



MAX PLANCK GESELLSCHAFT



HIGHLIGHTS 2022 AUS DEM JAHRBUCH DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

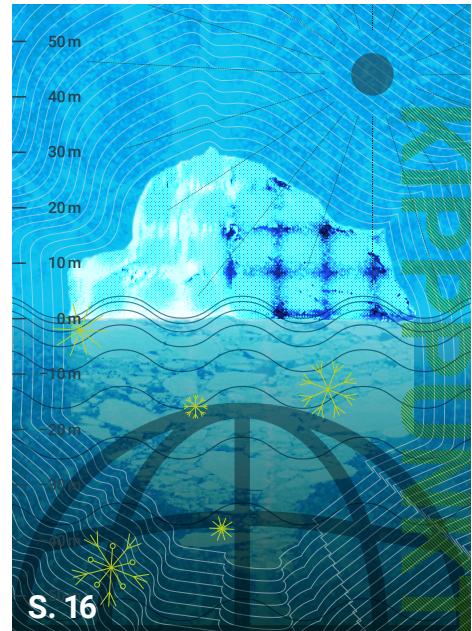
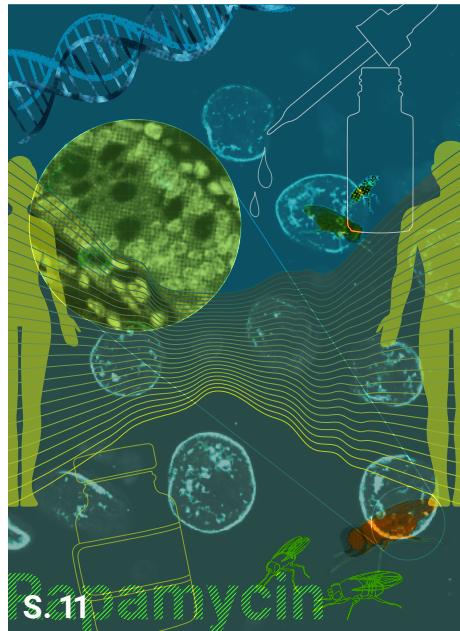
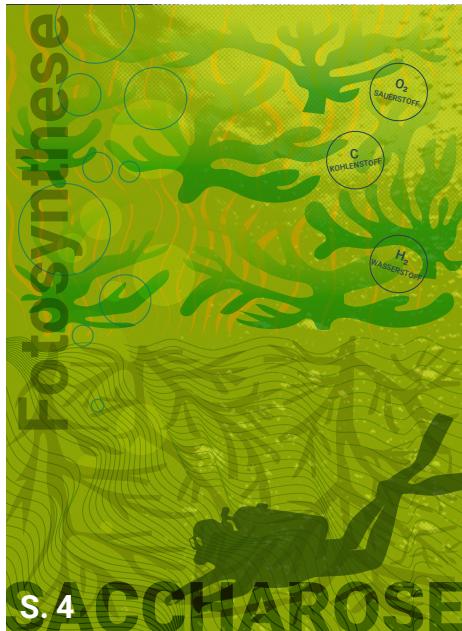
Editorial

Jedes Jahr legt die Max-Planck-Gesellschaft einen wissenschaftlichen Tätigkeitsbericht in Form des Jahrbuchs als Rechenschaftslegung gegenüber der Öffentlichkeit und ihren Zuwendungsgebern vor. Im Zentrum stehen dabei die Fragen: Wo stehen wir und wo wollen wir hin? Die Max-Planck-Institute sind gebeten, aus ihren wissenschaftlichen Arbeiten, soweit diese zu einem gewissen Abschluss gekommen sind, jeweils eine Arbeit oder ein Projekt herauszugreifen, das sich für eine Darstellung im Jahrbuch eignet. Die Jahrbuch-Beiträge aller Max-Planck-Institute werden im Internet unter www.mpg.de/jahrbuecher veröffentlicht. Für die hier vorliegenden gedruckten Highlights aus dem Jahrbuch 2022 wurden 15 aus Sicht der Wissenschaftskommunikation besonders geeignete und gerade auch für Laien interessante Beiträge herausgesucht und journalistisch aufbereitet.

Am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung befassen sich die Forschenden mit der Erschließung biogener Materialien, die bislang als Abfall der Holzwirtschaft gelten, für hochwertige Anwendungen. So lässt sich Baumrinde u.a. zu einem flexiblen, lederartigen Material und damit zu Kleidungsstücken verarbeiten. Mit derartigen nachhaltigen Rohstoffen ließen sich Ressourcen schonen und CO₂-Emissionen reduzieren. Mit der sogenannten „Deep Visual Proteomics“ hat das Team um Matthias Mann vom Max-Planck-Institut für Biochemie einen neuen Ansatz für die Krebsdiagnose entwickelt. Mit geringem Aufwand kann man dabei die Gesamtheit der Proteine einer Gewebeprobe aus einem Tumor bestimmen und so die Faktoren erkennen, die am Voranschreiten des Tumors beteiligt sind. Eine einzige Gewebeanalyse ermöglicht somit eine schnelle und gezielte Behandlung. Forschende am Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb wiederum untersuchen, wie sich menschliches Verhalten wandelt, wenn Menschen mit technologiegesteuerten Akteuren in Beziehung treten. Ein tiefgreifendes Verständnis solcher Veränderungen ist wichtig, wenn es darum geht, einen rechtlichen und politischen Rahmen zur Regulierung von Automatisierung zu schaffen.

Viel Spaß beim Lesen der Jahrbuch-Highlights von 2022!

Inhalt



1 Süße Oasen im Meer S. 4

4 KI hilft bei der Krebsdiagnose S. 14

7 Musik und Psyche S. 21

2 Programme auf dem Prüfstand S. 8

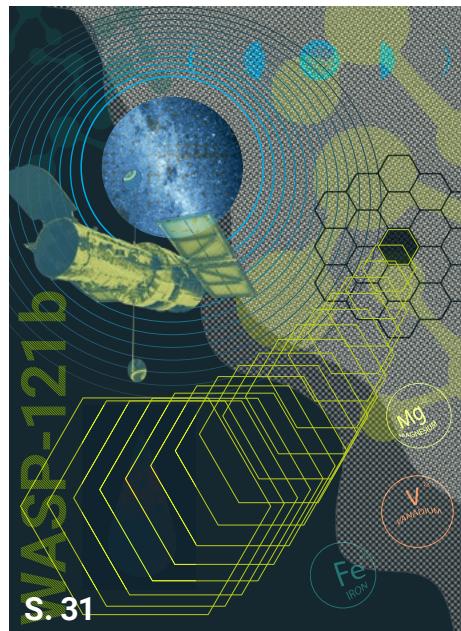
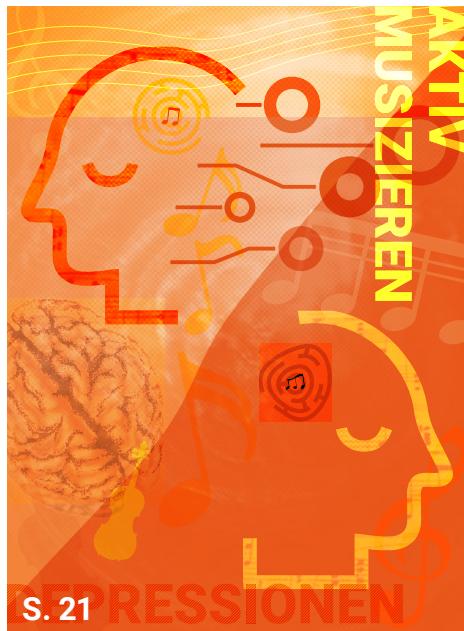
5 Eisschilde als Klimafaktor S. 16

8 Rinde als Rohstoff S. 24

3 Frauen und Männer altern anders S. 11

6 Kurzfristig denken, kriminell handeln S. 19

9 Das Geheimnis der Schönheit S. 27



10 Metall-
wolken auf
WASP-121b S. 31

11 Wir und unsere
automatisierten
Partner S. 34

12 Toxische
Schönheit S. 36

13 Chemie in der
Kugelmühle S. 38

14 Ein Sinn
für Süßes S. 41

15 Die Wachstums-
frage in
Krisenzeiten S. 44

1 Süße Oasen im Meer

MANUEL LIEBEKE

Max-Planck-Institut
für marine Mikrobiologie,
Bremen

Auf alten Karten findet sich häufig die Bezeichnung „terra incognita“ – unbekanntes Land. Bis heute sind große Teile der Weltmeere unerforscht, „mare incognitum“ sozusagen. In den Meeren gibt es also immer noch jede Menge Neues zu entdecken. Mein Team und ich erforschen Seegraswiesen. Obwohl diese Ökosysteme nur eine kleine Fläche des Ozeans bedecken, binden sie durch Fotosynthese große Mengen atmosphärischen Kohlenstoffs.

Seengräser wachsen an den meisten Küsten der Weltmeere. Ähnlich wie Landpflanzen binden die Gräser durch Fotosynthese Kohlendioxid und wandeln es in neue, größere Kohlenstoffverbindungen um. Obwohl sie nur 0,2 Prozent der Meeresfläche bedecken, produzieren Seegräser etwa zehn Prozent der Kohlenstoffverbindungen in den Ozeanen. Sie leisten somit einen erheblichen Beitrag für den Kohlenstoffhaushalt der Meere und des gesamten Planeten.

Seegräser geben einen Teil des von ihnen gebundenen Kohlenstoffs meist als Zuckerverbindungen über ihre Wurzeln an den Meeresboden ab. Auch viele Landpflanzen sondern aus ihren Wurzeln Zucker ab. Im Boden lebende Pilze und viele Mikroorganismen erfreuen sich an diesen für sie lebenswichtigen Kohlenhydraten. Manche dieser Mikroben stellen den Pflanzen im Gegenzug Mineralien und andere anorganische Substanzen zur Verfügung.

Solche schon vor über 100 Jahren als Rhizosphäre bezeichneten Bodenökosysteme sind inzwischen sehr gut erforscht und die Symbiosen zwischen Landpflanzen und den im Boden lebenden Mikroorganismen dokumentiert. Dagegen ist über pflanzliche Zuckerausscheidungen im Meeresboden und deren potenzielle Wechselwirkungen mit Mikroben nur sehr wenig bekannt. Mein Team und ich wollen diese Lücke schließen. In verschiedenen Meeresregionen haben wir Wassersproben im Sediment unter den Seegraswiesen genommen und die darin vorkommenden, von den Pflanzen abgegebenen Stoffwechselprodukte analysiert.

Unsere Analysen zeigen, dass unterhalb von Seegraswiesen viel Rohrzucker (Saccharose) vorkommt. Die Konzentrationen erreichen in einigen Sedimenten je nach Tiefe sehr hohe Werte. Der Rohrzucker macht bis zu 40 Prozent des von den Wurzeln der Seegräser abgegebenen Kohlenstoffs aus. Dessen Konzentration im Boden schwankt im Tagesverlauf und je nach Jahreszeit. Bei sehr starkem Lichteinfall, zum Beispiel zur Mittagszeit oder im Sommer, produzieren Seegräser mehr Zucker, als sie verbrauchen oder speichern können. Dann geben sie die überschüssige Saccharose einfach an den Boden ab.

Mikroben im Boden verbrauchen wenig Saccharose

Warum aber lagern Seegräser so viel Saccharose in den Sedimenten ab? Handelt es sich vielleicht um eine Art Überfluss-Stoffwechsel, weil ihnen essenzielle Substrate zum Aufbau anderer Kohlenhydrate fehlen? Die meisten Mikroorganismen an Land und im Meer können Saccharose leicht verdauen und daraus viel Energie für sich gewinnen. Wir haben jedoch bei unseren Untersuchungen festgestellt, dass viele der in der Seegras-Rhizosphäre vorkommenden Mikroorganismen vergleichsweise wenig Saccharose beanspruchen. Dies könnte die von uns beobachtete Anreicherung des Zuckers im Sediment erklären. Oder vielleicht fehlen den Mikroben die Stoffwechselwege, die sie für die Verdauung von Saccharose benötigen?





Üppige Seegraswiesen von *Posidonia oceanica* im Mittelmeer. Die Forschenden des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie gehen davon aus, dass ihre Erkenntnisse auch für andere Seegrasarten sowie Mangroven und Salzwiesen relevant sind.



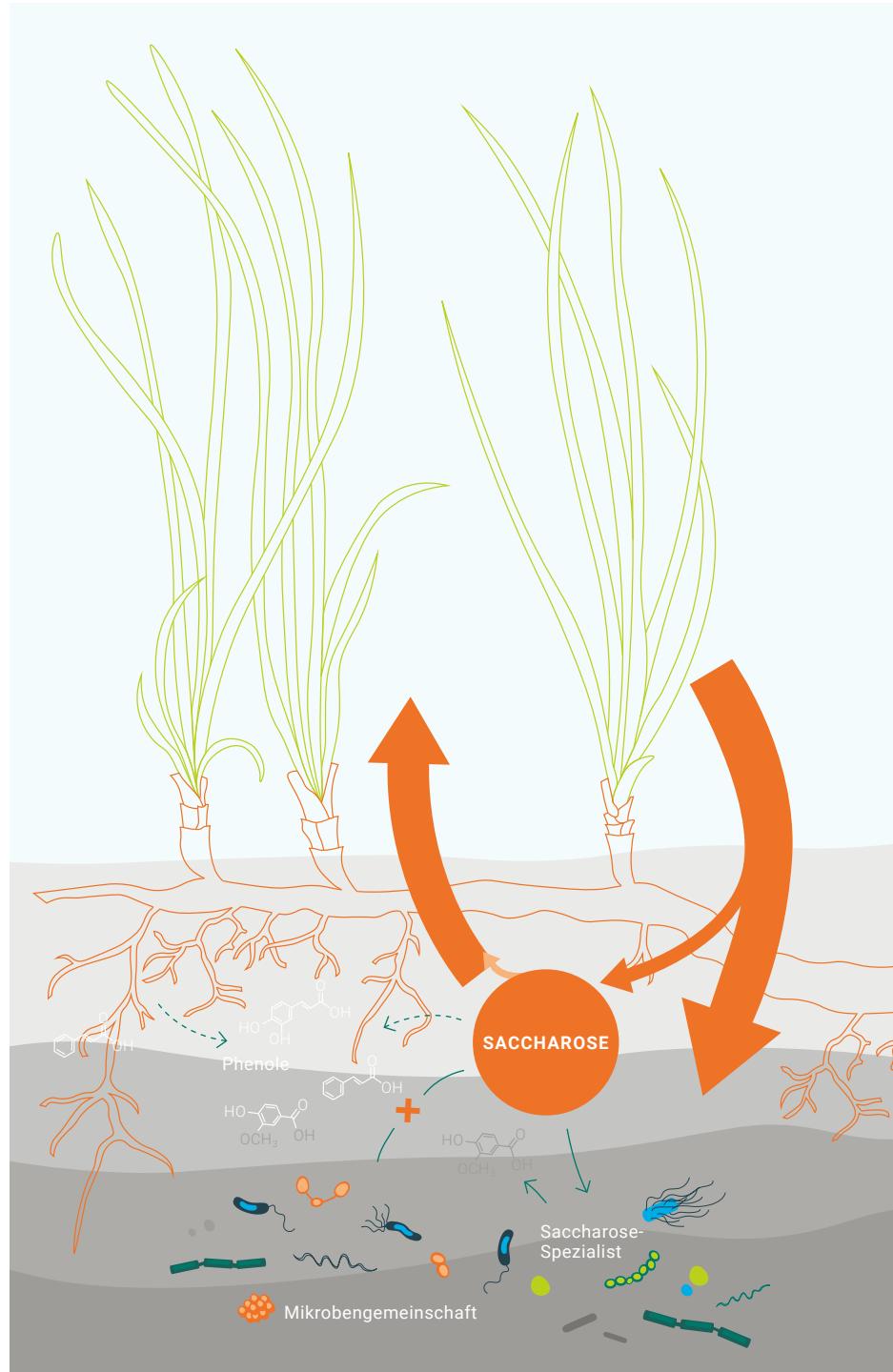
Manuel Liebeke mit dem Seegras *Posidonia oceanica*

Möglich ist aber auch, dass die Seegräser Stoffwechselprodukte absondern, die das Wachstum der Mikroorganismen bremsen. Unser Verdacht: Es könnte sich um phenolische Verbindungen handeln. Phenolartige Substanzen kommen in verschiedensten Pflanzenarten vor, zum Beispiel in Weintrauben, Kaffeebohnen und Obst. Diese Stoffe hemmen den Stoffwechsel von Mikroorganismen und wirken dadurch antimikrobiell – vermutlich ihre eigentliche Aufgabe für die Gesundheit der jeweiligen Pflanze.

Seegräser enthalten von Natur aus viele Phenole, etwa Kaffeesäure (3,4-Dihydroxyimtsäure), die sie an ihre Umgebung abgeben könnten. Im Meerwasser rund um Seegraswiesen konnten wir dann phenolische Verbindungen nachweisen, die aus pflanzlichen Polymeren gebildet werden. Um zu prüfen, ob die in der Umgebung von Seegräsern vorkommenden Mikroorganismen von diesen Phenolen gehemmt werden, haben wir auf der Mittelmeerinsel Elba Bodenproben von unterhalb der Seegraswiesen genommen und mit aus Seegras isolierten Phenolen sowie Saccharose in Kontakt gebracht. Unsere Messungen zeigen, dass die Mikroben in den Bodenproben nach Zugabe der phenolischen Substanzen viel weniger Saccharose konsumiert haben, dies war besonders deutlich bei Versuchen ohne Sauerstoff. Der Zuckergehalt blieb also entsprechend hoch, ähnlich unseren Beobachtungen direkt aus der Seegraswiese.

Als Nächstes haben wir die im Sediment vorhandenen Nukleinsäuren isoliert und sequenziert. Auf diese Weise konnten wir alle Arten von Mikroorganismen anhand ihres Erbguts identifizieren und klassifizieren, welche Stoffwechselgene sie besitzen. Trotz der toxischen Phenole scheint eine kleine Gruppe

Küstenökosysteme können die Atmosphäre von CO₂ entlasten.



mikrobieller Spezialisten sowohl Saccharose verdauen als auch Phenole abbauen zu können. Wir vermuten, dass diese von uns entdeckten Mikroorganismen nicht nur auf den Abbau von Zucker und Phenolen spezialisiert sind. Wahrscheinlich sind sie für das Seegras auch nützlich, weil sie Nährstoffe produzieren, welche die Pflanzen für ihr Wachstum dringend brauchen. Der Kohlenstoffkreislauf in Seegras-Sedimenten unterscheidet sich somit von dem auf dem Land und auch von den Kohlenstoffkreisläufen im freien Meerwasser, wo Mikroben Saccharose schnell abbauen.

Phenole in anderen Ökosystemen

Phenolverbindungen kommen höchstwahrscheinlich auch in anderen Ökosystemen in größeren Mengen vor. Wir untersuchen zurzeit die Zusammensetzung von gelöstem Kohlenstoff in Salzmarschen und Mangrovenwäldern. Innerhalb der Deutschen Allianz Meeresforschung beteiligt sich unser Institut an Forschungsvorhaben, welche die deutschen Küstenregionen in den Fokus rücken. Vergleichsstudien und Probenahmen in tropischen Ländern ergänzen das Projekt. Zudem wird untersucht, wie stabil Kohlenwasserstoffe bei starkem UV-Licht oder erhöhten Temperaturen sind. Diese Umweltfaktoren sind für das weitere Schicksal des Kohlenstoffs im großen Meereskreislauf entscheidend.

Das Ziel ist, Küstenökosysteme zu erhalten, die langfristig möglichst viele stabile Kohlenstoffverbindungen produzieren und so den Anstieg des Gehalts an Kohlendioxid in der Atmosphäre in Schach halten. Auch eine „Wiederaufforstung“ zerstörter Flächen mit Seegras wäre denkbar, wenn es die Beschaffenheit der Küsten zulässt. o

2 Programme auf dem Prüfstand

DANUPON
NANONGKAI

Max-Planck-Institut
für Informatik,
Saarbrücken

Als Computer dienen uns heute sehr unterschiedliche Geräte, vom Smartphone bis zur elektronischen Steuerung etwa von Autos. Mit dieser Vielfalt ergeben sich neue Herausforderungen für die Software und die Beurteilung von deren Leistungsfähigkeit. Wir nutzen die wachsende Zahl solcher Computing-Paradigmen, um seit Jahrzehnten ungelöste Probleme der Informatik zu bewältigen und gleichzeitig optimale Algorithmen für neue Computing-Geräte zu entwickeln.

