislang kaum nachvollziehen – vor allem nicht zeitnah. Diese Daten wären jedoch wichtig, damit Behörden und Hilfsorganisationen die Betroffenen unterstützen können, unabhängig davon, ob sie bleiben, ein neues Leben woanders beginnen oder nach Hause zurückkehren wollen. Nur mit traditionellen Datenquellen, etwa von statistischen Ämtern, lassen sich diese Fragen nicht beantworten. Gerade die Behörden in den USA erheben nicht jeden Monat Umzüge innerhalb von US-Bundesstaaten und US-Außengebieten wie Puerto Rico. Genau das wäre aber nötig, um Migration und Fluchtbewegungen im Katastrophenfall nachzuvollziehen.

Gemeinsam mit Monica Alexander von der University of Toronto und Kivan Polimis von der University of Washington haben wir deshalb eine andere Datenquelle erschlossen: Facebook. Anonymisierte Facebook-Daten, die regelmäßig für Werbetreibende

erhoben werden, liefern zusätzlich zur Anzahl der Betroffenen auch präzise demografische Informationen über Geschlecht und Alter der Migrierenden. So konnten wir nicht nur zeitnah nachvollziehen, wie viele Personen nach Hurrikan Maria auswanderten, sondern auch, ob ähnlich viele Männer wie Frauen wegzogen und welches Alter sie zu diesem Zeitpunkt hatten. Das ist ein zusätzlicher Vorteil, auch gegenüber anderen unkonventionellen Quellen wie Fluggast- oder Mobiltelefondaten.

Das soziale Netzwerk nutzen vor allem junge Menschen

Unser Team hatte bereits ab Januar 2017 begonnen, Daten der Facebook-Werbeplattform zu sammeln. Als Hurrikan Maria Puerto Rico im darauffolgenden September traf, verfügten wir also bereits über Informationen zu Migrationsbewegungen vor der Naturkatastrophe und konnten in der Folgezeit weitere Daten sammeln. Das ist wichtig, da Facebook-Daten aussagekräftige Informationen liefern, wenn man Trends über einen längeren Zeitraum und im Vergleich mit anderen Ländern beobachten kann.

Bei der Arbeit mit Facebook-Daten muss allerdings noch ein weiterer Faktor berücksichtigt werden: Vor allem junge Menschen nutzen das soziale Netzwerk.





Naturgewalt: Im September 2017 verwüstete der Hurrikan Maria die Insel Puerto Rico, viele Menschen flohen oder wanderten aus. Mithilfe von Facebook haben Forschende eine ganze Reihe von demografischen Informationen über die Migrierenden gewonnen.

Ältere Menschen sind im Vergleich zu ihrem Anteil an der Gesamtbevölkerung unterrepräsentiert. Mit einem geeigneten statistischen Modell korrigierten wir deshalb diese Verzerrung des Datensatzes.

Dann aber sahen wir deutlich, dass die Migration von Puerto Rico in verschiedene US-Bundesstaaten direkt nach der Naturkatastrophe schlagartig anstieg. Wir fanden heraus, dass bis Januar 2018 etwa 185.000 Menschen von der Insel auf das US-amerikanische Festland auswanderten, das sind mehr als fünf Prozent der Bevölkerung. Unter ihnen waren hauptsächlich junge Menschen im Alter zwischen 15 und 30 Jahren. Außerdem zeigte sich, dass diese jungen Erwachsenen vor allem in US-Bundesstaaten mit bereits bestehenden puerto-ricanischen Communities zogen. In Florida, Connecticut und Pennsylvania nahm die puerto-ricanische Bevölkerung am stärksten zu.

