



HIGHLIGHTS
2023 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 2023 wurden 15 aus Sicht der Wissenschaftskommunikation besonders geeignete und gerade auch für Laien interessante Beiträge herausgesucht und nach journalistischen Kriterien überarbeitet.

So haben Forschende am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern ein innovatives Trainingsprogramm zur Verbesserung des Betriebsklimas im Feldexperiment getestet und damit zu einer Reduktion der Mitarbeiterfluktuation beigetragen. Die positiven Auswirkungen des Programms sind vor allem auf die besseren Beziehungen zwischen Führungskräften und Teammitgliedern zurückzuführen. In einer Pilotstudie konnte ein Forschungsteam vom Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme zeigen, dass Körpersimulationen in Virtual Reality bisherige Behandlungen bei Mager-sucht sinnvoll ergänzen könnten. Viele Menschen, die erkrankt sind, kämpfen tagtäglich mit einem verzerrten Körperbild und starker Angst vor Gewichtszunahme. Und am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion arbeiten die Forschenden an der Entwicklung von Katalysatoren und Produktionsverfahren, um Kraftstoffe für den Straßenschwertransport oder auch die Schifffahrt mit grünem Strom aus Wasser, CO₂ oder biologischen Abfällen herzustellen. Denn nicht bei allen Verkehrsmitteln ist eine Abkehr von Verbrennungsmotoren möglich. Für diese Bereiche sind daher nachhaltige Kraftstoffe erforderlich, wenn die Energiewende gelingen soll.

Viel Spaß beim Lesen der Jahrbuch-Highlights von 2023!

Inhalt



1 Transition 2.0:
Die Rückkehr zum
Rechtsstaat S. 5

2 Leben nur
zu zweit S. 7

3 Feinstaub schadet
der Gesundheit
anders als
gedacht S. 9



4 Leben
im Wandel S. 11

5 Wasser für
erdähnliche
Planeten S. 14

6 Wer
beherrscht die
Unternehmen
heute? S. 17



7 Virtuelle Körper-
modelle helfen bei
Magersucht S. 20

8 Die Wurzeln des
Anthropozäns S. 23

9 Gedränge
im Zellkern S. 26



10 Ein Programm
für ein besseres
Arbeitsklima
S. 28

13 Umbau im
Knochen S. 37

11 Mysteriöse
Meiose S. 31

14 Gene und
Umwelt S. 40

12 Per Tandem-
reaktion
zu sauberen
Treibstoffen S. 33

15 Grüner Stahl
aus giftigem
Rotschlamm S. 43



1 Transition 2.0: Die Rückkehr zum Rechtsstaat

**ARMIN VON
BOGDANDY, LUKE
DIMITRIOS SPIEKER**

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

Seit einigen Jahren ist in mehreren EU-Mitgliedstaaten ein Rückgang an Demokratie und Rechtsstaatlichkeit zu beobachten. Die jüngsten Wahlen in Polen haben jedoch gezeigt, dass solche illiberalen Entwicklungen keine Einbahnstraße sind. Die neue Regierung steht nun vor der Herausforderung, die demokratische Rechtsstaatlichkeit in Polen wiederherzustellen. Dabei handelt es sich um eine gewaltige Aufgabe, denn die Veränderungen reichen tief. Unser Projekt untersucht, wie europäisches Recht und Institutionen diesen Prozess unterstützen und einhegen können.

U nabhängig davon, wie sehr sich eine Regierungspartei bemüht, ihre Macht zu festigen: Keine Regierung währt ewig. In diesem Sinne hat sich eine Mehrheit der polnischen Bevölkerung gegen einen weiteren Abbau demokratischer Rechtsstaatlichkeit entschieden. Den von der PiS betriebenen Umbau des Staates rückgängig zu machen ist eine gewaltige Aufgabe, denn die Veränderungen der letzten Jahre reichen tief. Dieser Umbau betrifft unter anderem die Gleichschaltung der öffentlich-rechtlichen Medienlandschaft, die Beschneidung von Frauen- und LGBTIQ-Rechten und nicht zuletzt den Abbau richterlicher Unabhängigkeit. Ein alles bereinigender „Federstrich des Gesetzgebers“, den manche Stimmen fordern, wird die demokratische Rechtsstaatlichkeit in Polen kaum wiederherstellen können. Nach acht Jahren PiS bedarf es einer Transition 2.0, die an die Transitionsprozesse der 1990er-Jahre anknüpft.

Nach dem Fall des Eisernen Vorhangs fand ein umfassender politischer, sozialer, wirtschaftlicher und rechtlicher Wandel statt, der zu demokratischer Rechtsstaatlichkeit in vielen mittel- und osteuropäischen Ländern und schließlich zu ihrem EU-Beitritt führte. Diese Staaten mussten zahlreiche Bedingungen erfüllen, um EU-Mitglieder zu werden. Dazu gehörten die sogenannten Kopenhagener Kriterien, also Demokratie, Rechtsstaatlichkeit und Grundrechtsschutz. Trotz

dieser Anforderungen blieben die Transitionsprozesse der frühen 1990er-Jahre von internationalem oder europäischem Recht relativ unbeeinflusst. Auch wenn das Ausland Inspiration und Unterstützung bot, verfügten diese Länder über einen großen Entscheidungsspielraum, wie sie mit ihrer Vergangenheit umgehen, ihren demokratischen Herausforderungen begegnen und ihre Verfassungen zukünftig gestalten wollten.

Europäische Einbettung

Anders als diese Prozesse wird sich eine Transition 2.0 innerhalb einer starken europäischen Einbettung vollziehen. Die jeweiligen Staaten sind Mitglieder der Europäischen Union und des Europarats. Damit sind sie Teil einer europäischen Gesellschaft, die durch die in Artikel 2 des EU-Vertrags verankerten gemeinsamen Werte geprägt ist: Demokratie, Rechtsstaatlichkeit und Grundrechte. Wenn diese Werte in einem Mitgliedstaat unter Druck geraten, ist die gesamte europäische Gesellschaft betroffen. Europäischem Recht und europäischen Institutionen kommt somit eine zentrale Rolle zu.

Aus diesem Grund haben die EU-Institutionen in den letzten Jahren versucht, den illiberalen Entwicklungen in den Mitgliedstaaten entgegenzuwirken. Viele nationale Maßnahmen, wie der Umbau der polnischen Justiz, verstießen gegen europäische Vorgaben, insbesondere

gegen die Werte des Artikels 2 EUV. In diesem Gegenwind entwickelten sich die europäischen Mechanismen erheblich weiter. Insbesondere der Gerichtshof der Europäischen Union und der Europäische Gerichtshof für Menschenrechte fällten eine Reihe wegweisender Urteile, in denen sie eine Missachtung der gemeinsamen Werte feststellten.

Das Mandat der EU beschränkt sich jedoch nicht nur darauf, gegen eine Missachtung der gemeinsamen Werte vorzugehen. Die EU hat auch eine Rolle, wenn es um die Wiederherstellung dieser Werte geht. Zu dieser Dimension gibt es bisher kaum wissenschaftliche Erkenntnisse.

Beförderung und Begrenzung einer Transition 2.0

In Zusammenarbeit mit zahlreichen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Mittel- und Osteuropa, einschließlich des neuen polnischen Justizministers, bietet unser Projekt eine erste Untersuchung, wie europäisches Recht und europäische Institutionen die Transition 2.0 in einem Mitgliedstaat befördern, aber auch begrenzen können. Dabei werden unterschiedliche Aspekte thematisiert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Reform des polnischen Justizsystems. Bei der Umwälzung der polnischen Justiz hat die PiS-geführte Regierung zahlreiche, teilweise politisch loyale Richterinnen und Richter in Verfahren ernannt, die gegen die polnische Verfassung und die europäischen Werte verstoßen. Vor allem das Verfassungsgericht ist heute nicht mehr als eine Marionette der vorherigen Regierung. Unser Projekt zeigt mögliche Wege zur Wiederherstellung einer unabhängigen Justiz auf.

Europäisches Recht kann nicht nur die Rückkehr zum demokratischen Rechtsstaat erleichtern, sondern setzt diesem Prozess auch Grenzen. Insbesondere die Verfahren, mit denen die neue Mehrheit gegen Gesetze, Ernennungen und Maßnahmen vorgeht, die gegen die Werte verstoßen, müssen selbst mit diesen Werten in Einklang stehen. Dies erfordert die Wahrung der Grundsätze der Rechtssicherheit und der Rechtmäßigkeit, die integraler Bestandteil der von Artikel 2 EUV garantierten Rechtsstaatlichkeit sind.

Vor diesem Hintergrund erschiene es hoch problematisch, wenn die neue Mehrheit pauschal alle Richterinnen und Richter absetzen würde, die unter der alten Mehrheit ernannt oder befördert wurden. Gleiches gilt für eine Infragestellung aller von ihnen gefällten Urteile. Ein solcher Radikalschlag ist kaum mit Rechtssicherheit und Rechtmäßigkeit vereinbar. Darüber hinaus hat die Wiederherstellung richterlicher Unabhängigkeit in gesetzlicher Form zu erfolgen. Das erschwert die Transition in zweierlei Hinsicht. Einerseits erfordern solche Gesetze die Unterschrift des PiS-freundlichen


Ein elementarer rechtsstaatlicher Grundsatz lautet: Der Zweck heiligt nicht die Mittel.

Präsidenten. Ein bloßer Parlamentsbeschluss ohne die Zustimmung des Präsidenten kann ein formelles Gesetzgebungsverfahren nicht ersetzen.

Andererseits können Reformvorhaben am Verfassungsgericht scheitern, das Parteigänger der PiS dominieren und das entsprechende Gesetze kassieren kann. Eine Neubesetzung dieses Gerichts vor Ablauf der regulären Amtszeiten ist kaum möglich. Denn Richterschaft und Amtsdauer sind in der polnischen Verfassung verankert. Ohne verfassungsändernde Mehrheit können diese Bestimmungen nicht geändert werden. Sofern die Richterinnen und Richter im Einklang mit der Verfassung ernannt wurden, können sie also nicht einfach abgesetzt werden. Ein vorzeitiger Austausch der Richterschaft würde genau dem Wert zuwiderlaufen, um dessen Schutz es geht: die richterliche Unabhängigkeit.

Der Zweck heiligt nicht die Mittel

Das Ziel solcher Maßnahmen, also die volle Wiederherstellung demokratischer Rechtsstaatlichkeit, rechtfertigt solche Verletzungen der innerstaatlichen Rechtsordnung nicht. Ein elementarer rechtsstaatlicher Grundsatz lautet: Der Zweck heiligt nicht die Mittel. Das EU-Recht verlangt somit, dass demokratische Transitionen nicht auf rechtswidrige Weise erfolgen.

An dieser Stelle setzt unser Projekt an: Es entwickelt zahlreiche innovative Vorschläge, wie das Unionsrecht eine legale Transition unterstützen kann. Hier sei nur ein möglicher Weg skizziert: Das Unionsrecht und damit auch die Werte des Artikels 2 EUV genießen Vorrang vor dem Recht der Mitgliedstaaten, einschließlich seinem Verfassungsrecht. Verstößt also nationales Recht gegen Unionsrecht, darf dieses von allen staatlichen Stellen, Gerichten, der Exekutive und Legislative nicht mehr berücksichtigt werden. Gleiches gilt für Entscheidungen des Verfassungsgerichts, die gegen Unionsrecht verstoßen. Zusammenfassend: Wegen des Vorrangs des Unionsrechts wären Akte, die gegen die Unionswerte des Artikels 2 EUV verstoßen, unanwendbar und stünden der demokratischen Transition grundsätzlich nicht mehr im Wege. 

2 Leben nur zu zweit

**MARIA SHVEDUNOVA,
MEIKE WIESE,
ASIFA AKHTAR**

➤ *Max-Planck-Institut
für Immunbiologie und
Epigenetik, Freiburg*

Brauchen wir wirklich beide Kopien der Chromosomen, die wir von unserer Mutter und unserem Vater geerbt haben? Die Natur hat nichts zu verschenken, so lautet eine allgemeine Lehrmeinung der Biologie. Für einen Teil der Gene reicht tatsächlich eine Kopie aus. Das Duplikat auf dem zweiten Chromosom kann stillgeschaltet sein, ohne dass es einen Einfluss auf den Organismus hat. Für andere Gene aber gilt: Eine Mutation oder Inaktivierung in nur einer der beiden Kopien kann bereits eine schwere Krankheit auslösen.

Die meisten Wirbeltiere bergen zwei Chromosomensätze in ihren Zellen, so auch wir Menschen. Man spricht von einem diploiden Genom – das heißt, jedes Gen besitzt zwei Kopien, sogenannte Allele. Eines stammt von der Mutter, das andere vom Vater. Jede der beiden Kopien produziert Boten-RNA, auch mRNA genannt, die der Zelle die Anleitung für die Produktion lebenswichtiger Proteine liefert.

Vermutlich stellen die beiden Allele eine Art Reservesystem für jedes Gen dar: Bei einem Mangel an mRNA oder einer Mutation eines der Allele dient das andere auf dem zweiten Chromosom sozusagen als Back-up. Kann diese Sicherungskopie ausreichend mRNA produzieren, sind wir weitgehend resistent gegen Mutationen und damit verbundene genetisch bedingte Erkrankungen.

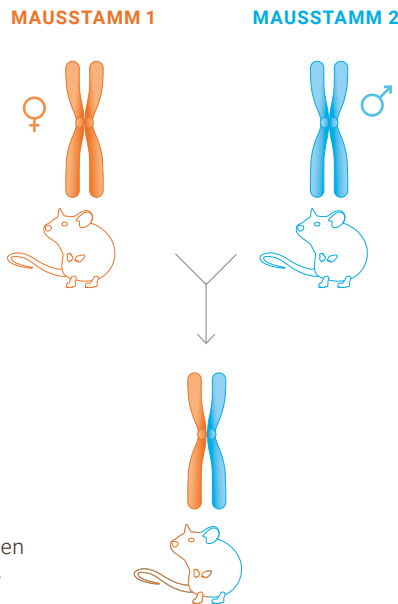
Eine Klasse von Genen jedoch stellt eine Besonderheit dar: Man nennt diese die sogenannten haploinsuffizienten Gene. Sie sind auf das kontinuierliche Ablesen beider Allele angewiesen. Ist die Aktivität auch nur eines Allels dieser Gene beeinträchtigt, kann dies zu Krankheiten führen. Ein Beispiel dafür ist das MECP2-Gen. Zu hohe oder zu niedrige Dosen dieses Gens verursachen Entwicklungsstörungen des Gehirns: das MECP2-Duplikations- oder das Rett-Syndrom.

Deshalb vermuteten wir, dass Zellen spezielle Schutzmechanismen entwickelt haben müssen, die die Produktion der mRNA dieser speziellen Klasse von Genen schützen.

mRNA nur von einem Allel

Mein Team hat kürzlich genau einen solchen Mechanismus entdeckt. Wir haben zwei genetisch sehr unterschiedliche Mäusestämme miteinander gekreuzt. So konnten wir bestimmen, ob der aus der Kreuzung hervorgegangene Nachwuchs mRNA eines bestimmten Gens vom mütterlichen oder väterlichen Chromosom oder von beiden Chromosomen bildet. Die meisten haploinsuffizienten Gene produzieren mRNA von beiden Allelen. Wenn wir jedoch einen speziellen Faktor, nämlich den Chromatinregulator MSL2, entfernen, bildet eine Untergruppe dieser Klasse von Genen nur noch von einem Allel mRNA. Einige dieser Gene sind bekannt dafür, dass sie Krankheiten verursachen können wie beispielsweise das Dias-Logan-Syndrom, das schwere Intelligenzminderungen aufzeigt.

Haploinsuffiziente Gene reagieren somit sehr empfindlich auf die Menge der produzierten mRNA. In einem gesunden Organismus sind beide Allele aktiv und stellen die notwendige Menge zur Verfügung. Ist dies



nicht der Fall, treten Krankheiten auf. Tatsächlich weisen Mäuse, denen der Chromatinregulator MSL2 fehlt, verschiedene Fehlbildungen auf und sterben noch im Mutterleib oder kurz nach der Geburt.

In Zusammenarbeit mit Medizinerinnen und Medizinern haben wir zudem herausgefunden, dass Mutationen in einem wichtigen Cofaktor von MSL2 zu einer Entwicklungsstörung führen, die als Basilicata-Akhtar-Syndrom bekannt ist. Betroffene mit diesem Syndrom zeigen Entwicklungsverzögerungen, geistige Behinderungen und Muskelschwäche.

Die Tatsache, dass MSL2 haploinsuffiziente Gene daran hindern kann, eine der beiden Genkopien auszuschalten, war für uns eine faszinierende Entdeckung. Damit haben wir erstmals nachgewiesen, dass ein an die DNA bindendes Protein die Aktivität eines spezifischen Allels direkt beeinflusst. So stellt MSL2 bei manchen haploinsuffizienten Genen sicher, dass beide Kopien aktiv bleiben. Dies widerspricht der herkömmlichen Ansicht, dass die Aktivität beider Allele eines Gens gleichmäßig reguliert wird.



Epigenetische Veränderung

Als Nächstes haben wir untersucht, wie genau die Aktivität von MSL2 reguliert wird. Bekannt war bereits, dass MSL2 an Regulationselemente der DNA bindet. Unsere Daten zeigen, dass Gene, die nach Verlust von MSL2 die Aktivität eines Allels verlieren, in einem besonderen Zustand vorliegen: An die weiter aktive Genkopie kann die Transkriptionsmaschinerie binden und mRNA produzieren. Das andere Allel hingegen wird komplett inaktiv: Die Ablesemaschinerie bindet nicht mehr an die DNA, und ein wichtiger Regulationsabschnitt des Gens wird epigenetisch verändert. Das bewirkt, dass die DNA an dieser Stelle nicht abgelesen werden kann.

Alle diese Erkenntnisse fügen unserem Verständnis über die Expression von Genen eine neue Ebene hinzu. Nicht nur die Gesamtmenge der mRNA spielt eine Rolle,

sondern auch ihr Ursprung: Kommt die gesamte mRNA von beiden Kopien oder nur von einer, und von welcher genau? Und welche biologischen Auswirkungen könnte das haben?

Wir vermuten, dass es eine ganz neue, unerwartete Ebene der Transkriptionsregulierung zu entdecken gibt, sobald Forschende beginnen, die Rolle anderer Chromatinregulatoren bei einzelnen Allelen zu berücksichtigen. Dafür müssen sie Tierstämme untersuchen, bei denen sich mütterliche und väterliche Allele unterscheiden lassen. Da die meisten derzeit verwendeten Labortiere jedoch aus Inzucht einzelner Mausstämme entstehen und daher nicht für diese Untersuchungen verwendet werden können, muss die Forschung auf diesem Gebiet künftig verstärkt hybride Tiere analysieren, die aus der Kreuzung genetisch sehr unterschiedlicher Linien stammen. **o**

Jedes unserer Gene liegt in zwei Ausführungen vor (Allele; rot, blau), von jedem Elternteil eine. Beide Allele können Boten-RNA (geschwungene Linien) produzieren. Diese Moleküle tragen die Bauanleitung für die Herstellung von Proteinen.

3 Feinstaub schadet der Gesundheit anders als gedacht

THOMAS
BERKEMEIER,
ELENI DOVROU,
STEVEN LELIEVELD,
ASHMI MISHRA,
ULRICH PÖSCHL

↳ Max-Planck-Institut
für Chemie, Mainz

Studien unseres Instituts zufolge sterben in Europa jährlich 800.000 Menschen vorzeitig an den Folgen von Luftverschmutzung, vor allem Feinstaub. Unsere Forschungsgruppe hat in Modellrechnungen herausgefunden, dass Feinstaub im Körper anders wirkt als bislang angenommen. Unsere Erkenntnisse sollten bei der Entwicklung von Messverfahren zur Gefährlichkeit von Feinstaub berücksichtigt werden. Sie können aber auch helfen, die Gesundheitsgefahr durch Feinstaub effektiv einzudämmen.

