



## Smarte Wesen

Vom richtigen Leben nach dem falschen

Der Wert der Vegetation

Nanophysik: Licht unter Kontrolle



Bei künstlicher Intelligenz denken viele unwillkürlich an humanoide Roboter. Doch unter den Begriff lassen sich weit mehr selbstlernende Systeme fassen. Foto: Alistair Grant/AP Photo/Picture Alliance

## Liebe Leserinnen, liebe Leser,

wer digitale Zeitungsarchive mit dem Suchwort „Intelligenz“ durchforstet, findet gegenwärtig fast ausschließlich Artikel zu Fragen der *künstlichen* Intelligenz. Was auf den ersten Blick frappierend erscheinen mag, ist jedoch keinesfalls nur das Ergebnis einer medialen Fokussierung. In der Tat ist KI ein Schlüsselbegriff der Stunde. Längst sind Anwendungen in den Alltag der Konsumenten eingesickert, die Versprechungen sind groß, Wirtschaft und Politik investieren. Doch was ist überhaupt intelligent an künstlicher Intelligenz? Wie weit reicht die Lernfähigkeit selbstlernender Systeme? Wo ist das Künstliche, das Maschinelle Fortschritt und Bereicherung? Das sind Überlegungen, die unweigerlich zu der nur scheinbar einfachen Grundfrage zurückführen, was wir unter Intelligenz verstehen.

Dem gehen Wissenschaftler der LMU von unterschiedlicher Warte aus nach. Und so ist diese Ausgabe des Forschungsmagazins *Ein-*

*sichten* ein Heft über Intelligenz *und* künstliche Intelligenz geworden. Der Psychologe und Eignungsdiagnostiker Markus Bühner analysiert die Tauglichkeit von Intelligenztests. Der Entwicklungspsychologe Markus Paulus erforscht die Sozialität intelligenter Wesen. Der Psychologe und Bildungsforscher Reinhard Pekrun fragt nach dem Einfluss der Emotionen auf das Lernen und also danach, wie sich der Schatz der Intelligenz heben lässt. Der Volkswirt Klaus Schmidt untersucht die Irrationalität im wirtschaftlichen Handeln und setzt sich so mit dem Schlagwort von der Intelligenz der Märkte auseinander. Der Informatiker Thomas Seidl und der Statistiker Bernd Bischl diskutieren über Maschinelles Lernen und andere Formen von KI. Psychiater Nikolaos Koutsouleris, Informatiker Christian Wachinger und Altorientalist Enrique Jiménez experimentieren mit KI-Ansätzen für psychiatrische Diagnosen, bildgebende Verfahren und bei Textrekonstruktionen.

Viel Spaß beim Lesen  
wünscht Ihnen  
Ihre *Einsichten*-Redaktion

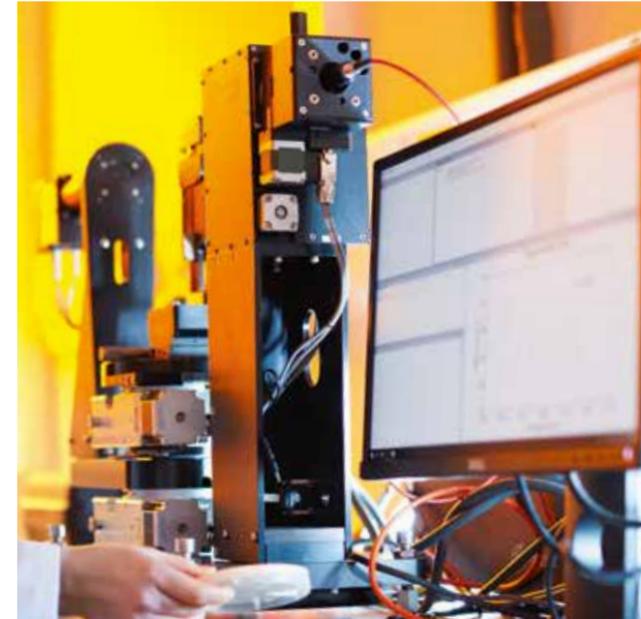
# Inhalt



Wie lässt sich die Eignung für Berufe messen? 18



Vom Spiel mit Preisen 33



Forschung zur Wechselwirkung von Licht und Materie 54



Die grüne Lunge des Planeten 58

- 6 **Aktuelles aus der Forschung**  
 Restriktionen helfen gegen Waffengewalt ■  
 Sozialpolitik: Es geht auch anders ■  
 Der Dolmetscher: »Mimesis« ■ Meldungen ■  
 Interview: Vom richtigen Leben  
 nach dem falschen

Schwerpunkt: **Smarte Wesen**

- 18 **Mythos IQ**  
 Es kursieren viele falsche Vorstellungen:  
 Was ist Intelligenz tatsächlich und  
 wie misst man kognitive Fähigkeiten?

- 24 **Mehr als schlau**  
 Was den Menschen sozial kompetent macht –  
 und was sich die Robotik davon abzuschauen versucht

- 28 **Lernen mit Gefühl**  
 Wie Emotionen die Leistung beeinflussen und  
 wie sich die Intelligenz wecken lässt

- 33 **Der menschliche Faktor**  
 Intelligenz der Märkte? Zur Frage von Vernunft und  
 Irrationalität im wirtschaftlichen Handeln

- 38 **Muster-Schüler**  
 Algorithmen lernen Strukturen zu erkennen –  
 drei Anwendungsbeispiele von KI

- 47 **»Hat das mit Intelligenz zu tun?«**  
 Warum es wichtig ist zu verstehen,  
 wie Rechner mit KI-Technologien zu ihren  
 Ergebnissen kommen

- 54 **Licht unter Kontrolle**  
 Winzige Antennen und andere kleinste Strukturen  
 sollen helfen, Prozesse in der Nanowelt zu steuern.

- 58 **Der Wert der Vegetation**  
 Die Folgen von Rodung, Waldbewirtschaftung  
 und Agrarproduktion: Welchen Einfluss hat die  
 Landnutzung auf das Klima?

## Rubriken

- 3 **Editorial**  
 64 **Büchertisch**  
 Neues von Michael Brenner, Irene Götz und  
 Till Roenneberg  
 66 **Die Zukunftsfrage**  
 Steht eine Quantenrevolution bevor?  
 66 **Impressum**

Titelbild: **Der Mensch, das selbstlernende System**  
 Foto: Amelie-Benoist/ullstein bild – BSIP

Fotos v.l.n.r.: Mauritius Images/Karo; Robert Haas/SZ Photo; Jan Greune; Dado Galdieri/Bloomberg via Getty Images

# Aktuelles aus der Forschung



Spuren der Gewalt: Projektile am Tatort. Foto: Salvatore Laporta/KONTROLAB/LightRocket via Getty Images



## Restriktionen helfen gegen Waffengewalt

Die Diskussion wird breit geführt und nach jedem Amoklauf, nach jedem Schulmassaker in den USA flammt sie wieder auf: Was tun gegen die Waffengewalt? Könnte ein restriktiveres Waffenrecht die Welle der Gewalt eindämmen, so lautet die allfällige Frage, und die Zahl von Morden und Suiziden mit Schusswaffen verringern? Für die USA bejahen Studien dies.

Doch wie steht es in westeuropäischen Ländern, in denen Waffengewalt insgesamt eine deutlich geringere Rolle spielt? Hat auch hier ein strengeres Waffenrecht einen positiven Effekt und könnte dafür sorgen, dass weniger Menschen sich oder andere erschießen? Eindeutig ja, sagen die Politikwissenschaftler Dr. Steffen Hurka und Professor Christoph Knill vom Geschwister-Scholl-Institut der LMU.

Die LMU-Forscher haben dafür die Regulierungen in 16 verschiedenen Ländern Europas und die Zahlen von Morden und Selbsttötungen mit und ohne Schusswaffen miteinander verglichen. Um die Werte miteinander in Beziehung setzen zu können, haben sie zunächst für jedes der Länder einen

sogenannten Gun Control Index errechnet. Nach einem arithmetischen Verfahren stufen die Wissenschaftler dafür das Waffenrecht der einzelnen Staaten nach verschiedenen Faktoren ein. Ist der Waffenbesitz in den untersuchten Staaten verboten, erlaubt oder nur unter bestimmten Voraussetzungen zulässig? Welche persönlichen Voraussetzungen muss ein Waffenhalter erfüllen? Welche sonstigen Anforderungen stellt das Gesetz an ihn? Muss er eine Waffe in einem abgeschlossenen Schrank lagern? Besonders strikt ist demnach Großbritannien, als vergleichsweise liberal gelten dagegen Finnland und die Schweiz. Diese länderspezifischen Werte haben die Forscher daraufhin jeweils mit den Fallzahlen der Jahre zwischen 1980 und 2010 in Beziehung gesetzt. Dabei zeigte sich, dass bei strengerer Gesetzgebung und damit geringerer Verfügbarkeit von Waffen die Zahl von Morden und Suiziden deutlich niedriger ausfiel. Das galt im Übrigen nicht nur für die mit einer Schusswaffe verübten Taten, sondern für alle Fälle von Mord und Suizid.

Regulation & Governance, Januar 2019



Über Nacht hingestellt sozusagen: Gecekondu-Viertel. Die informellen Siedlungen in türkischen Großstädten wurden später vielfach legalisiert. Istanbul, 1993. Foto: Rainer Hackenberg/Picture Alliance

## Es geht auch anders

Die Politikwissenschaftlerin Laura Seelkopf analysiert sozialpolitische Maßnahmen im historischen Kontext und weltweit. Ihre Forschung zeigt, wie vielfältig Sozialpolitik ist und wie ungewöhnlich mitunter die Instrumente sind, die ein gesellschaftliches Gefälle auszugleichen helfen.