Das bedeutet im Umkehrschluss, dass vor allem ältere Menschen vor Ort blieben. Allgemein bestätigen unsere Daten die Ergebnisse anderer Untersuchungen, wonach Menschen ein gewisses Maß an Mitteln benötigen, um schnell auf eine Katastrophe zu reagieren. Denn die Möglichkeit auszuwandern hängt von der Gesundheit und der finanziellen Lage ab. Geschwächte und arme Menschen bleiben, egal wie verheerend die Situation ist. Da wir auch für das Jahr nach der Katastrophe Daten

der Facebook-Werbeplattform ausgewertet haben, fanden wir heraus, dass zwischen Januar und März 2018 rund 20.000 Menschen wieder nach Puerto Rico zurückkehrten. Nachdem die schlimmsten Folgen des Hurrikans eingedämmt waren, entwickelte sich also ein Trend, wieder in die alte Heimat einzuzwandern. Auch diese Migrationsbewegung hätten wir mit traditionellen Datenquellen nicht erfassen können.

Zuverlässige Daten unterstützen Hilfsmaßnahmen im Katastrophenfall

Solche unkonventionellen Daten präzise aufzubereiten und auszuwerten, erfordert solides statistisches Wissen und Programmierkenntnisse. Deshalb arbeiteten in unserem Projekt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Demografie, Datenwissenschaften und Statistik zusammen. Gemeinsam entwickelten wir neue Methoden und überprüften unsere Ergebnisse unabhängig voneinander mit zusätzlichen Datenquellen.

Das Beispiel der Migration nach dem Hurrikan Maria zeigt, dass sich mithilfe von Facebook-Werbedaten in Kombination mit statistischen Modellen Wanderungsbewegungen gut nachvollziehen lassen. Mit unserer Methode können wir Verantwortlichen im Katastrophenfall zügig zuverlässige Migrationsdaten liefern und so Hilfsmaßnahmen unterstützen. o

15 Bauwerke aus DNA

KERSTIN GÖPFRICH
Max-Planck-Institut
für medizinische
Forschung, Heidelberg

Das Leben auf der Erde ist aus unbelebten Komponenten entstanden. Können wir diesen Prozess im Labor nachstellen, und welche Werkzeuge benötigen wir dafür? Mit DNA-Origami, einer Faltkunst im Größenmaßstab weniger Millionstel Millimeter, lassen sich einzelne Bestandteile einer Zelle nachbauen. Diese könnten zukünftig auch in unserem Körper wichtige Aufgaben übernehmen.

Eine lebende Zelle besteht aus voneinander abgegrenzten und doch vernetzten Funktions-einheiten: Zellhülle, Organellen, Stoffwechsel, Erbgut. „Was ich nicht nachbauen kann, kann ich nicht verstehen“ – die Aussage des Physikers und Nobelpreisträgers Richard Feynman lässt sich auch auf lebende Zellen übertragen.

Noch ist es unmöglich, eine künstliche Zelle zu erschaffen. Aber die Geschichte lehrt, dass morgen Realität sein kann, was gestern noch undenkbar erschien: So waren noch Anfang des 19. Jahrhunderts die meisten Chemiker davon überzeugt, dass sich Harnstoff nicht aus unbelebter Materie künstlich erzeugen ließe. Es brauchte „Lebenskraft“ für die Herstellung einer organischen Substanz, wie dem Bestandteil des Harns. 1828 synthetisierte dann der Chemiker Friedrich Wöhler Harnstoff aus Ammoniumchlorid und Silberzyanat.

Zum ersten Mal konnte der Mensch damit eine Substanz im Reagenzglas herstellen, die bis dahin nur aus lebenden Organismen bekannt war. Die synthetische Biologie steht heute ungefähr dort, wo die organische Chemie vor der künstlichen Harnstoff-Synthese stand. Allerdings ist eine Zelle weitaus komplexer als die Chemie der Ammoniumsalze.