Dass Feinstaub gesundheitlich schädlich ist, daran besteht kein Zweifel – das zeigen zahlreiche medizinische und epidemiologische Studien. Und anders als bei anderen Gesundheitsgefahren wie dem Rauchen können wir Feinstaub nur schwer vermeiden. Vor allem Feinstaubpartikel, die kleiner als 2,5 Mikrometer sind, PM 2,5 genannt, schädigen die Gesundheit, da sie wegen ihrer geringen Größe bis tief in die Lunge gelangen. 2019 hat ein Team unter anderem des Max-Planck-Instituts für Chemie herausgefunden, dass Luftverschmutzung insbesondere durch Feinstaub alleine in Europa jährlich zu 800.000 vorzeitigen Todesfällen führt. Das heißt, Feinstaub verkürzt das Leben der Europäer im Schnitt um zwei Jahre.

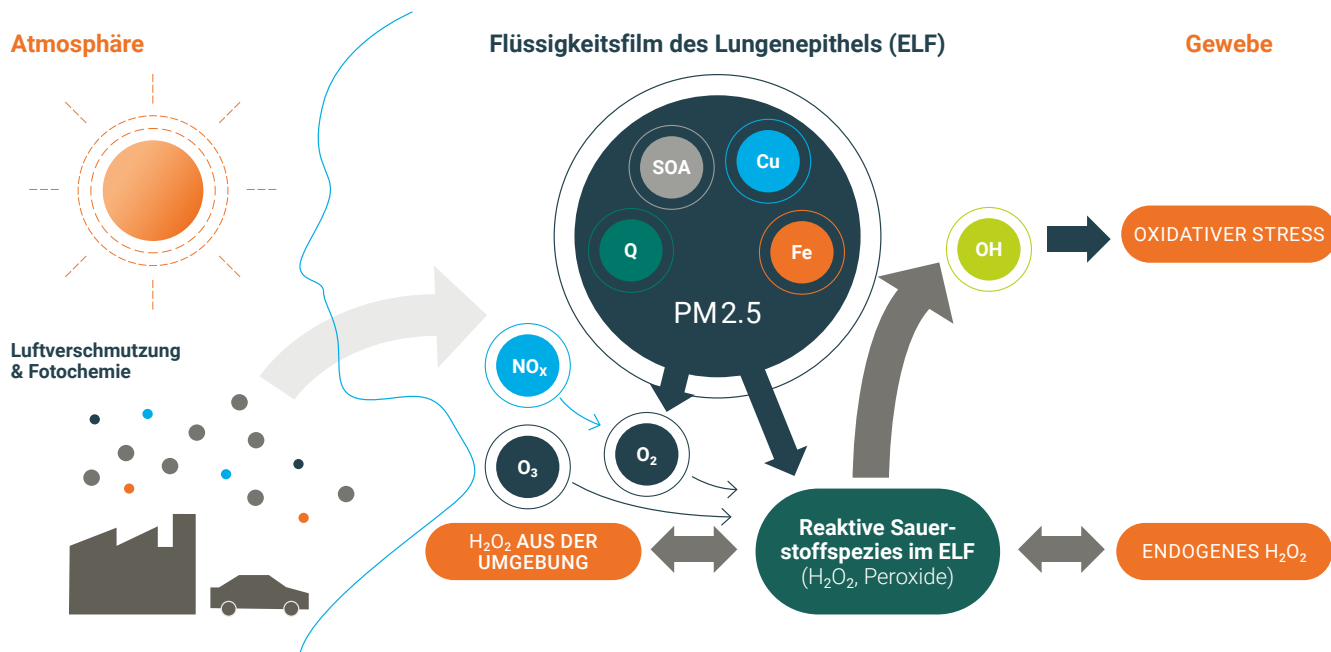
Der Grund für die Gesundheitsschädlichkeit von PM 2,5 liegt darin, dass diese Partikel in den menschlichen Atemwegen eine Reihe von chemischen Reaktionen auslösen und diese am Laufen halten. Dabei werden im Flüssigkeitsfilm des Lungenepithels, der die Atemwege und Lungenbläschen der menschlichen Lunge bedeckt, reaktive Sauerstoffspezies produziert. Diese verursachen oxidativen Stress, der in den Zellen zu Entzündungen führt und somit Herz-Kreislauf-Erkrankungen begünstigt. Als reaktive Sauerstoffspezies werden verschiedene Moleküle wie zum Beispiel Wasserstoffperoxid oder Hydroxyl-Radikale bezeichnet, die Sauerstoff enthalten und eine hohe Reaktionsbereitschaft mit anderen Stoffen zeigen. In der wissenschaftlichen Literatur wird daher die Gesamtproduktion reaktiver Sauerstoffspezies in der Lunge häufig als Maß genutzt, um die schädliche Wirkung von Luftschadstoffen abzuschätzen. Reaktive Sauerstoffspezies

kommen aber auch natürlicherweise im menschlichen Körper vor. Zum einen als Nebenprodukt beim Stoffwechsel, zum anderen hält der Körper sie zur Immunabwehr von Krankheitserregern auf Vorrat.

Feinstaub fördert die Produktion von Hydroxyl-Radikalen

Unsere Forschungsgruppe hat nun mithilfe von Modellrechnungen neue Erkenntnisse über die Wirkung von Feinstaub im Körper gewonnen. So zeigen wir, dass die Konzentration reaktiver Sauerstoffspezies in den menschlichen Atemwegen hauptsächlich von im Körper selbst produziertem Wasserstoffperoxid abhängt und durch die körpereigenen Prozesse relativ konstant gehalten wird. Das heißt, der eingeatmete Feinstaub führt weniger als angenommen zur Bildung der hochreaktiven Sauerstoffspezies. Das war zunächst verwunderlich, da wir aus medizinischen und epidemiologischen Studien wissen, dass viele negative Gesundheitseffekte dem Feinstaub zugeschrieben werden können.

Nichtsdestotrotz erhöht Feinstaub den oxidativen Stress im Körper. Denn wie unsere Rechnungen auch ergeben, hängt die Produktion von Hydroxyl-Radikalen stark mit dem Vorhandensein von Feinstaub zusammen. Unsere Ergebnisse deuten also darauf hin, dass Feinstaub überwiegend durch Umwandlung von körpereigenen Peroxiden in hochreaktive Radikale wirkt. Im Gegensatz zum bereits sehr reaktiven Wasserstoffperoxid sind Hydroxyl-Radikale nochmal um Größenordnungen reaktionsfreudiger, sodass sie augenblicklich



Feinstaub (PM_{2,5}) entsteht durch Luftverschmutzung und fotochemische Reaktionen in der Atmosphäre und gelangt in den Flüssigkeitsfilm des Lungenepithels. Dort sammeln sich auch reaktive Sauerstoffspezies wie H₂O₂ und Peroxide an, die durch Prozesse im Körper, aber auch außerhalb entstehen. Einzelne Bestandteile des Feinstaubes wie Eisen (Fe) und Kupfer (Cu), aber auch Chinone (Q) und sekundäres organisches Aerosol (SOA) katalysieren deren Umwandlung in Hydroxyl-Radikale, die besonders großen oxidativen Stress verursachen.

biologische Moleküle wie Proteine und Membranlipide angreifen.

Das heißt, Feinstaub ist weniger der Treibstoff für die Produktion von hochreaktiven Sauerstoffspezies, sondern vielmehr der Katalysator für die chemischen Reaktionen, die Zellen und Gewebe letztlich besonders stark schädigen. Da ein Katalysator bei einer chemischen Reaktion nicht verbraucht wird, kommt es also weniger auf die Menge des eingeatmeten Feinstaubes an als auf dessen Zusammensetzung. Katalytisch aktiv sind im Feinstaub Kupfer oder Eisen, die etwa im Abrieb von Reifen enthalten sind. Neben seiner Rolle als Katalysator für die Bildung von Hydroxyl-Radikalen wirkt Feinstaub auch, indem er die Produktion von Superoxid, einer weiteren besonders aggressiven Sauerstoffspezies, aus körpereigenen Quellen stimuliert. Das trägt zusätzlich zur gesundheitsschädlichen Wirkung bei.

Gesucht sind neue Marker für oxidativen Stress

Für unsere Studie haben wir ein Computermodell verwendet, das wir eigens dafür programmiert haben. Es simuliert den Transport von Luftschadstoffen in die Lunge und die chemischen Reaktionen, die sich in den Atemwegen abspielen. Wir nutzen das Modell, um die dabei maßgeblichen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse zu identifizieren und die gesundheitsschädlichen Auswirkungen der verschiedenen Arten von Luftschadstoffen zu verstehen. In der aktuellen Version des Computermodells haben wir erstmals die Produktion, die Diffusion und den Verbrauch von Wasserstoffperoxid in den Zellen und der Blutbahn betrachtet. Es war herausfordernd, diese in biologischen Geweben ablaufenden Prozesse in präzise mathematische Gleichungen zu fassen. Vor allem die Durchlässigkeit der Blut-Luft-Schranke für

Wasserstoffperoxid ist im Modell von großer Bedeutung, ihr Zahlenwert war uns jedoch nicht genau bekannt. Wir haben dieses Problem gelöst, indem wir die Durchlässigkeit anhand von bekannten Wasserstoffperoxid- und Enzym-Konzentrationen in den verschiedenen Geweben eingrenzten.

Derzeit scheinen sich zellfreie Untersuchungsverfahren zu etablieren, um die Gesundheitsgefahr durch Feinstaub zu bestimmen. Wie unsere Studie zeigt, sind viele dieser Methoden dafür aber möglicherweise ungeeignet, da sie häufiger die produzierte Menge an oxidativen Spezies messen und seltener die Bildung von Hydroxyl-Radikalen. Viele oxidative Spezies wie Peroxide sind schon von Natur aus in großer Zahl im menschlichen Körper vorhanden und führen nicht direkt zu Gewebeschäden oder zumindest nicht in den kleinen Mengen, wie sie durch Feinstaub in unserer Lunge produziert werden. Die direkte Messung der kurzlebigen Hydroxyl-Radikale ist jedoch außerordentlich schwierig. Eine weitere Studie aus meiner Gruppe beschäftigt sich daher damit, wie wir etwa die Oxidation von Proteinen als Marker für oxidativen Stress in der Lunge mit unseren Modellen simulieren können. Diese Marker können wesentlich einfacher in lebenden Organismen nachgewiesen werden.

Unsere Studie gibt zudem Hinweise, wie sich die Gesundheitsgefahr durch Feinstaub effektiv und effizient minimieren lassen könnte. Demnach kommt es vor allem darauf an, Feinstaub mit den katalytisch aktiven Bestandteilen wie etwa Eisen und Kupfer zu reduzieren. Diese Partikel entstehen vor allem durch Reifenabrieb im Straßenverkehr. Daher könnten mögliche Maßnahmen mehr Verkehrsberuhigungen in Städten vorsehen oder die Entwicklung neuer Materialien für Reifen fördern. Um dafür verlässliche Empfehlungen abgeben zu können, müssen wir die Wirkung unterschiedlicher Bestandteile von Feinstaub im Körper jedoch noch genauer erforschen. **o**

4 Leben im Wandel

**MARLENE OEFELE,
MICHAELA HAU**

➤ Max-Planck-Institut
für biologische
Intelligenz, Seewiesen

Wir untersuchen, wie sich Kohlmeisen und andere Vögel an Temperaturschwankungen anpassen. Damit erhoffen wir uns Aufschluss darüber, ob und wie Tiere mit dem Klimawandel zurechtkommen und welche Arten vom Aussterben bedroht sein könnten.

Über viele Wochen Trockenheit, dann Dauerregen – solche schnellen Veränderungen der Umwelt prägen viele Lebensräume der Erde. Die meisten Organismen sind gut dagegen gerüstet. Doch was, wenn es extrem heiß ist, zu lange kalt bleibt oder durch wochenlange Überschwemmungen das Angebot an Nahrung knapp wird? Genau das passiert beim menschengemachten Klimawandel. Wetterextreme und Temperaturschwankungen werden stärker und unvorhersehbarer. Damit eine Tierart unter solchen veränderten Umweltbedingungen überleben kann, muss sie sich anpassen – wie diese Anpassungen aussehen und warum Tiere das können, wollen wir herausfinden. Dann können wir besser einschätzen und vielleicht sogar vorhersagen, welche Tierarten besser oder schlechter mit dem Klimawandel umgehen können.

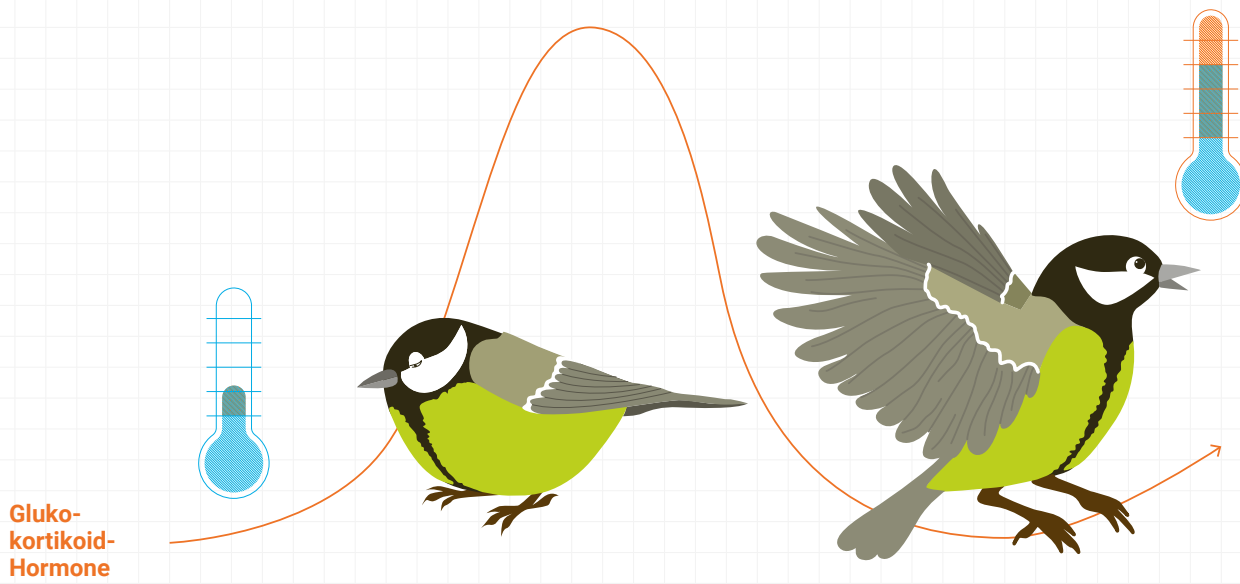
Wie ein Individuum auf seine Umwelt reagiert, hängt vor allem von seinem Energiestoffwechsel ab. Alle gleichwarmen Tiere halten ihre Körpertemperatur durch Wärmezeugung aufrecht. Dazu zapft der Körper Energiereserven an, die über die Nahrung wieder aufgefüllt werden. Wenn das Nahrungsvorkommen bei ungünstigem Wetter nicht ausreicht, muss der Körper seine Energiereserven umverteilen und zum Beispiel bei der Fortpflanzung einsparen. Diese Fähigkeit zur Umverteilung ist ein wichtiges Element der Anpassung.

Dreh- und Angelpunkt sind dabei die Hormone. Ihre Konzentration im Blut kann sich schnell verändern und dem Energiestoffwechsel so Informationen über Umweltschwankungen vermitteln. Ein wichtiges Hormon ist das Kortikosteron aus der Gruppe der Glukokortikoide, auch als Stresshormon bekannt. Bei niedrigen Temperaturen werden Glukokortikoide vermehrt produziert. Sie fördern den Abbau von Energiereserven, um daraus Wärme zu erzeugen. Bei milden Temperaturen sinkt der Glukokortikoidspiegel und damit auch die Umwandlung von Energie in Körperwärme. Diese Hormone kommen außerdem bei allen Wirbeltieren vor. Dadurch können wir die Allgemeingültigkeit unserer Ergebnisse überprüfen und weitere Arten und ihre Anpassung an Umweltfaktoren analysieren.

Kohlmeisen und der Klimawandel

Mein Team und ich erforschen an Kohlmeisen (*Parus major*), welche Rolle Kortikosteron für die Anpassungsfähigkeit spielt. Kohlmeisen kommen in ganz Europa in Wäldern und Siedlungen vor und sind als kleine gleichwarme Tiere wahre Meister der Temperaturanpassung. Wir haben in einer fünf Jahre dauernden Studie untersucht, wie der Hormonhaushalt der Vögel vom Klima beeinflusst wird. Dazu haben wir






während der Brutzeit regelmäßig Blutproben von wild lebenden Meisen-Eltern genommen. Parallel dazu haben wir die Lufttemperatur aufgezeichnet. Natürliche Schwankungen konnten wir erkennen, da wir die Daten über die Jahre an derselben Population erhoben.

Wir konnten zeigen, dass Glukokortikoide tatsächlich in Zusammenhang mit der Wärmeproduktion stehen und dass ihr Gehalt bei niedrigen Temperaturen ansteigt. Auffällig war, dass die Höhe des Anstiegs von Individuum zu Individuum variiert. Manche Tiere reagieren im Hinblick auf die Kortikosteron-Ausschüttung stärker auf die Umgebungstemperatur als andere. Diese Vielfalt könnte es der Population als Ganzes ermöglichen, auf eine größere Bandbreite von Veränderungen zu reagieren. Höhere Glukokortikoid-Werte könnten auch bei höheren Temperaturen von Nutzen sein und die Abgabe von Körperwärme unterstützen. Falls sich die Variationen vererben, könnten solche Populationen besser gegen den Klimawandel gewappnet sein.

Energie aus den Mitochondrien

Wir nutzen die Erkenntnisse aus unseren Messungen auch, um einen zentralen Schauplatz des Energiestoffwechsels zu untersuchen: die Mitochondrien. Ihre Aufgabe, Nahrung in Energie umzuwandeln, wird unter anderem von Glukokortikoiden gesteuert. Die Energieproduktion in den Mitochondrien ist eng mit bestimmten Abschnitten der Erbsubstanz verknüpft, den sogenannten Telomeren. Sie gelten als Biomarker für die Gesundheit und die Überlebensfähigkeit eines Individuums. Telomere verkürzen sich im Laufe des Lebens, und Zellen mit zu kurzen Telomeren sterben. Als Folge altert der Organismus. Tatsächlich konnte

unser Forschungsteam bei Kohlmeisen-Küken zeigen, dass Tiere mit experimentell erhöhtem Glukokortikoid-Spiegel auch verkürzte Telomere und einen verschlechterten Energiestoffwechsel in den Mitochondrien besitzen. Offenbar müssen die Küken einen Kompromiss zwischen dem Energieaufwand für die Auswirkungen von Glukokortikoiden und dem Aufwand für den Schutz der Telomere finden – ein Dilemma in Zeiten des Klimawandels.

Wir forschen derzeit daran, den Zusammenhang zwischen Umweltbedingungen, Kortikoiden, Mitochondrien und Telomeren besser zu verstehen. Unter anderem untersuchen wir in einer Langzeitstudie an Zebrafinken, wie das Verhalten der Vögel mit dem Energiestoffwechsel zusammenhängt. Zebrafinken sind ideal dafür, da sie sich sehr schnell an unvorhergesehene Veränderungen anpassen. Da sie leicht in Volieren gehalten werden können, können wir das gesamte Leben der Vögel verfolgen und spannende neue Erkenntnisse gewinnen. Dadurch können wir in Zukunft hoffentlich besser einschätzen, ob und wie sich Tiere an Klimaveränderungen anpassen, und so den Weg für fundiertere Schutzmaßnahmen ebnen. 