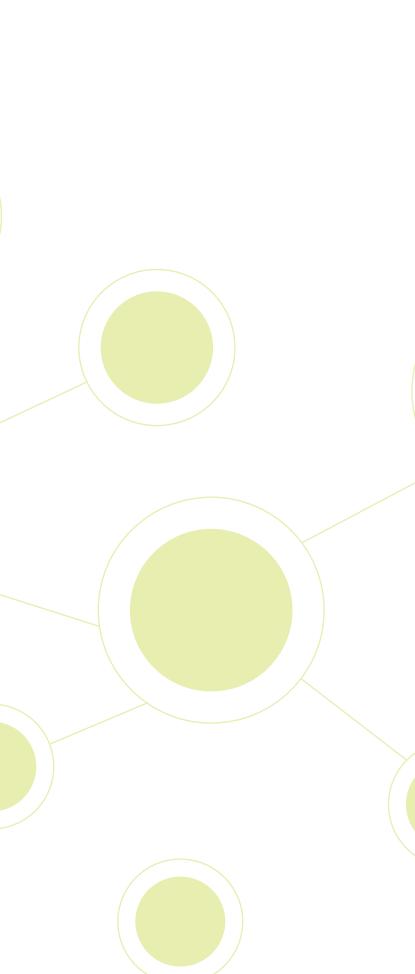
Computer rechnen heute oft in Teamwork. Onlinedienste etwa werden meist in großen Rechenzentren verteilt über viele Server ausgeführt. Das stellt völlig neue Anforderungen an die Software. Das gilt auch für andere Computing-Geräte wie etwa Smartphones oder die Steuerung von Autos oder moderner Haustechnik. Dabei muss nicht nur die Arbeitsweise von Software angepasst werden, nötig sind auch neue Kriterien, Paradigmen genannt, an denen sich ihre Leistungsfähigkeit messen lässt. Wir suchen konkret nach neuen Graphen-Algorithmen unter Berücksichtigung der Paradigmen, die für neue Computing-Geräte und -Methoden definiert werden. Algorithmen sind Schritt-für-Schritt-Rechenanleitungen für Computerprogramme. Graphen-Algorithmen arbeiten in Software von sozialen Medien und Navigationsprogrammen, aber auch in Programmen, mit denen die Ausbreitung von Infektionskrankheiten modelliert wird.

Bei Graphen handelt es sich um Computerdaten, die man sich als Netzwerke vorstellen kann: Sie bestehen aus Punkten, sogenannten Knoten, und Linien, sogenannten Kanten, die einige Punktpaare miteinander verbinden. In sozialen Netzwerken beispielsweise stehen Punkte für Personen, und zwei Freunde sind durch eine Linie miteinander verbunden. In Straßennetzen stehen Punkte für Städte und Linien für Straßen zwischen zwei Städten. Graphen-Algorithmen können viele Fragen zu Netzwerksdaten beantworten. Wie zum Beispiel, welche

ist die beste Route, um von Punkt A nach Punkt B zu gelangen? Wer sollte zuerst geimpft werden, um die Ausbreitung einer Infektionskrankheit zu stoppen?

Was macht den besten Algorithmus aus?

Es gibt für die meisten Aufgaben viele mögliche Algorithmen – so können zehn verschiedene Anwendungen zehn Routen ausgeben, weil ihre Entwickler unterschiedliche Algorithmen verwendet haben. Daher stellt sich die Frage, welches der beste Graphen-Algorithmus für eine konkrete Aufgabe ist. Doch was heißt überhaupt, der beste Algorithmus? Offensichtlich ist, dass ein Algorithmus die beste Lösung für ein Problem berechnen muss, also zum Beispiel die kürzeste oder schnellste Route. Darüber hinaus gibt es aber weitere Kriterien, anhand derer Algorithmen bewertet werden. Sie betreffen die Effizienz, mit der ein Algorithmus arbeitet. So bewerteten Informatikerinnen und Informatiker Algorithmen Jahrzehntelang nicht nur über die Qualität ihrer Lösungen, sondern auch anhand der Zeitkomplexität. Diese prognostiziert, wie lange ein Algorithmus je nach Umfang eines Datensatzes benötigt, um die Aufgabe zu erledigen. Beispielsweise gibt es einen Algorithmus zur Ermittlung der kürzesten Fahrstrecke von einer Stadt zu einer bestimmten anderen mit einer Zeitkomplexität, die im



Wesentlichen der Zeit entspricht, die der Computer zum Lesen der Eingabe benötigt. Dieser sogenannte Dijkstra-Algorithmus gilt in dem Sinne als bestmöglich, als Computer ohnehin alle Netzwerkdaten lesen sollten, um die Aufgabe zu erfüllen. Dagegen ist die Ermittlung der Entferungen zwischen allen Städtepaaren viel schwieriger, und der beste bisher bekannte Algorithmus benötigt dafür viel länger. Bei einem Netzwerk aus einer Million Städten etwa braucht er bis zu einer Million Mal so lange wie für das Lesen der Daten.

Rechenzeit ist nicht alles

Aber Zeitkomplexität ist nicht unbedingt das beste Maß für moderne Computing-Geräte und Daten. Man hat viele neue Computing-Paradigmen eingeführt, um die Leistung von Algorithmen mit modernen Computing-Geräten und Daten besser messen zu können. So kann bei der Ermittlung der optimalen Route in Rechenzentren, in denen die Daten auf vielen Servern verteilt liegen, die Kommunikation zwischen den Computern sehr lange dauern. Daher ist hier die Kommunikationskomplexität unter bestimmten Umständen ein besseres Maß. Außerdem sind moderne Daten dynamisch, wie etwa die Fahrzeit, die durch Staus beeinflusst werden kann. Dabei ist die Zeit von Bedeutung, die für die Aktualisierung der Information, wie zum Beispiel die Berechnung der neuen optimalen Route, erforderlich ist. Hier spielt also die Komplexität der Aktualisierungszeit eine wichtige Rolle.

Die Zunahme neuer Computing-Geräte und Daten führt zu immer mehr neuen Computing-Paradigmen mit unterschiedlichen Verfahren zur Vorhersage der Leistungsfähigkeit von Algorithmen. Viele Lösungen für das alte Paradigma der Zeitkomplexität sind für die neuen Paradigmen möglicherweise nicht mehr brauchbar, und damit auch für einige moderne Geräte und Daten nicht. Der Dijkstra-Algorithmus beispielsweise wurde in verteilten Netzwerken und bei der Verarbeitung dynamischer Daten unannehmbar ineffizient. Mit den neuen Paradigmen ergeben sich also neue Herausforderungen für die Entwickler von Algorithmen.

Die Sache wird dadurch noch verschlimmert, dass wir bei vielen Fragen nicht einmal gute Lösungen für das alte Paradigma haben. Was ist zum Beispiel die beste Zeitkomplexität für die Ermittlung der Entferungen zwischen allen Städtepaaren? Wie sieht es aus, wenn wir nicht nach der Route mit der kürzesten Entfernung fragen, sondern nach einer, bei der ein Elektroauto, das beim Bergabfahren Energie zurückgewinnen kann, den wenigsten Strom benötigt? Hinter diesen Fragen stecken Probleme, die seit den Anfängen der Informatik aktiv untersucht, aber noch nicht vollständig gelöst wurden.

Wie können wir also mit neuen Paradigmen zurechtkommen, wenn wir nach mehreren Jahrzehnten der

Wir möchten übergreifende Verfahren entwickeln, um für viele Paradigmen effiziente Algorithmen zu konzipieren.

Forschung immer noch nicht den besten Algorithmus zur Lösung einer Aufgabe für das alte Paradigma gefunden haben?

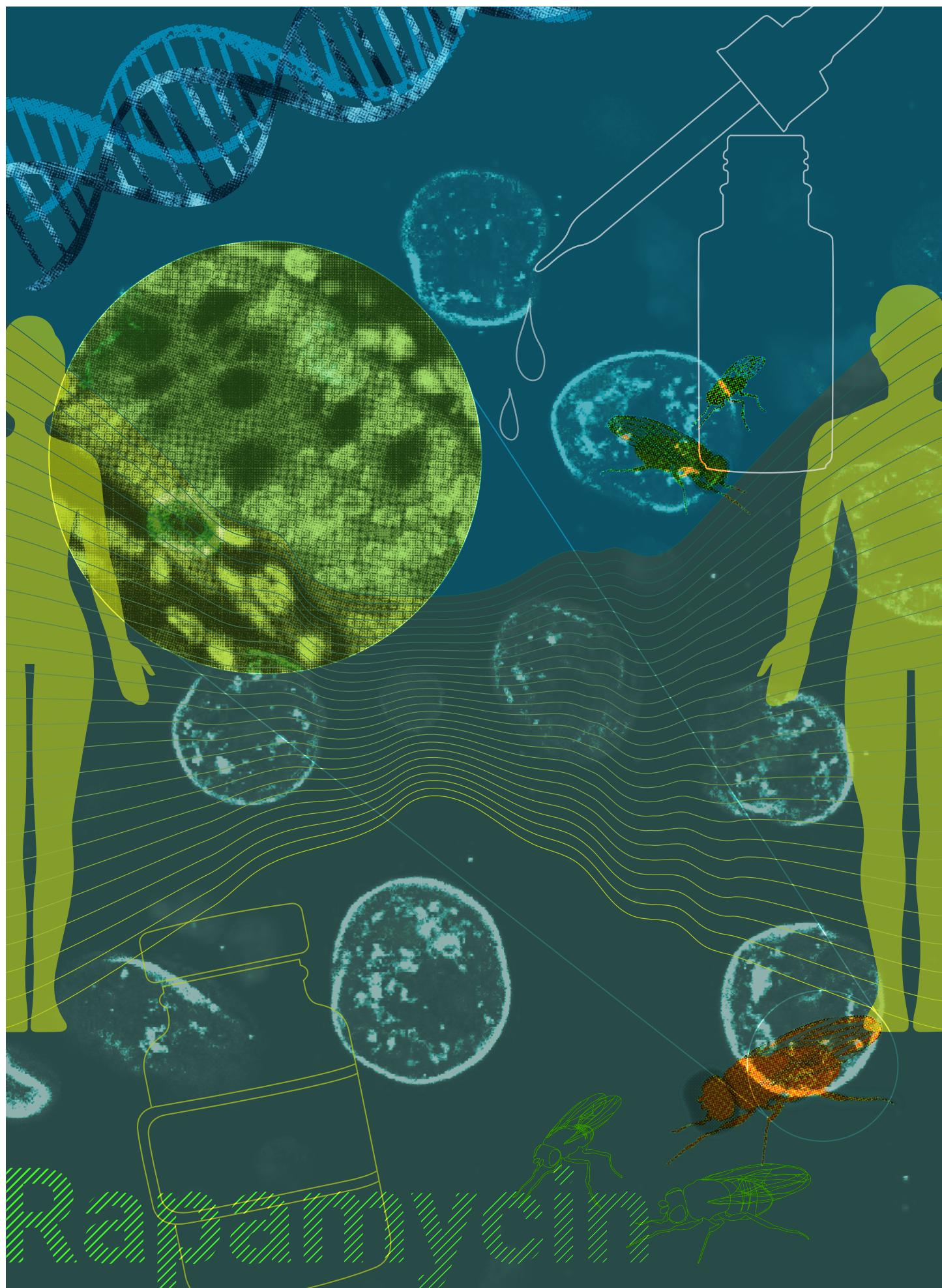
Wir versuchen, die alten und die neuen Herausforderungen gleichzeitig zu bewältigen. Langfristig möchten wir paradigmübergreifende Verfahren entwickeln, um für viele Paradigmen effiziente Algorithmen zu konzipieren. Auf diese Weise möchten wir zwei Ziele erreichen: zum einen seit Langem offene Probleme lösen und zum anderen eine neue Generation von Algorithmen für die neuen Computing-Paradigmen entwickeln. Wir sind überzeugt, dass die Untersuchung ein und derselben Frage aus den Perspektiven mehrerer Computing-Paradigmen zu Erkenntnissen führen kann, die sich aus der isolierten Sicht eines einzelnen Paradigmas nicht ergeben.

Neue Lösungen für alte Probleme

Dank dieses Ansatzes haben wir jüngst Lösungen für Probleme gefunden, bei denen Jahrzehntlang keine Fortschritte erzielt wurden. So haben wir zum Beispiel einen neuen Algorithmus für ein Problem im Zusammenhang mit der Ermittlung von Fahrtrouten entwickelt; die entsprechende Veröffentlichung wurde vor Kurzem als beste in unserem Fachgebiet ausgezeichnet.

Ein anderes Beispiel ist die Analyse der Netzwerkkonnektivität, das heißt die Suche nach der Anzahl der Kanten (Linien), bei deren Entfernung das Netzwerk in zwei Teile getrennt wird. Unsere Forschung brachte seit zwei Jahrzehnten die ersten Fortschritte für dieses Problem im alten Paradigma und effiziente Algorithmen für mehrere neue Paradigmen wie verteiltes und paralleles Rechnen oder Quantencomputing hervor.

Wir glauben, dass unsere bisherigen Entdeckungen nur der Anfang sind. Es gibt viele seit Langem offene Probleme, die wir erst durch die neuen Perspektiven der neuen Paradigmen besser zu verstehen beginnen. Neue Techniken wie maschinelles Lernen und Quantencomputer werden zur Entstehung von noch mehr neuen Paradigmen führen. Diese werden weitere Perspektiven und somit Chancen eröffnen, bislang unbeantwortete Fragen zu klären und gleichzeitig die Möglichkeiten der neuesten Computing-Geräte und Daten voll auszuschöpfen.○



3 Frauen und Männer altern anders

**LINDA PARTRIDGE,
YU-XUAN LU**

↙ Max-Planck-Institut
für Biologie des Alterns,
Köln

Vor allem die Menschen auf der Nordhalbkugel „ergrauen“ in einer noch nie dagewesenen Zahl: Im Jahr 2030 wird einer von sechs Menschen 60 Jahre und älter sein. Die Bekämpfung der negativen Auswirkungen des Alterns, einschließlich altersbedingter Krankheiten, rückt daher zunehmend in den Mittelpunkt der Forschung. Unsere Arbeiten mit dem in der Medizin eingesetzten Wirkstoff Rapamycin haben gezeigt, dass das biologische Geschlecht ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit von Anti-Aging-Medikamenten zu sein scheint. Ein noch besseres Verständnis dieser geschlechtsspezifischen Vorgänge könnte neue Wege für die Entwicklung personalisierter Behandlungen altersbedingter und anderer Krankheiten aufzeigen.

Wir alle wollen lange leben und auch im Alter gesund bleiben. Änderungen des Lebensstils können die Gesundheit fördern, reichen aber allein nicht aus, um Krankheiten im Alter zu verhindern. Eine gesunde Lebensführung ist also noch keine Garantie für ein gesundes und langes Leben. Das biologische Geschlecht spielt dabei ebenfalls eine Rolle. Neuen Daten aus Österreich zufolge beträgt dort die durchschnittliche Lebenserwartung von Frauen 83,7 Jahre, die der Männer aber nur 78,9 Jahre, so die Zeitung KURIER im Februar 2023. Man könnte dies in unseren Breiten auf die zahlreichen Möglichkeiten und Angebote für eine gesunde Lebensführung zurückführen, die mehrheitlich von Frauen und nicht von Männern in Anspruch genommen werden. Jedoch werden Frauen auch in Gegenden unseres Planeten durchschnittlich älter als Männer, in denen weder

ein modernes Gesundheitssystem noch ausreichend gesunde Nahrungsmittel zur Verfügung stehen.

Rapamycin erhöht die Lebenserwartung von Mäusen

Interessanterweise ist das nicht nur beim Menschen so, es trifft auch auf Insekten und andere Tiere zu. Die weibliche Fruchtfliege (*Drosophila*) wird im Durchschnitt deutlich älter als das männliche Insekt. Zusammen mit einem Team vom University College in London haben wir die Fliegen als Versuchsobjekte ausgewählt und uns gleichzeitig einer Substanz gewidmet, die schon länger als „Anti-Aging-Mittel“ bekannt ist: Rapamycin. Diese Substanz wird als Immunsuppressivum nach Organtransplantationen eingesetzt. In einer Studie aus dem Jahr 2009 wurde in Experimenten mit Mäusen

Rapamycin schützt vor altersbedingten Darmerkrankungen.



Rapamycin ist der derzeit vielversprechendste Kandidat für ein Anti-Aging-Medikament.

dann festgestellt, dass eine Gabe von Rapamycin deren Lebenserwartung deutlich erhöht. Der Wirkstoff scheint also noch weitere Potenziale zu beherbergen.

Wir haben kürzlich mehrere Ursachen für die positiven Wirkungen von Rapamycin identifiziert. Auch in Säugetieren konnten wir diese Faktoren zumindest teilweise identifizieren. Unseren Ergebnissen zufolge wirkt die Substanz auf die Zellen von Fruchtfliegen-Weibchen und verlängert so deren Lebenserwartung, anders als bei den Männchen. Es scheint einen Zusammenhang zwischen altersbedingten Darmerkrankungen und der Wirkung von Rapamycin zu geben. Bei Fliegenweibchen treten während des Alterns zwar sogar mehr Störungen im Darm auf als bei den Männchen, aber speziell in den Darmzellen der Weibchen werden diese Erkrankungen durch die Rapamycin-Behandlung stark verringert oder verhindert. Bei den Darmzellen handelt es sich um die sogenannten Enterozyten – das sind die am häufigsten vorkommenden Zellen des Dünndarms, die als solche für die Nahrungsverwertung zuständig sind.

Rapamycin fördert Protein-Recycling im weiblichen Organismus

Wie rettet Rapamycin die Darmzellen in weiblichen Fliegen? Wir haben herausgefunden, dass der Wirkstoff die Säuberung der Enterozyten von beschädigten Proteinen und anderen Zellbestandteilen fördert. Diese werden dabei einer Qualitätskontrolle unterzogen: Manche werden vollständig aufgelöst, andere aber werden derart recycelt, dass sofort neue, unverbrauchte Proteine gebildet werden können. Im männlichen Organismus läuft dieser Vorgang in den Enterozyten zwar auch ab, jedoch wird das Recycling defekter Proteine nicht durch Rapamycin gesteigert. Diesem Unterschied, so bestätigen weitere Analysen, liegt allein das jeweilige Geschlecht der Enterozyten zugrunde. Wenn wir nämlich das Geschlecht dieser Zellen durch einen Eingriff ins Erbgut ändern, ändert sich nicht nur der Säuberungsprozess, sondern auch die Lebensspanne der Fliegen und die Reaktion auf Rapamycin.

Ähnliche geschlechtsspezifische Reaktionen auf Rapamycin haben wir auch in Mäusezellen beobachtet.

Unseren Ergebnissen zufolge erhöht sich nach einer Behandlung mit Rapamycin der Gehalt sogenannter Histon-Proteine ausschließlich in den Enterozyten des weiblichen Fliegendarms, nicht aber in anderen Körperzellen. Wir konnten außerdem zeigen, dass diese zusätzlichen Histone das Wachstum von Tumoren verringern, die Darmgesundheit verbessern und die Lebensspanne der Fliegen verlängern. Ähnliche Veränderungen traten in den Darm-Enterozyten von Mäusen nach einer Behandlung mit Rapamycin auf.

Histone sind Proteine, welche die DNA, also das Erbgut der Zelle, umschließen und so vor schädigenden Einflüssen schützen. Die Menge der Histon-Proteine muss genau reguliert werden, denn die Menge und Bindungsstärke an die DNA bestimmt, welche Gene abgelesen werden können. Bei vielen Arten verändert sich der Gehalt der Histone mit zunehmendem Alter. Unsere Ergebnisse belegen nun erstmals einen Zusammenhang zwischen Rapamycin und dem Histon-Spiegel in Darmzellen.

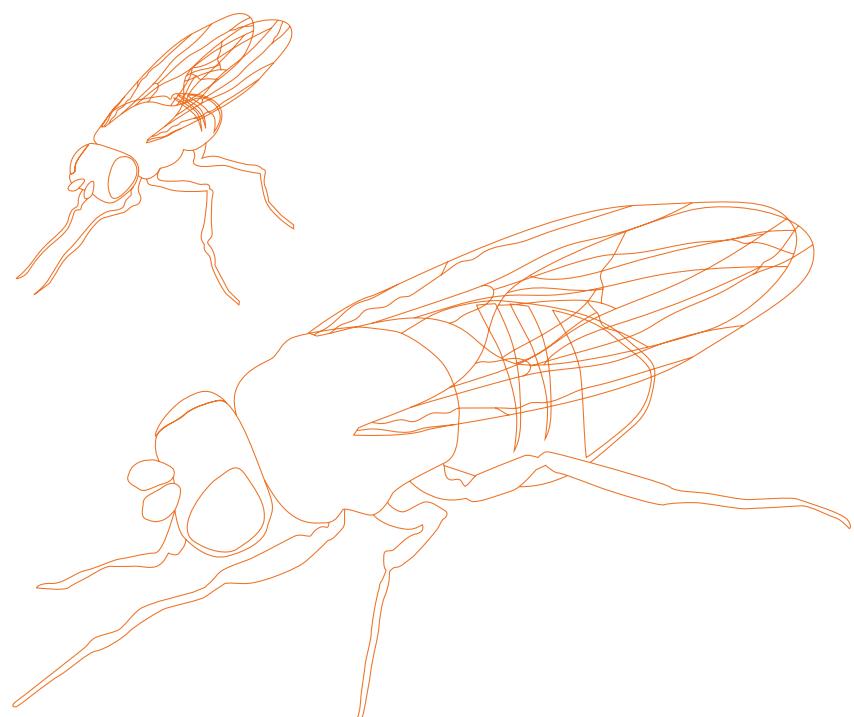
Kurze Therapie schützt genauso wie eine Dauerbehandlung

Allerdings ruft Rapamycin nach Organtransplantationen zur Vermeidung von Abstoßungsreaktionen selbst bei niedrigen Dosen Nebenwirkungen hervor. Die unerwünschten Wirkungen ließen sich mit einer kürzeren Dauer der Behandlung verringern. Wir haben deshalb verschiedene Zeitfenster für kurzfristige Verabreichungen an Fruchtfliegen getestet und festgestellt, dass bereits eine 14-tägige Rapamycin-Behandlung von jungen erwachsenen Fliegen vor altersbedingten Schäden im Darm schützt und das Leben verlängert. Eine dreimonatige Behandlung von jungen erwachsenen, drei Monate alten Mäusen hat ähnliche positive Auswirkungen auf die Gesundheit des Darms.