Ein Erfolgsrezept der synthetischen Biologie lautet deshalb Vereinfachung: Forschende wählen dabei nur die wichtigsten Bausteine aus und setzen sie in zellähnlichen Kompartimenten zusammen. Bei einem solchen

sogenannten Bottom-up-Ansatz entstehen minimale Einheiten, die jeweils eine Funktion einer lebenden Zelle nachahmen: Ein Modul kann beispielsweise Licht in chemische Energie umwandeln, ein anderes auf Reize reagieren, ein Drittes wiederum ermöglicht die Bewegung. Der Zusammenbau der Module zu einer komplett funktionsfähigen synthetischen Zelle gestaltet sich jedoch noch als sehr schwierig, denn es ist nicht immer eindeutig, wie genau sich die Module zusammenfügen lassen. Außerdem ist ihr Zusammenspiel untereinander äußerst komplex.

Künstliche Zellen sollen selbstständig und programmierbar sein

Vielleicht wäre es einfacher, die Perspektive zu wechseln. Statt einzelne Module zusammenzusetzen, um das Original bestmöglich zu rekonstruieren, könnten Forschende auch neue Werkzeuge und Materialien verwenden. Das schafft mehr Freiraum für kreative Lösungen. Mit einem solchen De-novo-Ansatz versuchen mein Team und ich, eine künstliche Zelle von Grund auf neu zu bauen. Aber statt einer Kopie wollen wir ein Unikat. Unsere künstliche Zelle soll programmierbar sein und selbstständig agieren – wie ein miniaturisierter Roboter, als Bindeglied zwischen der belebten und der unbelebten Welt.

Was ist Leben, und könnte es auch ganz anders aussehen?

Doch welche Werkzeuge und welche Materialien eignen sich für den Bau derartiger synthetischer Komponenten? Es müssen auf jeden Fall programmierbare Präzisionswerkzeuge sein, die flexibel hohe Stückzahlen an molekularen Einheiten bereitstellen können, passgenau für eine Vielzahl verschiedener Funktionen.

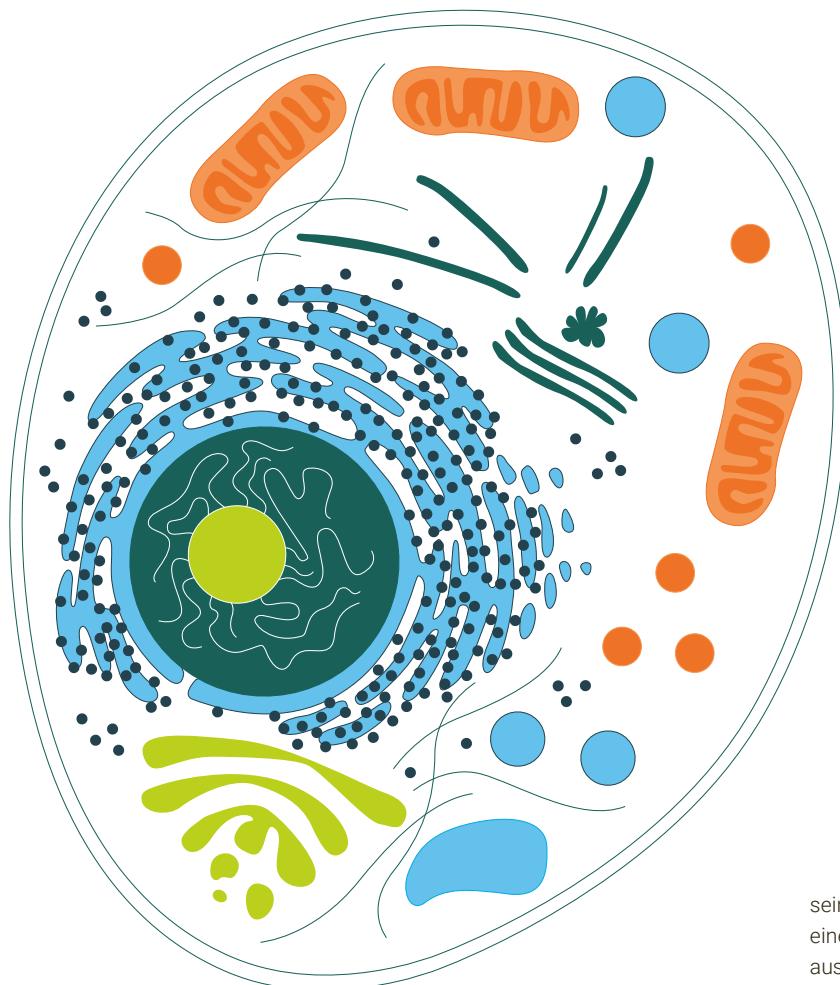
Mit DNA-Origami lassen sich Moleküle in Form bringen