Kortikoid-Hormone steuern den Energiestoffwechsel und regulieren auf diese Weise die Körpertemperatur. Da der Körper bei niedrigen Außentemperaturen mehr Wärme produzieren muss, um die Körpertemperatur konstant zu halten, schüttet er bei Kälte mehr Kortikoide aus. Mit steigenden Außentemperaturen sinken die Hormonwerte. Die Hormonspiegel können jedoch von Tier zu Tier sehr unterschiedlich sein.

5 Wasser für erdähnliche Planeten

GIULIA PEROTTI

↳ Max-Planck-Institut
für Astronomie, Heidelberg

Wasser ist für das Leben, wie wir es auf der Erde kennen, unverzichtbar. Das macht die Suche nach Wasser auf anderen erdähnlichen Planeten jenseits des Sonnensystems so bedeutsam. Bisher ist es noch nicht gelungen, flüssiges Wasser auf einem Exoplaneten nachzuweisen. Neue Beobachtungen mit dem aktuell leistungsfähigsten Weltraumteleskop, dem James-Webb-Weltraumteleskop (JWST), lassen vermuten, dass Wasser bereits bei der Entstehung von Planetensystemen reichlich vorhanden sein könnte: nämlich genau in der Entfernung von einem Stern, in der sich erdähnliche Planeten für gewöhnlich bilden.

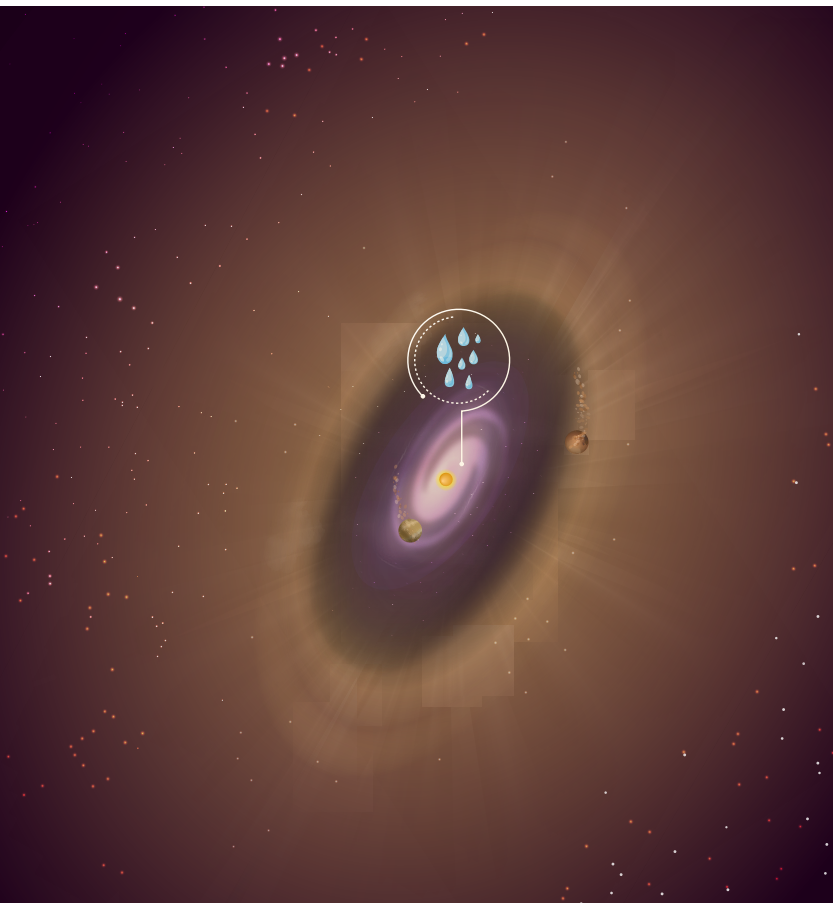
Unter Astronominen und Astronomen wird diskutiert, wie das Wasser auf die Erde gelangt ist und ob dies genauso auch für erdähnliche Exoplaneten um andere Sterne funktionieren könnte. Der bevorzugte Mechanismus besteht darin, dass Asteroiden, die Wassereis enthalten, die Oberfläche eines jungen Planeten bombardieren. Ob Wassereis aus den äußeren Bereichen des Planetensystems einen Gesteinsplaneten so weit anreichert, dass sich Leben, wie wir es kennen, entwickeln kann, hängt in dem Szenario fast vom Zufall ab. Nun haben wir Hinweise auf einen weiteren Prozess gefunden, der terrestrische Planeten von Geburt an regelmäßig mit dem lebenswichtigen Element versorgt.

Planeten entstehen in Scheiben aus Staub und Gas, die junge Sterne umgeben. Auch die Erde und die anderen Planeten unseres Sonnensystems sind vor rund 4,5 Milliarden Jahren in einer solchen Scheibe entstanden. Das *Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array* (Alma), ein leistungsstarkes bodengebundenes Teleskop in den chilenischen Anden, hat bereits viele solcher Scheiben durch die Wärmestrahlung des darin enthaltenen Staubs abgebildet. Die Bilder zeigen diese Scheiben in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Aus ihnen werden wohl in einigen Millionen Jahren Systeme entstehen, in denen jeweils Planeten einen oder mehrere Zentralsterne umkreisen.

Wasser in der inneren Scheibe von PDS 70

Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms *Minds (MIRI Mid-Infrared Disk Survey)* haben wir mit MIRI, dem *Mid-Infrared Instrument* an Bord des JWST genauer hingeschaut. Wir haben uns insbesondere für die Strahlung der jungen Gas- und Staubscheibe um den Stern PDS 70 interessiert und sie in ihre spektralen Bestandteile zerlegt, so wie ein Prisma das Sonnenlicht in seine Farben zerlegt. Die Linien in diesen Spektren erlauben es, bestimmte chemische Verbindungen nachzuweisen. Eine ganze Reihe solcher Linien fiel uns besonders auf. Sie stammen von heißem Wasserdampf, der bei Temperaturen von etwa 330 Grad Celsius (600 Kelvin) durch die Scheibe um PDS 70 strömt. Solche Temperaturen können nur in der Nähe des Zentralsterns auftreten, und zwar dort, wo aus dem Scheibenmaterial gewöhnlich Gesteinsplaneten entstehen. Frühere Versuche, in diesem System Wasser zu finden, waren gescheitert. Daher erwarteten wir eigentlich eine trockene innere Scheibe. Umso überraschender war es, dass wir tatsächlich Wasser in dieser nicht mehr ganz so jungen, etwa 5,4 Millionen Jahre alten Scheibe, fanden.

Da sich Planeten in allen bisher bekannten Systemen auf ganz ähnliche Weise zu bilden scheinen,



Künstlerische Darstellung der Staub- und Gasscheibe um den Stern PDS 70. Im wasserhaltigen Zentralbereich entstehen üblicherweise erdähnliche Planeten, die hier (noch) nicht entdeckt wurden. In diesem System sind bisher nur zwei Gasriesenplaneten bekannt, PDS 70b und c, die während ihres Wachstums eine große Lücke in die Scheibe gegraben und dabei einen äußeren Ring erzeugt haben, der sich aus Gas und eishaltigen Festteilchen wie Staub und Felsbrocken zusammensetzt.

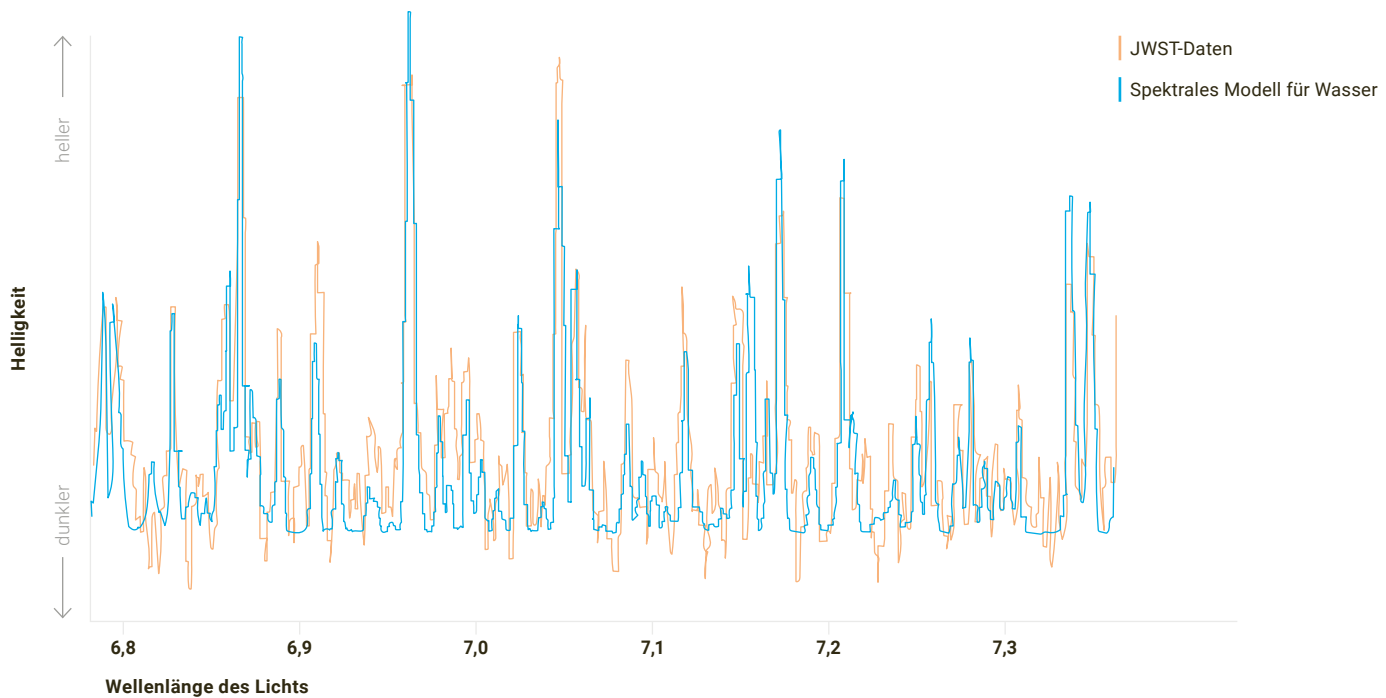
liegt die Vermutung nahe, dass Wasser nicht nur um PDS 70, sondern auch anderswo eine der frühesten Zutaten für Gesteinsplaneten gewesen sein könnte. Denn mit der Zeit nimmt der Gas- und Staubgehalt von planetenbildenden Scheiben ab. Entweder entfernen die Strahlung oder der Wind des Zentralsterns Material wie Staub und Gas aus der Scheibe, oder der Staub wächst zu größeren Objekten heran, die schließlich Planeten bilden.

Derzeit entstehen in der Lücke zwei Gasriesenplaneten, PDS 70b und c, die den Stern in den äußeren Bereichen der Scheibe umkreisen. Im Inneren der Scheibe nach Gesteinsplaneten zu suchen macht derzeit zumindest noch keinen Sinn. Die äußeren Gasriesenplaneten erscheinen wegen ihrer großen Oberfläche, die das Licht des Zentralsterns reflektiert, viel heller und sind daher auf Bildern leichter zu erkennen. Teleskope sind noch nicht in der Lage, relativ kleine terrestrische Planeten oder ihre Vorläufer auf Bildern zu erkennen. Möglicherweise wird es noch einige Zeit dauern, bis Planetenembryos, zum Beispiel in der Nähe des Sterns PDS 70, nachweisbare Spuren hinterlassen. Dies könnte erst in älteren Scheiben der Fall sein, in denen sich das Material vollständig verflüchtigt hat und Teleskope einen klareren Blick auf die Regionen in unmittelbarer Nähe des Sterns haben.

Was bedeutet der Fund für das Leben auf anderen Planeten?

Könnte es sein, dass alle erdähnlichen Planeten schon früh über einen lebensspendenden Wasservorrat verfügten? Wenn dem so wäre, würde das die Chancen erhöhen, Gesteinsplaneten zu finden, auf denen Wasser im Überfluss vorhanden ist, das Leben, wie wir es kennen, ermöglichen könnte. Das Minds-Forschungsprogramm soll klären, wie viel Wasser in den steinigen planetenbildenden Zonen von Scheiben um andere Sterne, die ein ähnliches Alter haben wie die Scheibe um PDS 70, wirklich vorkommt. Die JWST-Beobachtungen solcher Systeme werden derzeit von den Forschenden analysiert.

Wie aber gelangt das beobachtete Wasser in die Scheibe? Planetenbildende Scheiben um junge Sterne



befinden sich inmitten interstellarer Molekülwolken, riesiger Gas- und Staubvorkommen. Dort ist es bei etwa -260 Grad Celsius sehr kalt. Das Wasser, das in solchen Wolken häufig vorkommt, ist daher gefroren und umschließt winzige Staubteilchen. Wenn sich dort ein Stern wie PDS 70 bildet, gelangen auch solche eisigen Staubteilchen in die Scheibe, die den Stern umgibt. Eisige Staubteilchen, die dem Stern nahe genug kommen, werden der Wärmestrahlung des Sterns ausgesetzt, das Wasser verdampft und vermischt sich mit anderen Gasen.

Ein Nebeneffekt entsteht durch den ultravioletten Lichtanteil des Sterns: Die Wassermoleküle zerfallen durch die hohe Strahlungsenergie leicht in ihre Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff. Das Material der inneren Scheibe, darunter Staub und die Wassermoleküle selbst, schirmt die zerstörerische Ultraviolett-Strahlung aber offenbar teilweise ab. So könnte das Wasser, das in der Nähe von PDS 70 entdeckt wurde, eine solche Bestrahlung überlebt haben. Ein Teil des entdeckten Wassers könnte aber auch entstanden sein, nachdem Sauerstoffgas aus den äußeren Rändern der Scheibe von PDS 70 eingeströmt und sich dann mit Wasserstoff zu Wasser verbunden hat. Weiter könnte der Sog des einfließenden Gases eisreiche Staubteilchen mitgerissen haben. Kommt das Eis dem Zentralstern nah genug, entstünde wiederum Wasserdampf.

*Überall Wasser:
In diesem Ausschnitt des
Lichtspektrums, das das
Instrument MIRI an Bord
des Weltraumteleskops
JWST vom inneren Teil
der planetenbildenden
Scheibe um den Stern*

*PDS 70 aufgenommen
hat (orangene Linie), hat
ein physikalisches Modell
mehrere Spektrallinien
identifiziert, die durch
heißen Wasserdampf
entstanden sein müssen
(blaue Linie).*

Wir vermuten, dass einer dieser Mechanismen eine entscheidende Rolle beim Auffüllen des Wasserreservoirs der PDS-70-Scheibe spielt. Welcher das ist, ist eine unserer Forschungsfragen.

Auf dem Weg zum vollständigen Bild

JWST ist ein leistungsstarkes Weltraumteleskop. Am Max-Planck-Institut für Astronomie waren wir maßgeblich am Bau des Instruments Miri beteiligt.

Wie bei einem Gemälde, das seine Botschaft nur vermittelt, wenn man alle Farben erfasst, erhalten Astronominnen und Astronomen aber nur dann ein vollständiges Bild von den Vorgängen in planetenbildenden Scheiben, wenn sie diese bei möglichst vielen Wellenlängen beobachten. Deshalb haben wir bereits zusätzliche Beobachtungen von PDS 70 mit bodengebundenen Teleskopen durchgeführt und werten derzeit Daten aus. Darüber hinaus haben wir mit anderen Instrumenten an Bord des JWST detaillierte Bilder der inneren Scheibenregionen von PDS 70 aufgenommen. All dieser Aufwand hilft uns zu verstehen, wie Wasser auf Gesteinsplaneten gelangt. ○

6 Wer beherrscht die Unternehmen heute?

BENJAMIN BRAUN

↳ Max-Planck-Institut
für Gesellschaftsforschung,
Köln

Der Aufstieg der Vermögensverwalter ändert die Machtverhältnisse zwischen den Vermögenden und dem Rest der Gesellschaft – den Arbeitnehmern, den Unternehmen und dem Staat. Im Vergleich zu vor zwanzig Jahren konzentriert sich heute mehr Macht in den Händen weniger, vor allem US-amerikanischer Fonds- und Private-Equity-Gesellschaften. Diese Akteure beeinflussen nicht mehr nur die Unternehmensführung, sondern zunehmend auch die Wirtschaftsstruktur insgesamt.

Vor genau zwanzig Jahren erschien das Buch „Wer beherrscht die Unternehmen?“. Darin befasste sich Martin Höpner vom MPI für Gesellschaftsforschung mit dem Schicksal der „Deutschland AG“ – dem Netzwerk an gegenseitigen Beteiligungen, welches die größten deutschen Unternehmen über weite Strecken des 20. Jahrhunderts hinweg zusammengehalten hatte. Im Zentrum des Netzwerks standen damals die Deutsche Bank und die Allianz-Versicherung.

Ab den 1990er-Jahren veranlassten Globalisierung, Finanzmarktliberalisierung und steuerliche Anreize deutsche Unternehmen, ihre strategischen Beteiligungen abzustößen. Von der „Abwicklung“ der Deutschland AG erwartete man eine stärkere Streuung des Aktienbesitzes unter institutionellen Investoren mit kurzen Anlagehorizonten. Die Erwartung erfüllte sich nur

zum Teil: Heute beherrschen institutionelle Investoren aus den USA die Aktionärslandschaft, die Aktionärsstruktur ist allerdings ähnlich konzentriert wie in der Ära der Deutschland AG. Es dominieren nun große US-amerikanische Vermögensverwalter wie BlackRock und Vanguard. Zudem wächst erstmals auch bei nicht an der Börse notierten Unternehmen die Bedeutung institutioneller Beteiligungsgesellschaften.

Finanzkapital: Bedarf der Industrieunternehmen

Um diesen Wandel zu verstehen, bedarf es einer umfassenderen historischen und theoretischen Perspektive. Heute besteht Kapital vornehmlich aus „institutionellem“ Kapital, das in Pensionsfonds und Stiftungen gebündelt ist, die es ihrerseits an größere

Kapitalsammelstellen weiterleiten, an kommerzielle Vermögensverwalter oder „Asset-Management-Firmen“. Historischer Vorläufer dieses neuen Asset-Management-Kapitalismus ist das von Rudolf Hilferding, dem Finanzminister der Weimarer Republik, beschriebene „Finanzkapital“. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts führte ein beispielloser Kapitalbedarf der Industrieunternehmen zu einer Ausweitung des Angebots an Finanztiteln aus dem Unternehmenssektor und verschmolz zwei bis dahin weitgehend getrennte Welten: die Industrie und die Kapitalmärkte. Der Bankensektor engagierte sich zunehmend in der Industrie, durch umfangreiche Kreditbeziehungen und direkte Beteiligungen am Aktienkapital der Industrieunternehmen. Vor allem in Deutschland und in den USA wurden die Finanziere zu den dominierenden Aktionären und Gläubigern der Großunternehmen und Monopole, die sie zu schmieden halfen. Zwar hatten sie weitgehende Kontrolle, doch ihre Portfolios waren schlecht diversifiziert und damit anfällig für die Launen des Kapitalismus.

Heute dominiert der Finanzsektor erneut den Unternehmenssektor. Die zentralen Akteure sind jedoch nicht mehr Banken, sondern Asset-Management-Firmen: Private-Equity-Firmen, wie Blackstone, und die großen Fondsgesellschaften, etwa BlackRock. Sie können Anlagestrategien umsetzen, die für einzelne Aktionäre oder Investoren zu aufwendig wären. Asset-Management-Firmen ermöglichen es nun, Portfolios breit zu diversifizieren und dabei liquide Anteile an verschiedenartigen Investmentfonds zu halten. Durch die Institutionalisierung des Kapitals können zugleich nichtfinanzielle Aktivitäten kontrolliert, Vermögen geschützt und hohe Renditen erwirtschaftet werden.