Kurze Behandlungen im frühen Erwachsenenalter bewirken also einen ebenso starken Schutz wie eine kontinuierliche Behandlung, die zur gleichen Zeit durchgeführt wird. Eine kurze Verabreichung wäre also eine Möglichkeit, die Notwendigkeit einer mit Nebenwirkungen verbundenen Langzeitbehandlung zu umgehen. o



Rapamycin beeinflusst die Darmgesundheit und Lebenserwartung von weiblichen und männlichen Fruchtfliegen unterschiedlich.



4 KI hilft bei der Krebsdiagnose

MATTHIAS MANN

Max-Planck-Institut
für Biochemie,
Martinsried

Wodurch und wann entsteht Krebs? Warum gibt es gutartige oder bösartige Tumore und was macht sie bösartig? Gemeinsam mit meinen Forschungsgruppen ist es mir gelungen, eine neue Art der Diagnose zu entwickeln, mit der sich Antworten auf diese Fragen finden lassen.

Ein erwachsener Mensch besteht aus rund 100 Billionen Zellen. Sie bilden Gewebe, Organe, Muskeln und vieles mehr, was wir für unser Überleben brauchen. Eines haben alle Zellen gemeinsam: Sie unterliegen einer strengen Kontrolle. Während einige dafür bestimmte Zellen sich teilen dürfen, beim Mann beispielsweise die Keimzellen, teilen sich andere Zellen, zum Beispiel die der Leber, nicht. Tun sie dies doch, zum Beispiel wenn ein Gen mutiert ist, entsteht ein Tumor.

Das Erbgut, also die DNA, enthält die Bauanleitung für Enzyme und andere Proteine. Fehler in der Anleitung, sogenannte Mutationen, führen zur Produktion fehlerhafter Proteine und in der Folge zu Erkrankungen. Der Mensch besitzt in seinen Zellen rund 20.000 Protein-kodierende Gene. Ihre korrekte Funktion entscheidet über die Funktionsfähigkeit einer Zelle. Jedes Gen kann jedoch mutieren und so ein fehlerhaftes Protein hervorbringen. Dies kann in der Folge zu einer Krebs-erkrankung führen. Deshalb kann eine Analyse der Proteine innerhalb eines Tumors dabei helfen, die Gründe für die Entstehung eines Tumors in einem Patienten zu verstehen und seine Schwachpunkte zu finden. Mit diesem Wissen lassen sich individuell auf

einen Patienten zugeschnittene Behandlungsmethoden entwickeln.

Künstliche Intelligenz enthüllt krank machende Tumorproteine

Wir haben eine neue Methode entwickelt, welche die Proteine durch künstliche Intelligenz analysiert – die sogenannte „Deep Visual Proteomics“. Mithilfe hoch-auflösender Mikroskopbilder werden zunächst exakte Karten der Gewebe erstellt, ähnlich wie Landkarten. Mit künstlicher Intelligenz ordnen wir die in der Karte erfassten Zellen je nach Größe, Form oder Protein-verteilung in verschiedene Klassen ein. Im Anschluss daran trennen wir die Zellen mit einem Laser aus dem Gewebe heraus und unterteilen sie in Gruppen gesunder oder erkrankter Zellen. Die vielen tausend Proteine in den Zellen analysieren wir dann mittels ultra-sensitiver Massenspektrometrie, und abschließend erstellen wir eine Proteinkarte für jede Gruppe. Diese Karten enthalten die Verteilung der Proteine in gesunde und Tumorzellen. Mit Deep Visual Proteomics lässt sich also eine Gewebeprobe aus einem Tumor entnehmen

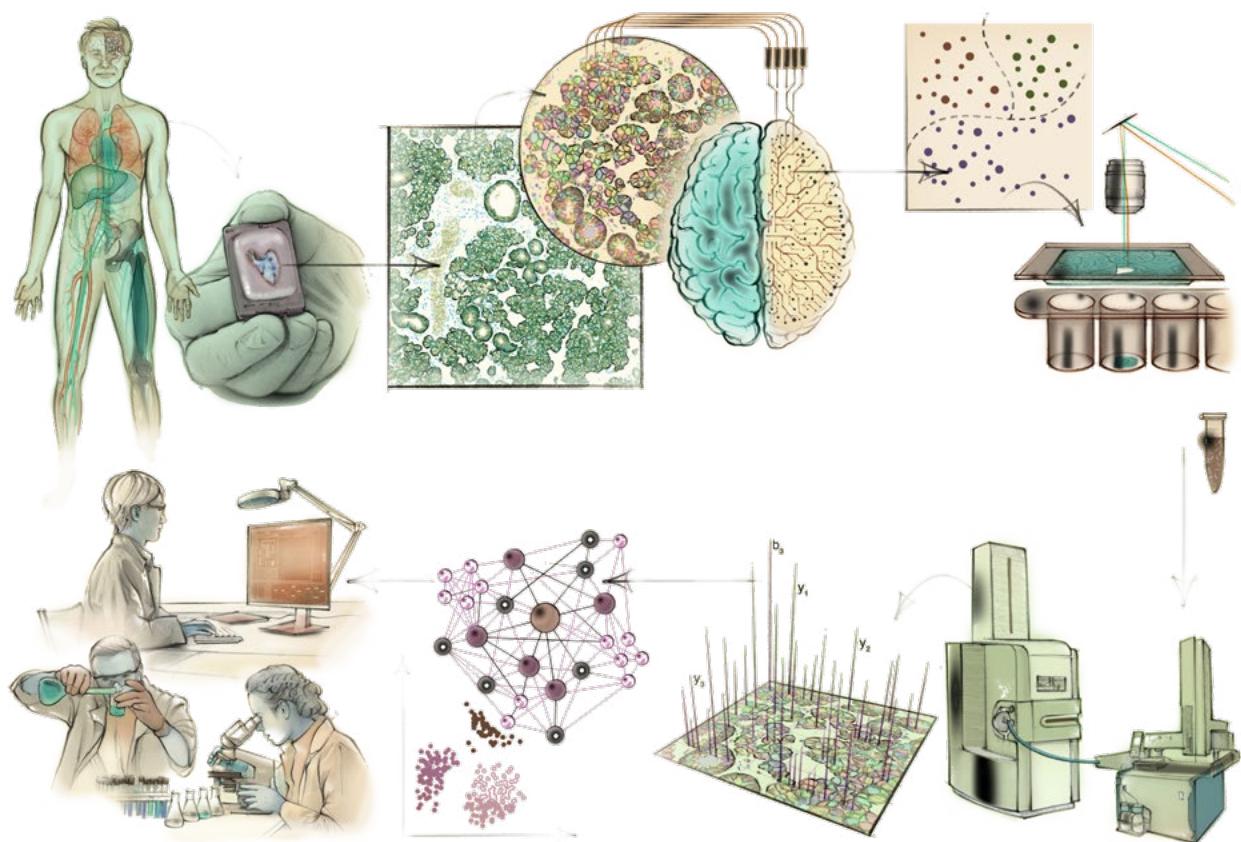
Dank der Methode könnten neue Therapien gegen Krebs-erkrankungen entwickelt werden, die bislang noch nicht behandelt werden können.

Deep Visual Proteomics kombiniert Mikroskopie und Bildanalyse mittels künstlicher Intelligenz mit hochempfindlicher Analyse aller Proteine eines Gewebes.

und mit geringem Aufwand schnell die Gesamtheit der Proteine bestimmen. So werden die Faktoren erkennbar, die am Voranschreiten des Tumors beteiligt sind. Eine einzige Gewebeanalyse kann somit eine schnelle und gezielte Behandlung ermöglichen.

In einer Studie mit Bauchspeicheldrüsen- und Hautkrebspatienten haben wir unsere Technologie erstmals angewendet. Wir haben die visuellen Merkmale eines Tumors bestimmt und sogar einzelne Proteine in Krebszellen untersucht, die direkt an gesundes Gewebe angrenzen. Mit der Technik ist es uns sogar gelungen, einen klinisch hochkomplexen Fall zu diagnostizieren. Die bisher mit unserer Methode erzielten Erkenntnisse lassen uns hoffen, dass künftig personalisierte Therapieformen auch gegen Tumore entwickelt werden können, für die es bisher noch keine Therapien gibt.

Deep Visual Proteomics ist auch bei anderen Erkrankungen anwendbar. Zum Beispiel könnten damit auch neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer oder Parkinson untersucht werden. o



5 Eisschilde als Klimafaktor

MARIE-LUISE
KAPSCH,
CLEMENS
SCHANNWELL

Max-Planck-Institut
für Meteorologie,
Hamburg

Heute bedecken Eisschilde eine Fläche, die fast so groß ist wie Südamerika. Und auch wenn das nur drei Prozent der Erdoberfläche sind, spielen sie ähnlich wie das arktische Meereis eine große Rolle für das Klima. Um Eisschilde und deren Wechselwirkungen mit dem Klima zu berücksichtigen, entwickeln wir ein Klimamodell, in dem sich Eisschilde mit der Zeit in ihrer Ausdehnung verändern können. Solche Veränderungen und Zusammenhänge werden in herkömmlichen Klimamodellen bislang nur unzureichend abgebildet.

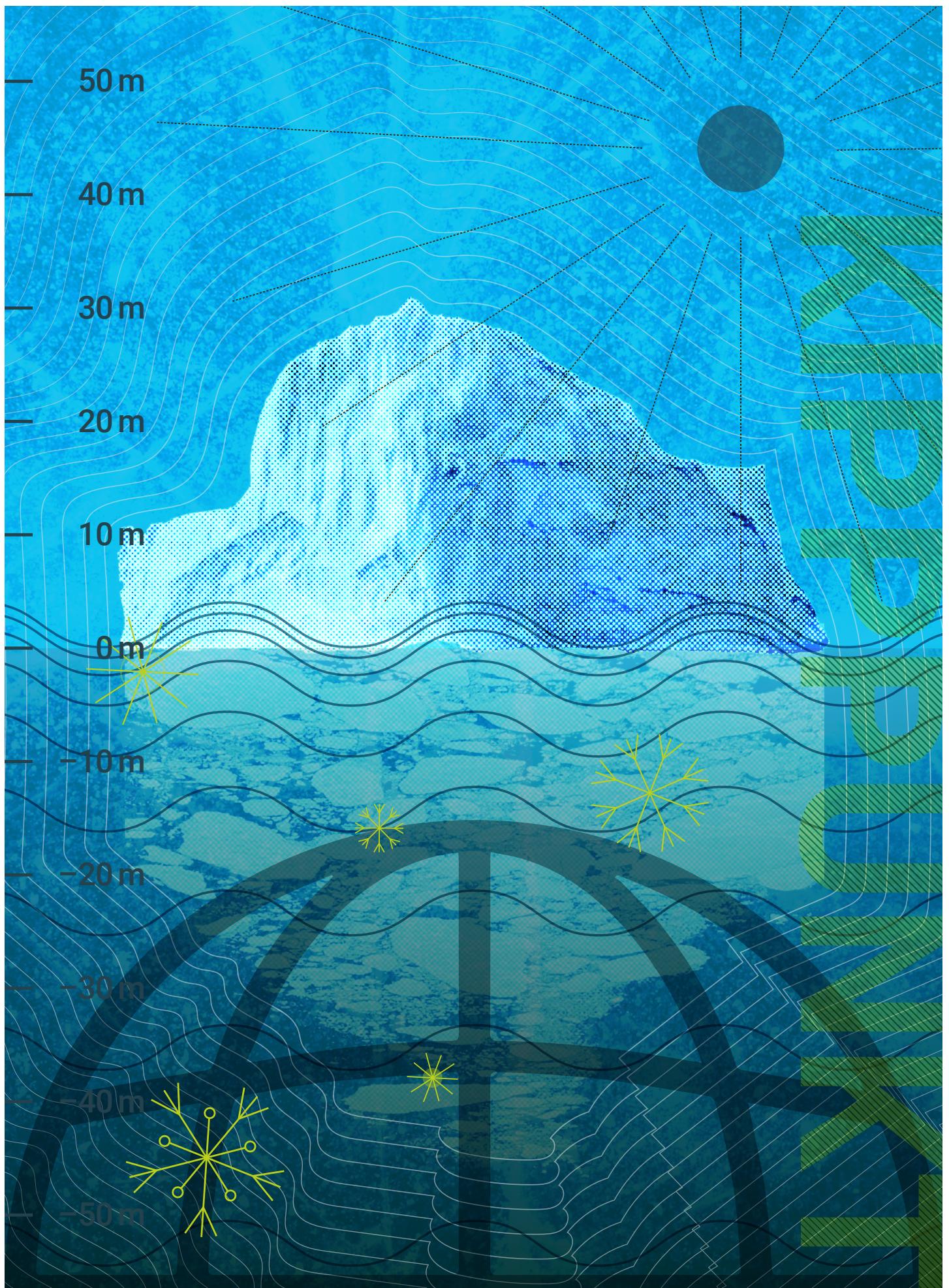
In den letzten Jahrzehnten sind die Eisschilde Grönlands und der Antarktis stark geschrumpft, und wissenschaftlichen Prognosen zufolge wird sich ihr Rückgang in Zukunft noch verstärken. Eisschilde bilden sich an Land in Regionen mit ausreichend Schneefall, der sich über die Zeit durch Kompression zu Eis verdichtet. Sie entstehen also auf ganz andere Weise als das oft in der Öffentlichkeit diskutierte Meereis, welches sich durch das Frieren von Meerwasser bildet. Da sich der überwiegende Teil der Eisschilde an Land befindet, führt ein Abschmelzen der Eisschilde, anders als das Tauen des Meereises, zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Abhängig von der Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der damit verbundenen Schmelze der Eisschilde wird sich der Meeresspiegel bis zum Ende dieses Jahrhunderts vermutlich noch zwischen 0,3 und 1,1 Meter erhöhen. Dies hat nicht nur klimatologische, sondern auch sozioökonomische Auswirkungen, da weltweit etwa 267 Millionen Menschen in Gebieten leben, die weniger als einen Meter über Meeresspiegel-Niveau liegen.

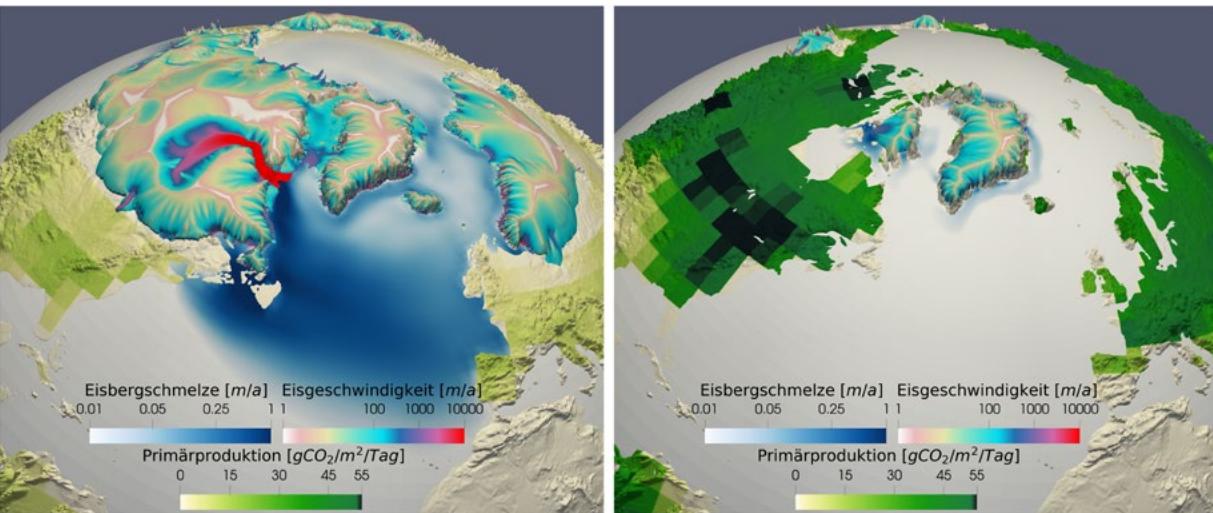
Bereits in der Vergangenheit gab es mehrere Zeiträume, in denen Eisschilde starken klimatischen Änderungen ausgesetzt waren. So herrschte auf der Erde vor etwa 21.000 Jahren eine Kaltzeit, bei der die globale Durchschnittstemperatur etwa fünf Grad Celsius kälter war und der Meeresspiegel circa 120 Meter niedriger lag als heute. Große Eisschilde bedeckten

Grönland, die Antarktis und Teile Nordamerikas und Eurasiens – insgesamt rund acht Prozent der Erdoberfläche. Vor etwa 19.000 Jahren begannen die Temperaturen wieder zu steigen, und ein großer Teil der Eisschilde verschwand. Dieser Übergang wird als letzte Termination bezeichnet. Heute sind nur noch der grönlandische und der antarktische Eisschild übrig. Um die Klimaänderungen sowie die Wechselwirkungen zwischen Eisschilden und dem Klima besser zu verstehen, führen wir mit unserem neu entwickelten Klimamodell Simulationen langer Zeiträume durch. Daraus wollen wir auch Rückschlüsse auf mögliche zukünftige Klimaentwicklungen ziehen.

Kleine Unterschiede wirken sich stark auf das Klima aus

Ein Schwerpunkt unserer bisherigen Arbeiten lag unter anderem darauf, besser zu verstehen, wie sich Unsicherheiten in der Ausdehnung und der Höhe der Eisschilde in Klimamodellen auswirken. Dafür haben wir die letzte Termination mit verschiedenen Eisschildrekonstruktionen simuliert: Diese ergeben sich aus der Analyse von geologischen Daten vergangener Eisschilde, die jedoch zeitlich und räumlich unvollständig sind. So kommt es zu verschiedenen Rekonstruktionen, die sich in Eisschildhöhe und -ausdehnung erheblich unterscheiden. Wie die Modellrechnungen zeigen, wirken





Simulierte Ausdehnung der Eisschilde im letzten glazialen Maximum (circa 21.000 Jahre vor heute; links) und um circa 1850 (rechts) in der Nordhemisphäre. Die Abbildung zeigt die Eisgeschwindigkeit und Primärproduktion durch Fotosynthese sowie den Schmelzwassereintrag von Eisbergen in den Ozean. Während des LGM ist im Osten des nordamerikanischen Eisschildes ein Heinrich-Ereignis zu sehen, das durch erhöhte Fließgeschwindigkeit des Eises und einen erhöhten Schmelzwassereintrag durch Eisberge in den Ozean gekennzeichnet ist.

sich bereits kleine Unterschiede stark auf das Klima aus. Die Veränderungen der Eisschilde beeinflussten dabei sowohl das Klima der letzten Kaltzeit als auch die Zeitpunkte und das Ausmaß abruper Klimaschwankungen der Nordhemisphäre. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die Eisbedeckung der Kontinente und der Eintrag von Schmelzwasser in den Ozean von sich verändernden Eisschilden Auswirkungen auf die atmosphärische und ozeanische Zirkulation hat. Diese regulieren wiederum, wie viel Wärme aus subtropischen Regionen in den Nordatlantik fließt, und bestimmen damit das Klima in den angrenzenden Regionen wie zum Beispiel in Europa.

Große Veränderungen der Eisschilde beeinflussten das Klima auch wiederholt in einer Periode der letzten Kaltzeit zwischen 60.000 und 25.000 Jahren vor heute, dem sogenannten marinen Isotopenstadium 3. In dieser Phase prägten starke, zyklische Temperaturschwankungen das Klima der Nordhemisphäre. Zudem kam es zu periodisch auftretenden Instabilitäten der Eisschilde, die nach ihrem deutschen Entdecker als Heinrich-Ereignisse bezeichnet werden. Während eines Heinrich-Ereignisses wurden plötzlich große Mengen an Eisbergen vom nordamerikanischen Eisschild freigesetzt. Die Eisberge gelangten in den Ozean, wo sie unter anderem Einfluss auf die Ozeanzirkulation nahmen und zu einer deutlichen Abkühlung über den Nordatlantik führen konnten. Die genauen Mechanismen, die zu diesen Ereignissen führten, sind bis heute unklar.