Ein geeignetes Werkzeug dafür ist unserer Meinung nach DNA-Origami, die Faltkunst mit DNA. Dabei dient DNA nicht wie in der Natur als Erbinformationsspeicher, sondern als Baumaterial. Die spiralförmige DNA-Doppelhelix wird entwunden und in Einzelstränge zerlegt. Ein langer Einzelstrang kann nun durch viele kurze, künstlich hergestellte DNA-Sequenzen in die gewünschte Form gefaltet werden. Dafür berechnen wir aus einer 3D-Zeichnung die nötigen DNA-Sequenzen und bringen sie im Reagenzglas zusammen. In einem Tropfen Wasser entstehen so Billionen, nur wenige Millionstel Millimeter große Kopien der zuvor entworfenen Form.

Klingt nach Magie, ist aber simple Physik: Die DNA-Strände finden aufgrund der vorgegebenen Basenpaarungen exakt zusammen und bilden von selbst eine dreidimensionale Struktur, die eine bestimmte Aufgabe in einer Zelle übernehmen kann. Auf diese Weise haben wir unter anderem künstliche Membranporen aus DNA hergestellt – Komponenten, die sich nur schwer aus Zellen isolieren lassen.

Nicht immer müssen es komplizierte Bauwerke sein. Schon eine einzelne DNA-Doppelhelix mit chemischer Modifikation genügt, um zwei Komponenten in einer Zelle miteinander zu verknüpfen. Oft verwendet die Natur dafür Hunderte von Bindegliedern – zum Beispiel, um das Zellskelett an die Zellmembran anzuheften. Jedes einzelne zu isolieren und in künstliche Zellen einzubringen, scheint unmöglich. Deshalb haben wir eine Abkürzung gewählt und DNA als künstliches Bindeglied verwendet. Die Bindung lässt sich durch äußere Einflüsse festigen oder lösen, zum Beispiel durch Änderung der Temperatur.

Am Ende müssen wir die verschiedenen Komponenten in einer Membranhülle zusammensetzen, um eine Zelle nachzuahmen. Die Teilung der Zellhülle gelingt uns schon. Dabei will der Prozess des Zusammenbaus gut überlegt



Eine Zelle besteht aus einer Vielzahl von Komponenten und Organellen. Dazu zählen zum Beispiel die länglich geformten und hier orange gezeichneten Mitochondrien, die die Zelle mit Energie versorgen. Der kugelförmige Zellkern (olivgrün) beinhaltet das Erbgut und ist wie das netzförmige Endoplasmatische Retikulum (hellblau) von einer Membranhülle umgeben.

sein, denn die Zellhülle ist besonders fragil. Wenn die aus einer dünnen Fettschicht bestehende Membran erst einmal ausgebildet ist, gestaltet sich der Einbau als zu umständlich.

Synthetische Hülle beherbergt Bauteile für künstliche Zelle

Deshalb haben wir eine Methode entwickelt, die oberflächlich dem Mixen eines Cocktails gleicht: Wir schichten die Komponenten zuerst in einem Reagenzglas übereinander und erzeugen durch Schütteln eine Tröpfchen-Emulsion. An der Grenzschicht der Tröpfchen bildet sich eine künstliche Zellhülle, welche die Komponenten einschließt. Auf diese einfache Art und Weise können wir viele verschiedene Komponenten einbauen. Auch Mikrofluidik und 3D-Druck sind dafür hilfreiche Werkzeuge. Mit ihnen können wir uns nun der nächsten Herausforderung widmen: der Entwicklung eines Informationsspeichers für künstliche Zellen.