Private Equity: die Blackstone-Ökonomie

Private-Equity-Firmen erwerben und veräußern Unternehmensanteile, die zunächst nicht an einer Börse gehandelt werden (daher „privat“). Sie verstehen sich als Landschaftspfleger im Garten des Kapitalismus, als dessen Wesenskern ein Verdrängungs- und Erneuerungsprozess angenommen wird: „Unwirtschaftliche“ Unternehmen werden übernommen, um sie nach einer Umstrukturierung gewinnbringend weiterzukaufen (das „Buy-out-Modell“).

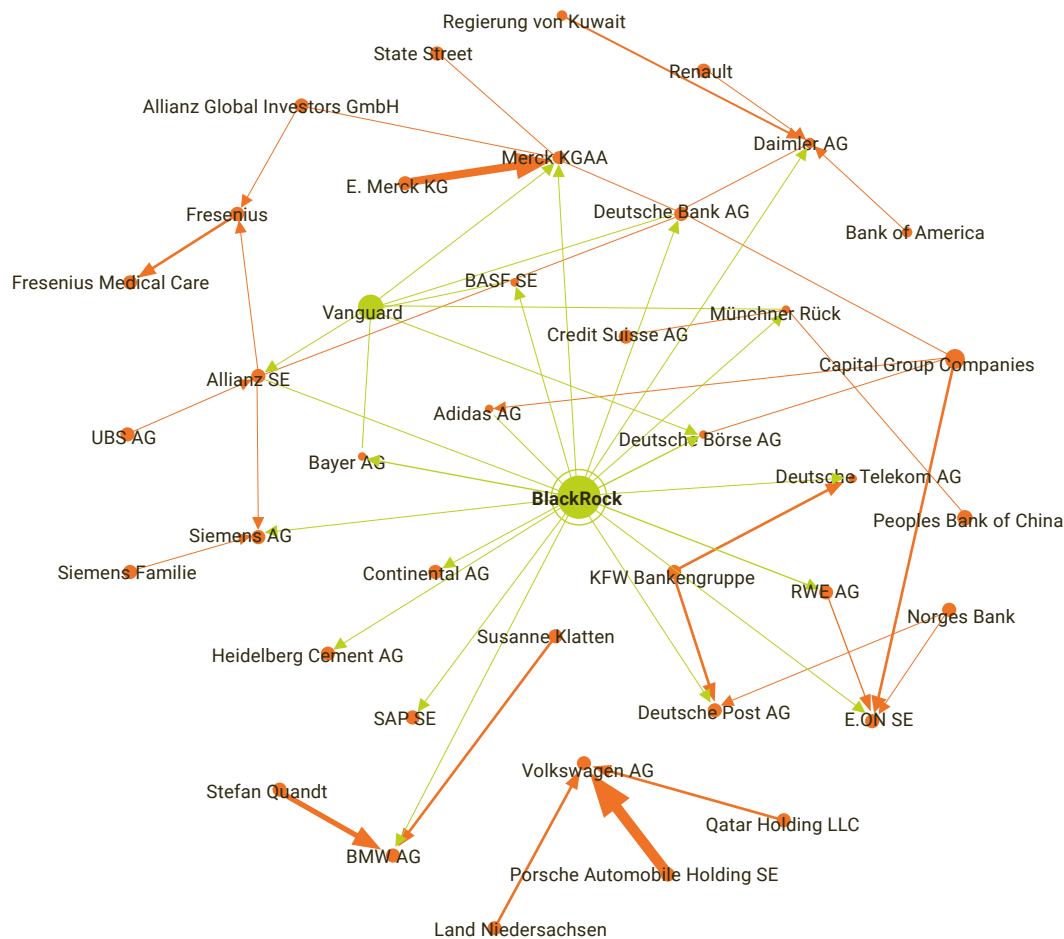
Diese Beschreibung war in den 1980er-Jahren in den USA durchaus zutreffend. Inzwischen hat sich das Geschäftsmodell der Private-Equity-Firmen jedoch grundlegend verändert. Statt „schöpferische Zerstörung“ (wie Schumpeter einst formulierte) streben sie nun höchstmögliche Renditen bei geringstmöglichem Risiko an. Einst ein Nischenprodukt, hat sich Private Equity so zu einer unverzichtbaren Anlageform in den Portfolios von Pensions- und Staatsfonds entwickelt. Der Kapitalzufluss hat den Einstieg von Private-Equity-Gesellschaften in den Immobilien- und Infrastruktursektor begünstigt, wo stetige Renditen aus Mieteinnahmen locken. Im Bereich der Unternehmensbeteiligungen hat Private Equity das „Roll-up-Modell“ entwickelt, bei dem ehemals lokale und familiengeführte Unternehmen aufgekauft und zu größeren Einheiten zusammengeschlossen werden.

Die vollständige Kontrolle über die nichtfinanziellen Vermögenswerte ermöglicht es, kurzfristigen Renditen Vorrang vor langfristiger wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit zu geben. Und dies zunehmend auch in Sektoren wie dem Gesundheits- und Pflegesektor, die sich bislang kommerziellen Zusammenschlüssen eher widersetzt haben.

Fondsgesellschaften: die BlackRock-Ökonomie

Bei der Aktionärsstruktur börsennotierter Unternehmen unterscheiden wir klassischerweise zwischen konzentrierten, von Familien und Nicht-Finanzunternehmen dominierten Aktionärsstrukturen und verstreuten, von institutionellen Anlegern dominierten Strukturen. Mit dem Aufkommen indexorientierter Vermögensverwalter wird diese Unterscheidung jedoch untergraben: Heute ist die Aktionärsstruktur etwa in den USA besonders konzentriert, gerade weil die USA der

**Im Vergleich zu vor
20 Jahren konzentriert sich
heute mehr Macht in den
Händen einiger weniger.**



Kapitalverflechtungen in Deutschland, 2020. Die Abbildung zeigt das Netzwerk an Beteiligungen an DAX30-Unternehmen, die über 3 Prozent des Aktienkapitals liegen. Die Breite der Pfeile ergibt sich aus der Größe der jeweiligen Beteiligung, die Größe der Kreise aus der relativen Zahl der Beteiligungen.

Heimatmarkt der beiden größten Vermögensverwalter BlackRock und Vanguard sind. Diese beiden Fondsgesellschaften nehmen inzwischen auch in Deutschland eine dominante Stellung ein.

Diese „Big-2“-Vermögensverwalter haben somit großen Einfluss auf Investitionen und Produktionstechnologien der Zukunft. Unsere Untersuchungen zeigen jedoch, dass sie in der Praxis überraschend zurückhaltend sind, wenn es darum geht, ihr Stimmrecht zur Gestaltung der Wirtschaft einzusetzen. Grund dafür ist die Situation in den USA, wo die großen Fondsgesellschaften massivem politischem Druck ausgesetzt sind: Einerseits müssen sie die Demokraten mit klimapolitischen Signalen besänftigen, andererseits alles vermeiden, was den Anti-Wall-Street-Flügel der Republikaner, der sich für die Förderung und Nutzung fossiler Brennstoffe starkmacht, auf den Plan rufen könnte. In dieser prekären Lage versuchen die Fondsgesellschaften, weniger Stimmrechte zu kontrollieren, indem sie diese an ihre Kunden „zurückgeben“ und die institutionellen Anleger somit selbst entscheiden lassen, wie ihre Stimmrechte ausgeübt werden sollen.

Wandel der Machtverhältnisse im Kapitalismus

Mit dem Erfolg der Vermögensverwalter kam es zu einer Verschiebung der Machtverhältnisse zwischen Vermögensbesitzern auf der einen und Arbeitnehmern, Unternehmen und Staat auf der anderen Seite. Auch in Deutschland haben einige wenige, hauptsächlich US-amerikanische Fonds- und Private-Equity-Gesellschaften heute deutlich mehr Einfluss als noch vor 20 Jahren. In den USA stellt das Roll-up-Modell eine ernsthafte Bedrohung für den Wettbewerb dar, in Deutschland sind ähnliche Entwicklungen in einem frühen Stadium erkennbar. Es wäre jedoch irreführend, dies als Reinkarnation einer Deutschland AG 2.0 zu interpretieren, da Asset-Management-Gesellschaften wie BlackRock oder Blackstone nicht mit traditionellen deutschen Finanzinstituten vergleichbar sind. Wie sich die Internationalisierung und Institutionalisierung der Eigentümerstrukturen auf das exportorientierte deutsche Wachstumsmodell auswirken, bleibt eine offene empirische Frage. ◉

7 Virtuelle Körpermodelle helfen bei Magersucht

**SIMONE BEHRENS,
KATRIN GIEL**

Max-Planck-Institut
für Intelligente
Systeme, Tübingen

Viele Menschen, die an Magersucht erkrankt sind, kämpfen tagtäglich mit einem verzerrten Körperbild und starker Angst vor Gewichtszunahme. Traditionelle Therapien stoßen an ihre Grenzen, etwa wenn die Angst der Betroffenen zu groß ist. In einer Pilotstudie haben wir gezeigt, dass Körpersimulationen in Virtual Reality bisherige Behandlungen sinnvoll ergänzen könnten.

Magersucht, auch bekannt als Anorexia nervosa, ist eine ernste psychische Störung, die durch Untergewicht, übermäßige Beschäftigung mit dem Körpergewicht und eine starke Angst vor Gewichtszunahme gekennzeichnet ist. Menschen, die an Magersucht leiden, haben oft ein verzerrtes Körperbild und sehen ihr Untergewicht trotz der offensichtlichen negativen Folgen als positiv an. Magersucht kann zu lebensbedrohlichen Komplikationen wie ernährungsbedingten Mangelerscheinungen, Organversagen und anderen gesundheitlichen Problemen führen. In der Therapie der Magersucht steht daher die Gewichtszunahme im Vordergrund. Viele Therapien werden jedoch vorzeitig abgebrochen, da die Patientinnen und Patienten bei einer Gewichtszunahme starke Ängste um ihre Figur haben. Als Psychotherapeutin und Forscherin erlebe ich täglich, wie schwer es für Betroffene ist, mit dieser Ambivalenz umzugehen.

Neuer Therapieansatz dank Körpersimulation

Unsere Hypothese ist, dass Virtual Reality auf dem Weg zu einer gesunden Körperwahrnehmung helfen kann. Dazu nutzen wir das „SMPL-Modell“ (Skinned Multi-Person Linear model), mit dem sich relativ schnell

digitale Doppelgänger, sogenannte Avatare, einer Person erstellen lassen. Dieses Modell wurde am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme entwickelt und auf der Basis von Tausenden von Körperscans trainiert, die Körperform eines Menschen biometrisch exakt und mit wenigen Parametern zu beschreiben, ähnlich wie die Form eines Würfels durch seine Kantenlängen beschrieben werden kann. Damit lassen sich auch unterschiedlich schwere Körper simulieren.

Wir haben gemeinsam mit Fachleuten der Computer Vision am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme zudem eine Anwendung entwickelt, mit der wir Betroffene in der virtuellen Realität mit einer Darstellung ihres Körpers bei gesundem, meist höherem Körpergewicht konfrontieren. Psychotherapeutinnen und Psychotherapeuten nutzen immersive Darstellungen schon länger, um Angststörungen zu behandeln. Virtual Reality bietet die Möglichkeit, in eine computer-generierte dreidimensionale digitale Umgebung einzutauchen, mit der man auf natürliche Weise interagiert. Mithilfe von am Körper angebrachten Sensoren ahmt der Avatar die Bewegungen des Users in Echtzeit nach, während der User seinen Avatar über eine Virtual-Reality-Brille sowohl im Spiegel als auch in der Ich-Perspektive betrachtet. Möchte die Person etwa wissen, was sich links von ihr befindet, schaut sie einfach nach links.

AN OPREXIE





Mit einer VR-Brille begegnet eine Testperson (unten) ihrem digitalen Zwilling (oben für Außenstehende auf einem Bildschirm dargestellt). Über Sensoren, die am Körper angebracht sind, spiegelt der Avatar die Bewegungen in Echtzeit wider.



Virtuelle Simulation als Brücke zur Selbstwahrnehmung

Im Rahmen der bisherigen Behandlungskonzepte ist es schwierig, Menschen mit Magersucht dabei zu unterstützen, sich konstruktiv mit dem Behandlungsziel eines gesunden Körpergewichts auseinanderzusetzen. Im Gespräch stößt man schnell auf ein hochautomatisiertes Vermeidungsverhalten. Betroffene empfinden ihr Untergewicht als „normal“ und haben Angst, durch normales Essen „dick“ zu werden.

Bevor wir den klinischen Nutzen unserer Virtual-Reality-Anwendung untersuchen, wollen wir in mehreren kleineren Studien verstehen, wie Menschen mit Magersucht – in unserem Fall zunächst Frauen – emotional auf ihren Avatar reagieren und ob die Gegenüberstellung den Leidensdruck lindert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Patientinnen trotz ihres verzerrten Körperbildes durchaus in der Lage sind, das Körpergewicht ihres digitalen Abbilds richtig einzuschätzen. Außerdem scheinen sie die verzerrte Bewertung von Untergewicht als „Idealgewicht“ nur auf ihren eigenen Körper zu beziehen. Dies war überraschend und widerspricht der gängigen Annahme, dass Personen mit

Magersucht ihr Gewicht nicht richtig wahrnehmen können. Es zeigte sich auch, dass die Patientinnen unter starken Ängsten litten, bevor sie im Rahmen der Studie mit verschiedenen Gewichtsvarianten ihres Körpers konfrontiert wurden. Trotzdem beschrieben sie die Auseinandersetzung mit einem gesünderen Körper als hilfreich und interessant.

Neue Wege in der Therapie

In einer Pilotstudie haben wir dann über 40 Frauen mit einem Avatar konfrontiert, der ein höheres Körpergewicht hatte als sie selbst. Darunter waren 20 Frauen mit Magersucht und 24 Frauen, die zwar klinisch gesund waren, sich aber Sorgen um ihr Körpergewicht machten. Alle reagierten stark angespannt, die Patientinnen mit Magersucht hatten zusätzlich Angstgefühle. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Angst vor einer Gewichtszunahme nach vier Sitzungen mit Einzelbetreuung abnahm. Nahezu alle Patientinnen berichteten anschließend von einer hilfreichen Erfahrung.

So eindeutig und ermutigend diese vorläufigen Ergebnisse sind, so sehr unterschieden sich die individuellen Reaktionen auf den simulierten gesunden Körper. Bei allen Patientinnen war messbar, dass die Konfrontation mit dem virtuellen Ich eine intensive und hoch emotionale Erfahrung hervorgerufen hat (Herzrasen, Schwitzen, Stresshormone). Dennoch berichteten die meisten, dass die Anspannung während der Behandlung nachließ, andere wiederum gaben an, die Erfahrung gar nicht als negativ empfunden zu haben. Dies könnte daran liegen, dass die Patientinnen nur mehr oder weniger gut in der Lage waren, ihre erlebten Emotionen zu beschreiben. Das Untergewicht könnte etwa dazu führen, dass der Körper etwas anders reagiert als erwartet, aber es ist auch möglich, dass Personen mit Magersucht die Reaktionen ihres Körpers anders einordnen.

Diese Unschärfen werden wir in einer größeren klinisch-experimentellen Studie genauer untersuchen. Dabei wollen wir etwa herausfinden, warum Betroffene überhaupt Angst haben, wenn sie ihrem virtuellen Ebenbild mit erhöhtem, aber gesundem Körpergewicht gegenüberstehen, und sie ganzheitlich auf ihrem Weg zur Genesung unterstützen. Eine zweite Zielgruppe haben wir ebenfalls im Blick: Menschen mit starkem Übergewicht. Auch ihnen wollen wir mit der Simulation dabei helfen, Stück für Stück ein normales Körpergewicht zu erreichen. o

8 Die Wurzeln des Anthropozäns

**PATRICK ROBERTS,
JÜRGEN RENN,
RICARDA
WINKELMANN**

↳ *Max-Planck-Institut
für Geoanthropologie, Jena*

Zu verstehen, wie sich die Landnutzung und Abholzung tropischer Wälder auf die Dynamik des globalen Erdsystems auswirken, sowie die Identifizierung potenzieller Kipppunkte sind der Schlüssel zur Zukunft unserer Spezies auf diesem Planeten. Indem wir die lange Geschichte menschlicher Gesellschaften in tropischen Wäldern erforschen und natürliche und soziale Systeme in interdisziplinären Modellen zusammenführen, können wir bewerten, welche Auswirkungen bereits die frühe Interaktion des Menschen mit den Tropenwäldern hatte. Schon vor langer Zeit haben sich daraus unumkehrbare Folgen für die Erde ergeben, die über das 21. Jahrhundert hinaus fortwirken werden.

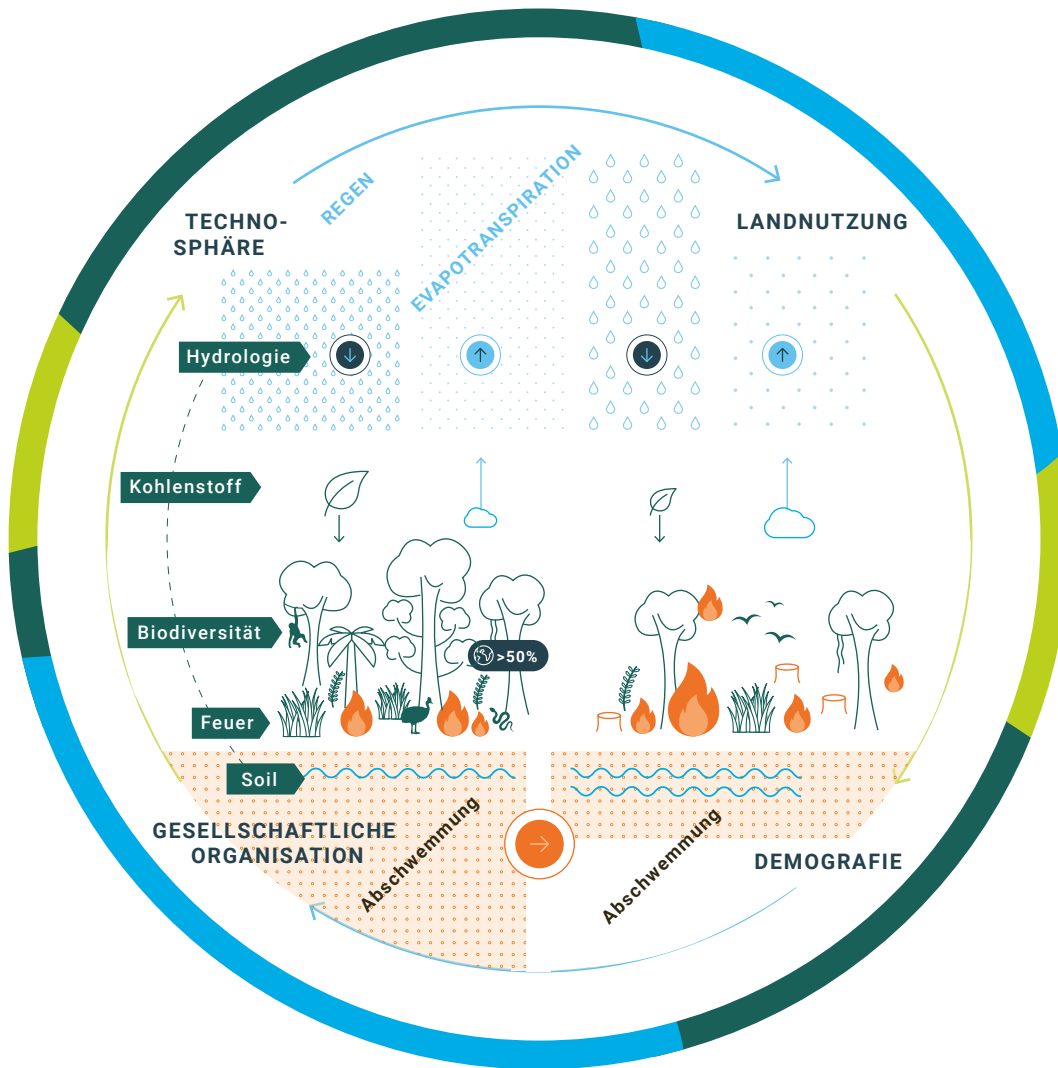
Das Handeln des Menschen hat die Erde so stark verändert, dass bereits diskutiert wurde, ein neues Erdzeitalter einzuführen: das Anthropozän. Der genaue Beginn dieses „Menschenzeitalters“ ist noch nicht abschließend geklärt. Die Belastungen des natürlichen Erdsystems durch menschliche Einwirkungen nehmen jedenfalls in hohem Maße zu. Dadurch besteht die Gefahr, dass – etwa durch den Verlust des Amazonas-Regenwalds – bestimmte Kipppunkte erreicht werden, was schlimmstenfalls zu irreversiblen Veränderungen führt.