Kontinuierlicher Eisstrom nach einem Kippunkt

Um zu verstehen, wie unterschiedliche Klimabedingungen beeinflussen, wann ein Heinrich-Ereignis einsetzt, haben wir weitere Simulationen durchgeführt. In unseren Simulationen treten Heinrich-Ereignisse in verschiedenen Regionen des nordamerikanischen Eisschildes immer wieder auf, unterscheiden sich regional aber in ihrer Dynamik. Wie wir zudem festgestellt haben, führt ein wärmeres Klima häufig zur Überschreitung einer kritischen Schwelle zu einem sogenannten Kippunkt, bei dem es unter Umständen nicht mehr zu Heinrich-Ereignissen kommt, da sich ein kontinuierlicher Eisstrom einstellt. Solch ein Übergang kann den Meerespiegel um mehrere Meter anheben und verdeutlicht, dass es in der Vergangenheit bereits Kippunkte gab, welche die Klimaentwicklung langfristig ändern können.

Unsere Studien unterstreichen die Bedeutung der Eisschilde für die kurz- und langfristige Klimaentwicklung. Sie zeigen, wie wichtig es ist, Veränderungen von Eisschilden in Modellsimulationen der Vergangenheit und Zukunft zu berücksichtigen. Im nächsten Schritt wollen wir Kippunkte des Klimasystems identifizieren, die auf sich verändernde Eisschilde zurückzuführen sind und das Potenzial haben, die Klimaentwicklung nachhaltig zu ändern. Dazu gehören Änderungen des Jetstreams, der atlantischen Umwälzbewegung (AMOC), zu der auch der Golfstrom gehört, und der Eis-Albedo-Rückkopplung. Letztere bedeutet, dass Eis Sonnenstrahlung stärker reflektiert als etwa Vegetation und sich die Erde deshalb dort weniger aufheizt, wo sie mit Eis bedeckt ist. Unser Modellsystem ermöglicht es uns, solche Prozesse und Rückkopplungen zwischen Eisschilden und dem Klima vollständig zu erfassen und zu untersuchen. o

6 Kurzfristig denken, kriminell handeln

JESSICA DEITZER,
SEBASTIAN L. KÜBEL,
JEAN-LOUIS
VAN GELDER

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

Kurzfristig denkende – das heißt impulsive, sensationslüsterne und wenig zukunftsorientierte – Menschen begehen mit höherer Wahrscheinlichkeit Straftaten. In unserer Forschung befassen wir uns mit den Einflüssen und Erfahrungen, die solche Denkweisen formen. Demnach sind etwa ein raues und unberechenbares Umfeld, Viktimisierung und ein früher erster Polizeikontakt mit kurzfristigen Denkweisen verbunden. Unsere Ergebnisse tragen dazu bei, den Zusammenhang zwischen kurzfristigem Denken bei Jugendlichen und späterer Kriminalität zu erklären.

Eine kurzfristige Denkweise, also die Entscheidung, die Gegenwart auf Kosten der Zukunft zu bevorzugen, bringt nachträglich tendenziell Nachteile. Sie kann kriminelles Verhalten trotz langfristig negativer Folgen attraktiv machen, da es oft direkt belohnt wird: zum Beispiel in Form von materiellen Gütern, sozialem Status oder Nervenkitzel. Das erklärt, warum kurzfristige Denkweisen eines der verlässlichsten Merkmale für die Prognose künftiger Straffälligkeit sind. Kurzfristige Denkweisen zu erforschen ist daher wichtig für das Verständnis abweichenden Verhaltens.

Am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht tragen wir im Rahmen des vom European Research Council finanzierten Projekts CRIMETIME zu dieser Forschung bei. Wir ermitteln Faktoren, die bei Jugendlichen eine solche Denkweise fördern. In mehreren Forschungsprojekten haben wir daher untersucht, welche Rolle eine rau, unberechenbare Umgebung und widrige Erfahrungen spielen können. Ebenso haben wir Polizeikontakte, Viktimisierung oder andere negative Lebensereignisse in den Blick genommen, die dazu führen können, dass Jugendliche ihre Zukunft negativer sehen. Wenn also Jugendliche die Zukunft als unbeständig und wenig

aussichtsreich ansehen, passen sie sich möglicherweise an, indem sie sich auf die Gegenwart konzentrieren.

Die Versuchungen des Augenblicks

Vor gut 30 Jahren führten die Kriminologen Michael R. Gottfredson und Travis Hirschi das Konzept der Selbstkontrolle in die Kriminologie ein: „die Vorstellung, dass sich Menschen auch darin unterscheiden, wie anfällig sie für die Versuchungen des Augenblicks sind“. Darunter fallen unter anderem Impulsivität – die Unfähigkeit, unmittelbaren Versuchungen zu widerstehen – und *sensation seeking* – eine Vorliebe für aufregende Erfahrungen im Hier und Jetzt. In unserer Forschung berücksichtigen wir zudem weitere Variablen, die eine Priorisierung der Gegenwart einschließen – zum Beispiel mangelnde Zukunftsorientierung: die Tendenz, keine längerfristigen Pläne oder Ziele aufzustellen und zu verfolgen. Kurzfristig orientierte Denkweisen als Oberbegriff bündelt also mehrere Konstrukte, die eine Tendenz beschreiben, die Gegenwart zu fokussieren und die Zukunft außer Acht zu lassen oder abzuwerten, wie Jean-Louis van Gelder gemeinsam mit Forschenden aus Zürich und Cambridge 2018 in einer Studie dargelegt hat.

Unser erstes Forschungsprojekt hat gezeigt, dass ein raues und unvorhersehbares Umfeld die Kognition von Jugendlichen verändern kann. Ein raues Umfeld zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Betroffenen durch unzureichende Ressourcen oder Gewalt einem erhöhten Risiko für Tod, Verletzungen oder andere unerwünschte Folgen ausgesetzt sehen. Eine unberechenbare Umwelt wiederum verändert sich häufig. Jugendliche, die in einer Umgebung mit solchen Merkmalen aufwachsen, sehen die Welt und andere Menschen eher als unzuverlässig und unkontrollierbar an – und konzentrieren sich möglicherweise lieber auf die Gegenwart als auf eine ungewisse Zukunft. Wir überprüften diese Thesen an zwei Längsschnitt-Datensätzen aus den USA und der Schweiz. Unsere Ergebnisse zeigen, dass ein raues und unvorhersehbares Umfeld tatsächlich mit einer kurzfristigen Denkweise verbunden ist, was teilweise den Zusammenhang zwischen einem solchen Umfeld und Straffälligkeit erklären kann.

Ein zweites Projekt, zu dem wir erst kürzlich Ergebnisse veröffentlicht haben, konzentriert sich auf die sogenannte Viktimisierung: Ähnlich wie ein raues Umfeld kann die Erfahrung, Opfer von Gewalt zu werden, eine unsichere Zukunft signalisieren und Jugendliche dazu bringen, sich auf die Gegenwart zu konzentrieren. Gewaltopfer sind oft auch Straftäter; in der Kriminologie spricht man von Opfer-Täter-Überschneidung. Wir führen diese Überschneidung teils darauf zurück, dass nach einer Viktimisierung das kurzfristig orientierte Denken und später die Kriminalität zunimmt. Längsschnittdaten von Schweizer Jugendlichen stützen diese Annahme. Dies erklärt teilweise den Zusammenhang zwischen Viktimisierung und späterer Straffälligkeit.

In einem dritten Projekt untersuchen wir die Folgen von Polizeikontakt auf die Zukunftsperspektiven von Jugendlichen. Eine Verhaftung kann die Kriminalität erhöhen, anstatt abschreckend zu wirken. Wir vermuten, dass der Polizeikontakt dazu führen kann, dass Jugendliche für die Zukunft weitere Kontakte mit der Polizei oder dem Strafrechtssystem sowie Auswirkungen auf andere Lebensbereiche erwarten und aus diesem Grund eine Präferenz für die Gegenwart entwickeln. Längsschnittdaten Schweizer Jugendlicher zeigen, dass der erste Polizeikontakt tatsächlich mit einer Zunahme der Gegenwartsorientierung verbunden ist, insbesondere bei jüngeren Jugendlichen.

Frühzeitiges Eingreifen kann ein raues Umfeld vermeiden

Diese Forschung macht deutlich, wie Jugendliche in ihrer Entscheidungsfindung auf widrige Erfahrungen und eine rauhe Umwelt reagieren. Außerdem zeigt sie, wie kurzfristige Denkweisen dazu beitragen können, den Zusammenhang vieler bekannter Risikofaktoren mit Kriminalität zu erklären. Welche Konsequenzen sollten aus diesen Erkenntnissen folgen?

Idealerweise helfen politische Maßnahmen Jugendlichen, die beschriebenen negativen Erfahrungen und Umfelder zu vermeiden. Ein frühzeitiges Eingreifen in die elterliche Erziehung und das Umfeld kann dazu beitragen, rauhe und unberechenbare Umstände zu verhindern. Strategien zur Kriminalitätsreduktion könnten zudem dafür sorgen, dass weniger Jugendliche Opfer von Gewalt und Straftaten werden. Wann immer möglich, sollten Alternativen zum frühen Polizeikontakt erwogen werden. Ist die Vermeidung dieser Umstände jedoch schwierig oder unmöglich, sollte den Betroffenen geholfen werden, Perspektiven für eine positive Zukunft aufzubauen und zu lernen, die Konsequenzen ihres Handelns zu berücksichtigen. So kann zum Beispiel kognitive Verhaltenstherapie die Delinquenz verringern, indem sie impulsive, automatische Denkstile reduziert. Die Imagination des zukünftigen Selbst wird ebenfalls mit einer Abnahme von Delinquenz in Verbindung gebracht. Auf diese Weise könnten eine Verbesserung von Zukunftsaussichten und eine stärkere Zukunftsorientierung schädliche Auswirkungen von widrigen Umwelten und Erfahrungen eindämmen.○

Die Betroffenen brauchen Perspektiven für eine positive Zukunft.

7 Musik und Psyche

MIRIAM MOSING,
LAURA WESSELDIJK,
FREDRIK ULLÉN

✉ Max-Planck-Institut
für empirische Ästhetik,
Frankfurt am Main

Ist Musizieren gut für uns? Obwohl viele glauben, ein Instrument zu spielen helfe ihrer psychischen Gesundheit, leiden Musikerinnen und Musiker – verglichen mit musikalisch inaktiven Menschen – häufiger unter Depressionen und Angststörungen. Wir haben den Zusammenhang zwischen musikalischer Aktivität und psychischer Gesundheit genauer untersucht und dabei besonders eine mögliche Kausalität sowie genetische und familiäre Faktoren in den Blick genommen.

Intuitiv glauben viele, musizieren könne helfen, Emotionen auszudrücken, mit Problemen besser zurechtzukommen und die psychische Stabilität zu stärken. Andererseits hört man immer wieder über Depressionen und Selbstmorde unter bekannten Musikerinnen und Musikern. Große Populationsstudien zeigen, dass tatsächlich sowohl Hobby- als auch professionell Musizierende häufiger unter Depressionen und Angststörungen leiden als Menschen, die nicht aktiv Musik betreiben. Ist Musik zu machen nun gut oder schlecht für uns?

Genetische Risikofaktoren könnten eine wichtige Rolle in der Beziehung zwischen Musik und Psyche spielen. Es ist bekannt, dass psychische Probleme zu einem beträchtlichen Anteil erblich sind. Gleichzeitig konnten immer mehr Studien in den letzten Jahren zeigen, dass auch die individuellen Unterschiede in Musikalität und im Umgang mit Musik teilweise genetisch beeinflusst sind. Es könnte also sein, dass Menschen mit einer angeborenen Neigung zu depressiven Verstimmungen oder Angststörungen eher zum Instrument greifen als andere. Das würde sowohl den Zusammenhang zwischen Musik und psychischen Problemen erklären, gleichzeitig einen positiven Effekt des Spielens an sich aber nicht ausschließen.

Aufschlussreiche Ergebnisse aus Zwillingsstudien

Hier kann die Zwillingsforschung Antworten geben. Da Zwillinge den gleichen familiären Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, das heißt, zeitgleich im selben Haushalt aufgewachsen und darüber hinaus teilweise (zweieiige Zwillinge) oder sogar komplett (eineiige Zwillinge) die gleichen Gene haben, sind sie füreinander perfekte Kontrollpersonen. Wenn nun eineiige Zwillinge einander in Bezug auf ein bestimmtes Merkmal im Durchschnitt stärker ähneln als zweieiige Zwillinge, kann dies als Hinweis gedeutet werden, dass individuelle Unterschiede im untersuchten Merkmal zumindest teilweise genetisch beeinflusst sind. Durch mathematische Analysen kann man dann den genetischen Anteil (die sogenannte Heritabilität oder Erblichkeit) sowie den Einfluss gemeinsam erlebter Umweltfaktoren (etwa in der Familie) auf verschiedene Eigenschaften und deren Assoziationen bestimmen.

Vor Kurzem konnten wir dies zum ersten Mal an ungefähr 10.500 schwedischen Zwillingen untersuchen, die sowohl Auskunft über ihre musikalischen Aktivitäten als auch über ihr psychisches Wohlbefinden gegeben haben. Zusätzlich haben wir die Daten der



Teilweise prägen die gleichen genetischen Faktoren unsere Psyche und unsere Musikalität.

Zwillinge mit dem schwedischen Patientenregister verlinkt, sodass wir auch psychiatrische Diagnosen auswerten konnten. Die Daten zeigten, dass musikalisch aktive Teilnehmende häufiger depressive, Burn-out- und psychotische Symptome aufwiesen als nicht musikalisch aktive. Dieser Zusammenhang ist wahrscheinlich aber nicht kausal zu sehen, sondern sowohl gemeinsamen genetischen Faktoren als auch Einflüssen des familiären Umfelds zuzuschreiben. Dies ist die erste Studie, die zeigen konnte, dass familiäre Einflüsse eine wichtige Rolle spielen und dass teilweise die gleichen genetischen Einflüsse unsere Psyche und unsere Musikalität beeinflussen. Letzteres wird genetische Pleiotropie genannt: Das heißt, die gleichen Gene haben einen Einfluss auf verschiedene Verhalten oder Konditionen.

Positive Einflüsse von Musik auf die Psyche sind möglich

In Verbindung mit Methoden der Molekulargenetik konnten wir diese Studie nun erweitern. Insgesamt 5.648 der teilnehmenden Zwillinge stellten eine Probe ihrer DNA zur Verfügung. Darauf basierend konnten wir individuelle Indikatoren für das genetische Risiko aller Teilnehmenden sowohl für psychiatrische Krankheiten als auch für Musikalität berechnen, die sogenannten „Polygenic Scores“. Wie erwartet waren Teilnehmende mit einem höheren genetischen Risiko für Depressionen und bipolare Störungen mit größerer Wahrscheinlichkeit auch musikalisch aktiv. Interessanterweise traten diese Zusammenhänge unabhängig davon auf, ob die Menschen tatsächlich psychische Probleme hatten. Gleichzeitig hatten Teilnehmende mit höherer genetischer Veranlagung zur Musikalität auch ein höheres Risiko, eine Depression diagnostiziert zu bekommen – unabhängig davon, ob sie tatsächlich ein Musikinstrument spielen oder nicht.

Dies bestätigt, dass wahrscheinlich dieselben Gene sowohl Musikalität als auch psychische Probleme beeinflussen und dass dies nicht über einen kausalen Pfad erklärbar ist. Menschen spielen Musik also nicht als Reaktion auf ihre psychischen Probleme oder anders herum. Diese Ergebnisse sind nicht völlig überraschend, wurde doch auch schon früher gezeigt, dass Menschen, die sich aktiv in einer kreativen Domäne betätigen, ein höheres genetisches Risiko für bipolare Störungen und Schizophrenie haben als diejenigen, die weniger kreativ sind. Die Hypothese eines Zusammenhangs von Kreativität und Wahnsinn ist also auch im Bereich der Musik nicht auszuschließen.

Diese zwei Studien sind die ersten, die den Zusammenhang zwischen Musizieren und psychischen Problemen unter dem Gesichtspunkt einer möglichen Kausalität und unter Berücksichtigung von familiären Faktoren genauer untersucht haben. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Musik und psychischer Gesundheit komplexer ist als angenommen. Familiäre (besonders genetische) Faktoren können sowohl die Musikalität als auch die psychische Gesundheit beeinflussen, und wer Musik macht, hat im Durchschnitt ein höheres genetisches Risiko für bestimmte psychische Probleme. Wichtig ist aber, dass diese Ergebnisse positive Einflüsse von Musik und Kultur auf die psychische Gesundheit nicht ausschließen. In diesem Sinne forschen wir weiter, und erste Ergebnissen zeigen, dass sogenannte Flow-Erfahrungen, die oft durch kulturelle Aktivitäten hervorgerufen werden, einen positiven Einfluss auf die Psyche haben können. ◦

8 Rinde als Rohstoff

**MICHAELA EDER,
CHARLETT WENIG,
JOHANNA
HEHEMEYER-
CÜRTEN,
PETER FRATZL**

Max-Planck-Institut
für Kolloid- und
Grenzflächenforschung,
Potsdam

Nachhaltige Rohstoffe sind gefragter denn je – nicht zuletzt, um Ressourcen zu schonen und CO₂-Emissionen zu reduzieren. Wir möchten daher biogene Materialien, die bislang als Abfall der Holzwirtschaft gelten, für hochwertige Anwendungen erschließen. So untersuchen wir in einem Zusammenspiel von naturwissenschaftlicher Grundlagenforschung und Design, wie sich Baumrinde zu steifen Platten und zu einem flexiblen, lederartigen Material verarbeiten lässt.

Alleine in Deutschland fallen jährlich rund zehn Millionen Kubikmeter Baumrinde an. Sie wird bislang zu einem kleinen Teil genutzt, etwa um daraus diverse Chemikalien zu extrahieren, oder als Rindenmulch. Der größte Teil wird jedoch zur Energiegewinnung verbrannt. Wir sind der Frage nachgegangen, ob sich Rinde auf neue Art und Weise nutzen lässt, zumal der Bedarf an nachhaltigen, holzähnlichen Materialien etwa in der Baubranche und der Papierindustrie steigt. Gleichzeitig bedroht die Klimakrise die Wälder als Quellen für den Rohstoff Holz, sodass dieser künftig knapper werden dürfte. Daher wäre es erstrebenswert, auch die Abfälle der Holzproduktion zu verwerten. Wie das möglich ist, haben wir in einem Projekt in der Region Berlin-Brandenburg eingehend untersucht.

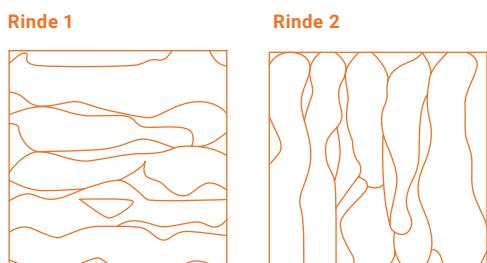
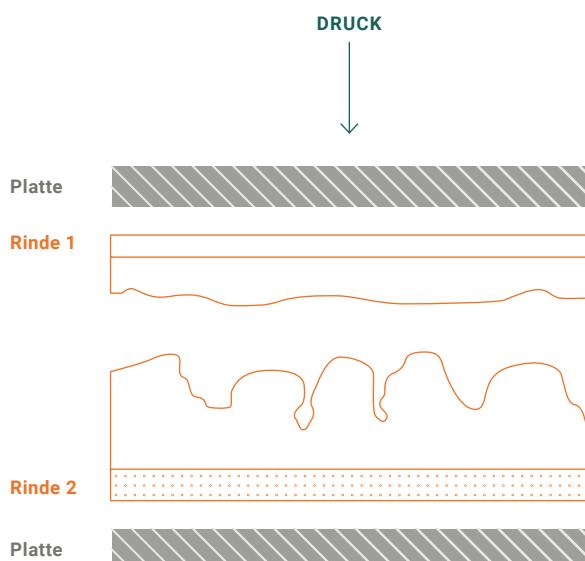
Bislang wurde Rinde kaum als Werkstoff genutzt, weil das Material sehr heterogen ist und das Wissen über seine komplexe Struktur limitiert war. In einer Zusammenarbeit von Forschenden aus den Bereichen Natur- und Kulturwissenschaften und Design haben wir zunächst die Struktur und die Eigenschaften von Baumrinde analysiert. Diese haben wir uns für unterschiedliche Anwendungen zunutze gemacht. Zu diesem Zweck haben wir zunächst von vier unterschiedlichen

Baumarten aus der Region die Rinde mittels einer historischen Schälmethode geerntet, bei der die natürliche Struktur des Materials erhalten bleibt und sich auch größere Stücke gewinnen lassen.