Uruguay, 2002: Das Land steckt in einer Wirtschaftskrise, die arme Bevölkerungsschichten hart trifft und die Menschen offenbar kollektiv zum Diebstahl zwingt: Genau zu dieser Zeit wird in Montevideo in den Slums verstärkt illegal Strom abgezapft. Die staatliche Elektrizitätsgesellschaft und die Politik sehen zu, erzählt Laura Seelkopf. Es ist dies eine der Episoden in dem Band *Social Policy by Other Means*, den sie mit herausgegeben hat. Aber kann Stehlen lassen tatsächlich als sozialpolitische Maßnahme gelten? Für Laura Seelkopf ist der Strom-Diebstahl in Montevideo durchaus ein, wenn auch extremes, Beispiel für eine „Sozialpolitik mit anderen Mitteln“: „Im Kontext eines

weniger entwickelten Landes kann diese Art von Politik besser sein, als gar nichts zu tun. Häufig gibt es in sogenannten Entwicklungsländern keine antizyklische Sozialpolitik, weil sie kein Geld dafür haben und auch nicht die Möglichkeit, sich während einer Krise auf dem internationalen Kreditmarkt dafür Geld zu leihen.“ Zuzulassen, wie die Armen Elektrizität stehlen, wäre demnach eine aus der Not geborene Methode, sie zu unterstützen und Ressourcen umzuverteilen. Laura Seelkopf ist Juniorprofessorin für Politikwissenschaft an der LMU und forscht über Sozial- und Steuerpolitik im globalen Kontext. In Deutschland wird Sozialpolitik als etwas gesehen, das klar zu den Aufgaben

des Staates gehört: die Bürger über ein staatliches Gesundheits- und Rentensystem vor Risiken wie Krankheit und Altersarmut, aber auch vor Arbeitslosigkeit und möglichen Folgen von Wirtschaftskrisen zu schützen und sozial abzusichern, was über Sozialversicherungsbeiträge oder Steuern finanziert wird. „Darüber wird vernachlässigt, dass es sehr viele andere Arten von Politik gibt, die diese Aufgaben auch wahrnehmen, wie sich sowohl historisch als auch im weltweiten Vergleich zeigt“, sagt Laura Seelkopf.

Der australische Politikwissenschaftler Francis G. Castle hatte in den 1980er-Jahren den Begriff „social protection by other means“ geprägt, um staatliche Regulierungen in Australien und Neuseeland einzuordnen. In einer historischen Analyse zeigte er, wie die beiden Staaten etwa über die Regulierung von Arbeitsmarkt, Handel und Einwanderung für gesellschaftlichen Ausgleich sorgten, ohne klassische Wohlfahrtsstaaten zu sein.

„Oder nehmen Sie das Beispiel Singapur“, sagt Laura Seelkopf. „Blickt man durch die übliche sozialwissenschaftliche Brille, dann scheint es dort überhaupt keinen Wohlfahrtsstaat zu geben. Die Staatsausgaben sind sehr gering. Aber dafür reguliert der Staat die Bereiche Gesundheitsvorsorge und Wohnen, sodass auch Menschen mit wenig Einkommen eigene Wohnungen haben und die Bevölkerung nicht zuletzt wegen der guten Gesundheitsvorsorge eine der höchsten Lebenserwartungen weltweit hat.“

Laura Seelkopf geht es darum, mit dem Begriff „Sozialpolitik mit anderen Mitteln“ den wissenschaftlichen Blick zu weiten: „Die Forschung über Sozialpolitik ist stark europäisch geprägt. Sie beschäftigt sich vor allem damit, was in den entwickelten Demokratien nach dem Zweiten Weltkrieg passiert ist. Das hat sich durch die Digitalisierung noch verstärkt, da es leichter geworden ist, an entsprechende Datensätze zu kommen. Um sie vergleichbar zu machen, hat man klare Grenzen ziehen und damit andere Maßnahmen ausschließen müssen. Es ist

viel einfacher, staatliche Ausgaben zu messen als beispielsweise Regulierungen.“

Doch auch in Deutschland und anderen europäischen Staaten gab und gibt es Formen der Sozialpolitik, die nicht vom Staat ausgeführt werden. „Häufig wird angenommen, dass es im 18. und 19. Jahrhundert gar keine staatliche Sozialpolitik gab. Das ist aber nicht der Fall. In Belgien zum Beispiel gab es schon früh staatliche Regulierungen, etwa wie Kirchen Krankenhäuser zu führen haben, und dies war oft bereits staatlich finanziert. Und das setzt sich fort bis heute“, sagt Seelkopf. „Der belgische, aber auch der deutsche Staat sind wie auch andere Länder in Europa deutlich weniger reine Sozialstaaten, als angenommen wird. Es ist eine historisch gewachsene Mischung von Maßnahmen verschiedener Akteure. Der Staat reguliert zwar, aber es ist keineswegs so, dass er immer die Hauptrolle spielt.“

So sind es in Deutschland häufig Kirchen, die die Trägerschaft etwa für Altenheime übernehmen und dann vom Staat die Finanzierung dafür bekommen. Sogar die Regulierung von Immigration, um Pflegekräfte zu gewinnen, könnte man Seelkopf zufolge als „Sozialpolitik mit anderen Mitteln“ sehen, ebenso wie Einwanderungspolitik als antizyklische Konjunkturpolitik zur Stabilisierung der Wirtschaft darunterfallen müsste. Mit der vorherrschenden engen Definition von Sozialpolitik fallen jedoch alle nicht direkt vom Staat finanzierten Maßnahmen unter den Tisch. „Bislang lässt sich gar nicht messen, welche Sozialpolitik es in welchem Land und in welchem Ausmaß gibt und wie relevant die Maßnahmen für die Absicherung der Bevölkerung sind“, sagt Seelkopf. In Ländern mit einem großen Agrarsektor ist es zum Beispiel noch häufig üblich, dass Essen subventioniert wird, damit sich Beschäftigte und Konsumenten Lebensmittel leisten können. In der Türkei hingegen wurde es weiterhin lange Zeit geduldet, dass man auf staatlichem Land schwarz Wohnhäuser baute. „Dieses sogenannte Squatter-Housing wurde in den 1980er-Jahren rück-

wirkend sogar legalisiert. Inzwischen gibt es in der Türkei aber eine Hinwendung zur eher klassisch-europäischen Sozialpolitik.“ Aus Sicht des Bürgers muss die traditionelle Sozialpolitik eines Wohlfahrtsstaates nicht unbedingt die beste sein. Vielmehr scheinen die Wege, soziale Gerechtigkeit zu erreichen, vielfältig zu sein: „Man kann nicht pauschal sagen, dass jede Form von Sozialpolitik mit anderen Mitteln schlechter ist als die traditionelle Form. Gerade das Beispiel Uruguay zeigt ja, dass für eine mögliche Bewertung auch immer berücksichtigt werden muss, ob es überhaupt Alternativen gibt.“

Nicht nur für die wissenschaftliche Analyse ist der globale Blick auf Sozialpolitik relevant, auch die Programme internationaler Organisationen, etwa des Internationalen Währungsfonds IWF, setzen Analysen voraus, die länderspezifische Besonderheiten berücksichtigen. „Früher hat der IWF häufig die eine Lösung für alle verbreitet oder Best-Practice-Beispiele vorgegeben. Aber die Frage ist, ob solche Best-Practice Beispiele überhaupt überall funktionieren können“, sagt Laura Seelkopf, die mit ihrem Forschungsansatz der „Sozialpolitik mit anderen Mitteln“ zeigt: „Es gibt eben nicht nur einen Standard und eine Art von Sozialpolitik, die richtig ist, und schon gar keine, die überall gleich ist. Die richtige Wahl hängt von den lokalen Konditionen ab.“

Nicola Holzapfel

#### Prof. Laura Seelkopf

ist Juniorprofessorin für Politikwissenschaft mit dem Schwerpunkt Internationale Organisationen am Geschwister-Scholl-Institut für Politikwissenschaft der LMU. Den Band *Social Policy by Other Means* hat Laura Seelkopf zusammen mit Peter Starke (Odense, Dänemark) herausgegeben. Er ist als Sonderheft des *Journal of Comparative Policy Analyses: Research and Practice* erschienen. Zu den Autoren gehören Santiago López-Cariboni (Montevideo, Uruguay), Henrik Moeys (Leuven, Belgien), Alexandre Afonso (Leiden, Niederlande) und Tim Dorlach (Istanbul, Türkei).



Ein Klassiker der Killerspiele: Counter-Strike war Zielscheibe vieler Debatten um die Schädlichkeit von Computerspielen. Ist das virtuelle Nachahmen, so lautete die Frage, eine Einübung von Gewalt? Foto: Jan Woitas/ Picture Alliance

## Der Dolmetscher: Christopher Balme über „Mimesis“

Es gibt wissenschaftliche Begriffe, die es in die Alltagswelt geschafft haben. LMU-Wissenschaftler erklären an dieser Stelle solche Ausdrücke – nicht nur mit einer reinen Definition, sondern auch mit einer kurzen Geschichte ihrer Popularität.

„Mimesis meint zunächst Nachahmung und bezeichnet ein menschliches Verhalten. Doch ganz so einfach ist dieser Kernbegriff der abendländischen Kunst nicht, wie die Kontroverse seit der Antike zeigt. Platon behandelt die Mimesis in der *Polyteia* im Rahmen der Kunsttheorie. Doch für den altgriechischen Philosophen ist Mimesis ‚bloße‘ Nachahmung, ein negativer Begriff also. Denn die nachahmenden Künste bilden nur die sichtbare Welt ab. Die ist jedoch selbst bloß Abbild der Ideen – für Platon das wahrhaft Seiende. Diese Ideen zu erkennen ist das höchste Ziel der Philosophie, Kunst ist ihm nur Abbild vom Abbild. Sein bedeutendster Schüler, Aristoteles, sieht das ganz anders. In seiner *Poetik* definiert er Mimesis als Nachahmung einer Handlung. Die Mimesis ist für ihn ein entscheidender Urtrieb des Menschen: Nachahmend lernt der Mensch.

Seit gut 2.400 Jahren bewegt sich die Diskussion um die Mimesis zwischen diesen beiden Polen. Es ist dies eine der wichtigsten Theoriedebatten des Abendlandes, das, wenn man so will, einen mimetischen Grundzug hat. Im Okzident sind Nachahmung der Natur und Nachahmung Gottes ganz wesentliche Formen der Erkenntnis. Im Orient spielt sie dagegen keine große Rolle, was am Bilderverbot des Judentums und des Islams liegen mag. So richtig in Fahrt kommt der Theoriestreit im 18. Jahrhundert mit einem Wiederaufblitzen der *Ut-pictura-poesis*-Debatte. In der *Ars Poetica* hatte der römische Dichter Horaz gefordert, dass die Literatur genauso abbilden solle wie die Malerei – was sie aber natürlich nicht kann. Im *Laokoon* erklärt Lessing, dass die Künste verschiedene Darstellungsformen von Raum und Zeit sind: Die Malerei bildet den Raum, Literatur und Musik bilden die Zeit ab. Nachahmung ist für Lessing das verbindende, aber eben auch trennende Element der unterschiedlichen Raum- und Zeitkünste.