Man kann das Anthropozän auch durch die Entstehung eines neuen funktionellen Teils im großen Stoffwechselsystem der Erde beschreiben: der sogenannten Technosphäre. In ihrer physischen Beschaffenheit umfasst diese sämtliche menschengemachten Artefakte, Bauten, Landnutzungs- und Energiesysteme, die allein schon eine geschätzte Masse von 30 Billionen Tonnen auf die Waage bringen. Die historische Evolution der Technosphäre ist komplex und geschah über lange Zeiträume. Auch wenn mit der Industrialisierung und mit dem sich beschleunigenden technischen Fortschritt seit Mitte des 20. Jahrhunderts die Rate menschengemachter Einflüsse auf den Planeten drastisch

zugenommen hat, so liegen die sozialen, ökonomischen, technologischen und umweltverändernden Wurzeln des Anthropozäns viel weiter in der Vergangenheit. Vom Beginn des Ackerbaus über die Ankunft der Europäer auf dem amerikanischen Doppelkontinent bis hin zum damit einsetzenden globalen Warenaustausch – bereits frühe Gesellschaften schufen die Voraussetzungen für den fundamentalen Umbruch, den das Erdsystem heute erfährt.

Der Blick auf die Tropen

Ein Beispiel von besonderer Bedeutung sind die Tropenwälder. Angesichts der ökologischen Bedeutung der Tropen und der prognostizierten Zunahme der Bevölkerung und des Städtewachstums wird es immer wichtiger zu verstehen, wie Technologien, sozioökonomische Systeme, Landnutzung und das Erdsystem in diesen Regionen über die Zeit hinweg interagiert haben. Neuere archäologische, historische und paläoökologische Forschungsergebnisse verdeutlichen, wie sich die frühere menschliche Landnutzung – von Brandrodung bis zur Urbanisierung – auf Pflanzen, Tiere, Böden und sogar das Klima ausgewirkt hat. In einem



Die globale Vernetzung der Tropenwälder mit unterschiedlichen Erdkreisläufen und Interaktionen mit der Technosphäre

Wasserkreislauf: Tropenwälder tragen zu Wolkenbildung und Niederschlag bei.

Kohlenstoffkreislauf: Tropische Wälder gelten als wichtige CO₂-Senken.

Artenvielfalt: Mehr als die Hälfte aller Pflanzen- und Tierarten leben in den Tropenwäldern.

Feuer: Dürren und Hitze-stress führen dazu, dass die Tropenwälder anfälliger für Waldbrände werden, die zu zusätzlichen CO₂-, Methan- und Partikelemissionen führen.

Boden: Durch ihr umfangreiches Wurzelwerk und ihre Vegetationsdecke helfen die Tropenwälder bei der Stabilisierung der Böden.

interdisziplinären Projekt am Max-Planck-Institut für Geoanthropologie haben Forschende verschiedener Abteilungen die Auswirkungen frühen menschlichen Handelns auf die natürliche Funktion der Tropenwälder erforscht und den Tropengürtel im Kontext der globalen Herausforderungen des Anthropozäns beleuchtet.

Schwellenwerte tropischer Landnutzung

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben bei der Landnutzung tropischer Regenwälder durch den Menschen in den letzten 10.000 Jahren drei wesentliche Schwellen identifiziert. Die ersten beiden markieren den Beginn der Lebensmittelproduktion sowie neue Besiedlungsformen. Viele Nahrungsmittel, die wir heute global als selbstverständlich erachten – wie Mais, Huhn oder Schokolade –, stammen ursprünglich aus den

Tropen. Die Verbreitung von Reis und Wasserbüffeln in den Tropenwäldern ging oftmals mit einem Anstieg von Rodungen, Bodenerosion und Emissionen einher. Es ist auch anzunehmen, dass die beginnende Urbanisierung in den Tropen vor rund 1000 bis 2000 Jahren verstärkt Druck auf die Tropen als Lebensraum ausgeübt hat. Neue Informationen und Technologien wurden in Umlauf gebracht und gebietsfremde Arten breiteten sich aus.

Der dritte Schwellenwert beschreibt die Ankunft der Europäer und den späteren US-Kolonialismus und Imperialismus. Waren Europa und Amerika zuvor voneinander isoliert, wurden sie nun mit dem Eintreffen der iberischen Kolonialmächte direkt verbunden und in ein weltumspannendes ökonomisches Verwertungssystem eingegliedert. In der Folge wurde großflächig mit wilden und domestizierten Tier- und Pflanzenarten gehandelt, was Landschaften auf der ganzen Welt dauerhaft veränderte. Die Ausbreitung von Krankheiten sowie der



durch die Kolonialmächte praktizierte Sklavenhandel und die von ihnen ausgeübte Gewalt hatten drastische Auswirkungen auf die indigene Bevölkerung und deren Landnutzung.

Möglicherweise wurden schon damals Rückkopplungsmechanismen des Erdsystems dauerhaft verändert. Die Marginalisierung indigener Praktiken der Landnutzung und die Verbreitung des Kolonialsystems, basierend auf Landrodung aus Profitstreben sowie Zwangs- und Sklavenarbeit, setzten sich noch bis in das 20. Jahrhundert fort. Die Auswirkungen auf globale Ungleichheiten und mangelnde Nachhaltigkeit sind bis heute spürbar.



Von der Vergangenheit in die Zukunft

Das Max-Planck-Institut für Geoanthropologie nutzt den Blick in die Vergangenheit, um Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft besser zu verstehen. Mit Hilfe eines transdisziplinären Ansatzes und innovativer Methoden können wir die Entstehung sozioökonomischer Ungleichheiten Hunderte von Jahren zurückverfolgen und ihren Zusammenhang mit der sich formierenden Technosphäre untersuchen. Indem wir den Einfluss des Menschen auf die Tropen erforschen, gewinnen wir insbesondere einen tieferen Einblick in die langfristigen Folgen des westeuropäischen und nordamerikanischen Konsums. Dieser Ansatz hilft uns auch, indigene und andere, besonders betroffene Bevölkerungsgruppen im Kampf gegen den Klimawandel zu unterstützen. Neue Einsichten in die regionalen und globalen Zusammenhänge zwischen Technologien und sozioökonomischen Trends sowie Bodenqualität, Klima und biologischer Vielfalt ermöglichen nicht nur ein besseres Verständnis des aktuellen und zukünftigen Erdsystems. Sie sind auch die Grundlage für Handlungsoptionen von Gesellschaft und Politik. [o](#)

Reis dient großen Teilen der Weltbevölkerung als Grundnahrungsmittel. Schon in der Vergangenheit wurden große Flächen gerodet, um

Reisterrassen anzulegen. Der Anbau benötigt viel Wasser und verursacht Methanemissionen, die das Klima belasten.



9 Gedränge im Zellkern

EUGENE KIM

Max-Planck-Institut
für Biophysik,
Frankfurt am Main

In jedem Kern unserer Zellen befindet sich ein zwei Meter langer Molekülfaden, die DNA. Trotz der Enge muss dessen Information ständig zuverlässig abgerufen werden. Zum Glück hat die Natur eine Lösung gefunden: Proteine, die die DNA sicher verpacken und gleichzeitig ihre Aktivität steuern. Mein Team und ich untersuchen, wie sie das machen.

Viele kennen ihn noch aus den Zeiten von Kassettenrecordern: den Bandsalat. Die Natur kann sich ein solches Durcheinander dagegen nicht leisten. Doch wie bekommt man Ordnung, wenn man ein zwei Meter langes DNA-Molekül in einem Zellkern unterbringen muss, der nur wenige Tausendstel Millimeter groß ist? Das entspricht einem 20 Kilometer langen Wollfaden in einem Tischtennisball. Dieses Problem haben unsere Zellen mit ihrem Erbgut. Die Lösung: Das DNA-Molekül wird stark verdrillt.

Mein Team und ich wollen herausfinden, wie die DNA aufgewickelt wird und wie die so entstehenden räumlichen Strukturen die Funktionen des Erbguts beeinflussen. Um die Antworten auf diese Fragen zu finden, wenden wir eine Reihe modernster mikroskopischer Techniken an. Damit möchten wir die Prinzipien entschlüsseln, die der Organisation des Erbmaterials zugrunde liegen.

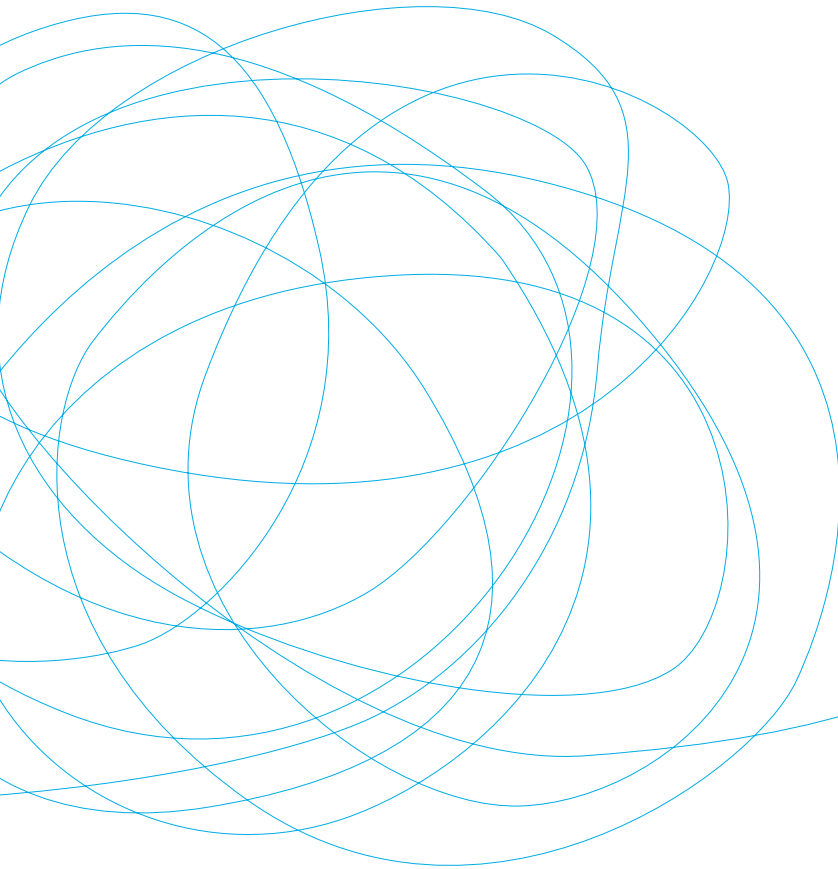
DNA platzsparend zu verpacken ist eine Sache – doch sie muss auch zugänglich sein, zum Beispiel bei der Zellteilung oder beim Ablesen der Gene. Dabei darf kein Durcheinander entstehen, denn für das Leben ist es unabdingbar, dass Erbinformationen sicher verwahrt und weitergegeben werden. Was also verhindert einen DNA-Salat?

Die Lösung der Natur sind Smc-Proteinkomplexe – die Abkürzung Smc stammt aus der englischen Bezeichnung Structural Maintenance of Chromosomes (Strukturerhaltung der Chromosomen). Diese Proteinkomplexe legen die DNA in Schlaufen. Man weiß heute, dass sie aus ringförmig angeordneten Proteinen und Protein-Untereinheiten bestehen. Auf diese Weise können sie das DNA-Molekül umfassen. Zur genauen Arbeitsweise vor allem eines Vertreters dieser Proteine, Smc5/6, gab es allerdings bis vor Kurzem nur Vermutungen.

DNA bildet Schlaufen

Um das zu ändern, haben wir die DNA und Smc5/6-Proteine mit fluoreszierenden Farbstoffen markiert. So konnten wir in Echtzeit beobachten, dass Smc 5/6 die DNA ähnlich wie die übrigen SMC-Proteine ebenfalls in Schlaufen legt. Einzelne rot markierte Smc5/6-Proteine fahren dabei immer in einer Richtung an der türkis gefärbten DNA wie die Waggons einer Achterbahn entlang. Damit sich Schlaufen bilden, müssen sich zwei Smc5/6-Proteine zusammenlagern und ein sogenanntes Dimer bilden.

Jedes Protein des Dimers besitzt einen unabhängigen molekularen Motor, der den jeweiligen Teil



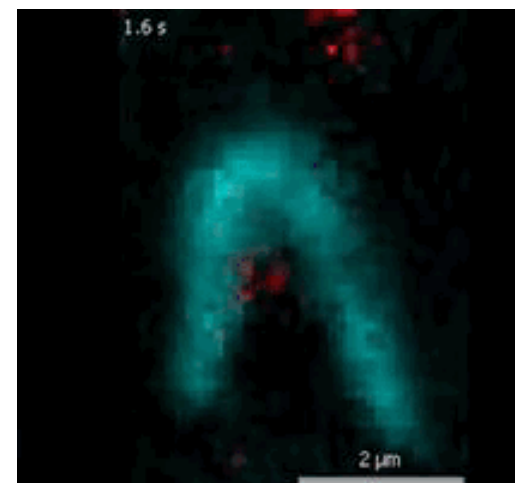
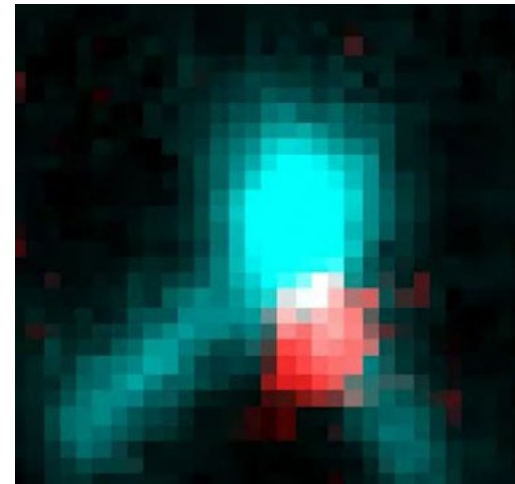
Kontrollierte Schlaufenbildung

Wir haben zudem entdeckt, dass zwei Proteinuntereinheiten die Aktivität von Smc5/6 kontrollieren. Ohne sie werden immer weiter Schlaufen geformt. Als Nächstes möchten wir noch besser verstehen, wie diese beiden Untereinheiten in der Zelle aktiviert und deaktiviert werden, um die Schlaufen und somit das Ablesen der Gene zu regulieren. Diese Erkenntnisse haben auch medizinische Bedeutung, denn wenn die SMC-Proteine Fehler machen, kann das Erbgut geschädigt werden. Erbkrankheiten, Entwicklungsstörungen oder Krebs sind die Folge. Wenn wir wissen, wie solche Defekte entstehen, können wir Methoden entwickeln, die Schäden zu beheben oder ihnen vorzubeugen. [o](#)

des DNA-Doppelstrangs einspult. Dadurch bilden sich die Schlaufen beider Stränge symmetrisch. Bemerkenswert ist die Geschwindigkeit, mit der die SMC-Proteine arbeiten: Ein einzelner Protein-Komplex kann Zehntausende von DNA-Bausteinen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1000 Bausteinen pro Sekunde durchschleusen.

Auf diese Weise wird der DNA-Faden platzsparend verpackt, ohne dass ein Durcheinander entsteht. Die Form der Schlaufen hilft der Zelle zu steuern, welche Proteine hergestellt werden sollen: Die Gene im äußeren Bereich der Schlaufe sind leichter zugänglich und können dadurch leichter abgelesen werden. An der Basis der Schlaufen kommen zudem DNA-Abschnitte, die normalerweise weit voneinander entfernt sind, einander nahe und können sich gegenseitig beeinflussen. All dies ermöglicht der Zelle, die Aktivität von Genen hochzufahren, wenn sie wächst oder sich teilt, oder zu hemmen, wenn die zugehörigen Proteine in ausreichender Menge vorhanden sind.

Mit Farbstoffen markierte DNA (türkis) und Smc5/6-Proteine (rot) lassen sich unter dem Mikroskop beobachten. Smc5/6 bindet an die DNA (oben) und formt eine Schlaufe (unten).



10 Ein Programm für ein besseres Arbeitsklima

MATTHIAS SUTTER

➤ *Max-Planck-Institut
zur Erforschung von
Gemeinschaftsgütern, Bonn*

Toxische Beziehungen am Arbeitsplatz, die durch unsoziales und unethisches Verhalten gekennzeichnet sind, haben erhebliche negative Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Mitarbeitenden. Wir präsentieren ein Feldexperiment, in dem wir durch ein innovatives Trainingsprogramm das Betriebsklima verbessern und die Mitarbeiterfluktuation reduzieren konnten. Die positiven Auswirkungen des Programms sind vor allem auf die besseren Beziehungen zwischen Führungskräften und Teammitgliedern zurückzuführen.

Ein positives Betriebsklima ist entscheidend für die Motivation, das Engagement und die Bindung von Mitarbeitenden in einem Unternehmen. Obwohl dieser Zusammenhang intuitiv ist, sind Arbeitsplätze mit toxischem Beziehungsklima allgegenwärtig. In vielen Unternehmen sind toxische Beziehungen zur Hauptursache für Burn-out und die Kündigung von Mitarbeitenden geworden. Dabei kündigen Mitarbeitende mehrheitlich wegen ihrer Führungskraft, nicht wegen des Unternehmens an sich.

Toxizität am Arbeitsplatz zeigt sich daran, dass antisoziale Verhaltensweisen wie Mobbing, Tratsch und der häufige Gebrauch von respektloser und herablassender Sprache vorherrschen. Wenn Führungskräfte ein solches Verhalten annehmen, kann es schnell zur Norm am Arbeitsplatz werden. In einer im Jahr 2023 erschienenen Arbeit haben wir ein innovatives Schulungsprogramm evaluiert, das darauf abzielt, toxische Beziehungsdynamiken in Unternehmen zu beseitigen. Das Programm wurde 3.000 Angestellten in 20 großen Unternehmen in der Türkei angeboten. Diese Unternehmen sind in sechs Branchen tätig: Energie, Chemie, Verteidigung, Finanzen, Bauwesen und Textilien. Eine nach Zufall ausgewählte Hälfte dieser 20 Unternehmen nahm vor der anderen Hälfte an der Schulung teil, sodass wir die kausalen Auswirkungen

des Programms auf die Beziehungsatmosphäre in den Unternehmen bewerten konnten.

Bei der Bewertung des Betriebsklimas stützten wir uns auf vier Messinstrumente: Wir werteten erstens die Personaldaten über Mitarbeiterfluktuation aus und maßen zweitens anhand von Laborexperimenten die pro- und antisozialen Verhaltensweisen, einschließlich der Tendenz zu toxischem Wettbewerb. Drittens evaluierten wir anhand von Umfragen zum Betriebsklima die Zufriedenheit am Arbeitsplatz, die Wahrnehmung der Werte innerhalb des Unternehmens, die Kollegialität, Verhaltensnormen sowie präskriptive Normen. Viertens ermittelten wir die beruflichen Netzwerke im Unternehmen. Dazu sollten die Mitarbeitenden höchstens drei Kolleginnen und Kollegen benennen, von denen sie berufliche Unterstützung erhalten. Anhand dieser Informationen können wir die sozialen Netzwerke und die Bindung an die Führungskraft messen.