Gepresste Rindenplatten ohne Klebstoffe

Die Herstellung von Platten ist eine Möglichkeit, die Rinde zu verarbeiten. Solche Rindenplatten könnten etwa in Möbeln, zum Beispiel als Regalböden, oder als Fußbodenbeläge verwendet werden. Um die Rindenplatten herzustellen, haben wir jeweils zwei Rindenstücke von Kiefer, Lärche, Eiche und Birke verwendet, die dicker als einen Zentimeter waren. Diese haben wir mit den Borkenseiten so aufeinander gelegt, dass die Faserrichtungen im rechten Winkel zueinander verliefen. Dann haben wir die beiden Rindenstücke bei einem Druck von maximal 97 Bar und einer Temperatur von 90 Grad 20 Minuten lang gepresst. Dabei haben wir auf Zusatzstoffe wie etwa Klebstoff verzichtet, was für die weitere Verwertung etwa als Brennstoff von großem Vorteil ist. Denn für eine solche Kaskadennutzung ist es günstig, wenn sich Materialien einfach und ohne großen Energieaufwand trennen lassen.

Von den verschiedenen untersuchten Rindenplatten sind solche aus Eichenrinde am stabilsten. Um die Platten herzustellen, werden zwei Rindenstücke mit der Borke kreuzweise aufeinander gepresst.

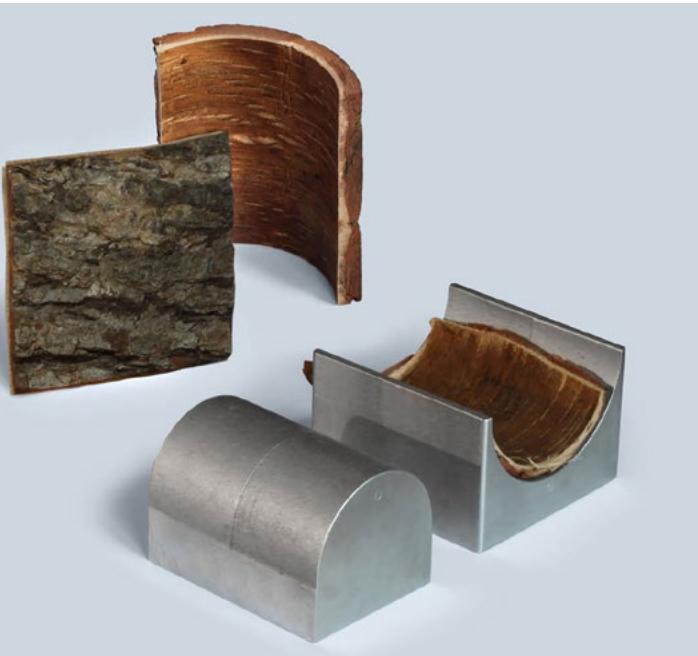
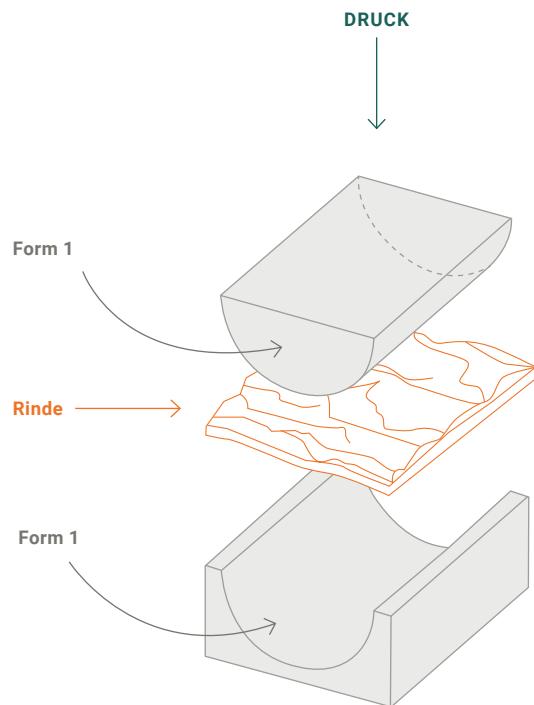


Ausrichtung der Rinde in der Presse



Strukturelle und mechanische Untersuchungen wie etwa Biegetests an den fertigen Platten haben ergeben, dass sich das Ausgangsmaterial erheblich verdichtet und die Oberflächenqualität sowie die mechanischen Eigenschaften der Platten mit denen von holzbasierten Werkstoffen vergleichbar sind. Die Art der verpressten Rinde beeinflusst dabei die Eigenschaften der Platte; als besonders stabil erwiesen sich Platten aus Eichenrinde. Auch der Feuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials sowie die Luftfeuchtigkeit bei der Verarbeitung wirken sich auf die Eigenschaften des Materials aus. Der Einfluss der Feuchtigkeit ist ein wichtiger Aspekt für mögliche Anwendungen, um einschätzen zu können, ob oder wie stark sich Möbel bei schwankender Luftfeuchtigkeit verschieben. Wir arbeiten aktuell daran, die Platten weiter zu optimieren. So möchten wir die Eigenschaft von Rinde, bei Feuchtigkeit aufzuquellen, ausnutzen.

Als weitere Anwendung haben wir untersucht, ob sich Rinde zu Textilien verarbeiten lässt. Dabei machen wir uns zunutze, dass die Rindeneigenschaften nicht nur zwischen Baumarten variieren, sondern auch an einem Baum. So ist beispielsweise die Rinde von Kiefern im bodennahen Bereich dick und schuppig, während man weiter oben am Stamm dünne Rinde, die sogenannte Spiegelrinde, findet. Diese ist direkt nach der Ernte sehr



Rinde lässt sich auch in gebogene Formen pressen.



flexibel. Wenn sie trocknet, wird sie spröde und brüchig. Um das zu vermeiden, haben wir die Rinde mit einer Mischung aus Wasser und Speiseglycerin behandelt. Das Erscheinungsbild und die Haptik des bearbeiteten Materials erinnern anschließend an Leder. Im Rahmen eines Designexperiments haben wir daraus zwei Jacken hergestellt. Das erste Modell, das wir aus großen Rindenstücken gefertigt haben, hat die Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Daher haben wir das Design für die zweite Jacke verändert und schmale Rindenstreifen miteinander verweben, wodurch sich die Bewegungsfreiheit deutlich erhöht hat. Das ist ein gutes Beispiel dafür, wie sich in unserer Forschung Materialwissenschaft und Produktdesign ergänzen.

Vielfältige Formen aus verwobener Rinde

Das gilt auch für mögliche Anwendungen in der Architektur. Die großen Mengen an Rinde, die in der Holzwirtschaft anfallen, legen es nahe, über Anwendungen in einem solchen Maßstab nachzudenken. Dabei ist es hilfreich, dass sich Rinde anders als Holz auch in komplexe Formen pressen lässt. Wie das Beispiel der Textilien zeigt, können wir zudem vielfältige Formen erzeugen, indem wir Rinde verweben. Auf diese Weise haben wir in einem architektonischen Designexperiment eine begehbarer Kugel konstruiert. Die Kugel als abstrakte Form kann als Inspiration für mögliche Anwendungen von Rinde in der Architektur dienen und soll generell die Diskussion zu einem nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen anregen. Die Designerinnen Charlett Wenig und Johanna Hehemeyer-Cürten wurden für das Objekt mit einem Preis der Jungen Akademie der Wissenschaften geehrt.

9

Das Geheimnis der Schönheit

ANNE BRIELMANN

↙ Max-Planck-Institut
für biologische Kybernetik,
Tübingen

Was Menschen als schön empfinden, ist höchst individuell. Mein Team und ich wollen verstehen, wie das Schönheitsempfinden zustande kommt und welchen Einfluss die Gestaltung der Umgebung auf das Wohlbefinden hat.

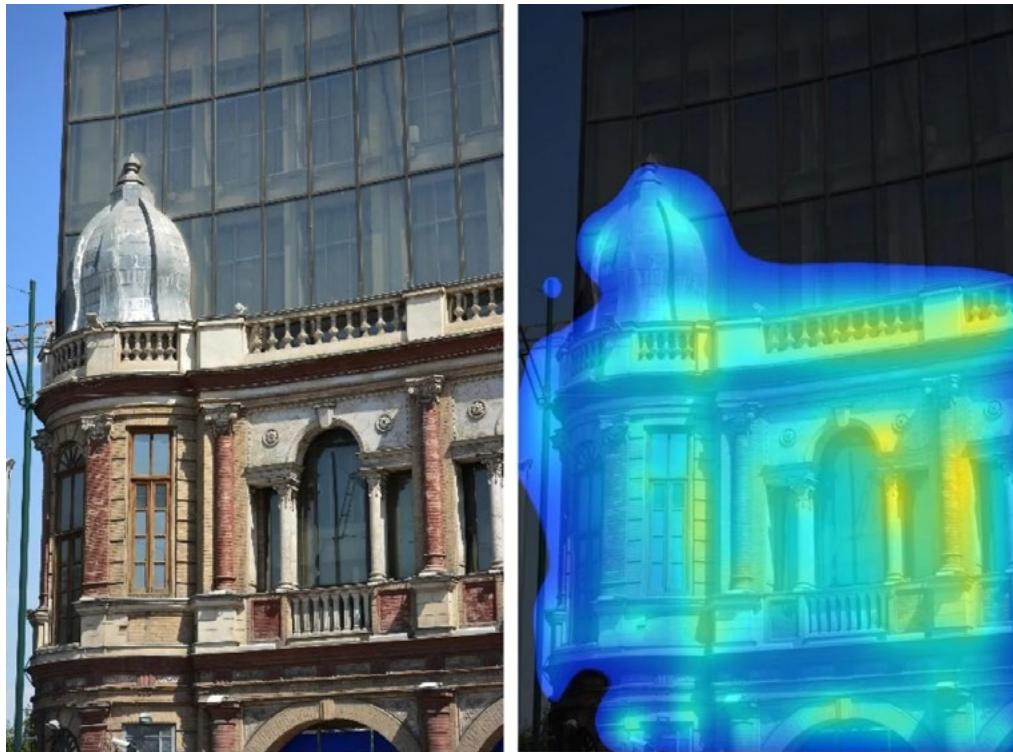
Was wir anziehen, wo wir uns gerne aufhalten, womit wir unsere Freizeit verbringen: Jeden Tag treffen wir Entscheidungen aufgrund einer Vorliebe für einen bestimmten Anblick, einen Klang oder einen Geschmack. Diesen Aspekt der persönlichen Vorliebe nutzt die Werbung bereits lange, und doch hat ihn die Wissenschaft bislang weitgehend ignoriert. Das könnte daran liegen, dass es schwierig ist, das „Gerne-Mögen“ zu messen. Ein weiterer möglicher Grund ist die hohe Bandbreite persönlicher Geschmäcker. Unsere Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen möchte das Wesen der Schönheit ergründen und sie mit wissenschaftlichen Methoden analysieren. Dazu arbeiten wir auch mit Fachleuten aus den Bereichen der Philosophie, Informatik und Architektur zusammen.

Ein- und derselbe äußere Reiz kann im Gehirn unterschiedliche Reaktionen hervorrufen. Ein Geräusch zum Beispiel gefällt dem einen, dem anderen aber nicht. Mein Team und ich wollen herausfinden, wie ein bestimmter Input in einen Output wie Mögen oder Ablehnung umgewandelt wird. Auf diese Weise können wir ein Modell entwickeln und trotz individueller Unterschiede Vorhersagen dazu machen, wie ein Reiz verarbeitet wird. Wir haben für diesen Vorgang eine Theorie in Form eines mathematischen Modells aufgestellt. Damit möchten wir eines Tages vorhersagen können, welche Dinge unser Gehirn besonders mag und welche Veränderungen in unserem Lebensumfeld Gesundheit und Wohlbefinden steigern können.

Unsere Theorie basiert darauf, dass das Gefühl, etwas zu mögen, bedeutet, dass ein Sinneseindruck für unser sensorisches System gut ist. „Gut“ heißt in diesem Zusammenhang, dass unser Gehirn den Eindruck leicht verarbeiten kann und er ihm dabei hilft, vorherzusagen, ob es vergleichbare „gute“ Eindrücke in der Zukunft machen kann. Wenn wir eine für uns angenehme Möglichkeit wählen, entscheiden wir uns also für eine Sinneserfahrung, die einfacher zu verarbeiten ist und aus der wir etwas lernen können. Der Belohnungscharakter bringt uns dazu, solche Erfahrungen immer wieder machen zu wollen.

Schönheit ist nicht nur Geschmackssache

Nehmen wir als Beispiel Barcelona: Jedes Jahr besuchen Millionen von Menschen die Stadt und flanieren dort durch „Las Ramblas“, die angeblich schönste Straße der Welt. Was macht diese Straße so besonders? Warum empfinden so viele Menschen diesen Ort als schön? In der Architektur- und Designwelt gilt meist die Annahme, dass die Schönheit im Auge des Betrachters liegt. In der Wissenschaft weiß man jedoch mittlerweile, dass manche ästhetischen Vorlieben biologisch begründet sind. Um das Empfinden visueller Schönheit zu erfassen und zu messen, setzen wir bewusst keine Fragebögen ein. Sie würden vor allem widerspiegeln, was Menschen aufgrund ihrer Prägung als angenehm und schön empfinden, weil etwa



Links: Ein Gebäude aus den 1920ern vor einer Glasfassade in Teheran.
Rechts: Die Falschfarbendarstellung zeigt, wie stark ein Mensch die Gebäude wahrnimmt. Gelbe Strukturen ziehen den Blick am stärksten, blaue und schwarze Objekte am wenigsten an. Die Glasfassade im Hintergrund wird also kaum wahrgenommen.

ihr Kunstverständnis oder die Gewöhnung an heutige Städte in die Antworten einfließen. Wir nutzen vielmehr die Technik des „Eye-tracking“. Dabei nehmen wir mit Kameras das Blickfeld und die Augenbewegungen der Betrachter auf. Computerprogramme berechnen anschließend, wohin die Betrachter geschaut haben. Das Erfassen der Blickrichtung ist ein wunderbares Werkzeug, um die unbewusste Aufmerksamkeit zu erfassen. Sie deutet auch Vorlieben und Gefallen an. Schon Kleinkinder blicken unbewusst auf angenehme Gegenstände und richten sogar ihren Körper auf solche Objekte aus.

Menschen mögen Dinge, die der Natur ähneln

Welche Objekte oder Umwelten kann unser Gehirn nun gut verarbeiten und von welchen kann es lernen? Genauer gefragt: Nach welchen Gesichtspunkten sollten wir Städte bauen und gestalten, damit sie nicht nur funktional, sondern auch „schön“ sind? Sofort drängt sich hier der Gedanke an die Natur auf. Tatsächlich haben viele Studien bestätigt, dass Menschen Dinge mögen, die der Natur ähneln. Das heißt nicht nur, dass das Aufgreifen natürlicher Elemente wie Sonnenlicht, Wasser und Pflanzen einen positiven Effekt darauf hat, wie wir unsere Umgebung empfinden. Auch abstrakte Merkmale können von der Natur abgeschaut werden.

Schönheit verringert Stress und fördert das Wohlbefinden.

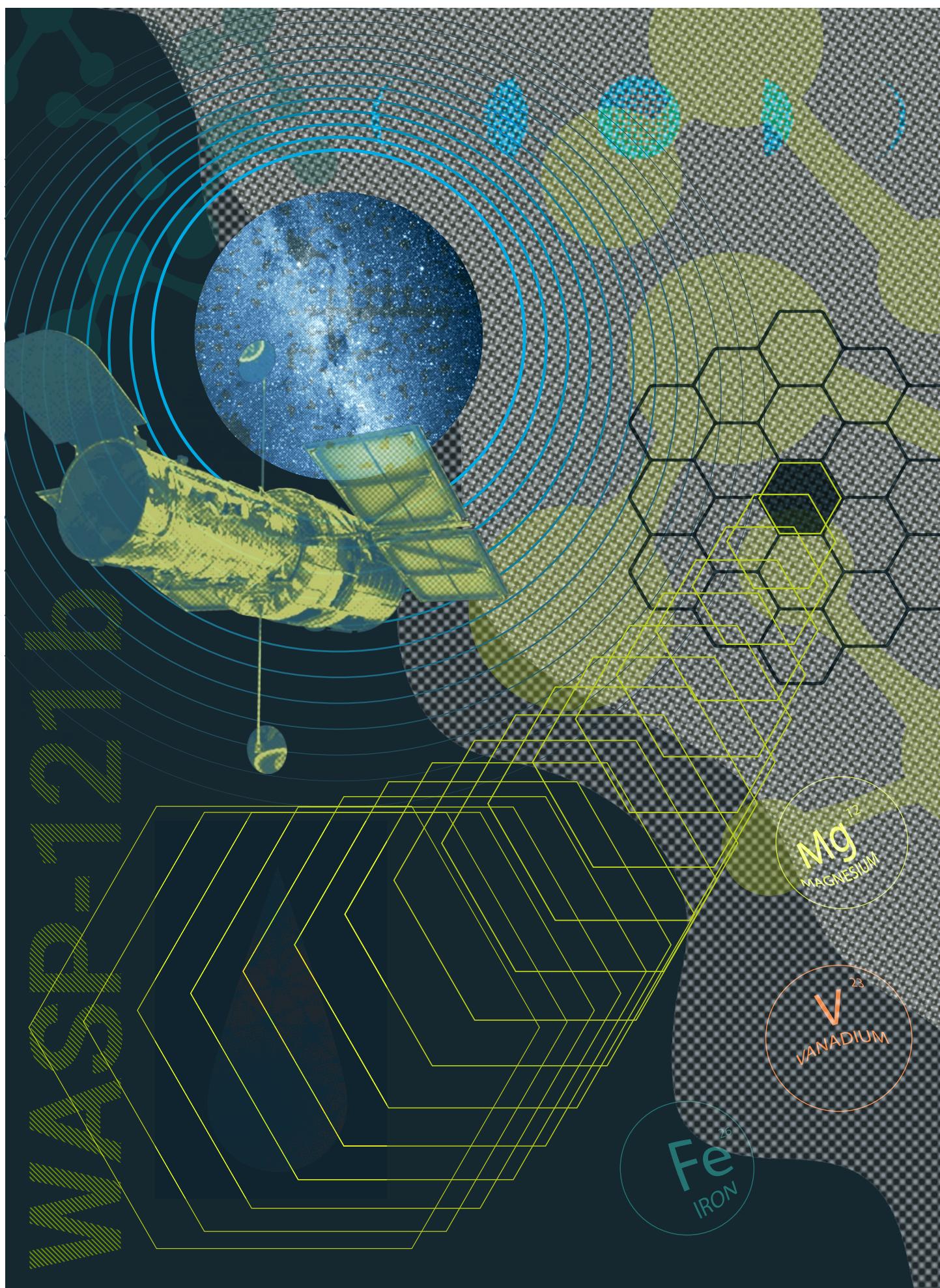
Das bekannteste dieser Merkmale ist das der Fraktalität, ein Prinzip, bei dem das Ganze seinen Bestandteilen ähnelt. Man findet fraktale Strukturen nicht nur in der Biologie, sondern auch in Musik und Mathematik. Ein Baum ist ein gutes Beispiel für ein fraktales Bauprinzip: Die Struktur eines Astes ähnelt dem des gesamten Baumes, die Teiläste wiederum dem Hauptast. Dieses Muster wiederholt sich in fortwährend kleinerer Form, bis hin zur Verzweigung der Blattadern. Mit anderen Worten: Ein Baum ist visuell anregend. Eye-Tracking-Experimente zeigen, dass Menschen auch eine Vorliebe für Fraktale in der Architektur besitzen. Je mehr eine Fassade fraktalen Mustern entspricht, umso eher verweilen die Augen auf ihr. Tatsächlich beinhalten die meisten traditionellen Architekturstile solche fraktalen Elemente. Eine leere Beton- oder Glasfassade hat dagegen unseren Augen nichts zu bieten.

Neue Reize stimulieren die Sinne

Warum also finden Touristinnen und Touristen „Las Ramblas“ so schön? Weil die Straße dem Spaziergänger immer neue stimulierende Reize präsentiert. Ihre Architektur ist einfach zu verarbeiten, aber gleichzeitig komplex genug, um weitere Lernerfahrungen zu sammeln – genauso, wie uns Spiele am stärksten motivieren, wenn sie nicht zu schwer und nicht zu leicht sind. Die aufeinanderfolgenden Reize von „Las Ramblas“ fördern einerseits die Fortbewegung, gleichzeitig sinken Anspannung und Stress. Die positive Wirkung der Umgebung auf unser Gehirn empfinden wir also als schön. Schönheit verringert Stress und fördert das Wohlbefinden. Es ist also nicht verwunderlich, dass Menschen weniger gestresst sind, wenn sie in grüneren Stadtteilen leben oder arbeiten. Kunst kann übrigens denselben Effekt hervorrufen. o



Der Moraine Lake ist nicht umsonst eines der am häufigsten fotografierten Motive in Kanada. Die spiegelnde Seeoberfläche, die schroffen Berggipfel und der sattgrüne Wald bieten dem Auge eine Fülle anregender Reize.