Damit beginnt auch die Debatte um die Medienspezifität der Künste, die bis heute andauert. Es geht nicht mehr um Nachah-

mung der Natur, sondern um Imitation von Form. Spätestens mit dem Aufkommen der Fotografie gerät die Mimesis in die Krise. Alle kunsttheoretischen Debatten des 20. Jahrhunderts kreisen um das Verhältnis von Urbild und Abbild. Der französische Dekonstruktivist Jacques Derrida behauptet gar, dass es keinen notwendigen inneren Zusammenhang mehr gibt zwischen Dargestelltem und Darstellendem. Ihm ist alles nurmehr Abbild vom Abbild. Anders als Platon sieht er aber darin kein Defizit. Von Anfang an begleitet die Mimesis-Debatte ein unterschwelliges Unbehagen: Mit Nachahmen beginnt schon im Tierreich das Lernen. Welchen Einfluss aber hat das nachahmende Lernen zum Beispiel auf das Verhalten von Kindern? Diese Frage berührt selbst die Diskussion um die Schädlichkeit von Computerspielen wie Counter-Strike. Die über zwei Jahrtausende währende Debatte hat sich noch lange nicht erschöpft.“ Protokoll: mbu

Prof. Dr. Christopher Balme ist Inhaber des Lehrstuhls für Theaterwissenschaft an der LMU und einer der Leiter des Internationalen Doktorandenkollegs MIMESIS.

## Unklarer Patientenwille

Die Umsetzung einer Patientenverfügung und eine Organspende schließen sich miteinander aus. Das ist vielen Menschen jedoch nicht bewusst, wie eine neue Studie zeigt. Wissenschaftler um den Medizinethiker Professor Georg Marckmann haben 236 Seniorinnen und Senioren nach ihrer Bereitschaft zur Organspende befragt und danach, ob sie eine Patientenverfügung haben. Vor einer Organspende muss der Hirntod des potenziellen Spenders festgestellt werden, was nur im Kontext einer intensivmedizinischen Behandlung erfolgen kann. Etwa jeder Fünfte der Befragten hatte seine Bereitschaft

dazu in einem Organspende-Ausweis dokumentiert. Einige der potenziellen Spender haben zugleich mit einer Patientenverfügung festgehalten, dass sie keine lebenserhaltenden Maßnahmen wünschen und lieber außerhalb einer Intensivstation sterben möchten. „Diese Konstellation birgt einen potenziellen Konflikt und bedeutet für die behandelnden Ärzte eine schwierige ethische Herausforderung“, sagen die Forscher. Es bedürfe umfangreicher Aufklärung der Patienten und in jedem Fall eines qualifizierten Beratungsgesprächs. (nh)

Das Gesundheitswesen, Februar 2019

## Sie machen den Weg frei

Katalysatoren machen viele technische Verfahren überhaupt erst möglich. Sie beschleunigen chemische Reaktion, bleiben selbst dabei aber unverändert. Voraussetzung ist, dass die Moleküle auf dem Katalysator diffundieren können, damit sie für eine Reaktion aufeinandertreffen. Unter industriellen Bedingungen ist die Katalysatoroberfläche allerdings fast vollständig mit adsorbierten Teilchen bedeckt und dadurch blockiert – wie die Moleküle sich trotzdem bewegen können, war bisher unklar. Chemiker um

LMU-Professor Joost Winterlin zeigen nun, dass sich die Moleküle in der Oberflächennähe des Katalysators zunächst nur kleinstufig wie in einem Käfig bewegen können, bis sie durch lokale Fluktuationen in der Matrix wieder freikommen. Erst das ermöglicht ihnen, sich auf der Katalysatorfläche ungehindert zu bewegen und Bindungspartner für die chemische Reaktion zu finden. Die Dichteschwankungen verlaufen äußerst schnell, weisen die Forscher nach. (math)

Science, Februar 2019

## Gefährliche Risse

Multiple Sklerose ist eine entzündliche Erkrankung des Zentralen Nervensystems. Das Ausmaß der Behinderung hängt davon ab, wie viele der Nervenzellfortsätze, der Axone, zerstört werden. Ein Team um Professor Martin Kerschensteiner, Direktor des Instituts für Klinische Neuroimmunologie der LMU, hat einen Mechanismus identifiziert, der zum Absterben der Axone führen kann. Die Ursache ist ein Zustrom von Kalzium durch winzige Risse in der Zellmembran. Bereits frühere Studien zeigten, dass

Axone in der Nähe von entzündlichen Läsionen häufig anschwellen und anschließend absterben können. „Einige Axone erholen sich aber spontan“, sagt Kerschensteiner. „Der Prozess ist also grundsätzlich reversibel und könnte womöglich therapeutisch beeinflusst werden, wenn wir die Mechanismen besser verstehen.“ Wie die Studie zeigt, haben Axone mit einem erhöhten Kalziumspiegel ein hohes Risiko anzuschwellen und geringe Chancen, sich wieder zu erholen. (göd)

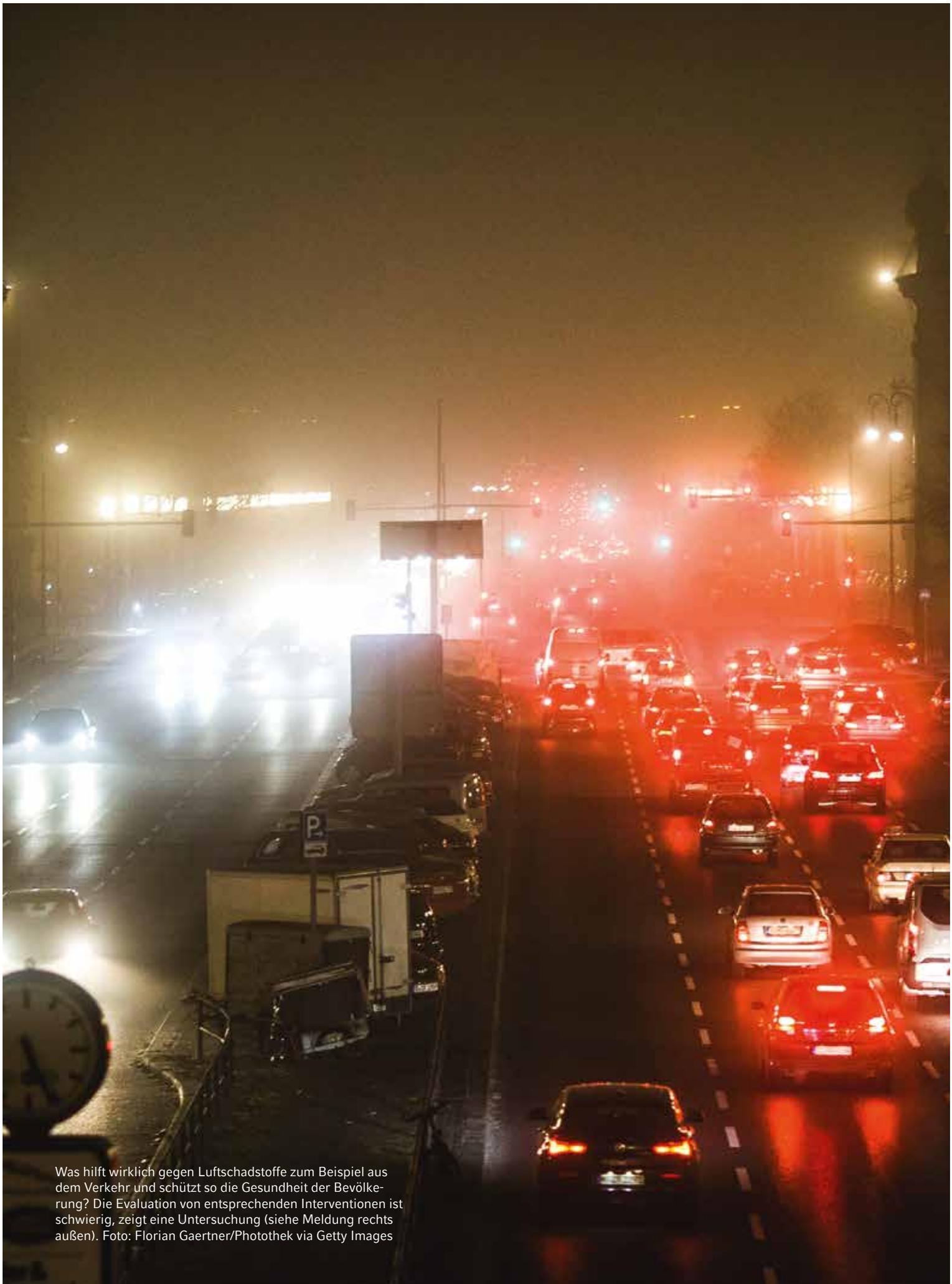
Neuron, Januar 2019

## Archaeopteryx bekommt Gesellschaft

Der Thron des *Archaeopteryx* wackelt. Seit im Jahr 1861 das erste Fossil des Urvogels gefunden wurde, gilt er als einziger Vogel aus der erdgeschichtlichen Periode des Jura. Er belegt als Übergangsform zwischen Reptilien und Vögeln, dass die heutigen Vögel direkte Nachfahren von Raubdinosauriern sind. Alle bisher von ihm gefundenen Exemplare stammen aus dem Gebiet des Solnhofener Archipels, das sich im Jura im Bereich des heutigen Altmühltals erstreckte. Hier lebte *Archaeopteryx* vor etwa 150 Millionen Jahren in einer Riff-Insel-Landschaft. Nun hat ein Team um Professor Oliver Rauhut einen bislang unbekannt Vogel aus der Gegend taxonomisch beschrieben, es ist der zweite bekannte flugfähige Vogel aus dieser Periode überhaupt: *Alcmonavis poeschli*. „Das weist darauf hin, dass die Diversität der Vogelwelt im Oberen Jura größer war als bisher bekannt“, sagt Rauhut, Paläontologe am LMU-Department für Geo- und Umweltwissenschaften und der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Geologie.