Training für ein besseres Miteinander

Bei der Umsetzung des Schulungsprogramms arbeiteten wir mit einem Beratungsunternehmen zusammen. Dieses wurde von ehemaligen Unternehmensfachleuten gegründet, die sich gegen ein toxisches Betriebsklima engagieren. Der Inhalt des Schulungsprogramms



Eine Schlüsselrolle für die Beziehungskultur am Arbeitsplatz spielen die Führungskräfte.

konzentrierte sich auf die Vorteile sozialen Verhaltens am Arbeitsplatz und die Bedeutung einer professionellen Kommunikation. Das Programm stand allen Mitarbeitenden offen, doch wurden insbesondere die Führungskräfte zur Teilnahme ermutigt.

Die Schulung bestand aus zwei Phasen: Die erste Phase umfasste eine Reihe von Workshops, vor allem zu den Themen respektvolle Kommunikation, Verständnis für die Standpunkte der Kolleginnen und Kollegen und Toleranz gegenüber anderen Meinungen. Die Sitzungen waren sehr interaktiv und wurden mit innovativen Mitteln wie kreativem Theater und Rollenspielen gestaltet. In der zweiten Phase wurden die Teilnehmer aufgefordert, Projekte zur Verbesserung der Kommunikation und der Beziehungskultur in ihren Unternehmen zu entwickeln. Nach achtwöchiger Teamarbeit präsentierten die teilnehmenden Teams ihre Projekte der oberen Führungsebene und setzten sie in die Praxis um.


Weniger toxischer Wettbewerb

Das Schulungsprogramm hatte signifikante positive Auswirkungen auf die meisten der von uns betrachteten Bereiche: Die Fluktuation von Mitarbeitenden, insbesondere auf Führungsebene, war in den Unternehmen, die das Programm anboten, niedriger als in der Kontrollgruppe. Die Mitarbeitenden dieser Unternehmen zeigten zudem weniger unsoziale Tendenzen am Arbeitsplatz: Sie neigten weniger zu toxischem Wettbewerb und erwiderten das Vertrauen ihrer Kolleginnen und Kollegen großzügiger als die Mitarbeitenden in den Kontrollunternehmen.

Die positiven Auswirkungen auf das prosoziale Verhalten gingen einher mit einer höheren Zufriedenheit am Arbeitsplatz, mit stärker wahrgenommenen Werten im Unternehmen und mehr Kollegialität in der Abteilung. Auch die sozialen Netzwerke innerhalb des Unternehmens profitierten von dem Schulungsprogramm: Ein erschreckend hoher Anteil von 13 % der Beschäftigten in den Kontrollfirmen hatte angegeben, dass ihnen die fachliche Unterstützung durch ihre Kolleginnen und Kollegen fehlte. Durch die Schulung sank dieser Anteil auf acht Prozent.

Starke soziale Netzwerke

Eine Schlüsselrolle für die Beziehungskultur am Arbeitsplatz spielen die Führungskräfte. Wir konnten die positiven Auswirkungen des Trainingsprogramms hauptsächlich darauf zurückführen, dass sich deren Einstellung gegenüber den Teammitgliedern verbesserte. Letztere berichteten über eine höhere Qualität der Führung in ihren Unternehmen. Insbesondere nahmen sie ihre Führungskräfte als professioneller und einfühlsamer wahr.

Unsere Studie zeigt, dass ein innovatives Schulungsprogramm toxischen Wettbewerb wirksam reduzieren, prosoziale Handlungen steigern, soziale Netzwerke stärken und die Mitarbeiterfluktuation in Unternehmen senken kann. Die Ergebnisse unterstreichen, wie wichtig Prosozialität für ein gesundes Betriebsklima in großen Unternehmen ist. Das gilt sowohl für die alltäglichen Interaktionen als auch für die professionellen Beziehungen zwischen Führungskräften und Teammitgliedern. 

11 **Mysteriöse Meiose**

**LINDA
ODENTHAL-HESSE**

➤ *Max-Planck-Institut
für Evolutionsbiologie, Plön*

Wenn Menschen ungewollt kinderlos bleiben, wird dies in der Regel auf weibliche Unfruchtbarkeit zurückgeführt. Tatsächlich ist die Unfruchtbarkeit aber bei Männern und Frauen bis ins mittlere Alter etwa gleich häufig. Meine Forschungsgruppe erforscht, wie Spermien gebildet werden. Unsere Forschung könnte die Basis für künftige Therapien gegen Unfruchtbarkeit sowie für Verhütungsmittel für Männer sein.

Spermien entstehen aus Vorläuferzellen, die eine besondere Form der Zellteilung durchlaufen, die sogenannte Meiose. Bevor das Erbgut gleichmäßig auf die Spermienzellen verteilt wird, wird es neu gemischt. Jedes Spermium ist dadurch genetisch einzigartig. Dieser Vorgang, auch Rekombination genannt, erhöht die genetische Vielfalt einer Art.

Fehler bei der Rekombination können die Gesundheit und die Entwicklung eines Individuums massiv beeinträchtigen. Im männlichen Organismus besitzt die Meiose eine eingebaute Qualitätskontrolle, die es ermöglicht, kranke Zellen während der Meiose zu eliminieren. Werden jedoch wichtige Proteine, die den Ablauf der Meiose steuern, nicht gebildet, sterben nach und nach alle Vorläuferzellen ab, und Unfruchtbarkeit ist die Folge.

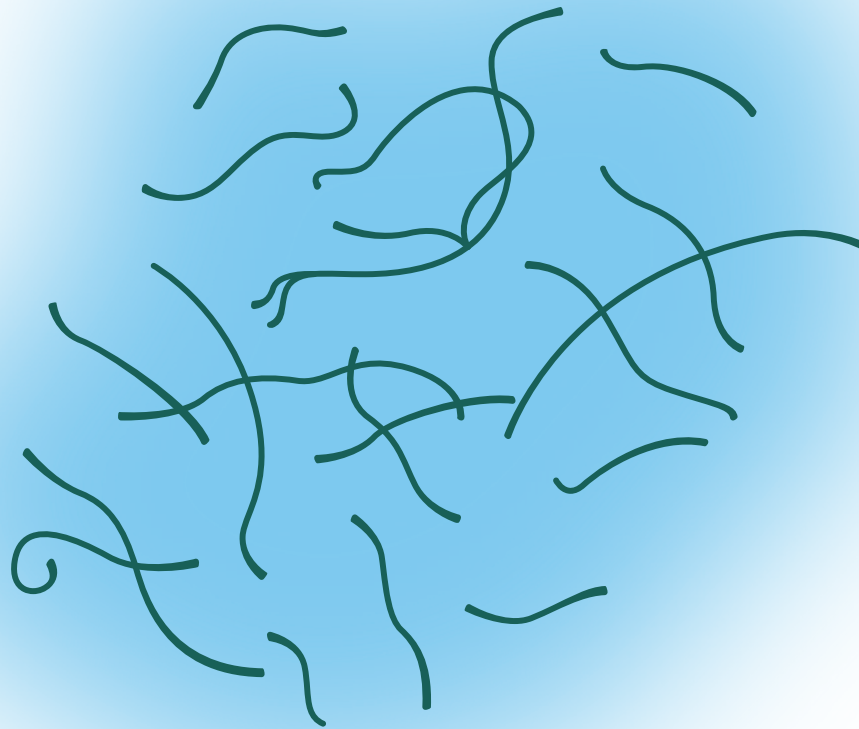
Mein Team und ich interessieren uns für die Moleküle, die Meiose und Rekombination steuern. Das Protein PRDM9 spielt dabei eine zentrale Rolle. Es platziert Signalmoleküle und bestimmt so auf epigenetische Weise, an welchen Stellen Rekombination stattfindet und das Erbgut neu gemischt wird. Es verhindert, dass sich das Ablesen von Genen und die Rekombination in die Quere kommen. Diese Form der Epigenetik steuert also nicht die Aktivität von Genen, sondern die Rekombination des Erbguts – eine bislang

unbekannte Eigenschaft epigenetischer Kontrolle. Außerdem steuert PRDM9 verschiedene weitere Proteine, die zusammen den Austausch von Teilen der Chromosomen einleiten können.

Wir wollen herausfinden, wo Rekombination am häufigsten stattfindet – wo also die Hotspots liegen. Diese Orte sind nicht bei allen Arten gleich. Das Erbgut von Schimpanse und Mensch stimmt zwar zu 98,8 Prozent überein, die Schwerpunkte der Rekombination liegen jedoch an völlig anderen Orten. Selbst zwischen Individuen derselben Population unterscheiden sich die Hotspots. Grund dafür ist die schnelle Evolution des PRDM9-Proteins. Menschen und andere Tierarten haben deshalb viele unterschiedliche Formen des Proteins herausgebildet. Die Hausmaus besitzt zum Beispiel hunderte PRDM-Formen. Dies hat zur Folge, dass die männlichen Nachkommen von Hausmäusen verschiedener Unterarten unfruchtbar sind.

Fruchtbare Kreuzungen

Andere Säugetiere können jedoch fruchtbare Nachkommen erzeugen, selbst wenn ihnen PRDM9 fehlt. Obwohl die Vorfahren der Haushunde, Wölfe und Füchse das Protein vor rund 14 Millionen Jahren verloren haben, erzeugen diese Arten fortpflanzungsfähige Jungtiere.



Fehlerhafte Meiose in einer Vorläuferzelle einer Maus, die keine gesunde Spermien bilden wird. Anstelle von klar voneinander getrennten Paaren homologer Chromosomen (grün) sind komplexe Muster aus mehreren nicht-homologen Chromosomen entstanden, die fälschlicherweise miteinander zu rekombinieren versuchen.

Beispiele sind der Tschechoslowakische Wolfshund, eine Kreuzung aus Deutschem Schäferhund und Karpatenwolf, oder Coywölfe in den USA (Kojote-Wolf-Hybriden). Auch viele Fisch- und Amphibienarten sowie Krokodile und Vögel kommen ohne PRDM9 aus. Es muss also noch andere Wege geben, die Rekombination während der Meiose zu steuern.

Regulation der Fruchtbarkeit

Wir untersuchen derzeit die Rekombinationsmuster in Spermienzellen von Tieren ohne PRDM9, zum Beispiel Hunde und Singvögel, und vergleichen sie mit denen von PRDM9-regulierten Hotspots von Mäusen. Darüber hinaus interessieren wir uns für einen weiteren Regulator von Fruchtbarkeit und Rekombination auf einem zuvor nicht analysierten Abschnitt auf dem weiblichen X-Chromosom von Mäusen. Außerdem haben wir den Abschnitt identifiziert, der mit PRDM9 wechselwirkt. Indem wir die Anzahl kleiner regulatorischer Moleküle variieren, können wir verhindern oder erleichtern, dass die Chromosomen zusammenfinden.

Das Wissen darüber, welche Gene die Meiose anschalten, könnte es in Zukunft ermöglichen, die Meiose und damit die Bildung von Spermien zu unterbrechen. Da bei Männern die Meiose kontinuierlich abläuft, würde diese nach Absetzen des Wirkstoffs sofort wieder einsetzen. So ließe sich die Fruchtbarkeit jederzeit wieder herstellen. **o**

12 Per Tandemreaktion zu sauberen Treibstoffen

**ANDREAS J.
VORHOLT**

➤ *Max-Planck-Institut
für Chemische
Energiekonversion,
Mülheim an der Ruhr*

Die E-Mobilität ist wichtiger Teil der Energiewende. Doch nicht bei allen Verkehrsmitteln wird eine Abkehr von Verbrennungsmotoren gelingen. Beispiele dafür sind etwa der Straßenschwertransport oder auch die Schifffahrt. Für diese Bereiche sind nachhaltige Kraftstoffe erforderlich. Wir entwickeln Katalysatoren und Produktionsverfahren, um solche Kraftstoffe mit grünem Strom aus Wasser sowie CO₂ oder biologischen Abfällen herzustellen – mit ersten Erfolgen.

Schätzungen zufolge ist alleine der globale Schiffsverkehr für drei Prozent der weltweiten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich. Hinzu kommen Feinstaub- und Stickoxid-Emissionen, die ebenfalls verursacht. Hier können aus erneuerbaren Rohstoffen erzeugte und sauber verbrennende Alternativen zum Schiffsdiesel einen wichtigen Nachhaltigkeitsbeitrag leisten.

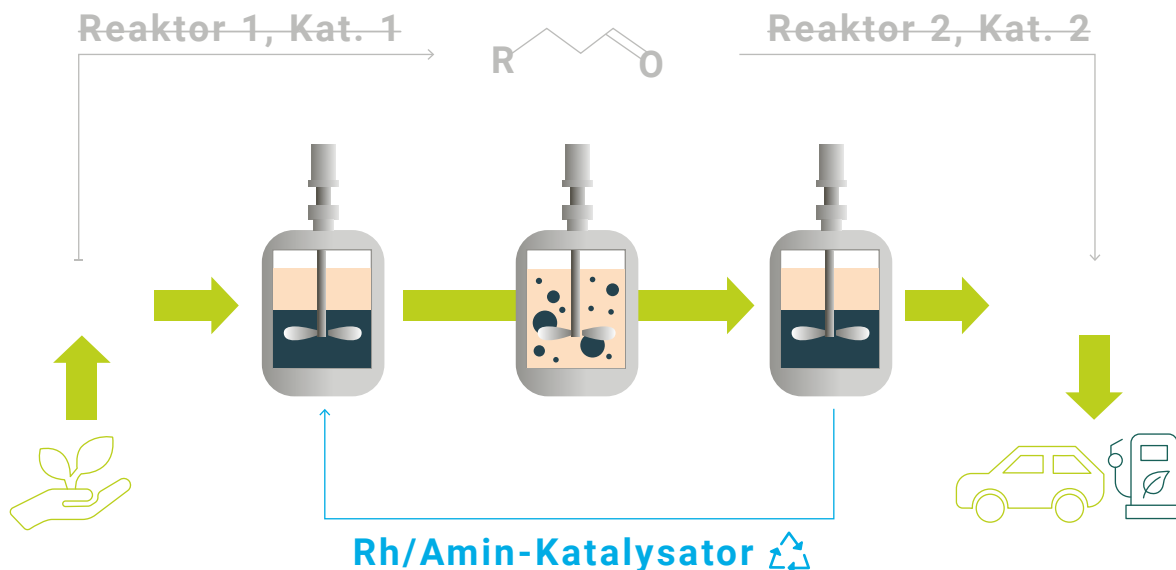
An der RWTH Aachen beschäftigt sich das „Fuel Science Center“ (FSC) mit solchen alternativen Kraftstoffen. Dabei sind zum einen nachhaltige Synthesewege wichtig, zum anderen aber auch, dass die Kraftstoffe möglichst sauber und emissionsarm verbrennen. Als besonders attraktive Kraftstoffkandidaten gelten Mischungen aus gesättigten Kohlenwasserstoffen und langkettigen Alkoholen. Letztere enthalten Sauerstoffatome, was dafür sorgt, dass die Gemische in der Regel sauberer verbrennen und weniger Ruß entsteht als etwa bei herkömmlichem Schiffsdiesel. Auch die Emission von Stickoxiden (NOx) geht zurück, wenn Alkohole Teil

des Verbrennungsgemischs sind. Dieses ist gerade für die Schifffahrt ein weiterer wichtiger Faktor, denn anders als unsere Kfz-Flotte verfügen Schiffe üblicherweise nicht über einen Abgaskatalysator zum NOx-Abbau.

Das Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion ist am FSC beteiligt. Unsere Aufgabe ist es, für die Kraftstoffe einen potenziell CO₂-neutralen Syntheseweg zu entwickeln, der sich auch im industriellen Maßstab realisieren lässt. Letzteres ist nicht selbstverständlich, denn nicht alles, was in kleinen Laborgefäßen gelingt, funktioniert auch in größeren Reaktoren.

Langkettige Alkohole ohne Erdöl

Ein besonderer Fokus bei dieser Arbeit lag bisher auf den genannten langkettigen Alkoholen, die üblicherweise sechs oder mehr Kohlenstoffatome enthalten. Die Synthese solcher Alkohole erfolgt klassischerweise durch die sogenannte reduktive Hydroformylierung



Mit Tandemreaktionen in einem Gefäß (Bildmitte) lassen sich CO₂-arme Kraftstoffe etwa aus Biomasse einfacher herstellen als mit zwei separaten Reaktionen, wie ein Mülheimer Team an verschiedenen Prozessen zeigt. Es ist dann nicht mehr nötig, die beiden Prozessschritte in zwei Reaktoren mit verschiedenen Katalysatoren durchzuführen.

von Alkenen. Das sind Kohlenwasserstoffe, bei denen zwischen zwei ihrer C-Atome eine Doppelbindung besteht. Solche Alkene werden bisher üblicherweise aus Fraktionen des Erdöls gewonnen.

Wir haben nun eine Syntheseroute gesucht, die ohne fossile Rohstoffe auskommt und mit erneuerbarer Energie ausgeführt werden kann. Dies gelingt durch eine Kombination der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) mit der schon genannten Hydroformylierung (HF). Praktisch dabei: Für beide Reaktionen dienen Wasserstoff und Kohlenmonoxid, H₂ und CO, als Ausgangsstoffe. Wasserstoff kann durch die elektrolytische Spaltung von Wasser gewonnen werden, Kohlenmonoxid entweder ebenfalls elektrochemisch aus CO₂ oder durch Gasifizierung von Biomasse oder auch Kunststoffmüll. Beide Ausgangsstoffe lassen sich also klimaneutral, ressourcenschonend und nachhaltig erzeugen, wenn der nötige Strom für die Elektrolysen aus erneuerbaren Energien stammt.