10 Metallwolken auf WASP-121 b

THOMAS
MIKAL-EVANS

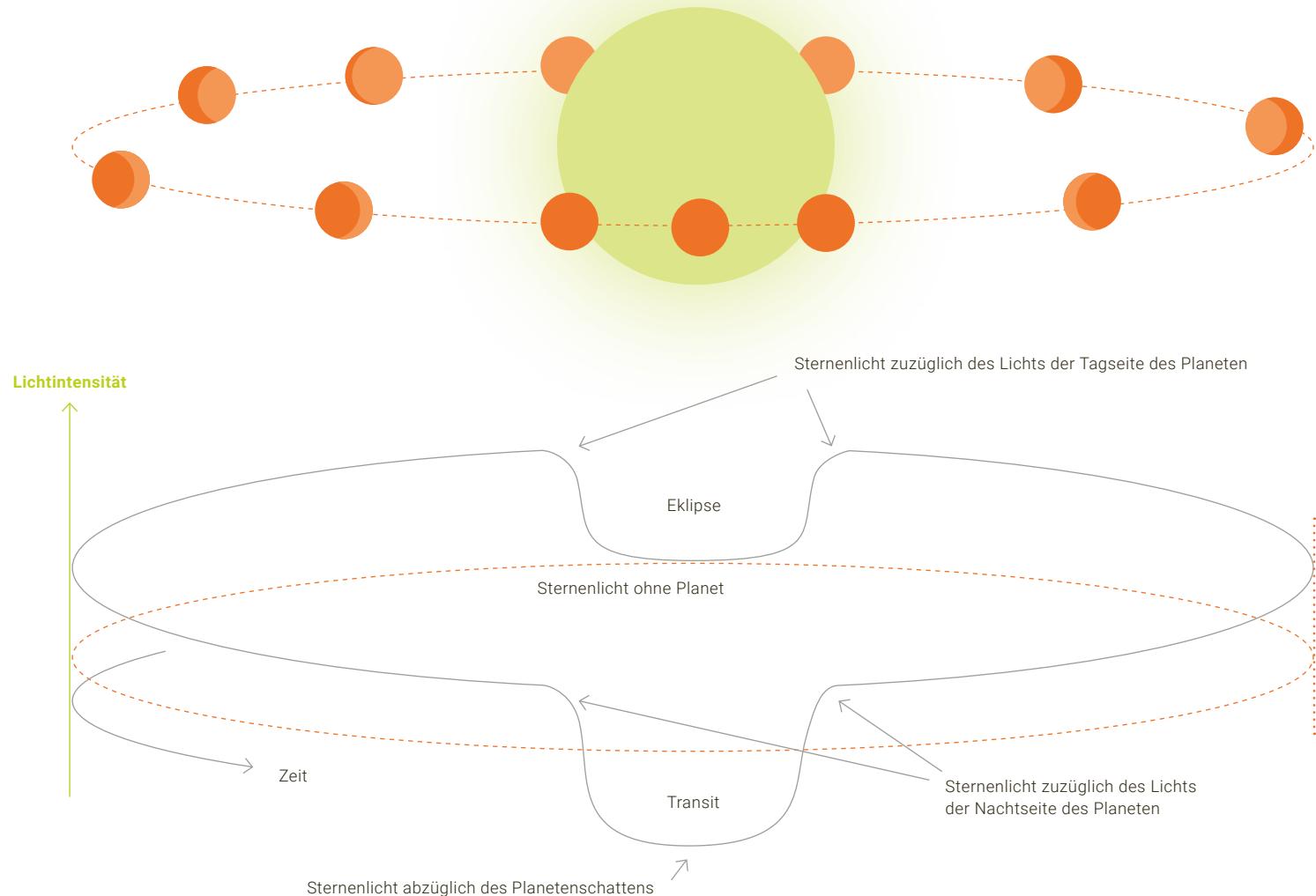
Max-Planck-Institut
für Astronomie,
Heidelberg

Die Planeten unseres Sonnensystems könnten unterschiedlicher nicht sein. Sie geben uns aber nur eine erste Vorstellung davon, welche exotischen Welten sich in den Tiefen des Weltalls finden. Mit dem Hubble-Weltraumteleskop untersuchten wir den heißen Gasriesen WASP-121 b, ein Exoplanet in der Milchstraße. Ein ungewöhnlicher Kreislauf von Wasser trifft auf Wolken flüssiger Metalle.

Planeten außerhalb unseres Sonnensystems aufzuspüren ist schon schwierig genug. Wir sind aber noch einen Schritt weiter gegangen und haben eine Art Wetterbericht für einen solchen Exoplaneten erstellt. Denn wir haben mit dem Hubble-Weltraumteleskop die extremen physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre des Planeten WASP-121 b beobachtet. Dieser ist 855 Lichtjahre von der Erde entfernt und umkreist seinen Zentralstern, der nur wenig größer als die Sonne ist, in nur 30 Stunden. Der Planet misst etwa den doppelten Durchmesser von Jupiter. Die Besonderheit: WASP-121 b zeigt dem Stern, wie der Mond der Erde, jederzeit dasselbe Gesicht. Auf seiner einen Seite ist es also immer Tag, während die andere Seite ständig in den kalten und dunklen Welt Raum weist. Erstmals haben wir Daten sowohl von der 3.000 Grad heißen Tagseite des Planeten als auch der

um 1.500 Grad kühleren Nachtseite genommen. Die Temperaturen sind so hoch, dass Moleküle auf der Tagseite in ihre Bestandteile zerlegt werden, während sich auf der Nachtseite Wolken flüssiger Metalle bilden.

Heiße Gasriesen wie WASP-121 b umkreisen ihren Zentralstern auf sehr engen Bahnen. Stern und Planet sind dann nur durch wenige Sterndurchmesser von einander getrennt. Wir kennen heute mehr als 300 dieser Exoten. Die Rotation dieser Planeten ist durch die dabei wirkenden Gezeitenkräfte an dessen Umlaufbahn um den Zentralstern gebunden. Das heißt, WASP-121 b, der in gerade einmal 30 Stunden den Stern umkreist, benötigt die gleiche Zeit für eine Drehung um seine Achse. Folglich ist eine Seite immer der glühend heißen Oberfläche des Sterns ausgesetzt. Durch die Zusammenführung der Daten beider Seiten von WASP-121 b ermittelten wir erstmals ein umfassendes



Bei einer gebundenen Rotation wie etwa von WASP-121 b beleuchtet der Stern immer die gleiche Seite des Planeten, angedeutet durch den hellen Orangeton (ganz oben). Die graue durchgezogene Linie (unten) gibt die beobachtete Lichtintensität während eines Umlaufs des Planeten um den Stern wieder. Dabei gibt nicht nur die Tag-, sondern

auch die Nachtseite des Planeten Licht ab. Je nach dessen Position erfasst ein Teleskop das Licht des Sterns sowie das Licht des Planeten, und zwar von seiner Tag- oder Nachtseite oder einer Mischung beider Seiten. Verdeckt der Stern den Planeten (Eklipse) oder zieht der Planet genau vor dem Stern vorbei (Transit), ist der Planet nicht zu beobachten.

Bild der globalen Stoff- und Energiekreisläufe in der Atmosphäre eines Exoplaneten.

Dabei haben wir auf WASP-121 b Hinweise auf einen Wasserkreislauf gefunden. Dieser sieht jedoch völlig anders aus als auf der Erde. Hier ändert das Wasser ständig seinen Aggregatzustand. Festes Eis schmilzt zu flüssigem Wasser. Das Wasser verdampft zu Gas und kondensiert dann zu Tröpfchen, die Wolken bilden. Der Kreislauf schließt sich, wenn diese Tröpfchen zu Regentropfen heranwachsen, die schließlich herunterfallen und Flüsse und Ozeane speisen.

Auf WASP-121 b beobachten wir einen ganz anderen Wasserkreislauf: Auf der 3.000 Grad heißen Tagseite des Planeten zerfallen Wassermoleküle in ihre atomaren Bestandteile. Der extreme Temperaturunterschied zur etwa 1.500 Grad heißen Nachtseite führt zu starken Winden, die den gesamten Planeten von Westen nach Osten umwirbeln und die aufgebrochenen Wassermoleküle mitreißen.

Die niedrigeren Temperaturen auf der Nachtseite ermöglichen es den Wasserstoff- und Sauerstoffatomen, sich wieder zu Wasserdampf zu verbinden, bevor sie auf die Tagseite geweht werden und sich der Zyklus wiederholt. Die Temperaturen sinken jedoch nie so weit ab, dass sich Wasserwolken, also Ansammlungen feiner Tröpfchen kondensierten Wasserdampfs, bilden könnten, geschweige denn Regen.

Während es selbst auf der Nachtseite von WASP-121 b zu heiß für kondensiertes Wasser ist, sind die Bedingungen dort ideal für Wolken aus kondensiertem Eisen, Magnesium oder Vanadium. Frühere Beobachtungen haben diese Metalle in gasförmigem Zustand auf der heißeren Tagseite nachgewiesen.

Metallischer Regen

Seltsamerweise befanden sich die ansonsten häufig vorkommenden Metalle Aluminium und Titan nicht unter den Gasen, die in der Atmosphäre von WASP-121 b nachgewiesen wurden. Eine wahrscheinliche Erklärung dafür ist, dass diese Metalle auf der Nachtseite kondensiert und in tiefere Schichten der Atmosphäre geregnet sind, die für Beobachtungen nicht zugänglich sind. Da früher oder später alle gasförmigen Vorkommen von Titan oder Aluminium von der Tag- zur Nachtseite geweht werden würden, gehen wir davon aus, dass beide Elemente vollständig aus

der Atmosphäre gewaschen wurden. Verbindungen aus Aluminium mit Sauerstoff bilden mit Verunreinigungen aus Chrom, Eisen, Titan oder Vanadium Minerale, die wir als Rubin oder Saphir kennen. Auf WASP-121 b könnte es also flüssige Edelsteine geregnet haben.

Um die gesamte Oberfläche von WASP-121 b zu untersuchen, haben wir mit Hubble während zweier kompletter Planetenumläufe Spektren aufgenommen. Ein Spektrum ist eine regenbogenartige Auffächerung von Licht entsprechend seiner Farben beziehungsweise Wellenlängen. Da Moleküle Licht bei charakteristischen Wellenlängen abstrahlen, haben wir aus den gemessenen Lichtspektren die Art und Häufigkeit dieser Moleküle ermittelt.

Solche Beobachtungen sind sehr anspruchsvoll. Nur wenige der rund 5.000 bekannten Exoplaneten konnten bislang auf diese Weise erforscht werden. Unsere Messungen liefern insbesondere den derzeit genauesten Einblick in die Bedingungen auf der Nachtseite eines Exoplaneten. Nur durch sie können wir den komplexen Wasserkreislauf in der oberen Atmosphäre des Planeten beschreiben. Dieser Blick von außen auf ferne Welten erweitert nicht nur unseren Horizont – er hilft, die Grenzen komplexer Atmosphärenmodelle auszuloten.

Ein zweiter Blick mit dem James-Webb-Weltraumteleskop

Das Hubble-Weltraumteleskop war lange Zeit State of the Art. Es ermöglichte uns faszinierende Erkenntnisse nicht zuletzt über ferne Welten. Das Weltraumteleskop der nächsten Generation, James Webb, liefert noch genauere Daten als Hubble. Der bienenwabenförmige Spiegel des James-Webb-Teleskops sammelt etwa sechs Mal mehr Licht als der deutlich kleinere Spiegel des Vorgängers Hubble. In Folgebeobachtungen von James Webb, die wir bereits analysieren, werden wir die Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Tiefen der Atmosphäre von WASP-121 b oder anderen Exoplaneten bestimmen. Außerdem hoffen wir, die Menge an Kohlenstoff in der Atmosphäre von WASP-121 b zu bestimmen. Diese Messung könnte verraten, wie Planeten dieser extremen Sorte entstanden sind – eine Information, die uns auch helfen könnte, unser Sonnensystem besser zu verstehen. Ist es besonders? Wie unterschiedlich sind die vielen Planetensysteme unserer Milchstraße? o

Auf WASP-121 b könnte es flüssige Edelsteine geregnet haben.

11 Wir und unsere automatisierten Partner

MARINA CHUGUNOVA

Max-Planck-Institut
für Innovation und
Wettbewerb, München

Rasante Fortschritte in Technologie und Automatisierung verlangen nach einem tiefgreifenden Verständnis, wie sich menschliches Verhalten wandelt, wenn anstelle zwischenmenschlicher Interaktionen Menschen mit technologiegesteuerten Akteuren in Beziehung treten. Es ist wichtig, solche Veränderungen im menschlichen Verhalten zu berücksichtigen, wenn es darum geht, einen rechtlichen und politischen Rahmen zur Regulierung von Automatisierung zu schaffen. Wir haben dafür einen Überblick über interdisziplinäre Erkenntnisse in diesem Bereich erstellt.

Technologien prägen zunehmend unser soziales, kulturelles und wirtschaftliches Leben und erleichtern unseren Alltag. Aber sie verändern auch unsere Umwelt und unser Verhalten grundlegend. Mit rasanten technologischen Fortschritten werden automatisierte Akteure (zum Beispiel Computerprogramme, Roboter, Künstliche Intelligenz) unverzichtbar und übernehmen neue Rollen und Funktionen. Letztlich verwandeln sie zwischenmenschliche in hybride Interaktionen zwischen Menschen und einem technologiegestützten Gegenüber. Hybride Interaktionen sind mittlerweile allgegenwärtig – von alltäglichen Routineaufgaben wie der Empfehlung der besten Reiseroute über Unternehmensentscheidungen bei Bewerbungen bis zu juristischen Entscheidungen über Kautions- und Bewährung.

Doch was geschieht im menschlichen Verhalten, wenn sich Mensch-Mensch-Interaktionen in Interaktionen mit immer leistungsfähigeren automatisierten Partnern verwandeln? Wie reagieren Menschen auf die vermehrte Einbeziehung solcher Akteure in die Entscheidungsfindung? Antworten auf diese Fragen sind von maßgeblicher Bedeutung, um einerseits technologisches Potenzial voll ausschöpfen zu können und andererseits wirksame Regeln und Strategien zu schaffen, um die Einführung und Verbreitung solcher Technologien zu lenken. Viele wissenschaftliche Disziplinen haben diese Fragen mit unterschiedlichsten Methoden und Ansätzen untersucht – von Psychologie und Wirtschaftswissenschaften über Informatik und

Medizin bis Luft- und Raumfahrttechnik. Daher sind relevante Erkenntnisse über verschiedene Disziplinen verteilt.

Bei nicht-menschlichen Akteuren reagieren wir weniger emotional

Um einen Überblick zu schaffen, welche Erkenntnisse es gibt und was sie etwa für betriebliche Entscheidungen oder den laufenden rechtlichen und öffentlichen Diskurs über die Regulierung solcher Technologien bedeuten, haben wir 138 experimentelle Studien aus den genannten Bereichen ausgewertet. Dabei wurde deutlich, dass hybride Interaktionen soziale Interaktionen bleiben, obwohl ein Partner kein Mensch ist. Allgemein reagieren Menschen zwar weniger emotional auf nicht-menschliche Interaktionspartner und kümmern sich weniger um soziale Verhaltensregeln – aber sie sind nicht völlig gleichgültig. Geringere emotionale und soziale Reaktionen von Menschen können Ergebnisse verbessern, die von einer erhöhten Rationalität profitieren: So wurde festgestellt, dass Menschen eher bereit sind, einem automatisierten System sensible Gesundheitsinformationen preiszugeben als einem Menschen, womit sie besser behandelt werden können.

Andererseits kann sich dieser Effekt auch als schädlich erweisen, wenn Emotionen oder soziale Regeln ausschlaggebend für positive Ergebnisse sind: Hybride Interaktionen erhöhen nämlich die Wahrscheinlichkeit, sich unethisch oder eigennützig zu verhalten.



Dieses Bild ist ein Produkt des KI-Systems Dall-E 2. Die Autorin ließ es mithilfe der Schlagworte „Digital art people playing with robots“ generieren.

Dabei spielen Aufgabenart und Kontext eine Rolle. Während Menschen bereit sind, sich mit automatisierten Akteuren in Kontexten zu beschäftigen, die als analytisch oder objektiv wahrgenommen werden, zögern sie, dies in sozialen oder moralischen Kontexten zu tun. Am Arbeitsplatz können sich Roboterkollegen entscheidend auf die menschliche Leistung auswirken, aber die Richtung des Effekts kann variieren: Menschliche Teamkollegen bemühen sich möglicherweise mehr, wenn sie sich verantwortlich fühlen, jedoch kann ihre Leistungsbereitschaft aufgrund von fehlendem Gruppendruck auch abnehmen. Menschen akzeptieren aber automatisierte Manager, besonders wenn Entscheidungen eher analytische als soziale Bereiche betreffen.

Menschen schätzen den Rat von KI – manchmal zu sehr

Studien über automatisierte Entscheidungsfindung (etwa zur Kreditwürdigkeit oder zu Bewerbungen) zeigen, dass Menschen die Entscheidungsbefugnis nicht vollständig an automatisierte Agenten delegieren wollen, jedoch ihren Rat zu schätzen wissen, wenn immer noch Menschen das letzte Wort haben. Interessanterweise

scheinen sie sich, sobald automatisierte Unterstützung verfügbar ist, darauf verlassen zu wollen – möglicherweise sogar zu sehr.

Der rechtliche Rahmen, der die Einführung und Verbreitung der Technologien steuern wird, nimmt derzeit Gestalt an. Sowohl die Regulierungsbehörden als auch die Gesellschaft sehen sich mit einer Vielzahl von Überlegungen konfrontiert, von der „Robotersteuer“ über die Rechte des geistigen Eigentums an nicht-menschlichen Leistungen bis hin zur Regulierung von automatisierter Entscheidungsfindung. Die Regulierungsmaßnahmen werden weitreichende Auswirkungen auf die Art und Weise haben, wie KI und verwandte Technologien in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen eingesetzt werden können, und letztlich bestimmen, in welche Richtung sich die Innovation entwickelt.

Gesetze fordern einen Menschen im Loop

Besonders bei der automatisierten Entscheidungsfindung neigen die Regulierungsbehörden dazu, rein automatisierte Entscheidungen zu verbieten, wenn sie schwerwiegende Auswirkungen auf die Betroffenen haben. So legt etwa die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) in Artikel 22 fest, dass eine betroffene Person das Recht hat, „nicht einer ausschließlich auf einer automatisierten Verarbeitung beruhenden Entscheidung – einschließlich Profiling – unterworfen zu werden, die ihr gegenüber rechtliche Wirkung entfaltet oder sie in ähnlicher Weise erheblich beeinträchtigt.“ Der Vorschlag für eine EU-Verordnung zur Regulierung Künstlicher Intelligenz sieht in Artikel 14 „menschliche Aufsicht“ vor und hält fest, dass Hochrisiko-KI-Systeme so konzipiert und entwickelt werden sollen, dass sie während der Dauer ihrer Verwendung von natürlichen Personen – auch mit geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstellen – wirksam beaufsichtigt werden können.

Diese Gesetze und Vorschläge sehen also ein sogenanntes Human-in-the-Loop-System vor, bei dem ein Mensch den Entscheidungsprozess überwachen muss, um die menschliche Handlungsfähigkeit zu erhalten, rechtliche Garantien zu bieten oder eine Qualitätskontrolle sicherzustellen. Jedoch birgt die Überwachung und Anpassung der Empfehlungen eines Algorithmus durch Menschen einen Zielkonflikt: Algorithmische Empfehlungen werden zwar eher akzeptiert, aber Anpassungen durch menschliche Beobachter können am Ende die Qualität von Entscheidungen verringern. Die Lösung für diesen Zielkonflikt kann jedoch in verschiedenen Entscheidungsbereichen unterschiedlich ausfallen.

Letztlich kann die Frage, welche Prozesse in welchem Ausmaß automatisiert werden sollen, nicht allein auf Grundlage technologischer Überlegungen beantwortet werden. Es muss stets auch das menschliche Verhalten in hybriden Interaktionen berücksichtigt werden. o

12 Toxische Schönheit



HANNAH
M. ROWLAND

Max-Planck-Institut
für chemische Ökologie,
Jena

So verschieden Monarchfalter und Milchkrautwanzen sind, eines haben sie gemein: Sie bilden Gifte, die zum Herzstillstand führen. Ihre grellen Farben signalisieren möglichen Feinden: „Wenn du mich frisst, wirst du es bereuen.“ Kaum vorstellbar, dass manche Räuber die giftige Beute dennoch unbeschadet verspeisen.

Damit sie nicht zur Beute werden, wenden Insekten unterschiedliche Strategien an: Sie meiden Lebensräume, in denen Beutegreifer häufig anzutreffen sind. Sie bleiben still oder entwickeln eine Tarnung, um nicht wahrgenommen zu werden. Dafür ahmen sie das Aussehen von Steinen, Zweigen, Rinde oder sogar Vogelkot nach. Wenn die Tarnung versagt und ein Räuber sie attackiert, setzen manche Arten Stacheln oder Reizhaare ein.

Marienkäfer, Bärenspinner, Monarchfalter und Milchkrautwanzen gehen noch einen Schritt weiter und nutzen die Kraft der Chemie: Sie sind giftig. Ihr Verzehr kann zu Schwellungen, Lähmungen und manchmal sogar zum Tod führen. Da es am besten ist, gar nicht erst angegriffen zu werden, tragen die Tiere grelle Farben und Muster. Räuber lernen meist schnell, die auffällige Warnung ernst zu nehmen und die bunte Beute zu meiden.