Von *Alcmonavis poeschli* wurde nur ein Flügel entdeckt. „Es sind Ähnlichkeiten da, seine aber seine fossilen Reste lassen vermuten, dass es sich um einen etwas höher entwickelten Vogel handelt.“ Er war nicht nur etwas größer als *Archaeopteryx*, er konnte offenbar auch besser fliegen: „Muskelansatzstellen am Flügel deuten auf ein verbessertes Flugvermögen hin“, sagt Rauhut. *Alcmonavis poeschli* weist mehrere Merkmale auf, die *Archaeopteryx* nicht hat, jüngere Vögel aber schon. Diese deuten auf eine bessere Anpassung an den aktiven Flatterflug hin. Damit bringt *Alcmonavis poeschli* neuen Schwung in die Debatte, ob der Vogelflug über den Gleitflug entstanden ist. Seine Anpassungen zeigen, dass die Evolution des Fluges offenbar relativ schnell vorangeschritten sein muss. (nh)

eLife, Mai 2019



Was hilft wirklich gegen Luftschadstoffe zum Beispiel aus dem Verkehr und schützt so die Gesundheit der Bevölkerung? Die Evaluation von entsprechenden Interventionen ist schwierig, zeigt eine Untersuchung (siehe Meldung rechts außen). Foto: Florian Gaertner/Photothek via Getty Images

## Salz in unserer Haut

In Industrieländern ist fast jeder Dritte im Laufe seines Lebens von einer Allergie betroffen, jedes zehnte Kind leidet an einer Neurodermitis. T-Zellen, Teil der körpereigenen Abwehr gegen Infektionen, spielen eine wichtige Rolle für solche Immunerkrankungen. So können Th2-Zellen, eine Untergruppe der T-Zellen, allergische Entzündungen der Haut, zum Beispiel eine Neurodermitis, verursachen. Dabei werden verstärkt die Interleukine IL-4 und IL-13 als Botenstoffe ausgeschüttet. Die Ursache einer solchen Fehlsteuerung ist bisher unbekannt. Untersuchungen, an denen Dr. Dirk Baumjo-

hann und Julia Maul vom Biomedizinischen Centrum der LMU maßgeblich beteiligt sind, zeigen, dass Salz, eigentlich ein wichtiger Mineralstoff für den Körper, T-Zellen dazu bringen kann, vermehrt Botenstoffe wie IL-4 und IL-13 auszuschütten und sich – jedoch reversibel – in potenziell Neurodermitis auslösende Th2-Zellen zu verwandeln. Zudem konnten die Forscher in der Haut von Neurodermitis-Patienten erhöhte Salzkonzentrationen nachweisen. Fraglich bleibt, ob und inwieweit diese Vorgänge durch den Salzgehalt der Nahrung gesteuert werden. (nh) *Science Translational Medicine*, Februar 2019

## Wie Darmkeime vor Erregern schützen

Eine Infektion mit Salmonellen kann schwer verlaufen, aber Menschen mit einer intakten Darmflora sind meist geschützt. Nur bei weniger als 20 Prozent derer, die die Keime, meist über kontaminierte Lebensmittel, aufnehmen, kommt es überhaupt zu einer Infektion. Welche Bakterien in der Darmflora aber womöglich die Ursache der schützenden Effekte sind, ist bisher weitgehend unbekannt. Forscher um Bärbel Stecher, Professorin am Max von Pettenkofer-Institut der LMU, haben nun ein Bakterium identifiziert,

das im Mausmodell vor Infektionen mit der in Deutschland sehr häufigen Subspezies von *Salmonella enterica* schützt. Der schützende Keim in der Darmflora, *Mucispirillum schaedleri*, konkurriert mit den Salmonellen um Nährstoffe, etwa Nitrat. Dadurch können die Salmonellen ihren wichtigsten Virulenzfaktor nicht mehr bilden – das sogenannte Typ-III-Sekretionssystem, mit dem sie Toxine in das Darmepithel spritzen, sodass sie dann in die Zellen eindringen können. (göd) *Cell Host & Microbe*, April 2019

## Exzellente Navigation mit wenig Information

Fledermäuse orientieren sich in der Dunkelheit mithilfe von Echos, wofür sie Ultraschallsignale ausstoßen. LMU-Forscher widerlegen nun gängige Annahmen über die Echoortung. „Bislang ging man davon aus, dass eine Art Hörbild mit räumlichen Informationen entsteht. Unsere Experimente zeigen jedoch, dass Fledermäuse kein räumliches Auflösungsvermögen haben. Sie navigieren auf der Basis von extrem wenig räumlichen Informationen. Ihr Navigationssystem funktioniert völlig anders, als wir es kennen“, sagt

Professor Lutz Wiegrebe, Abteilung Neurobiologie der LMU. Die Ergebnisse könnten Implikationen für technische Anwendungen haben. „Beim autonomen Fahren werden laufend Informationen mit der Kamera erfasst, um das Auto zu steuern. Womöglich wird dabei viel mehr Information erfasst als nötig. Fledermäuse verfügen über ein viel einfacheres Navigationsschema und navigieren dennoch exzellent. Es entstehen keine 3-D-Bilder wie bei visueller Wahrnehmung.“ (nh) *Current Biology*, Mai 2019

## Im Blick: Maßnahmen für saubere Luft

Um die Luftverschmutzung durch Schadstoffe zu reduzieren und so die Gesundheit der Bevölkerung zu schützen, gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen, etwa Umweltzonen oder Einschränkungen bei der Verbrennung von Holz in Privathaushalten. Die gewünschte Wirkung ist jedoch nicht so einfach nachzuweisen. So ist zwar eindeutig belegt, dass Luftschadstoffe negative Effekte auf die Gesundheit haben. Jedoch ist weniger eindeutig, inwieweit Maßnahmen, die auf die Verbesserung der Luftqualität abzielen, tatsächlich zu niedrigeren Schadstoffkonzentrationen und besserer Gesundheit führen. Auf das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen zum Beispiel wirken sich auch genetische, physiologische und soziale Risikofaktoren aus. Diese Problematik spiegelt nun eine Übersichtsstudie wider. Die Autoren um Professor Eva Rehfuess vom Institut für Medizinische Informationsverarbeitung, Biometrie und Epidemiologie an der Pettenkofer School of Public Health der LMU haben erstmals Studien geprüft, die Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität evaluiert haben. Sie zeigen zum größten Teil entweder positive Auswirkungen oder unklare Effekte, sind aber so unterschiedlich, dass sich keine verallgemeinernden Schlüsse daraus ziehen lassen. Das spricht aber nicht gegen die Interventionen, betont der Erstautor der Untersuchung, Jacob Burns: „Nur weil sich kein Effekt nachweisen lässt, heißt das nicht, dass es keinen Zusammenhang gibt.“ Vielmehr ist die Botschaft: „Die Evaluationsforschung muss sich verbessern“ und die Interventionen am besten bereits begleiten, „wenn sie eine gute Basis für Entscheidungsträger liefern soll“. (nh)

*Cochrane Database of Systematic Reviews*, Mai 2019

Aktuelles aus der Forschung finden Sie auch in unserem monatlich erscheinenden Forschungsnewsletter: [www.lmu.de/forschungsnewsletter](http://www.lmu.de/forschungsnewsletter)

## Unterhaltung mit: Julian Müller



„Eine signifikante Form, wie das Leben heute erzählbar wird“, sagt Julian Müller. Foto: ole/LMU

### Vom richtigen Leben nach dem falschen

Der eine wechselt das politische Lager, der andere den Beruf, der dritte bekennt sich zum Veganismus: Ob Sachbuchmarkt, YouTube oder Social-Media-Kanal – überall grassieren derzeit Geschichten der Umkehr. Der Soziologe Julian Müller untersucht, was es mit der neuen Bekenner-Biografie auf sich hat.

*Wie ich von links nach rechts gelangte* – manche brauchen nur einen Zeitungsartikel, um sich zu ihrer neuen politischen Identität zu bekennen, andere machen es auf Buchlänge. Es ist fast schon eine Welle unter Journalisten und Publizisten, sie alle erzählen mal launig, mitunter larmoyant, warum sie von nun an Zeitgeist und „linke Meinungsmache“ hinter sich lassen. Was treibt sie an? Der Wille zur Beichte? Eine Art Coming-out?

**Müller:** Sicher beides. Die Autoren verkaufen es als eine Art Selbstauskunft darüber, wo sie jetzt stehen, von welcher Position aus

sie reden und schreiben. In den letzten zehn Jahren fanden sich in nahezu jedem großen Medium solche Konvertiten. Viele der Bücher richten sich an die eigene Zunft und sind entsprechend selbstreferenziell. In fast allen Fällen handelt es sich im Übrigen um einen Wandel von links nach rechts, das generiert noch immer am meisten Aufmerksamkeit. Viele der Autoren spielen dabei mit dem, was gerade noch sagbar ist, als wollten sie demonstrieren, wie mutig sie sind.

Gibt es ein Muster für solche Erzählungen?

**Müller:** Viele dieser Geschichten – ich nenne sie Konversionserzählungen – haben eine Form, wie man es aus dem konfessionellen Bereich kennt. Es gibt meist ein genau datierbares Ereignis, das zur Umkehr führt und ein falsches Leben vor von einem richtigen Leben nach der Konversion trennt. In manchen Fällen war es die „Flüchtlingskrise“, aber es kann auch ein anderes politisches oder persönliches Erlebnis sein. Mich interessiert daran nicht der Einzelfall, sondern die Tatsache, dass Geschichten nach diesem Muster in völlig unterschiedlichen Bereichen auftauchen. Es ist offenbar eine signifikante Form, wie das Leben heute erzählbar wird.

Wo überall tauchen solche Berichte auf?

**Müller:** Nehmen Sie das Beispiel des Veganismus. Internetforen, Blogs, Podcasts – es gibt eine Reihe von Orten, an denen Leute ihn als das zentrale Merkmal des eigenen Lebens beschreiben. Oder ein anderes Beispiel, man kann derzeit etwa auf Instagram immer wieder auf Vorher-Nachher-Bilder stoßen. Bisher kannte man so etwas nur aus Illustrierten wie *Bunte* oder *Gala*, als Bildpaare von Prominenten, die die Frisur oder die Figur gewechselt haben.

„Abnehmen in vier Wochen“?