Effektive Synthese in einem Reaktor

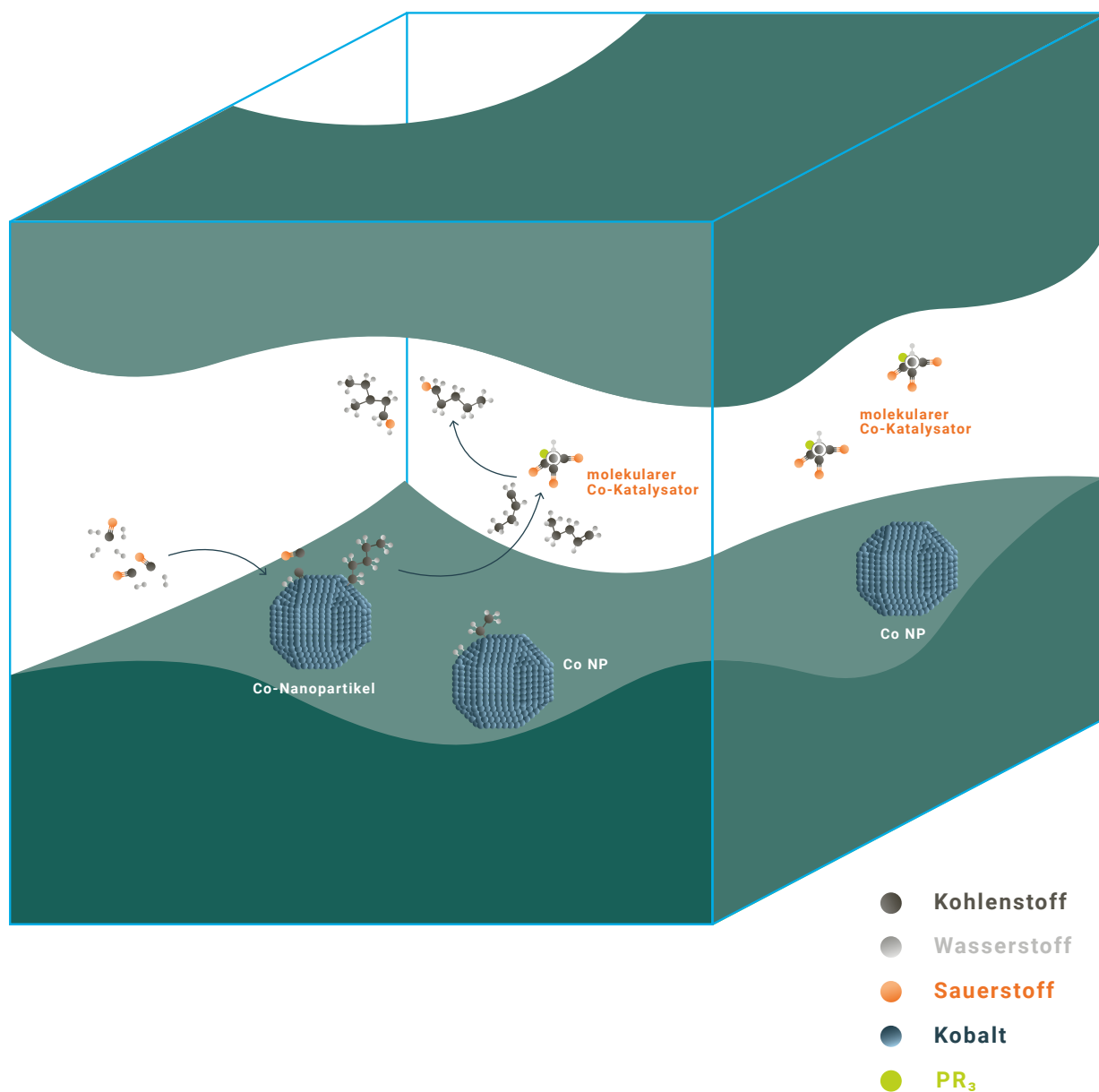
Die Fischer-Tropsch-Synthese wurde vor knapp 100 Jahren an einem Vorgänger-Institut des hier in Mülheim benachbarten Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung entwickelt. An einer geeigneten Katalysatoroberfläche werden dabei im Laufe der Synthese die Kohlenstoffatome aus den CO-Molekülen zu Kohlenstoffketten verknüpft und der Sauerstoff wird in Form von Wasser

abgetrennt. Am Ende einer FTS erhält man üblicherweise ein Gemisch aus Alkanen, also Kohlenwasserstoffen ohne Doppelbindung, und Alkenen. Durch die Wahl des Katalysators lässt sich das Mengenverhältnis von Alkanen und Alkenen steuern. Wir zielen auf einen hohen Anteil an Alkenen, weil wir aus diesen die gewünschten Alkohole erzeugen können. Auch die Länge der entstehenden Kette können wir über die Prozessführung in gewissem Rahmen beeinflussen. Die Hydroformylierung der entstandenen Alkene erfolgt dann an einem anderen Katalysator, der für die Reaktion der Doppelbindung mit H₂ und CO zum gewünschten Alkohol sorgt.

Die beiden Einzelschritte, FTS und HF, sind lange bekannt und industriell etabliert. Wir hatten nun die Idee, beide Schritte hintereinander im selben Reaktorsystem durchzuführen, um die nachhaltige Synthese von Alkoholen besonders effektiv und damit kostengünstig zu machen. Doch das ist schwieriger, als es klingt. Denn die jeweiligen Katalysatoren sind ganz unterschiedlicher Natur und haben ihr Einsatzoptimum daher auch bei verschiedenen Betriebsbedingungen. Für die FTS eignen sich Metalle wie Kobalt oder Eisen, während Katalysatoren für die Hydroformylierung in der Regel Komplexe sind, bei denen ein Metallatom noch von diversen Molekülresten umgeben ist. Gerade über deren Natur und Lage am Metallatom steuert man die Katalyse. Weil es sich hierbei – im Gegensatz zum metallischen FTS-Katalysator – um einen molekularen

Um in einem einzigen Reaktor CO_2 -arm langkettige Alkohole zu erzeugen, hat ein Mülheimer Team ein poröses Aluminiumoxid mit Nanopartikeln aus Kobalt (Co) präpariert. Daran bilden sich aus Kohlenmonoxid (CO) und

Wasserstoff (H_2), die im Reaktionsmedium in den Poren gelöst sind, zunächst Alkene, Kohlenwasserstoffe mit einer Doppelbindung. Diese werden an einem gelösten molekularen Katalysator, der ebenfalls Kobalt enthält, zu Alkoholen hydroformyliert.



Zwei Schritte im selben Reaktorsystem machen die nachhaltige Synthese von Alkoholen besonders effektiv.

Katalysator handelt, benötigen wir für diesen ein Lösungsmittel. Es gibt noch einen Unterschied: Während der metallische FTS-Katalysator umso besser arbeitet, je höher die Temperatur ist, wird der molekulare HF-Katalysator ab einer gewissen Temperatur zersetzt.

Poren mit zwei Katalysatoren

Und es kommt noch eine Herausforderung hinzu: Sobald sich ein gebildetes Alken von der Oberfläche des FTS-Katalysators löst, kann die bestehende C-C-Doppelbindung auch mit dem ebenfalls vorhandenen Wasserstoff reagieren. Statt einer Hydroformylierung findet dann eine Hydrierung statt. Eine Konkurrenzreaktion, die wir auf dem Weg zu den Alkoholen natürlich unterdrücken wollen. Wir brauchen also eine Anordnung, die es ermöglicht, dass die HF-Reaktion unmittelbar nach Freisetzung der Alkene von der Metalloberfläche erfolgt. Unglücklicherweise wird die Hydrierung gerade durch solche Katalysatoren gefördert, die auch für hohe Alken-Anteile bei den FTS-Produkten sorgen, also eigentlich vorteilhaft für unsere Zwecke wären.

Um alle Anforderungen zu berücksichtigen, haben wir gemeinsam mit Kollegen in Spanien ein geeignetes Reaktor- und Katalysatorkonzept entwickelt. Als FTS-Katalysator dient uns eine metallische Kobaltschicht, die wir auf einem hochporösen Trägermaterial mit definierter Porengröße auftragen. Das Ganze befindet sich suspendiert in einer Flüssigkeit, in der auch unser molekularer Katalysator, ein Kobaltkomplex, gelöst ist. Der poröse Charakter sorgt für eine große Kontaktfläche, an der die FTS stattfinden kann. Die Größe der Poren ist dabei so gewählt, dass auch die Katalysatormoleküle dort hineinpassen. Leitet man die Mischung aus CO und H₂ in diese Flüssigkeit ein, findet in den Poren an der Kobaltoberfläche die FTS statt. Lösen

sich die gebildeten Alkene, wird ein großer Teil von ihnen direkt von den Kobalt-Komplexen aufgenommen, hydroformyliert und zu Alkoholen reduziert. Das geht nur, weil die Komplexe, wie oben erwähnt, ebenfalls in die Poren gelangen. Wäre das nicht der Fall, würde sehr wahrscheinlich sofort die Hydrierung der Doppelbindungen einsetzen und unsere Alkoholausbeute reduzieren.

Kein zusätzlicher Energieaufwand

Wir führen diese Tandemreaktion bei rund 200 Grad Celsius durch. Das ist einerseits ausreichend hoch, damit das Kobaltmetall die FTS katalysiert, und andererseits nicht so hoch, dass der molekulare Kobaltkatalysator chemisch verändert wird. Übrigens ist für diese 200 Grad netto kein Energieaufwand nötig, denn sobald die Reaktionen einmal im Gang sind, unterhalten sie sich aufgrund der frei werdenden Wärme selbst. Eher muss gekühlt werden.

Am Ende haben wir mit diesem Ansatz Produktgemische erhalten, die bis zu 50 Prozent Alkohole enthalten. Das ist eine bisher beispiellose Quote. Der Rest sind Alkane, wie sie auch im klassischen Diesel-Kraftstoff vorkommen. Einen Anteil an reinen Kohlenwasserstoffen brauchen wir sowieso in künftigen Kraftstoffen, um gewisse Eigenschaftsnormen zu erfüllen. Da ist es natürlich schön, wenn auch dieser Anteil im Kraftstoff nachhaltig hergestellt wurde.

Trotz dieser Erfolge wäre es noch zu früh, das Ganze in eine industrielle Produktion zu überführen. Aktuell beschäftigen wir uns im Rahmen des EU-Projekts E-Tandem damit, unsere Doppelreaktion vom Labormaßstab auf eine größere Anlage zu übertragen. Dabei geht es auch um praktikable Lösungen dafür, wie wir den molekularen Katalysator von den entstandenen Produkten abtrennen und wiederverwenden können.

Wenn E-Tandem erfolgreich ist, können wir vielleicht dazu beitragen, dass wir eines Tages sauber verbrennende, dieselartige Kraftstoffe aus vollständig erneuerbaren Rohstoffen und Energien erzeugen können. Das wiederum kann den CO₂-Fußabdruck etwa des globalen Schiffsverkehrs und des Schwerlastverkehrs spürbar senken. Das ist eine schöne Aussicht. **o**

13 Umbau im Knochen

**RALF-HEINRICH
ADAMS**

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

Blutgefäße in den Knochen fördern die Knochenbildung, sind aber auch an dem mit Osteoporose verbundenen übermäßigen Knochenverlust maßgeblich beteiligt. Zusammen mit meinem Team möchte ich ihre Rolle dabei besser verstehen und so Möglichkeiten für neue Therapien gegen Osteoporose und andere Alterserkrankungen eröffnen.

Knochen wirken auf den ersten Blick trocken und tot. Tatsächlich sind sie jedoch sehr lebendig, und wie andere Organe auch werden sie ständig umgebaut. Zwei Zelltypen halten den Auf- und Abbau im Gleichgewicht: Sogenannte Osteoblasten bilden neuen Knochen, Osteoklasten dagegen bauen Knochenmaterial ab. Mit dem Älterwerden verschiebt sich dieses Gleichgewicht zugunsten der Osteoklasten und des Abbaus von Knochensubstanz. Sinkt die Knochendichte zu stark, kann Osteoporose die Folge sein. Patienten haben dadurch ein erhöhtes Risiko für Knochenbrüche, Bewegungseinschränkungen und chronische Schmerzen. Rund zehn Prozent der Menschen in der Europäischen Union sind von Osteoporose betroffen, darunter vor allem ältere Menschen.

Momentan verfolgen Therapien zwei Ansätze: die Blockade der knochenabbauenden Osteoklasten oder die Aktivierung der knochenaufbauenden

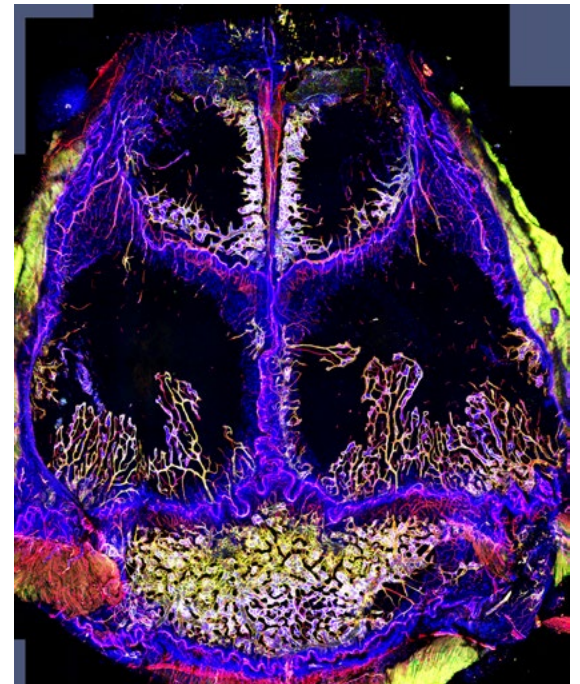
Osteoblasten. Beide Ansätze wirken jedoch nur eingeschränkt und bringen unerwünschte Nebenwirkungen mit sich. Es besteht also hoher Bedarf an neuen Behandlungsmöglichkeiten.

Blutgefäße beeinflussen Knochenwachstum

Das kilometerlange Blutgefäßsystem versorgt sämtliche Zellen des Körpers mit Sauerstoff und Nährstoffen. Außerdem senden die Gefäßzellen Signale aus, die auf andere Zellen wirken. Zusammen mit meinen Kolleginnen und Kollegen erforsche ich den Einfluss dieses Transportnetzes auf Wachstum, Struktur und Heilung der Knochen mit einem breiten Spektrum unterschiedlicher Methoden. Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass bei älteren Mäusen bestimmte kleine Gefäße, die als Kapillaren bezeichnet werden und die



*Blutgefäße (rot) im Schädel
einer erwachsenen Maus
(blau: Zellkerne)*



Knochenbildung anregen, weitgehend verschwunden sind. Wenn wir den Tieren bestimmte Signalstoffe verabreichen und so die Bildung dieser Kapillaren wieder anregen, entsteht neues Knochenmaterial. Nun stellt sich die Frage: Lässt sich Knochenschwund auch beim Menschen auf diese Weise behandeln?

Bis vor Kurzem konnten wir die Abläufe in dichten, stark kalkhaltigen Knochen kaum beobachten. Unser Team hat nun jedoch eine Methode entwickelt, mit der wir das Knochenmaterial so aufbereiten, dass wir es mit hochauflösenden Mikroskopen untersuchen können. Damit haben wir herausgefunden, dass sich die Bildung neuer Blutgefäße in Knochen grundlegend von der in anderen Organen unterscheidet. Wir haben in den verschiedenen Knochenbereichen zwei verschiedene Sorten von Kapillaren mit unterschiedlichen Funktionen entdeckt: Die sogenannten Typ-H-Kapillaren sind von Vorläuferzellen für Osteoblasten umgeben und bewirken über die Abgabe von Wachstumsfaktoren und anderen Signalen, dass sich Bereiche mit Knorpelzellen in feste Knochensubstanz umwandeln. Diese Kapillaren haben eine wichtige Bedeutung für das Knochenwachstum in der frühen Entwicklung und für die Heilung von Knochenbrüchen.

Typ-R-Kapillaren wiederum beeinflussen die Vorläuferzellen der Osteoblasten und verstärken so die Bildung von Knochentrabekeln, eines Netzwerks aus Gewebe im Knocheninnern. Manche Therapien gegen Osteoporose setzen daher auf die Aktivierung dieser Kapillaren. Sie sind allerdings auch an Vorgängen beteiligt, die zum Verlust von Knochenmasse führen. Dieses komplexe Wechselspiel zwischen Blutgefäßen, Osteoklasten und Osteoblasten im Knochen müssen neue Therapieansätze berücksichtigen.

Alle unsere Knochen enthalten Knochenmark und blutbildende Zellen, sie unterscheiden sich aber stark in Form und Funktion. Während die langen Knochen der Gliedmaßen das Körpergewicht tragen, schützt der Schädel das Gehirn und andere Teile des Kopfes.

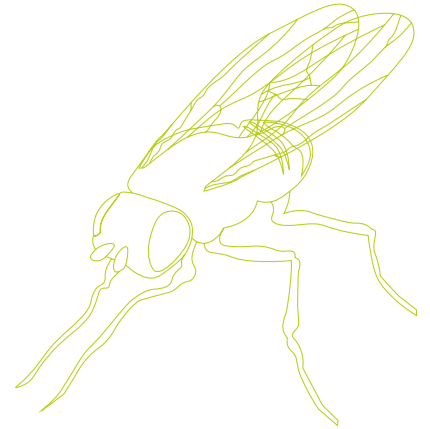
Unsere Untersuchungen an Mäusen zeigen, dass sich das Knochenmark des Schädeldaches während des gesamten Erwachsenenlebens bis ins hohe Alter aktiv erweitert – also an Umfang zunimmt – und auch das Gefäßsystem dabei kontinuierlich wächst. Im Gegensatz dazu ist die Knochenmarksbildung in den langen Knochen der Gliedmaßen mit Eintritt in das Erwachsenenalter abgeschlossen.

Besonderes Knochenmark im Schädel

Der Schädel ist noch in weiterer Hinsicht etwas Besonderes: Er ist vor manchen Alterungsprozessen geschützt. Während lange Skelettknochen in zunehmendem Alter mehr Entzündungsfaktoren und mehr Fettzellen aufweisen und ihre Blutgefäße durchlässiger werden, ist dies im Schädel nicht der Fall. Es zeigt sich, dass das Knochenmark im Schädel von Mäusen mittleren und höheren Alters unter anderem weniger Entzündungsfaktoren und weniger durchlässige Blutgefäße aufweist. Außerdem trägt es stärker zur Bildung von Blutzellen bei als das der langen Knochen. Auch beim Menschen unterscheidet sich das Knochenmark im Schädel offenbar grundlegend von dem der langen Knochen und erweitert sich im Laufe des Lebens.

Wenn es uns gelingt, dieses und andere Geheimnisse des Skelettsystems zu lüften, können wir eines Tages Knochenbrüche und Knochenschwund möglicherweise besser behandeln. Außerdem lernen wir viel darüber, welche Vorgänge im Alter ablaufen und wie sich altersbedingte Erkrankungen vorbeugen und heilen lassen. ○

14 Gene und Umwelt



LUISA F. PALLARES

↳ Friedrich-Miescher-
Laboratorium der
Max-Planck-Gesellschaft,
Tübingen

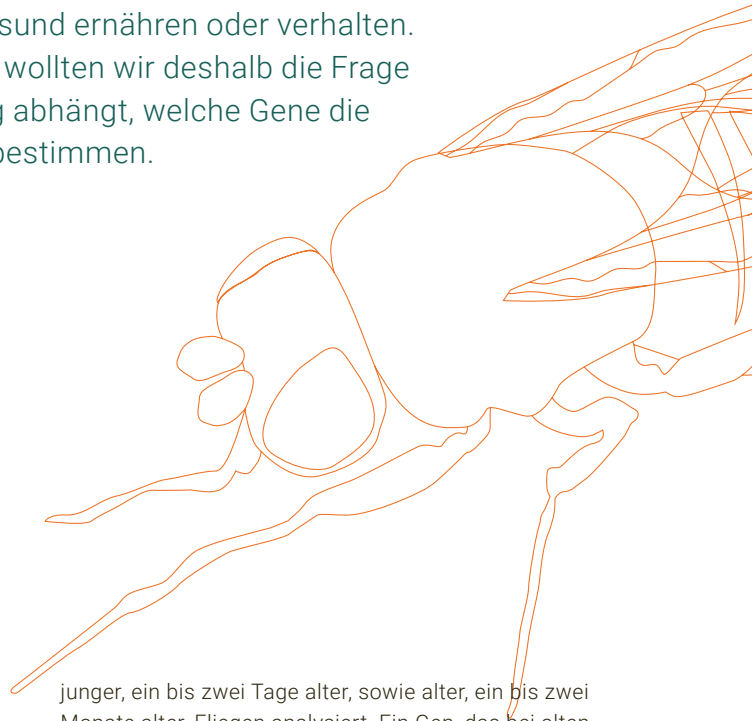
Mit moderner Technik ist es möglich, alle Gene zu finden, die ein Merkmal wie die Lebensdauer steuern. Die Frage ist aber, ob es unter verschiedenen Umweltbedingungen immer dieselben Gene sind, und wenn ja, ob sie die gleiche Wirkung haben. Erst wenn wir all diese Fragen beantworten können, werden wir wissen, wie sich Organismen an neue Umgebungen anpassen und warum sie beispielsweise Krankheiten entwickeln, wenn sie sich ungesund ernähren oder verhalten. In einem groß angelegten Experiment wollten wir deshalb die Frage beantworten, ob es von der Ernährung abhängt, welche Gene die Lebenserwartung eines Individuums bestimmen.