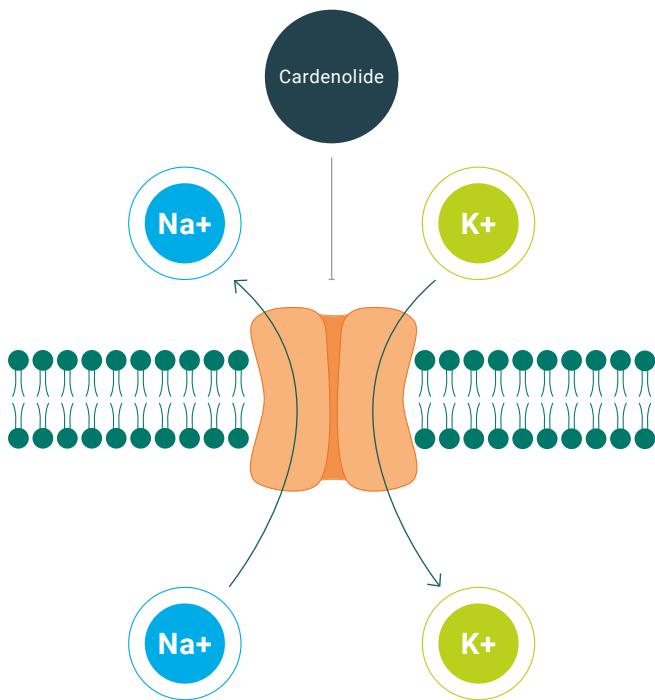
Raub- und Beutetiere stehen miteinander in einem ewigen Wettrüsten. So haben manche Arten Wege gefunden, die Giftabwehr ihrer Beute zu überwinden. Meine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie erforscht, welchen Einfluss Giftstoffe auf die Beziehungen zwischen Arten haben und welche Rolle sie bei der Entstehung neuer Anpassungen spielen. Wir wollen die Verhaltensweisen sowie chemischen und molekularen Abläufe verstehen, die diesen Wechselbeziehungen zugrunde liegen. Dabei konzentrieren wir uns auf die Beziehungen

zwischen Pflanzen, pflanzenfressenden Beutetieren und Beutegreifern.

Viele Tiere produzieren ihre Gifte nicht selbst. Monarchfalter und Milchkrautwanzen zum Beispiel nehmen das Gift mit ihrer Nahrung auf, der Seidenpflanze. Die Pflanze enthält Cardenolide zur Abwehr gegen Insekten. Cardenolide gehören zur Familie der Herzglykoside. Sie sind giftig, da sie an ein wichtiges Protein binden, das in allen tierischen Zellen vorkommt: die Natriumpumpe. Tiere brauchen die Natriumpumpe, damit sich Herzmuskelzellen zusammenziehen und Nervenzellen elektrisch aktiv sein können. Wenn Cardenolide an die Natriumpumpe andocken und damit ihre Arbeit unterbrechen, kann dies zu unregelmäßigem Herzschlag, Herzschwäche oder gar zum Tod führen.

Gifte können schlechter an mutierte Ionenpumpe binden

Warum sterben Falter und Wanze nicht selbst an der tödlichen Pflanzennahrung? Bei Insekten, die sich von Seidenpflanzen oder anderen Cardenolid-produzierenden Pflanzen ernähren, finden wir Mutationen in einem oder mehreren Genen für die Bildung der Natriumpumpe. Diese Mutationen führen zum Austausch einer Aminosäure, aus denen die Pumpe aufgebaut ist. Durch die Veränderung können Cardenolide weniger gut an die Natriumpumpe binden. Aus diesem Grund sind Monarchfalter und Milchkrautwanzen immun gegen die



Die Natriumpumpe pumpt Natriumionen aus der Zelle heraus und Kaliumionen in sie hinein. Cardenolide können an das kanal-förmige Protein in der Zellmembran binden und den Ionentransport blockieren.

Natriumpumpen-Gene erstellt. Inzwischen kennen wir die Natriumpumpen-Gene von 360 Arten sowie die Bandbreite ihrer Mutationen. Wir haben zum Beispiel herausgefunden, dass Gelbkehl-Flughühner eine zusätzliche Aminosäure in ihren Pumpen entwickelt haben, die es nur bei dieser Art gibt. Der Schwarzkopf-Kernknacker wiederum besitzt mehrere Mutationen in diesem Gen. Als Nächstes haben wir die Natriumpumpen verändert und eine zusätzliche Aminosäure hinzugefügt oder eine oder zwei Aminosäuren ersetzt. Anschließend haben wir die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Cardenolid-Resistenz getestet.

Kompliziertes Wechselspiel zwischen Mutationen

Erstaunlich war, dass selbst kleine Veränderungen die Widerstandskraft der Natriumpumpe gegen die Gifte erhöhten. Allerdings kamen dabei auch rätselhafte Phänomene ans Licht. Bei Gelbkehl-Flughühnern steigt das Hinzufügen einer Aminosäure die Resistenz um das Sechsfache. Der Austausch einer weiteren Aminosäure, die Nagetiere resistent macht, erhöht diese sogar um das Elfache. Paradoxe Weise verringert die Kombination beider Maßnahmen im Gelbkehl-Flughuhn die Resistenz gegen die Giftstoffe, bei anderen Vogelarten erhöht sie sie dagegen. Wir wollen nun herausfinden, warum das so ist. Außerdem möchten wir verstehen, wie diese Mutationen zustande kommen.

Herzglykoside sind auch in der Medizin von Bedeutung. Wirkstoffe wie Digoxin und Digitoxin werden zur Behandlung einer Herzinsuffizienz eingesetzt, weil sie die Schlagkraft des Herzens verstärken, die Schlagfrequenz senken und damit das Herz entlasten. Seit einigen Jahren weiß man, dass Herzglykoside auch krebshemmende Eigenschaften haben. Die erste Generation von Krebsmedikamenten auf der Basis von Herzglykosiden befindet sich derzeit in der klinischen Prüfung. Allerdings haben wirksame Herzglykosid-Arzneimittel zahlreiche Nebenwirkungen. Unsere Forschung zur Anpassung von Räubern an toxische Mengen von Herzglykosiden kann möglicherweise dazu beitragen, die Wechselwirkungen zwischen Herzglykosiden, Natriumpumpen und den verschiedenen Organen aufzudecken und ihre negativen Auswirkungen zu verringern. o

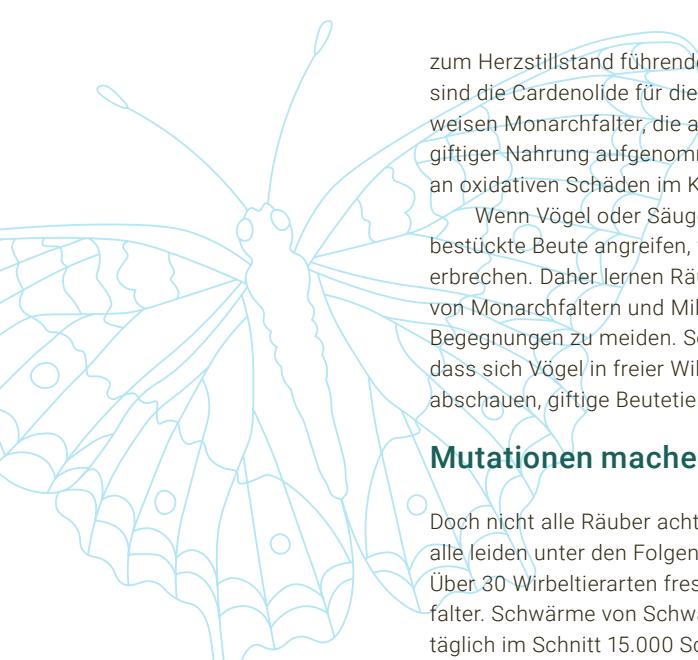
zum Herzstillstand führende Wirkung. Völlig harmlos sind die Cardenolide für die Tiere jedoch nicht. So weisen Monarchfalter, die als Raupen hohe Mengen an giftiger Nahrung aufgenommen haben, ein hohes Maß an oxidativen Schäden im Körper auf.

Wenn Vögel oder Säugetiere eine mit Cardenoliden bestückte Beute angreifen, wird ihnen schlecht, und sie erbrechen. Daher lernen Räuber, die auffälligen Farben von Monarchfaltern und Milchkrautwanzen bei künftigen Begegnungen zu meiden. So konnten wir beobachten, dass sich Vögel in freier Wildbahn voneinander abschauen, giftige Beutetiere nicht zu fressen.

Mutationen machen Vögel resistent

Doch nicht alle Räuber achten auf Warnfarben, und nicht alle leiden unter den Folgen des Verzehrs giftiger Beute. Über 30 Wirbeltierarten fressen die giftigen Monarchfalter. Schwärme von Schwarzkopf-Kernknackern töten täglich im Schnitt 15.000 Schmetterlinge in ihren Überwinterungsgebieten in Mexiko. Man geht davon aus, dass sich die Cardenolid-Resistenz der Vögel bereits bei ihren Vorfahren entwickelt hat. Bei den Insekten sind Mutationen in den Genen für die Natriumpumpe für die Resistenz verantwortlich. Doch wie sieht es bei ihren Fressfeinden aus?

Wir haben zunächst die Gensequenzen für die Natriumpumpen unterschiedlicher Vogelarten bestimmt und damit eine Art Orientierungskarte der



13 Chemie in der Kugelmühle

FERDI SCHÜTH

Max-Planck-Institut
für Kohlenforschung,
Mülheim an der Ruhr

Kaum eine chemische Reaktion ist für die Menschheit so wichtig wie die Ammoniaksynthese. Doch bislang erfordert sie sowohl hohe Temperaturen als auch hohe Drücke. In einer Kugelmühle läuft sie aber bereits bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck ab. Auch andere Reaktionen lassen sich mithilfe mechanischer Energie beschleunigen und zu gewünschten Produkten steuern. Wir erhoffen uns von der Untersuchung der Mechanokatalyse Hinweise, wie sich chemische Reaktionen auch in der Industrie bei milderden Bedingungen und selektiver durchführen lassen.

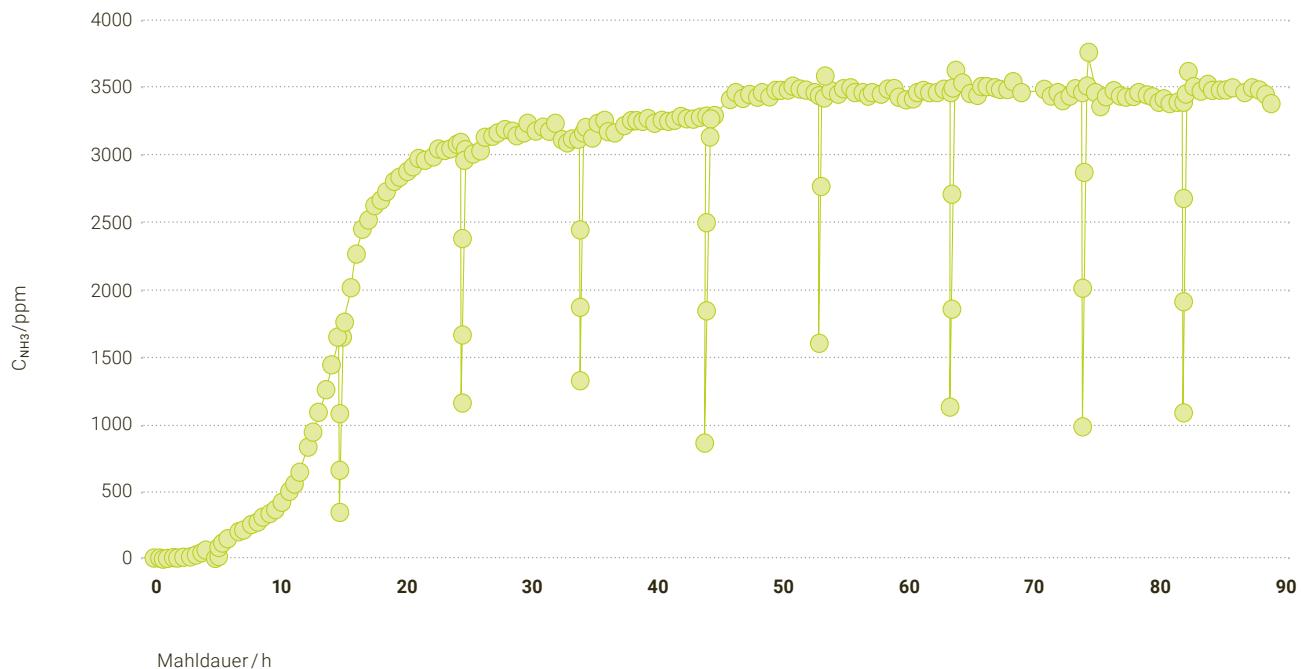
Ohne die Ammoniaksynthese wäre es vermutlich nicht möglich, die Weltbevölkerung von derzeit acht Milliarden Menschen zu ernähren. Denn sie verwandelt den Luftstickstoff in eine Form, in der er für Pflanzen nutzbar ist, und hat damit die landwirtschaftlichen Erträge deutlich erhöht. Und darauf ist die Menschheit immer noch angewiesen, auch wenn inzwischen klar ist, dass zu viel Stickstoffdüngung in manchen Regionen ökologische Schäden verursacht. Künftig könnte Ammoniak zudem als Wasserstoffträger wichtig werden: Mit Wasserstoff, der in sonnen- oder windreichen Regionen mithilfe von grünem Strom erzeugt wird, könnte der viel leichter zu transportierende Ammoniak synthetisiert und in Länder mit weniger regenerativer Energie gebracht werden. Der Ammoniak ließe sich dort dann als Grundstoff für die chemische Produktion verwenden oder möglicherweise wieder in seine Ausgangsstoffe spalten.

Angesichts der Bedeutung der Ammoniaksynthese verwundert es nicht, dass es für die Erforschung dieses Prozesses drei Nobelpreise gab: für Fritz Haber, für Carl Bosch und zuletzt für Gerhard Ertl, der am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft die einzelnen Schritte der Reaktion auf atomarer Ebene aufklärte. Der Haber-Bosch-Prozess läuft dabei heute noch weitgehend so ab wie in den Anfangsjahren nach 1913: Es werden hohe Temperaturen von 400 bis 500 Grad

Celsius, ein hoher Druck von 200 bis 300 bar sowie ein leistungsfähiger Katalysator von modifiziertem Eisen benötigt, den Alwin Mittasch ebenfalls schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelte. Zumindest hohe Temperaturen und Katalysatoren werden für viele industriell relevante Reaktionen benötigt, damit diese mit einer praxistauglichen Geschwindigkeit ablaufen.

Mahlen ermöglicht milder Bedingungen

Wir untersuchen seit einiger Zeit, ob sich chemische Reaktionen wie etwa die Ammoniaksynthese durch den Eintrag mechanischer Energie, sprich Mahlen, beschleunigen und auf diese Weise bei milderden Bedingungen durchführen lassen. Wir verwenden dafür eine Kugelmühle – eigentlich nur eine Stahl- oder Keramikkapsel, in der mit hoher Frequenz Stahl- oder Keramikkugeln und das zu mahlende Pulver, hier der Katalysator, hin- und hergeschüttelt werden. Eine solche Kugelmühle haben wir so umgebaut, dass während des Mahlens Gas durch die Mahlkapsel strömen kann, ohne dass das Katalysatorpulver aus der Mühle entweicht. Darin gelang uns nach vielen Experimenten mit unterschiedlichen Katalysatoren schließlich die Ammoniaksynthese aus den gasförmigen Ausgangsstoffen Stickstoff und Wasserstoff. Der letztlich erfolgreiche



Während des Mahlvorgangs in Kugelmühlen (unten) steigt die Ammoniakkonzentration im austretenden Gasstrom zunächst über mehrere Stunden an und erreicht dann ein Plateau (oben). Bei 20 bar liegt das bei 3500 ppm (Teilen pro Million) oder 0,35 Prozent. Die abrupten Einbrüche sind auf sicherheitsbedingte Unterbrechungen des Mahlprozesses zurückzuführen.

Katalysator ist dabei sehr verwandt mit dem auch technisch genutzten System: Es handelt sich um Eisenpulver, das mit schweren Alkalimetallen, etwa Rubidium oder Cäsium, modifiziert wird. Im technischen Katalysator nutzt man Verbindungen der Alkalimetalle, da die Metalle selbst bei den hohen Reaktionstemperaturen zu leicht verdampfen und damit aus dem Reaktor entweichen. Dies stellt jedoch bei Raumtemperatur kein Problem dar, sodass die – theoretisch auch besser geeigneten – Metalle selbst eingesetzt werden können.



Eine Ammoniaksynthese bei Raumtemperatur

Unter optimierten Bedingungen haben wir bei Raumtemperatur und einem Druck von 20 bar im Gasstrom, der aus der Kugelmühle austritt, Ammoniakkonzentrationen von bis zu 0,4 Prozent erreicht. Senkt man den Druck auf Atmosphärendruck, so entsteht Ammoniak immer noch in Konzentrationen von etwa 0,1 Prozent – ein Ergebnis, das auf den ersten Blick unscheinbar wirken mag, aber in unseren Augen spektakulär ist. Denn immerhin ist es seit mehr als 100 Jahren nicht gelungen, Ammoniak mit nennenswerten Ausbeuten bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck zu synthetisieren. Den Luftstickstoff so zu aktivieren, dass er als Ammoniak oder Ammonium für Pflanzen verfügbar wird, schafft unter diesen milden Bedingungen bisher nur die Natur in den Knöllchenbakterien in Symbiose mit Leguminosen, die daher als Stickstoff-Gründünger genutzt werden.

Den Luftstickstoff zu aktivieren schafft unter milden Bedingungen bisher nur die Natur.

Bei einer Kugelmühle handelt es sich im Wesentlichen um eine Stahlkapsel, in der Stahlkugeln mit dem Katalysatorpulver durcheinander- geschüttelt werden.

Ob die Ammoniaksynthese in der Kugelmühle auch industriell relevant wird, ist zwar fraglich, da die Ausbeuten für die Praxis noch zu gering sind. Zudem ist das Verfahren großtechnisch aufwendiger, als es klingen mag, und benötigt ebenfalls ziemlich viel Energie. Doch die Prozesse in der Kugelmühle könnten uns Hinweise geben, wie sich der Haber-Bosch-Prozess beziehungsweise der dabei eingesetzte Katalysator modifizieren lassen, um Ammoniak auch technisch bei milderen Bedingungen zu produzieren.

Auf der Suche nach den Ursachen der Beschleunigung

Bisher ist noch unbekannt, warum die mechanische Aktivierung den katalytisch aktiven Feststoff so stark aktiviert, dass er die Reaktion um so viel stärker beschleunigt als der technische Katalysator. Wir gehen derzeit davon aus, dass sich in der Oberfläche der Katalysatorteilchen besonders aktive Defekte bilden, wenn die Pulverpartikel zwischen den Kugeln sowie zwischen den Kugeln und der Gefäßwand von Stößen getroffen werden. Diese Defekte sind jedoch kurzlebig, sodass während der Reaktion kontinuierlich gemahlen werden muss. Wir überprüfen derzeit in mehreren Studien, ob diese Hypothese richtig ist. Sollten sich solche hochaktiven Defekte nachweisen und charakterisieren lassen, könnte man versuchen, diese auch auf andere Weise zu erzeugen und damit auf das aufwendige Vermahlen während der Reaktion zu verzichten.

Mit diesem Ansatz könnten sich auch andere praktisch relevante Synthesen optimieren lassen. Denn die Ammoniaksynthese ist nicht die einzige katalytische Reaktion, in der die Einwirkung mechanischer Energie zu einer viel höheren Geschwindigkeit führt. Bei der Oxidation von Kohlenmonoxid, einer wichtigen



Reaktion bei der katalytischen Abgasreinigung, steigt die Geschwindigkeit um etwa das 1000-Fache. Bei der selektiven Oxidation von Kohlenmonoxid in Wasserstoff haben wir bei Temperaturen von minus 30 Grad Celsius einen Umsatz von fast 80 Prozent erreicht, fast ohne dass dabei der wertvolle Wasserstoff ebenfalls oxidiert wird. Diese Reaktion ist wichtig für die Reinigung von Wasserstoff, der in Brennstoffzellen eingesetzt werden soll. Eine ähnlich hohe Selektivität wird bei der Chlorierung von Methan zu Monochlormethan, einem wichtigen Ausgangsstoff in der Chemieproduktion erreicht, was unter konventionellen Bedingungen nicht möglich ist. Und schließlich ist es mechanokatalytisch machbar, eine Vielzahl unterschiedlicher Polymere und Kohlenstoffmaterialien in kleinere Moleküle zu spalten. Das könnte im Zusammenhang mit dem Recycling von Kunststoffen bedeutend sein.