**Müller:** Genau, in der Art. Jetzt aber kann jeder dieses Format nutzen, um zum Beispiel auszustellen, wie er seinen Körper transformiert, durch Diät etwa oder durch Muskeltraining: Das war ich 2017. Und das bin ich

2019. So definiere ich mich jetzt selbst, meine Identität. Im dritten Block von Selbsterzählungen, die ich untersuche, geht es um den Bruch mit der beruflichen Biografie.

Also um den Unternehmensberater, der nach einem halben Jahr in der Burn-out-Klinik nun Achtsamkeitskurse gibt.

**Müller:** Das wäre so ein Fall. Häufig kaprizieren sich die Konvertiten auf Berufszweige, die von ihrem alten Leben ganz weit entfernt sind. Und oft geht es um handwerkliche Dinge, um „basale“ Tätigkeiten. Ein wiederkehrendes Motiv in den Erzählungen ist, dass man erkannt hat, welche Dinge für einen grundlegend und erfüllend sind. In diesem Zusammenhang ist es interessant, wie Medien heute über Berufe berichten. Auf Netflix beispielsweise gibt es schon die x-te Staffel von *Chef's Table* – einem weltweit erfolgreichen Format, das den Beruf des Chefskochs inszeniert. Auch da stößt man häufig auf Konversionserzählungen: Sie machen eine Ausbildung, sind unzufrieden, erzählen die Köche da durch die Bank, schälen Zwiebeln, schneiden Karotten, häckseln Kräuter. Und machen vor allem eine Küche, die ihnen gar nicht zusagt. Sie entdecken, dass diese Form der Künstlichkeit und der aufmontierten Saucen für sie nichts ist, sondern dass sie viel grundlegender kochen möchten, mit frischen und regionalen Zutaten. Und immer gibt es ein Ereignis, das alle Gewissheiten, die sie aus der Lehre mitgenommen haben, ins Wanken bringt. Von da an beginnen sie sich auf das zu konzentrieren, was sie später geworden sind. Im Moment finde ich das Thema Ernährung besonders ergiebig.

Warum?

**Müller:** Wir erleben insgesamt eine Aufwertung von Ernährung. Sie wird in hohem Maße ästhetisch, moralisch, politisch aufgeladen und ist sozusagen eine Form der existenziellen Erfüllung geworden. Wie man einkauft, wie man kocht, wie man zubereitet, welche Messer man dafür benutzt, all das ist längst zu einer Frage geworden, mit der

man demonstriert, wo man steht, was andere von einem zu halten haben. Deswegen interessieren mich die Fälle, in denen Menschen aus ganz anderen Berufen auf einmal Biobauern, Schnapsbrenner werden, in Craft Beer machen oder als Quereinsteiger Köche werden. Scheinbar ist es so, dass Ernährung irgendetwas befriedigt, was uns sonst im Berufsleben fehlt, etwas ganz Basales und eine Form von Verbindlichkeit vielleicht.

Mit der Ernährung zu sich kommen: Vegetarier und Veganer propagieren den Verzicht oft als neue Freiheit.

**Müller:** Genau, in der Selbstbeschränkung scheint offenbar ein großer Gewinn an Freiheit, Lust und Distinktion zu liegen. Es ist ein Verzicht, der gar nicht mehr als solcher wahrgenommen wird. Er ist ja auch zur zentralen Entscheidung im Leben aufgewertet, zum wichtigen Identitätsmarker. Ich habe Interviews geführt, in denen die Gesprächspartner Selbstbeschränkung als Gewinn feiern, also mit Teilen des Freundeskreises zu brechen, nicht mehr zu Grillfesten oder in den normalen Supermarkt zu gehen und sozusagen Ballast aus seinem eigenen Leben und dem näheren Umfeld abzuwerfen.

Woher kommt der Bekenntnis-Boom?

**Müller:** Man muss hier natürlich zunächst die Allgegenwart der sozialen Medien nennen. Sie machen Bekenntnisse nicht nur möglich, sondern sogar wahrscheinlich. Wenn jetzt Leute über ihr Essverhalten Auskunft geben, ist das durchaus auch ein funktionales Äquivalent für die klassische Beichte. Um eine Formulierung des Soziologen Alois Hahn abzuwandeln: Soziale Medien sind „Bekenntnisgeneratoren“. Nehmen Sie Twitter; da muss ich mich selbst permanent positionieren, damit sich meine Aussagen in 140 Zeichen überhaupt verstehen und einordnen lassen. Das ist eine notwendige Funktion dieser Art von Diskurs. Wenn man sich auf das Spiel der sozialen Medien einlässt, muss man – wie ironisch und distanziert auch immer – angeben, wer man ist, wer da spricht.

In einem Interview hat mir der Kulturtheoretiker Diedrich Diederichsen gesagt, es sei kein Zufall, dass man derzeit so oft und überall die Phrase „Ich bin ein Mensch, der...“ hören könne. Damit tut man ja so, als könnte man sich von außen beobachten, und offenbar ist es vielen sehr wichtig, sich als irgendwie fixierbare Identität zu präsentieren.

Woran schließen sie damit an?

**Müller:** Die klassischen Institutionen, die lange ein Leben geformt und reglementiert haben, haben dramatisch an Bedeutung eingebüßt. Und die Lebensläufe, die ja selbst hochgradig institutionalisiert waren, haben auch ihre klaren und festgefühten Chronologien verloren. Es sind eben nicht mehr Familie, Kirche, Gewerkschaft, Partei, Verein, Verband und Betrieb, die mitbestimmen, wer ich bin. Kirchen und Gewerkschaften ringen um Mitglieder, Volksparteien im eigentlichen Sinne gibt es nicht mehr. Diese Bedeutungsverluste werden dadurch kompensiert, dass sich Menschen selbst reglementieren und damit auch selbst fundieren: Ich weiß nicht, in welcher Firma ich nächstes Jahr arbeite, wo ich lebe, mit wem ich zusammen bin – aber Fleisch esse ich keins mehr. Ich habe unendlich viele Kontingenzen in meinem Leben, aber in einem Bereich habe ich Stabilität erzeugt. Darin scheint ein großer Reiz zu liegen. Und: Welches Ich die Selbsterzählungen ausstellen, berührt die klassische Frage von Repräsentation. Ging es früher darum, ob es sich einer Gruppe zuordnen ließ, einer Partei etwa, ist heute eher die Frage, ob das Ich sozusagen anschlussfähig ist. Lässt sich das neue Selbst in den sozialen Medien auffinden? Das ist eine Bedeutungsverschiebung: von der Frage der Kollektivität zu einer der Konnektivität.

Interview: Martin Thurau

Dr. Julian Müller ist Akademischer Rat auf Zeit am Institut für Soziologie, bis vor Kurzem war er Junior Researcher in Residence am Center for Advanced Studies der LMU.

# Smarte Wesen



## Der Schwerpunkt

### Mythos IQ

Was ist Intelligenz und wie misst man kognitive Fähigkeiten?

### Mehr als schlau

Menschen lernen, sozial kompetent zu sein, weil sie aufeinander angewiesen sind

### Lernen mit Gefühl

Wie Emotionen die Leistung beeinflussen

### Der menschliche Faktor

Wie viel Vernunft ist dabei, wenn wir ökonomisch handeln?

### Muster-Schüler

KI-Anwendungen: Wie Algorithmen lernen können, Strukturen zu erkennen

### „Hat das mit Intelligenz zu tun?“

Ein Gespräch über Maschinelles Lernen und andere Formen von KI



柯洁 KE JIE  
00:17:05



ALPHAGO  
01:51:38

浙江省体育局



Mensch gegen Maschine: Ke Jie aus China war erst 19 und er war der Weltranglistenerste im Go. Doch gegen das KI-gespeiste Google-Programm AlphaGo musste er sich geschlagen geben. Ein Jahr zuvor hatte schon der südkoreanische Großmeister Lee Sedol gegen die Software verloren. Wuzhen, China, 2017. Foto: Wu Hong/EPA/Shutterstock

# Mythos IQ

Was ist Intelligenz und wie misst man kognitive Fähigkeiten? Markus Bühner muss als Eignungsdiagnostiker oft Vorurteile ausräumen und falsche Annahmen korrigieren.

Von Nicola Holzapfel

**E**in IQ von 140 oder gar 150 – manche Prominente verraten gerne ihren angeblich überdurchschnittlichen Intelligenzquotienten. Markus Bühner kann darüber nur milde lächeln. „Es gibt nicht den IQ“, sagt der Psychologe. „Damit wird häufig kokettiert. Aber der IQ ist nichts anderes als eine Art Norm, die einen Vergleich ermöglicht.“ Mit dem IQ-Wert werden die Ergebnisse, die jemand in einem Intelligenztest erreicht, mit denen einer Vergleichsgruppe abgeglichen. Er bezieht seine Aussagekraft nur aus dem Bezug auf die IQ-Werte von Personen, die denselben Test gemacht haben sowie derselben Bevölkerungsgruppe angehören. „Die Frage ist also immer, in welchem Test und verglichen zu wem ein bestimmter IQ-Wert ermittelt wurde“, sagt Psychologe Markus Bühner.

Ein IQ von 100 stellt den Mittelwert aller Ergebnisse dar, die in einem Intelligenztest in einer Vergleichsgruppe erreicht wurden. Wer einen IQ-Wert über 100 erzielt, hat also besser abgeschnitten als der Durchschnitt der getesteten Personen in der Vergleichsgruppe, Werte unter 100 liegen unter dem Durchschnitt. Bezogen auf die Vergleichsgruppen erreichen 68 Prozent der Personen einen IQ-Wert zwischen 85 und 115, diese Spanne wird daher als Durchschnittsbereich der Intelligenz bezeichnet. Sie definiert die typische Abweichung der Personenwerte vom Mittelwert. Etwa zwei Prozent haben einen IQ unter 70, ebenfalls etwa zwei Prozent liegen mit ihrem IQ-Wert über 130 und gelten damit als intellektuell hochbegabt.