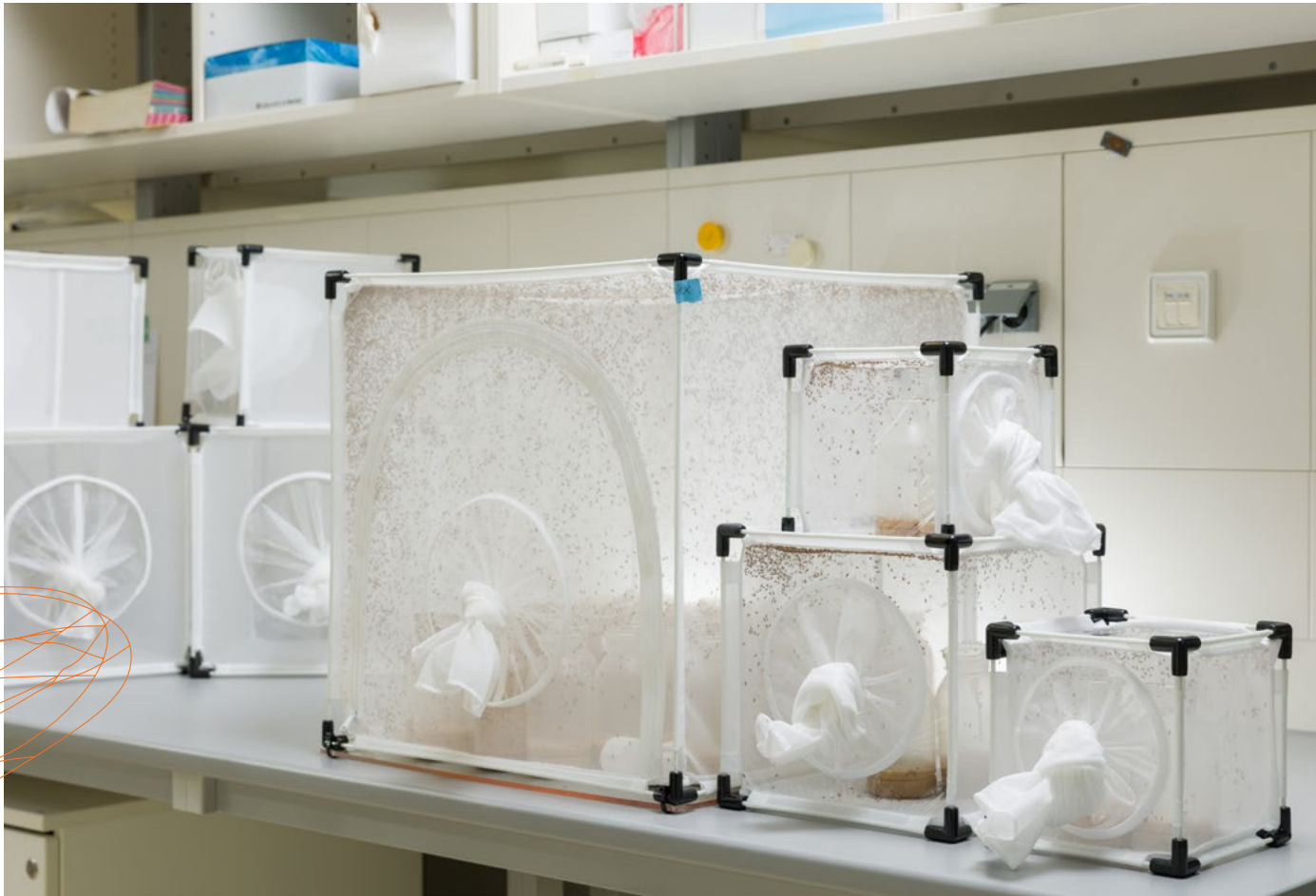
Da für dient uns die Fruchtfliege als Modellorganismus: Genau wie der Mensch wird sie bei einer zuckerreichen Ernährung fettleibig, unempfindlich gegenüber Insulin und sie stirbt früher. Außerdem können wir Hunderttausende ihrer Art unter kontrollierten Bedingungen im Labor halten und das Erbgut jeder einzelnen Fliege analysieren. So wollen wir die Gene finden, die die Lebensdauer der Fruchtfliegen unter unterschiedlichen Ernährungsbedingungen steuern.

In unserem Experiment haben wir eine Gruppe aus Zehntausenden Fruchtfliegen mit gesunder, zuckerarmer und eine andere mit zuckerreicher Nahrung gefüttert. Als Nächstes haben wir das Erbgut von Tausenden

junger, ein bis zwei Tage alter, sowie alter, ein bis zwei Monate alter, Fliegen analysiert. Ein Gen, das bei alten Tieren häufiger vorkommt, müsste sich folglich lebensverlängernd auswirken; eines, das bei jungen Fliegen häufig, bei alten aber selten ist, scheint dagegen das Leben zu verkürzen.

Wir haben rund 2.000 Orte im Erbgut entdeckt, die die Lebensdauer beeinflussen. Zwei Drittel davon spielen sowohl bei zuckerarmer als auch bei zuckerreicher Ernährung eine Rolle. Aber 600 Gene wirken sich nur bei zuckerreicher Ernährung auf die Lebenserwartung aus. Möglicherweise muss die Wirkung dieser Gene durch die Zusammensetzung der Nahrung also erst „geweckt“ werden. Wenn sich die Fliegen






*Behälter zur Zucht von
Zehntausenden von
Drosophila-melanogaster-
Fliegen, sortiert nach
Versuchsgruppen*

gesund ernähren, sind diese Gene für die Bestimmung der Lebensdauer eines Individuums ohne Bedeutung. Werden sie jedoch Stress ausgesetzt, beispielsweise einer zuckerreichen Ernährung, werden sie für die Lebensdauer wichtig.

Mit dieser Erkenntnis widerlegen wir einmal mehr die inzwischen veraltete, aber immer noch verbreitete Annahme, dass die Effekte von Genen immer statisch sind: Ein Gen kontrolliert ein Merkmal, und ein einziges oder wenige Gene reichen aus, um individuelle Unterschiede innerhalb einer Art zu erklären. Wir wissen heute, dass die meisten komplexen Merkmale tatsächlich von Hunderten oder Tausenden Genen oder Abschnitten im Erbgut reguliert werden. Durch die

gemeinsame Wirkung all dieser Bereiche lässt sich die natürliche Variation erklären. Unsere Ergebnisse stützen die Vermutung, dass die Wirkungen der Gene, die die Lebensdauer steuern, nicht statisch, sondern dynamisch sind und von der Umgebung verändert werden. Sie legen nahe, dass auch Gene, die für unsere eigene Gesundheit wichtig sind, Umwelteinflüssen unterliegen. Dies sollte künftig bei der Suche nach den Ursachen einer ganzen Reihe von Krankheiten berücksichtigt werden. 



15 Grüner Stahl aus giftigem Rotschlamm

**MATIC
JOVIČEVIĆ-KLUG,
ISNALDI R.
SOUZA FILHO**

↳ *Max-Planck-Institut
für Nachhaltige Materialien
GmbH, Düsseldorf*

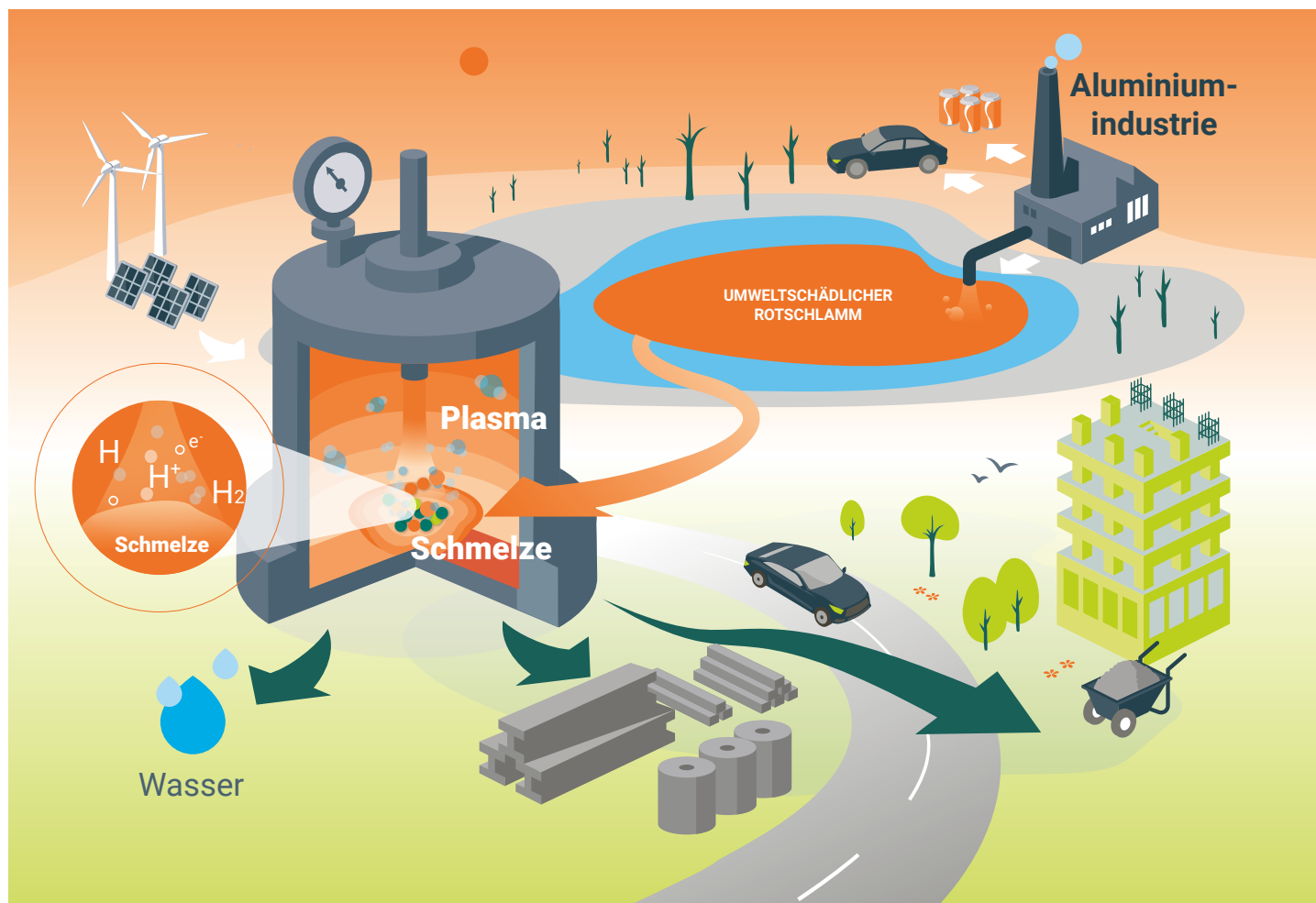
Bei der Produktion von Aluminium fallen jährlich etwa 180 Millionen Tonnen giftiger Rotschlamm an. Am Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien, das bis vor Kurzem Max-Planck-Institut für Eisenforschung hieß, haben wir gezeigt, wie sich aus dem Abfall der Aluminiumproduktion auf relativ einfache Weise grüner Stahl erzeugen lässt. In einem Lichtbogenofen, wie ihn die Stahlindustrie seit Jahrzehnten nutzt, wandeln sie das im Rotschlamm enthaltene Eisenoxid mithilfe von Wasserstoffplasma in Eisen um. Und wie das Max-Planck-Team zeigt, würde sich dieser Prozess auch ökonomisch lohnen.

Die Nachfrage nach Stahl und Aluminium wird Prognosen zufolge bis 2050 um bis zu 60 Prozent steigen. Die konventionelle Produktion dieser Metalle belastet die Umwelt jedoch erheblich. So stammen acht Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen aus der Stahlindustrie, sie ist damit die Branche mit dem größten Ausstoß an Treibhausgasen. Bei der Aluminiumproduktion wiederum fallen jährlich etwa 180 Millionen Tonnen Rotschlamm an, der stark ätzend ist und Spuren von Schwermetallen wie etwa Chrom enthält. Dieser Abfall wird unter anderem in Australien, Brasilien und China bestenfalls in gigantischen Deponien aufwendig getrocknet und entsorgt. Bei starkem Regen wird der Rotschlamm oft aus der Deponie gespült und bei Trockenheit als Staub vom Wind in der Umwelt verbreitet. Zudem greift der stark alkalische Rotschlamm die Betonwände der Deponien an, sodass auslaufender Rotschlamm bereits mehrmals Umweltkatastrophen auslöste, so etwa in China 2012 oder in Ungarn 2010.

Und große Mengen Rotschlamm werden ohnehin einfach in der Natur entsorgt.

Eine Lösung für zwei Probleme

Unser Prozess könnte gleichzeitig das Abfallproblem der Aluminiumproduktion lösen und die CO₂-Bilanz der Stahlindustrie verbessern. In einer Studie, die im Fachmagazin Nature erschien, zeigen wir, wie sich Rotschlamm als Rohstoff der Stahlindustrie nutzen lässt. Denn der Rotschlamm aus der Aluminiumproduktion besteht aus bis zu 60 Prozent Eisenoxid. Wir schmelzen den Rotschlamm in einem Lichtbogenofen und reduzieren das darin enthaltene Eisenoxid gleichzeitig mit einem Plasma, das zehn Prozent Wasserstoff enthält, zu Eisen. Die Umwandlung, die als Plasmareduktion bezeichnet wird, dauert gerade einmal zehn Minuten, wobei sich das flüssige Eisen von den flüssigen Oxiden trennt und anschließend einfach



Aus umweltschädlichem Rotschlamm, einem Abfall der Aluminiumindustrie, lässt sich durch Plasma-reduktion mit grünem Wasserstoff CO₂-freier Stahl erzeugen.

Eisen mit Wasserstoff direkt aus Rotschlamm zu erzeugen, lohnt sich auch ökonomisch, wie eine Analyse der Kosten zeigt.


abscheiden lässt. Das Eisen ist so rein, dass es sich direkt zu Stahl weiterverarbeiten lässt.

Die zurückbleibenden Metalloxide sind nicht mehr ätzend und erstarren beim Abkühlen zu einem glasartigen Material, das sich etwa in der Bauindustrie als Füllmaterial einsetzen lässt. Andere Forschungsgruppen haben aus Rotschlamm in einem ähnlichen Ansatz mit Koks Eisen erzeugt, wobei stark verunreinigtes Eisen und große Mengen CO₂ entstehen. Mit grünem Wasserstoff als Reduktionsmittel werden diese Treibhausgas-Emissionen vermieden. Aus den vier Milliarden Tonnen Rotschlamm, die bei der weltweiten Aluminiumproduktion bislang angefallen sind, ließen sich knapp 700 Millionen Tonnen Stahl gewinnen. Das entspricht einem guten Drittel der jährlichen Stahlproduktion weltweit. Mit grünem Wasserstoff als Reduktionsmittel würde die Stahlindustrie dabei fast 1,5 Milliarden Tonnen CO₂ vermeiden.

Entschärfte Schwermetalle

Auch die Schwermetalle im Rotschlamm lassen sich mit dem Verfahren gewissermaßen entschärfen. Chrom haben wir nach der Reduktion im Eisen nachgewiesen, auch andere Schwer- und Edelmetalle gehen wahrscheinlich ins Eisen oder einen separaten Bereich über. Das werden wir in weiteren Studien untersuchen. Wertvolle Metalle könnte man dann abtrennen und weiterverwenden. Und Schwermetalle, die in den Metalloxiden zurückbleiben, wären darin fest gebunden und könnten nicht mehr mit Wasser ausgeschwemmt werden, wie dies beim Rotschlamm passieren kann.

Eisen mit Wasserstoff direkt aus Rotschlamm zu erzeugen, nützt aber nicht nur der Umwelt doppelt. Der Prozess lohnt sich auch ökonomisch, wie wir in einer Analyse der Kosten nachgewiesen haben. Das ist ein entscheidender Aspekt, wenn es darum geht, den Prozess in die industrielle Praxis zu überführen. Mit

Wasserstoff und einem Strommix für den Lichtbogenofen aus nur teilweise regenerativen Quellen lohnt sich das Verfahren bereits, wenn der Rotschlamm 50 Prozent Eisenoxid enthält. Berücksichtigt man noch die Kosten für die Entsorgung des Rotschlammes, reichen darin sogar nur 35 Prozent Eisenoxid, um den Prozess wirtschaftlich zu machen. Mit grünem Wasserstoff und Strom ist bei den heutigen Kosten – den Aufwand für die Deponierung des Rotschlammes eingerechnet – ein Anteil von 30 bis 40 Prozent Eisenoxid nötig, damit das entstehende Eisen am Markt konkurrenzfähig ist. Das sind vorsichtige Abschätzungen, weil die Kosten für die Entsorgung des Rotschlammes wahrscheinlich eher niedrig berechnet sind. Ein weiterer Vorteil aus Sicht der Praxis: Lichtbogenöfen sind in der Metallindustrie – auch in Aluminiumhütten – weitverbreitet, da man damit Altmetall einschmilzt. In vielen Fällen müsste die Branche also nur wenig investieren, um nachhaltiger zu werden. 

Die Max-Planck-Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft (www.mpg.de) ist eine der führenden Forschungseinrichtungen weltweit mit gut 24.600 Mitarbeitenden. In den 84 Max-Planck-Einrichtungen betreiben rund 6.700 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sowie 6.600 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 zukunfts-trächtige wissenschaftliche Fragen zu finden. Diese ständige Erneuerung erhält der Max-Planck-Gesellschaft den Spielraum, neue wissenschaftliche Entwicklungen rasch aufgreifen zu können.

Entstanden ist sie 1948 als Nachfolgeorganisation der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Seither sind 31 Nobelpreisträger und Nobelpreisträgerinnen aus ihren Reihen hervorgegangen. Neben vier Auslands-instituten 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 2,1 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

Dr. Christina Beck, Dr. Tobias Beuchert,
Sepideh Fazlali, Dr. Virginia Geisel, Peter Hergersberg,
Karl Hübner, Dr. Jan Wolfhard Kellmann, Dr. Elke Maier,
Dr. Harald Rösch

Gestaltung

mattweis, München

Druck

Print Media Group GmbH, Leimen

Mai 2024

Bildnachweis

Transition 2.0: Die Rückkehr zum Rechtsstaat

S. 4: Illustration: mattweis

Leben nur zu zweit

S. 8: Illustration: mattweis (Vorlage MPI für Immunbiologie und Epigenetik); Shutterstock: Anusorn Nakdee & Holiday.Photo.Top & freepik; Montage: MPI für Immunbiologie und Epigenetik

Feinstaub schadet der Gesundheit anders als gedacht

S. 10: Illustration: mattweis (Vorlage Thomas Berkemeier / MPI für Chemie)

Leben im Wandel

S. 12: Illustration: mattweis

S. 13: Illustration: mattweis (Vorlage: Julia Kuhl / MPI für Biologische Intelligenz)

Wasser für erdähnliche Planeten

S. 15: MPI für Astronomie

S. 16: Illustration: mattweis (Vorlage: NASA, ESA, CSA, Joseph Olmsted (STScI))

Wer beherrscht die Unternehmen heute?

S. 19: Illustration: mattweis

Virtuelle Körpermodelle helfen bei Magersucht

S. 21: Illustration: mattweis

S. 22: Immanuel Reimold / Universitätsklinikum Tübingen

Die Wurzeln des Anthropozäns

S. 24: Illustration: mattweis (Vorlage: Roberts et al. / MPI für Geoanthropologie)

S. 24–25 Fotos: Patrick Roberts

Gedränge im Zellkern

S. 26–27: Illustration: mattweis

S. 27 oben: Shau Chung Shin / MPI für Biophysik; unten: Eugene Kim / MPI für Biophysik

Ein Programm für ein besseres Arbeitsklima

S. 29: Illustration: mattweis

Mysteriöse Meiose

S. 32: Illustration: mattweis (Vorlage: MPI für Evolutionsbiologie)

Per Tandemreaktion zu sauberen Treibstoffen

S. 34–35: Illustration: mattweis (Vorlage: Andreas J. Vorholt / MPI für Chemische Energiekonversion)

Umbau im Knochen

S. 38: Illustration: mattweis

S. 39: Ralf-Heinrich Adams / MPI für molekulare Biomedizin

Gene und Umwelt

S. 41: Jörg Abendroth / Friedrich-Miescher-Laboratorium

Grüner Stahl aus giftigem Rotschlamm

S. 42: Illustration: mattweis

S. 44: Illustration: mattweis (Vorlage: MPI für Nachhaltige Materialien GmbH)