Bis Leben auf der Erde entstand, dauerte es Milliarden von Jahren. Wann gelingt das Experiment im Labor? Der Mensch könnte sehr viel schneller sein, denn anstatt wie die natürliche Evolution auf eine Verkettung glücklicher Zufälle zu warten, verfolgt er mit der synthetischen Biologie klare Ziele. Das lässt hoffen, dass ein künstliches lebendes Modellsystem nicht mehr lange Vision bleibt. Spätestens dann wird eine uralte Frage neue Bedeutung bekommen: Was ist Leben, und könnte es auch ganz anders aussehen? o

Die Max-Planck-Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft (www.mpg.de) ist eine der führenden Forschungseinrichtungen weltweit mit mehr als 23.900 Mitarbeiter*innen. In den 86 Max-Planck-Einrichtungen betreiben rund 6.900 Wissenschaftler*innen sowie 6.100 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler*innen Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften.

Max-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 zukunftsträchtige wissenschaftliche Fragen zu finden. Diese ständige Erneuerung erhält der Max-Planck-Gesellschaft den Spielraum, neue wissenschaftliche Entwicklungen rasch aufgreifen zu können.

Entstanden ist sie 1948 als Nachfolgeorganisation der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Seither sind 17 Nobelpreisträger und eine Nobelpreisträgerin aus ihren Reihen hervorgegangen. Neben fünf Auslandsinstituten betreibt die Max-Planck-Gesellschaft weitere 20 Max Planck Center mit Einrichtungen wie dem US-amerikanischen Princeton, der Harvard University, Science Po in Frankreich, dem University College London/UK oder der Universität Tokio in Japan. Je zur Hälfte finanziert von Bund und Ländern, verfügt sie über ein jährliches Gesamtbudget von 1,86 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 Bührke, Peggy Fiebig, Dr. Virginia Geisel,
Peter Hergersberg, Helmut Hornung, Dr. Jan-Wolhard
Kellmann, Dr. Felicitas Mokler, Dr. Harald Rösch,
Yasmin Ahmed Salem, Mechthild Zimmermann

Gestaltung

mattweis, München

Druck

F&W Druck- und Mediencenter GmbH, Kienberg

Mai 2020

Bildnachweis

Das Porträt eines schwarzen Lochs

S. 5: EHT-Kollaboration

Tödliche Stiche

S. 8: Illustration: mattweis

Hetze im Netz besser bekämpfen

S. 10: Illustration: mattweis

Pflanzen Mikrobiom

S. 13: Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung / Franzen; Durán

S. 14: Illustration: mattweis nach Vorlage vom MPI für Pflanzenzüchtungsforschung / Hacquard

Ich bin die Haltestelle

S. 16: Illustration: mattweis; MPI für Dynamik und Selbstorganisation / Christoph Mischke (Busse)

Wie verletzte Nerven wieder wachsen können

S. 20: Illustration: mattweis nach Vorlagen vom MPI für Polymerforschung

Synapsen setzen auf regionale Produkte

S. 23: Illustration: mattweis nach Vorlage vom MPI für Hirnforschung / Schuman

Angriff auf den Autopiloten

S. 26: Illustration: mattweis

Raupenkot schreckt Nachtfalter ab

S. 31: Illustration: mattweis

Gammastrahlen aus dem All

S. 36: Sergi Luque / Espai Astronomic

Nachhaltige Legierung

S. 39: Angelika Gedsun / MPI für Eisenforschung

Migration nach Naturkatastrophen mit Facebook-Daten rekonstruieren

S. 41: Illustration: mattweis

S. 42: Shutterstock / lavizzara

Bauwerke aus DNA

S. 45: Illustration: mattweis