„Es wird viel von Intelligenz geredet, ohne aber zu definieren, was genau damit gemeint ist“, sagt Markus Bühner. „Es gibt in der Psychologie verschiedene Intelligenzmodelle. Wenn man Intelligenz kurz definieren wollte, könnte man sagen: Intelligenz bedeutet, sich in neue Sachverhalte schnell einfinden zu können.“ In den gängigen Intelligenztests wird in der Regel die sogenannte fluide Intelligenz ermittelt,

## Aussagekraft nur in der Vergleichsgruppe

die dafür steht, wie gut jemand logisch denken, Probleme lösen und schlussfolgern kann. Manchmal wird die Intelligenz daher auch als „Power“ bezeichnet oder bildlich als besonders leistungsfähiger Motor beschrieben. Um diese Leistungsfähigkeit zu messen, wird in Tests beispielsweise die Aufgabe gestellt, eine bestimmte Musterfolge zu erkennen. Generell werden in den Tests für die Aufgaben Materialien verwendet, die aus dem Bildungsbereich bekannt sind, also Zahlen, Wörter und Figuren. Außerdem wird die sogenannte kristallisierte Intelligenz erhoben, die sich in Wissen und Erfahrung ausdrückt. Auch die Merkfähigkeit und die Schnelligkeit bei der Bearbeitung von Aufgaben wird gemessen. Dafür wird

dann zum Beispiel eine Zahlenreihe vorgegeben, in der innerhalb einer vorgegebenen Zeit alle ungeraden Zahlen durchgestrichen werden müssen. In einem deutschen Intelligenztest, der unter dem Namen Berliner Intelligenzstrukturtest vertrieben wird, wird auch Einfallsreichtum als Teil der Intelligenz erfasst.

Die ersten Intelligenztests wurden in Frankreich zu Beginn des 20. Jahrhunderts von den Psychologen Alfred Binet und Théodore Simon entwickelt, um die kognitiven Fähigkeiten von Kindern zu erfassen und sie gegebenenfalls bei Bedarf rechtzeitig unterstützen zu können, damit sie in der Schule mitkommen. In den nachfolgenden Jahrzehnten wurden die Testverfahren von verschiedenen Psychologen für unterschiedliche Personengruppen weiterentwickelt. Als Meilenstein in der Geschichte der Intelligenzforschung gilt die Arbeit des US-amerikanischen Psychologen John B. Carroll, der die damaligen Erkenntnisse in einer Theorie integrierte und damit die Grundlage für das heute weltweit führende Intelligenzmodell schuf, das Cattell-Horn-Carroll-Modell.

„Intelligenztests haben eine große Erfolgsgeschichte in der Psychologie“, sagt Markus Bühner, der Inhaber des Lehrstuhls für psychologische Methodenlehre und Eignungsdiagnostik an der LMU ist. „Intelligenz ist ein wesentlicher Faktor, um beruflichen Erfolg vorherzusagen. Es gibt viele Metaanalysen über lange Zeiträume hinweg, die einen solchen Zusammenhang für verschiedenste Berufe bele-



„Intelligenz sagt den Erfolg in Berufen mit komplexen Aufgaben gut vorher“, sagt Markus Bühner. Trotzdem sind entsprechende Tests für die Auswahl im Management nicht unbedingt gängig. Foto: Mauritius Images/Karo

gen.“ Das liegt daran, wie Intelligenz in den Tests gemessen wird: Schlussfolgern des Denken dürfte schließlich in jedem Arbeitsalltag hilfreich sein.

Dem Umkehrschluss, dass weniger intelligente Menschen weniger erfolgreich sind, widerspricht Markus Bühner allerdings vehement. „Für ein Individuum ist der eigene IQ nicht relevant. Es heißt auch nicht, dass der Intelligenterer unbedingt der Erfolgreichere ist. Aus Sicht eines Unternehmens jedoch, das Mitarbeiter einstellt, sind eben die Erfolgsquoten erfolgreiche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter einzustellen, höher, wenn man aus Personengruppen mit höherem IQ-Wert auswählt. Intelligenz ist der beste Einzelprädiktor für beruflichen Erfolg.“

Dabei sind Intelligenztests gar nicht so weit verbreitet, wie man angesichts ihrer Vorhersagekraft annehmen könnte. Und wenn getestet wird, dann oft für Positionen, die gar nicht in so hohem Ausmaß in-

## Der beste Einzelprädiktor für Berufserfolg

telligenz erfordern. „Intelligenz sagt den Erfolg in Berufen mit komplexen Aufgaben gut vorher. Sie müssten also eigentlich etwa für die Auswahl im Management angewendet werden, gängig sind sie aber vor allem bei Azubis.“

Zudem kommt es immer auf die Anforderungen im jeweiligen Beruf an. „Eine Person kann unglaublich aufmerksam und reaktionsschnell sein, aber mit ihrer Intelligenz dennoch im Durchschnittsbereich liegen. Man kann nicht einfach sagen, wer vigilant ist, ist sehr gut im Schlussfolgern des Denken. Da gibt es eine Binnendifferenzierung zwischen den einzelnen kog-

nitiven Fähigkeiten und die ist auch sehr wichtig. Denn es gibt ja Berufe, beispielsweise den des Piloten, in denen viel Aufmerksamkeit und ein sehr gutes räumliches Vorstellungsvermögen verlangt wird, das heißt aber nicht, dass man dafür hochbegabt sein muss.“

Auch Persönlichkeitsmerkmale spielen für beruflichen Erfolg eine wesentliche Rolle. Und die haben mit der Intelligenz wenig zu tun. „Es gibt zwar Bezüge, die sind aber nicht sehr stark. Es zeigen sich zum Beispiel Zusammenhänge zum Merkmal der Offenheit: Intelligente Menschen sind offener. Aber vielleicht sind auch offene Menschen intelligenter – da steht man vor dem Henne-Ei-Problem.“

Markus Bühner hat in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen bereits Auswahlverfahren entwickelt, bei denen Bewerber für eine Ausbildungsstelle weniger gute kognitive Werte mit für den Job passenden Persönlichkeitsmerkmalen ausgleichen konnten. „Das Unternehmen hat nun eine Formel, mit der sich die Wahrscheinlichkeit berechnen lässt, mit der ein Bewerber die Ausbildung bestehen wird.“

Aus Sicht der Eignungsdiagnostik kommt es immer darauf an, welches Anforderungsprofil ein Bewerber erfüllen muss, um einen bestimmten Job gut auszufüllen, und dann gezielt die entsprechenden Intelligenzbereiche zu testen. Zudem werden im Idealfall verschiedene Personalauswahlverfahren kombiniert, sodass nicht allein der IQ entscheidet. „Man darf sich den IQ auch nicht wie ein Metermaß vorstellen, in dem Sinne, dass eine Person mit einem IQ von 123 automatisch für eine Position besser geeignet ist als der Mitbewerber, der einen IQ von 119 hat. In Berufen mit komplexen Aufgaben kann man davon ausgehen, dass alle Kollegen im oberen Durchschnittsbereich liegen, aber natürlich gibt es trotzdem Unterschiede. Ob und wie aussagekräftig die sind, ist eine andere Frage. Aus Tests wis-

sen wir, dass es zum Beispiel unter den Psychologiestudenten eine erhebliche Streuung der Intelligenzwerte gibt. Und das ist ja eine restriktiv ausgewählte Testgruppe, da der NC für das Studium sehr hoch ist.“

Auch wenn der IQ-Wert nur eine Zahl liefert, setzt sich die Intelligenz einer Person aus vielen einzelnen Fähigkeiten zusam-

## Ein alter Streit: Ist Intelligenz Familienerbe?

men. Es kann sein, dass eine Begabung in einem bestimmten Bereich, etwa im mathematischen Denken, überdurchschnittlich ist, der IQ insgesamt aber noch im Durchschnittsbereich liegt. In der Regel hängen die intellektuellen Fähigkeiten jedoch miteinander zusammen, sodass Personen, die in einem Teilbereich besser abschneiden auch in den anderen Bereichen im Durchschnitt besser sind. Dieser generelle Faktor der Intelligenz wurde erstmals vom britischen Psychologen Charles Spearman Anfang des 20. Jahrhunderts erkannt und in den 1990er-Jahren von John B. Carroll bestätigt.

Die Aussagekraft eines IQ-Werts hängt auch davon ab, wie gut dafür getestet wurde. Intelligenztests nach dem international führenden Cattell-Horn-Carroll-Modell dauern viele Stunden. „In der Regel werden nur Teile davon gemacht. Es gibt in Deutschland auch sehr gute Intelligenztests, die nur 30 und 90 Minuten dauern. Entscheidend ist, dass sie zum Anforderungsprofil des jeweiligen Jobs passen. Es muss für ein Unternehmen ja auch machbar sein.“

Dazu kommt, dass der IQ nicht fix ist, auch wenn Studien zeigen, dass Intelli-

genz über die Lebensspanne relativ stabil ist, lässt sie sich dennoch im Kinder- und Jugendalter steigern. Unter Intelligenzforschern wird immer mal wieder öffentlichkeitswirksam debattiert, inwieweit Intelligenz angeboren ist. Markus Bühner positioniert sich sehr deutlich: „Die Evidenz zeigt klar, dass ein Teil der Intelligenz angeboren ist. Ob das nun 50 oder 70 Prozent ist, halte ich für unerheblich. Das heißt aber nicht, dass man seine kognitiven Fähigkeiten nicht verändern kann. Man kann aus der Grundausstattung, die man mitbekommen hat, viel oder wenig machen. Auch Hochintelligente müssen etwas tun, sonst lernen sie nichts. Zu wissen, dass es bei der Intelligenz einen genetischen Anteil gibt, kann also kein Ruhekissen sein, sondern sollte ein Ansporn sein.“

In den 1980er-Jahren fiel dem neuseeländischen Politikprofessor James Flynn auf, dass die gemessenen IQ-Werte über die Jahrzehnte in vielen Ländern zunahm. Dieser Flynn-Effekt wurde von anderen Forschern bestätigt, die Menschen scheinbar also im Laufe der Generationen tatsächlich klüger zu werden.

Seit einigen Jahren ist damit aber offenbar Schluss. Im Gegenteil: Plötzlich zeigen Studien, dass die IQ-Werte stagnieren oder gar sinken. „Die Effekte sind jedoch sehr uneinheitlich und nicht sehr groß. Die Variation der IQ-Werte innerhalb einer Kohorte ist viel größer als die Veränderung im Durchschnitt über die Kohorten hinweg. Es werden in der Literatur Umwelteinflüsse diskutiert wie Änderungen bei der Erziehung oder Bildung sowie bei den Konsumgewohnheiten von Medien. „Die Ursachenklärung ist bis jetzt aus meiner Sicht noch nicht hinreichend erfolgt“, sagt Markus Bühner.