Wir werden in Zukunft versuchen, weitere industriell relevante Reaktionen mechanokatalytisch zu aktivieren. Vor allem werden wir jedoch untersuchen, was bei derartigen Prozessen im atomaren Maßstab passiert. Denn davon versprechen wir uns Einsichten, die als neue Prinzipien der Reaktionsführung in vielen Bereichen der chemischen Industrie zur Anwendung kommen könnten. o

14 Ein Sinn für Süßes

MAUDE W. BALDWIN

Max-Planck-Institut
für biologische Intelligenz,
Seewiesen

Viele Tiere verlassen sich auf ihren Geschmackssinn, um Nährstoffe zu erkennen und Giftstoffe zu vermeiden. Im Laufe der Evolution haben Tiere immer wieder ihre Ernährung umgestellt, zum Beispiel vom Alles- zum Fleischfresser. Dabei können Anzahl oder Funktion von Geschmacksrezeptoren angepasst werden. Mein Team und ich wollen herausfinden, wie und warum sich die Rezeptoren während der Evolution verändert haben.



Wenn wir in ein Stück Kuchen beißen, erkennt unsere Zunge sofort: Das schmeckt süß! Neben der Geschmacksrichtung süß unterscheiden wir auch bitter, salzig und umami, das man als würzig oder herhaft beschreiben kann. Der Geschmackssinn hat einen großen Einfluss auf unsere Ernährung, denn was uns schmeckt, essen wir auch.

Auch Tiere erkennen Nahrhaftes mithilfe ihres Geschmackssinns. In der Evolution haben Arten jedoch immer wieder ihre Ernährungsweise umgestellt, etwa von allesfressend zu fleischfressend. Damit hat sich auch die Anzahl oder Funktion von Geschmacksrezeptoren verändert und damit die Geschmackswahrnehmung.

Mein Team und ich erforschen, wie und wann sich Geschmacksrezeptoren verändern. Dabei konzentrieren wir uns vor allem auf die Rezeptoren für Süßes. Wir untersuchen die Geschmacksrezeptoren verschiedener Arten, rekonstruieren die ursprünglichen Rezeptoren und bestimmen, wie die Rezeptorproteine Aufgaben übernehmen können. Unsere Forschung erstreckt sich über viele Größenebenen: von der Struktur von Proteinketten über die Abläufe in einer Zelle bis hin zum Evolutionsprozess.

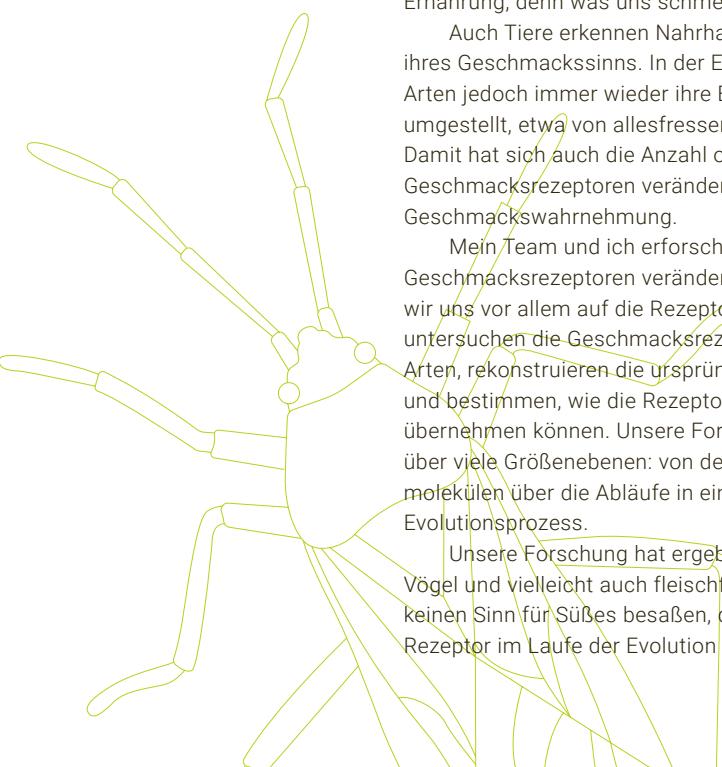
Unsere Forschung hat ergeben, dass die ersten Vögel und vielleicht auch fleischfressende Dinosaurier keinen Sinn für Süßes besaßen, denn sie hatten den Rezeptor im Laufe der Evolution verloren, den Säugetiere

für die Wahrnehmung von Zucker nutzen. Und doch steht bei manchen Vögeln heute auch Süßes auf dem Speiseplan. Neben Kolibris ernähren sich viele Singvögel von zuckerhaltiger Nahrung, zum Beispiel Beeren. Diese erschmecken zu können ist überlebenswichtig.

Kolibris brauchen enorme Mengen an Kalorien, um ihren schnellen Flügelschlag von bis zu 60 bis 80 Schlägen pro Sekunde aufrechtzuerhalten. Sie sind förmlich süchtig nach Zucker, denn dieser ist ein wichtiger Energielieferant. Mit ihrem langen, spitzen Schnabel und ihrer an der Spitze gespaltenen Zunge können sie den Nektar bestimmter Blütenpflanzen einsaugen.

Umami-Rezeptor funktioniert auch als Kohlenhydrat-Sensor

In unseren Untersuchungen an Kolibris haben wir festgestellt, dass den Vögeln eine Untereinheit des Süßstoffrezeptors der Wirbeltiere fehlt. Aber wie können die Kolibris den Zucker dann wahrnehmen? Die Antwort: Sie funktionierten einfach einen anderen Geschmacksrezeptor um. Der Umami-Rezeptor fungiert bei den Kolibris auch als Rezeptor für Kohlenhydrate. Da der Rezeptor sowohl Zucker als auch Aminosäuren schmeckt, können Kolibris die beiden Geschmacksrichtungen also möglicherweise gar nicht unterscheiden.





Unsere Studien enthielten eine bemerkenswerte Reaktionsvielfalt der Geschmacksrezeptoren in der gesamten Kolibri-Familie. Wir können nun die Evolution des Umami-Rezeptors verfolgen. Demnach ist die Wahrnehmung von Zucker schon sehr früh in der Evolution der Kolibris entstanden. Die Rezeptoren reagierten allerdings auch weiterhin auf Aminosäuren. Dieser stark Aminosäure-empfindliche Rezeptor ursprünglicher Kolibris wurde im Laufe der Evolution bei später entstandenen Kolibri-Arten zu einem eher Zucker-empfindlichen Rezeptor.

Darüber hinaus entdeckten wir eine ungewöhnliche Synergie: Bei Kolibris können Aminosäuren die Antwort des Rezeptors auf Zucker sogar verstärken. Der Rezeptor wird durch eine Mischung aus Aminosäuren und Zucker also noch stärker aktiviert als durch Zucker allein. Dieser neu entdeckte Zusammenhang zwischen Aminosäuren und Zuckern hat vermutlich eine ökologische Bedeutung, denn Kolibris nehmen auch kleine Insekten zu sich, und mancher Nektar enthält selbst zusätzlich Aminosäuren. Diese könnten für die Kolibris den Geschmack von Zucker verstärken und es Pflanzen ermöglichen, gezielt bestimmte Arten von Bestäubern anzulocken.

Lieber aminosäurehaltige Nahrung statt Zucker

Kolibris und Singvögel sind nicht die einzigen Vögel, die eine Vorliebe für zuckerhaltige Nahrung entwickelt haben. Ein weiteres Beispiel für die Entwicklung der Zuckerwahrnehmung über Umami-Rezeptoren sind die Vorfahren der mit Kolibris und Singvögeln entfernt verwandten Spechte. Dabei entdeckten wir jedoch eine überraschende Ausnahme: Ein auf Ameisen spezialisierter Specht, der Eurasische Wendehals, hat die Fähigkeit zur Zuckerwahrnehmung unerwarteterweise verloren. Wendehälse bevorzugen in Verhaltens- tests Aminosäure-haltige Nahrung, also solche mit Umami-Geschmack, gegenüber neutralem Kontrollfutter. Zucker lassen sie dagegen links liegen. Dafür verantwortlich ist unser Ergebnissen zufolge eine einzige Mutation des Rezeptorproteins. Dass Wendehälse ihre Wahrnehmung von Aminosäuren beibehalten und nur die für Zucker verloren haben, ist ein erstaunliches Beispiel für eine sensorische Umkehrung.

Hängt die veränderte Funktion des Rezeptors mit der Ameisenernährung zusammen? Das werden künftige Arbeiten zeigen. Sie könnte auch andere Anpassungen widerspiegeln, wie zum Beispiel die Unfähigkeit,



Wie die meisten anderen Spechte kann auch der Buntspecht zuckerhaltige Nahrung dank eines zweckentfremdeten Umami-Rezeptors wahrnehmen.

bestimmte Zucker zu verdauen, wie sie bei einigen Singvogelarten wie Staren zu beobachten ist. Interessant ist auch die Frage, ob andere Wirbeltiergruppen einen ähnlichen Mechanismus nutzen und ob solche Veränderungen der Geschmacksrezeptoren die Folge einer beobachteten Ernährungsumstellung sind oder deren Ursache.

Hinter unseren Untersuchungen steht eine weitreichende Frage: Wann sind die Rezeptoren für süßen Geschmack in der Evolution der Wirbeltiere überhaupt entstanden? Als wir uns die Ernährungsdaten von Eidechsen genauer anschauten, fiel uns auf, dass sich viele Reptilien von Nektar ernähren. Mit Verhaltens- tests und der Erstellung von Rezeptorprofilen konnten wir nachweisen, dass der Madagaskar-Taggecko einen Süßrezeptor besitzt, der denen der Säugetiere ähnelt. Doch die Ähnlichkeit wirft Rätsel auf: Früchte und Nektar, die wichtigsten Zuckerquellen in der heutigen Ernährung von Wirbeltieren, stammen von blühenden Pflanzen. Diese entwickelten sich jedoch erst nach dem letzten gemeinsamen Vorfahren der Säugetiere und Reptilien. Hat sich der Geschmackssinn für Zucker bei Geckos und Säugetieren also unabhängig entwickelt, nachdem Früchte und Nektar verfügbar waren? Oder war er bei Landwirbeltieren bereits vor der Entstehung von Blütenpflanzen vorhanden? Diesen und anderen Fragen bleiben wir weiterhin auf der Spur, im spannenden Forschungsfeld zwischen Ökologie und Evolution.○

15 Die Wachstumsfrage in Krisenzeiten

ARIANNA TASSINARI

Max-Planck-Institut
für Gesellschaftsforschung,
Köln

Als Grundvoraussetzung für die Stabilität und Legitimität kapitalistischer Ökonomien steht das Wirtschaftswachstum im Zentrum des öffentlichen Interesses. Dennoch gibt es über Wachstumsstrategien selten einen politischen Wettstreit; die Politik der Wachstumsmodelle vollzieht sich in normalen Zeiten unbemerkt. Dramatische Ereignisse und Wirtschaftskrisen können diesen Konsens allerdings ins Wanken bringen – wie sich am Beispiel von Spanien zeigen lässt.

Nach dem Wachstumsmodellansatz in der Politischen Ökonomie unterscheiden sich kapitalistische Volkswirtschaften darin, wie sie das Wirtschaftswachstum fördern – vor allem hinsichtlich der Treiber für die gesamtwirtschaftliche Nachfrage. Drei grundlegende Formen lassen sich benennen: Beim lohnorientierten Wachstum führt ein Lohnzuwachs bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität dazu, dass Konsumausgaben der Haushalte und Investitionen steigen und damit das Wachstum ankurbeln. Diese Art von Wachstum war in der Vergangenheit sehr weit verbreitet, das Modell kam allerdings infolge der beiden Ölkrisen in den 1970er-Jahren unter Druck. Etwa bis zur Finanzkrise 2008 war es ein Element des Wachstums der schwedischen Wirtschaft. Das exportorientierte Wachstum, typisch für Deutschland, ist abhängig von der Auslandsnachfrage und dem Exportsektor als wichtigsten Treibern. Im kreditorientierten Wachstum wird die Binnennachfrage über das Angebot an Konsumentenkrediten für private Haushalte beeinflusst; Großbritannien steht stellvertretend für dieses Modell. Es kann aber auch sein, dass ein Land über keinerlei prägende Wachstumsmotoren verfügt und in eine Stagnation gerät, wie etwa Italien.

Eine große Koalition für das bestehende Wachstumsmodell

Wachstumsmodelle sind strukturelle Merkmale einer Volkswirtschaft, doch sind sie nicht naturgegeben. Sie beruhen einerseits auf wirtschaftlichen Strukturen, andererseits werden sie durch politische Maßnahmen, die Wachstumsstrategien, gefestigt. Dazu zählen Regelungen in der Geld- und Steuerpolitik, in der Struktur- und Verteilungspolitik, in der Sozialpolitik sowie in der Lohn- und Arbeitsmarktpolitik.

Überraschenderweise sind Wachstumsstrategien in der Regel kein wichtiges Thema in der politischen Debatte. In Ländern mit etablierten Wachstumsmodellen werden politische Entscheidungen darüber selten zu einem Wahlkampfthema. Vielmehr nähern die Parteien ihre wachstumsprogrammatischen Positionen mit der Zeit einander an. In Deutschland etwa würde keine Partei einen Kurs unterstützen, welcher der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Exporte schadet. Worauf ist dies zurückzuführen?

Der Politökonom Lucio Baccaro, Direktor am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, vertritt gemeinsam mit seinen Fachkollegen Mark Blyth und

Die anhaltenden Krisen können Kontroversen über die richtige Wachstumsstrategie auslösen.

Jonas Pontusson die Hypothese, dass die Funktionsfähigkeit von Wachstumsmodellen auf einer klassenübergreifenden Koalition beruht – einem Zusammenschluss gesellschaftlicher Akteure, der alle Gruppen der Gesellschaft einbezieht, die de facto zu den „Gewinnern“ eines Wachstumsmodells zählen. Einer solchen Koalition gehören Akteure aus Schlüsselsektoren an: Wirtschaftseliten, Unternehmen und Arbeitgeberverbände, Beschäftigte und sogar Regierungsmitglieder.

Die Vermutung liegt nahe, dass sich die Parteien außerhalb von Krisenzeiten um den Fortbestand des Wachstumsmodells bemühen. Zugleich wollen sie möglichst viele Wählerinnen und Wähler für sich gewinnen – etwa durch eine Kompensationspolitik, die Erleichterungen für jene Gruppen in der Gesellschaft vorsieht, die nicht vom Wachstumsmodell profitieren. Doch nicht immer lassen sich Wachstumsstrategien aus dem politischen Wettstreit ausklammern. Nach Wirtschaftskrisen können öffentlicher Protest und politische Opposition das Gleichgewicht etablierter klassenübergreifender Koalitionen erschüttern. Krisen wirken dann als kritische Wendepunkte für die Richtung der verfolgten Wachstumsstrategien.

Wie ist das möglich? Im Fall eines Wandels von innen machen Krisen die Widersprüche und Fehlfunktionen eines Wachstumsmodells öffentlich sichtbar. Die Gruppe der Profiteure eines bestimmten Wachstumsmodells verkleinert sich, die der Verlierer nimmt deutlich zu. Forderungen nach einem wirtschaftspolitischen Kurswechsel werden laut und setzen die Parteien unter Handlungsdruck. Veränderungen können aber auch von externen Kräften angestoßen werden – etwa durch die Verpflichtung, Leistung für externe Finanzhilfen zu erbringen, oder durch Regelungen auf europäischer Ebene. So können politische Entscheidungen, zu denen sich Länder durch solche Interventionen von außen gezwungen sehen, die Tragfähigkeit eines Wachstumsmodells infrage stellen.

Die EU-Behörden drängten Spanien zu politischen Reformen

Ein lehrreiches Beispiel für das Zusammenwirken dieser beiden Ursachen für eine Anpassung der Wachstumsmodelle bot die spanische Wirtschaft nach der Finanzkrise der Jahre 2008/2009. Gemeinsam mit Fabio Bulfone von der Universität Leiden habe ich

diese Entwicklung analysiert. In der Krise platze die Immobilienblase, die durch eine rasante Zunahme der Kredit- und Hypothekenfinanzierungen ausgelöst worden war. Im Jahrzehnt zuvor waren diese der Garant für die Leistungsfähigkeit der spanischen Wirtschaft gewesen. Der Kollaps der Bauwirtschaft hatte eine vollständige Neugewichtung der Wirtschaftssektoren, einen drastischen Anstieg der Arbeitslosenzahlen und wachsende öffentliche Verschuldung zur Folge. Die EU-Behörden drängten Spanien zu tiefgreifenden politischen Reformen, etwa zu einer umfassenden Liberalisierung des Arbeitsmarktes, um die Wirtschaft strategisch auf Exporte auszurichten. Ziel war es, die Löhne zu senken und damit die Wettbewerbsfähigkeit des spanischen Exportsektors zu steigern. Dies gab einen wichtigen Impuls für die Konjunkturbelebung in Spanien seit 2015.

Die Veränderungen führten zum Erstarken neuer politischer Kräfte

Die Veränderung des spanischen Wachstumsmodells geht allerdings mit anhaltender politischer Instabilität einher. Sinkende Lebensstandards, Arbeitslosigkeit und Sparmaßnahmen haben das Aufkommen neuer politischer Kräfte begünstigt, die sich den EU-Vorgaben entgegenstellen. Ihre Ziele sind eine Stimulierung der Binnennachfrage durch Lohnerhöhungen und eine Arbeitsmarktreform zugunsten von sektorspezifischen Tarifverhandlungen für unbefristete Arbeitsverhältnisse. Damit sind Wachstumsstrategien in Spanien zum Politikum geworden.

Insgesamt ist die Stabilität der Weltwirtschaft durch die derzeitige Phase anhaltender Krisen gefährdet. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die Politik der Wachstumsmodelle auch in anderen Ländern künftig weitaus kontroverser verhandelt wird als bisher. Die Folgen dieser Krisen und ihre Auswirkungen auf den Kapitalismus in seiner derzeitigen Form lassen sich zwar nicht vorhersagen, doch können wir mit unserer Forschung einen wichtigen Beitrag dazu leisten, diese Transformation besser zu verstehen. o

Die Max-Planck-Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft (www.mpg.de) ist eine der führenden Forschungseinrichtungen weltweit mit gut 24.000 Mitarbeitenden. In den 85 Max-Planck-Einrichtungen betreiben rund 6.700 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sowie 6.300 Nachwuchs- und Gastforschende 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 zukunftsrechte 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 30 Nobelpreisträger und Nobelpreisträgerinnen aus ihren Reihen hervorgegangen. Neben fünf Auslandsinstituten betreibt die Max-Planck-Gesellschaft weitere 16 Max Planck Center mit Einrichtungen wie der Harvard University, dem University College London / UK oder der Universität Tokio in Japan. Je zur Hälfte finanziert von Bund und Ländern, verfügt sie über ein jährliches Gesamtbudget von 2,0 Milliarden Euro.



Impressum

Herausgeber

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

Redaktion

Tobias Beuchert, Dr. Virginia Geisel, Peter Hergersberg,
Dr. Jan-Wolhard Kellmann, Dr. Harald Rösch,
Mechthild Zimmermann

Gestaltung

mattweis, München

Druck

Print Media Group GmbH, Leimen

Mai 2023



Bildnachweis

Süße Oasen im Meer

S. 5: Illustration: mattweis
S. 6: Taucher: Ulysse Cardini / MPI für marine Mikrobiologie; Manuel Liebeke: Achim Multhaupt / MPG
S. 7: Illustration: mattweis (Vorlage Alina Esken / MPI für marine Mikrobiologie)

Frauen und Männer altern anders

S. 10: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für Biologie des Alterns)

S. 12: MPI für Biologie des Alterns
S. 13: MPI für Biologie des Alterns

S. 13: Illustration: mattweis

KI hilft bei der Krebsdiagnose

S. 15: Illustration: MPI für Biochemie

Eisschilde als Klimafaktor

S. 17: Illustration: mattweis

S. 18: Clemens Schannwell

Musik und Psyche

S. 22: Illustration: mattweis

Rinde als Rohstoff

S. 25: PLOS ONE, CC-BY 4.0

S. 26: gekrümmte Rindenelemente: PLOS ONE, CC-BY 4.0; Rindenelemente: ETH Zürich, Wood Materials Science

Das Geheimnis der Schönheit

S. 28: Lavdas, A.A.; Salingaros, N.A.; Sussman, A., CC-BY 4.0

S. 29: James Wheeler / Pixabay

Metallwolken auf WASP-121 b

S. 30: Illustration: mattweis (Vorlage NASA)

S. 32: Illustration: mattweis (Vorlage ESA)

Wir und unsere automatisierten Partner

S. 35: Marina Chugunova / DALL-E 2 / OpenAI

Toxische Schönheit

S. 36–37: Illustrationen: mattweis

Chemie in der Kugelmühle

S. 39–40: Patrick Kaut / MPI für Kohlenforschung

Ein Sinn für Süßes

S. 41–42: Illustrationen: mattweis

S. 43: Markus Hentschel / Adobe Stock

Die Wachstumsfrage in Krisenzeiten

S. 44–45: Illustration: mattweis