Seit einigen Jahren wird zunehmend die Förderung hochbegabter Kinder thematisiert. Es gibt inzwischen ebenso Hochbegabtenklassen wie Begabungspsychologische Beratungsstellen, so auch an der

LMU, die bei „Verdacht“ auf Hochbegabung den IQ eines Kindes ermitteln und Fördermöglichkeiten mit den Eltern besprechen. Nicht immer bestätigt sich die Vermutung einer überdurchschnittlichen intellektuellen Begabung, sagt Markus Bühner.

Auf der anderen Seite gibt es Kinder, deren Hochbegabung nicht erkannt wird. Einige von ihnen gelten als sogenannte Underachiever, die, obwohl sie mehr als die nötigen intellektuellen Voraussetzungen mitbringen, in der Schule keine guten Noten schreiben. In der Forschung wird davon ausgegangen, dass dies auf 15 Prozent der hochbegabten Kinder zutrifft. „Warum Kinder ‚Underachiever‘ sind, ist immer individuell und lässt sich nicht pauschalisieren. Man muss auch das System sehen, in dem sie sich bewegen“,



**Prof. Dr. Markus Bühner**

ist Inhaber des Lehrstuhls für Psychologische Methodenlehre und Diagnostik an der LMU. Bühner, Jahrgang 1969, studierte Psychologie an der Universität Würzburg, wo er auch promoviert wurde. Nach Stationen an der Universität Marburg und am Universitätsklinikum Lübeck wurde er 2005 an die LMU auf die Juniorprofessur für Methodenlehre und Evaluation berufen und habilitierte sich 2007 an der Universität Marburg. 2009 nahm er einen Ruf an die Universität Graz (Professur für Psychologische Diagnostik) an, bevor er 2011 wieder an die LMU wechselte.

meint Bühner. Manche Kinder scheitern an ihrem schulischen, andere an ihrem familiären Umfeld, manchen fehlt auch einfach die Motivation.“ In einem solchen Fall kann nur eine pädagogisch-psychologische Beratung helfen, die individuellen Ursachen zu erkennen.

Ein Vorurteil wurde bereits in vielen Studien entkräftet: das angebliche Drama des hochbegabten Kindes. Kinder mit einem überdurchschnittlichen IQ unterscheiden sich weder in ihrer emotionalen noch sozialen Entwicklung von ihren Altersgenossen. Im Gegenteil, aufs Leben gesehen, scheint eine hohe Intelligenz ein wertvolles Geschenk zu sein: „Studien zeigen, dass intelligente Menschen im Durchschnitt in allen Lebensbereichen erfolgreicher sind.“ Was aber nicht heißt, dass Menschen mit einem durchschnittlichen Intelligenzquotienten weniger erreichen können. Es handelt sich auch hier um Durchschnittswerte, die in Studien ermittelt wurden, für die Wissenschaftler viele Personen über lange Zeiträume begleitet hatten.

Ob jemand derart begünstigt ist, lässt sich nicht nur bei Kindern ohne fundierten Intelligenztest kaum erkennen. „Man selbst kann das schwer einschätzen“, sagt Bühner. Und den IQ-Wert mal kurz bei anderen zu diagnostizieren funktioniert nicht. Wenn der Nachbar oder die Kollegin schlagfertig ist oder schnell spricht, muss das nicht an einem besonders hohen IQ liegen. „Schnell und logisch denken zu können ist das, was Hochbegabung ausmacht. Sehr intelligente Menschen können schnell verstehen, Anforderungen schnell umsetzen und auch schnell antworten. Aber jeder Mensch hat auch bestimmte Persönlichkeitsmerkmale und ist von seinen Gewohnheiten geprägt. Wer aus einem gemütlichen Umfeld kommt, spricht womöglich auch als Hochintelligenter langsam“, sagt Markus Bühner. „Menschen bestehen nicht nur aus ihrer Intelligenz.“ ■



194102  
0000



Der Beruf des Piloten stellt besondere Anforderungen, an Aufmerksamkeit und räumliches Vorstellungsvermögen beispielsweise. Für Markus Bühner ist deshalb wichtig, nach den einzelnen kognitiven Fähigkeiten zu differenzieren, um mit einem Intelligenztest etwas über die Eignung von Kandidaten aussagen zu können. Im Cockpit eines Airbus A330. Foto: Markus A. Jegerlehner/Keystone



# Mehr als schlau

Menschen lernen, sozial kompetent zu sein, weil sie aufeinander angewiesen sind, sagt Markus Paulus. Der Entwicklungspsychologe untersucht, was das für den Umgang mit Robotern und die Entwicklung künstlicher Intelligenz bedeutet.

Von Nicola Holzapfel

Kinder sind auf Gelegenheiten angewiesen, Erfahrungen im Umgang mit anderen zu machen, sagt Markus Paulus. Spielen in der Kita. Foto: Christoph Soeder/dpa/Picture Alliance

Der Mensch ist sozial geboren. All die unterschiedlichen Aspekte der sozialen Kompetenz, die wir erlernen, haben damit zu tun, dass wir auf andere angewiesen sind und nur als soziale Wesen existieren können“, sagt Markus Paulus, Professor für Entwicklungspsychologie an der LMU. Gibt es also auch so etwas wie eine „soziale Intelligenz“? Häufig wird auch von „emotionaler Intelligenz“ gesprochen, seitdem der US-amerikanische Journalist Daniel Goleman in den 1990er-Jahren mit dem Buch *EQ* einen weltweiten Bestseller schrieb. Es basierte auf der Überlegung, dass die kognitive Intelligenz, gemessen als IQ-Wert, nicht reicht, um sich in der Gesellschaft zu behaupten, sondern dafür auch der gekonnte Umgang mit Gefühlen zählt, den eigenen ebenso wie mit den Emotionen der Mitmenschen.

„Der Intelligenzbegriff wird gern auf alle möglichen Bereiche übertragen. Es besteht offenbar die Befürchtung, dass irgendetwas fehlt, wenn Intelligenz nur rein kognitiv benannt wird, weil es noch so viel anderes im menschlichen Leben gibt, das wichtig ist“, sagt Markus Paulus. „Innerhalb der Psychologie nutzt man den Begriff „soziale Intelligenz“ eher nicht, sondern spricht von sozialen Kompetenzen. Dazu zählen viele unterschiedliche Aspekte und Verhaltensweisen, die ihre je eigenen Entwicklungsverläufe haben.“

Als sozial kompetent gilt beispielsweise, wer über die Fähigkeit verfügt, sich in einer bestimmten Situation, bei der er mit anderen zusammen ist, angemessen zu verhalten. Das kann bedeuten, Empathie zu zeigen, jemandem zu helfen oder einen anderen zu trösten. Zugleich kann es heißen, seine Interessen in einer Gruppe zu vertreten oder, zum Beispiel als Führungskraft, mal dominant, mal integrierend aufzutreten.

Für die Entwicklung sozialer Kompetenzen ist die Kindheit entscheidend. Säuglinge sind noch völlig abhängig von ihren Eltern.

Wenn sie etwas brauchen, schreien sie. Erst mit der Zeit signalisieren sie ihre Wünsche gezielt, damit ihre Eltern in ihrem Sinne reagieren. „Babys werden mehr und mehr zu sozialen Wesen, indem sie lernen, soziale Situationen zu kontrollieren und bestimmte Handlungen bei ihren Eltern her vorzurufen. Im Alter von ungefähr zwölf

## Kinder lernen zu kommunizieren, so werden sie sozial

Monaten kommunizieren Kinder intentional mit der Zeigegeste, die sich durch soziale Interaktion entwickelt hat. Indem Kinder lernen, zu kommunizieren, werden sie sozial.“

Markus Paulus untersucht in vielen Studien, wie sich das soziale Verhalten von Kindern und Empathie entwickeln und woran es liegt, dass Menschen unterschiedlich sozial kompetent sind. Oft nutzt er dabei eine experimentelle Situation, in der Kinder unter bestimmten Vorgaben teilen sollen. So hat der Entwicklungspsychologe in einer Studie, die er unlängst im Fachjournal *Journal of Experimental Child Psychology* veröffentlicht hat, Fünfjährige gebeten, Ressourcen zwischen Personen zu verteilen, die selbst viel oder wenig hatten. „Die Kinder gaben tendenziell der armen Person mehr ab“, sagt Psychologe Paulus. Wie sie verteilten, hing aber nicht mit kognitiven Variablen zusammen, etwa damit, dass sie schon die Perspektive von anderen einnehmen können. Ausschlaggebend waren die sozialen Variablen: Kinder, die schon länger in der Kita waren, also mehr Kontakt zu anderen Kindern hatten, gaben der armen Person mehr ab. Das war auch bei Kindern mit Geschwistern der Fall. Auch diese Studie zeigt: Sozial kompetent

wird man durch die Interaktion mit anderen.“

Kinder sind also auf Gelegenheiten angewiesen, Erfahrungen im Umgang mit anderen zu machen. Die Ausgangsbasis dafür ist die Beziehung zu ihren Eltern. Ergebnisse der Bindungsforschung zeigen, wie sehr die Bindung an die Eltern sich auf den Umgang mit anderen auswirkt. „Je sicherer die Bindung von Kindern an ihre Eltern ist, desto eher sind sie zum Beispiel in der Lage, etwas abzugeben und großzügig zu sein. Das zeigt sich besonders dann, wenn es darum geht, mit jemandem zu teilen, den man eigentlich nicht mag. Je sicherer die Kinder gebunden sind, desto mehr geben sie ab. Das liegt an der Emotionsregulation. Kinder, die sicher gebunden sind, können ihre Gefühle besser steuern.“ Dazu kommt das Verhalten der Eltern, die unweigerlich für ihre Kinder Rollenvorbilder sind. Wie auch Kindergarten und Schule Kindern Möglichkeiten eröffnen, an Rollenvorbildern zu lernen und ihre sozialen Kompetenzen zu trainieren.

Wie Kinder von klein auf soziale Kompetenzen erwerben, interessiert zunehmend die Robotik. Paulus ist Sprecher des Schwerpunktprogramms „Das aktive Selbst“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft, in dessen Rahmen Forscherinnen und Forscher verschiedener Disziplinen zusammenarbeiten und das thematisch bis hin zur Entwicklung künstlicher Intelligenz reicht. „Eine der Fragen, die in den beteiligten Projekten untersucht werden, ist, ob Prozesse, die typisch für die menschliche Handlung und Kompetenzentwicklung sind, auch in Robotern beziehungsweise künstlicher Intelligenz implementierbar sind. Die Robotik schaut sich dabei sehr viel von der Entwicklungspsychologie ab: Wie etwa lernen Kinder, intelligent zu handeln? Wie erwerben sie soziale Kompetenzen? Und wie kann man diese Prozesse in Robotern umsetzen?“

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms arbeitet Markus Paulus unter anderem mit



Menschenähnliche Maschine: Roboter Sophia, die FAZ nannte ihn schon das „It-Girl der Androiden“. Markus Paulus warnt davor, Roboter zu sehr zu vermenschlichen. Das könnte mit ihrer eigentlichen Funktion, Menschen zu helfen, kollidieren. Foto: Robin Utrecht/EPA-EFE/Shutterstock

dem Labor von Professor Verena Hafner vom Institut für Informatik der HU Berlin zusammen. Über kurz oder lang werden sich einzelne soziale Kompetenzen durchaus in Maschinen implementieren lassen, sagt Paulus, und doch funktioniert der Mensch als Bauanleitung nur bedingt: „Es gibt einen grundlegenden Unterschied: Menschliche Intelligenz ist in unsere Kultur eingebettet. Unsere begrifflichen Vorstellungen und Konzepte sind historisch gewachsen, sie sind Teil einer sozialen Lebensform. Manches lässt sich auch nur erfassen, wenn man sensorische Eindrücke hat. Hier wird von *embodied cognition* gesprochen. Man muss Schmerz fühlen können, um zu wissen, was ihn ausmacht. Auch Empathie entwickelt sich nicht, wenn man nicht nachfühlen kann.“

Ängste, die oft in Science-Fiction-Manier in Zusammenhang mit der Entwicklung künstlicher Intelligenz geschürt werden, beispielsweise, dass Maschinen irgendwann einmal die Weltherrschaft übernehmen könnten, kann Markus Paulus daher wenig abgewinnen. „Es besteht ein fundamentaler Unterschied zwischen Robotern und Mensch, sodass künstliche Intelligenz niemals menschliche Intelligenz erreichen wird. Vielleicht können Roboter in manchen Fähigkeiten Menschen übertreffen. Aber in der Bandbreite dessen, was der Mensch kann, in der Flexibilität, in der Grundsätzlichkeit, wird künstliche Intelligenz nicht an den Menschen herankommen.“

Für den Entwicklungspsychologen ist die spannende Frage im Zuge der Entwicklung künstlicher Intelligenz vielmehr, was KI mit den Menschen macht. Er hat bereits begonnen zu untersuchen, wie die Technisierung auf Kinder wirkt. So wurden in einer EEG-Studie Kindern Videos gezeigt, in denen mal Menschen, mal Roboter bestimmte Bewegungen ausführten. Im EEG wurde aufgezeichnet, wie die Kinder darauf reagierten. „Wir haben uns die Spiegelungen im motorischen Kortex im Gehirn ange-

hen. Hier werden Handlungen, die Menschen nur sehen, simuliert, so als ob wir sie selbst ausführen würden. Bei vierjährigen Kindern war im EEG kein Unterschied zu erkennen, ob sie Bewegungen von Menschen oder Robotern sahen. Bei Achtjährigen schon. Sie haben die Bewegungen des Roboters dann genauso wie die des Menschen verarbeitet, wenn ihnen der Roboter zuvor mit menschlichen Eigenschaften beschrieben wurde.“ Unter dieser Voraussetzung, meint der Entwicklungspsychologe, könnten Roboter also als Lehrer durchaus taugen: „Kinder könnten neue Handlungen von Robotern auf eine ähnliche Art lernen wie von Menschen.“



**Prof. Dr. Markus Paulus**

ist Inhaber des Lehrstuhls für Entwicklungspsychologie und pädagogische Psychologie II an der LMU. Paulus, Jahrgang 1980, studierte an den Universitäten Eichstätt und Oulu/Finnland. Er promovierte am Donders Institute for Brain, Cognition and Behavior der Radboud University Nijmegen in den Niederlanden und forschte am Early Social Development Lab der Dalhousie University in Halifax, Kanada, bevor er nach München kam. Im Jahre 2016 zeichnete ihn der Europäische Forschungsrat (ERC) mit einem seiner hochdotierten Starting Grants aus. Seit 2018 ist Markus Paulus Sprecher des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingerichteten Schwerpunktprogrammes „The Active Self“.

Markus Paulus verweist auf das in der Psychologie bekannte Thomas-Theorem – „If men define situations as real they are real in their consequences“: „Sobald ich etwas als bedeutungsvoll ansehe, hat es reale Konsequenzen. In dem Moment, in dem ich eine Beziehung zu einem Roboter aufbaue und Gefühle ihm gegenüber habe, hat das Auswirkungen. Dann nehme ich ihn auch als soziales Wesen wahr“, sagt Paulus.

Das Thomas-Theorem erklärt auch das Ergebnis einer Studie, die Markus Paulus viel Medienresonanz bescherte: Zusammen mit einer Kollegin der Radboud University in Nijmegen hatte der Entwicklungspsychologe untersucht, inwieweit Menschen bereit sind, auf Roboter Rücksicht zu nehmen. Die Studienteilnehmer wurden vor ein sogenanntes moralisches Dilemma gestellt: Würden Sie einen Einzelnen in Lebensgefahr bringen, um eine Gruppe verletzter Menschen zu retten? In unterschiedlichen Szenarien handelte es sich dabei mal um einen Menschen, mal um einen Roboter. Je menschenähnlicher die Maschine dargestellt wurde, desto weniger waren die Versuchspersonen bereit, sie zu opfern, um Menschenleben zu retten. Markus Paulus warnte angesichts des Ergebnisses davor, Roboter zu sehr zu vermenschlichen: „Das könnte mit ihrer eigentlichen Funktion, Menschen zu helfen, kollidieren.“

Markus Paulus will nun weiter untersuchen, welchen Einfluss die Technisierung auf den Menschen und auf unsere Kommunikation hat. Dabei wirft er Fragen auf, die angesichts der rasanten Entwicklung künstlicher Intelligenz drängend erscheinen: „Roboter in der Altenpflege werden über kurz oder lang kommen. Wie wird das Leben älterer Menschen, die nicht mobil sind, dann aussehen? Besteht ihr soziales Leben daraus, mit künstlicher Intelligenz zu kommunizieren, mit Robotern Schafkopf zu spielen – worin die Maschinen wahrscheinlich sehr gut sind. Genügt uns das oder nicht? Und wenn nicht: Was ist es, was uns dabei fehlt?“ ■



# Lernen mit Gefühl

Nervosität vor der Prüfung, Freude über einen Geistesblitz oder Langeweile beim Vokabelpauken: Der Psychologe Reinhard Pekrun untersucht, wie Emotionen die Leistung beeinflussen.

Von Nikolaus Nützel



Was ist gut für das Lernklima in einer Klasse?  
Gymnasium, 2018. Foto: Britta Pedersen/dpa/Picture Alliance

**E**in Klassenzimmer, in dem Kameras Bewegungen, Gesichtszüge und Veränderungen in der Körperhaltung der Schülerinnen und Schüler und auch der Lehrkraft aufzeichnen; hinterher werden die Aufnahmen computergestützt ausgewertet, um zu sehen, wer wann Langeweile ausstrahlte, Verwirrung oder auch Überraschung. Was auf den ersten Blick nach einem beängstigenden Szenario von Komplett-Überwachung klingt, ist ein Weg, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie Emotionen den Lernerfolg beeinflussen. „Da haben wir heute ganz andere Möglichkeiten als noch vor wenigen Jahren“, sagt Psychologie-Professor Reinhard Pekrun. „Und wenn man den Beteiligten und gegebenenfalls den Eltern vermittelt, dass sie einen wichtigen Beitrag zur Wissenschaft leisten, sind sie gerne dabei“, ergänzt er. Angst, Hoffnungslosigkeit, aber ebenso Freude und Entspannung – rund ums Lernen an der Schule oder der Universität hat jeder diese Gefühle schon einmal erlebt. Doch rückblickend ist es für die meisten schwer, die Frage zu beantworten: War die Nervosität vor einer Prüfung nur ein Hemmschuh oder nicht vielleicht doch auch ein Ansporn, sich besonders anzustrengen? War der gelassene, aber ein wenig distanzierte Mathe-Lehrer ein besserer Wissensvermittler als sein gefühlsbetonter Kollege im Fach Physik? Wem von beiden gelang es besser, den Schatz der Intelligenz bei seinen Schülern zu heben? Seit gut 20 Jahren erforscht Pekrun solche Fragen, er hat den Begriff der „Leistungsemotionen“ in der Fachliteratur verankert. „Zu untersuchen, wie sich Emotionen auf den Erfolg beim Lernen auswirken, ist immer noch ein junges Forschungsfeld“, sagt er. Und gerade bei der Umsetzung der Erkenntnisse in der Lehre und in Lernmaterialien gebe es noch einiges zu tun. Emotionen sind der Inbegriff des Subjektiven. Doch die Lernpsychologie hat in den vergangenen Jahrzehnten immer feinere Instrumente entwickelt, um sie so objektiv wie möglich zu beschreiben. Seit in den USA

in den 1930er-Jahren begonnen wurde, Prüfungsangst mit Fragebögen messbar zu erfassen, sind etliche weitere Verfahren dazugekommen. Wenn Probanden sich bereit erklären, ihren Kopf in einen funktionellen Magnetresonanztomographen zu stecken, der den Blutfluss im Gehirn abbildet, lässt sich herausfinden, welche Hirnregionen in

## Auch Verwirrung kann das Lernen befördern

dem Moment aktiviert werden, in dem sich Studienteilnehmer etwa an Erlebnisse intensiver Prüfungsangst erinnern. Über Speichelproben, die Prüflinge vor und nach einem Test abgeben, lässt sich das Stresshormon Cortisol messen. Armbänder mit entsprechenden Sensoren liefern Informationen über den Puls und die Leitfähigkeit der Haut, aus der sich wiederum die Schweißproduktion errechnen lässt. Probanden können in einer Prüfungssituation mündlich in einem Protokoll niederlegen, wie sie sich gerade fühlen, oder sie können Fragebögen ausfüllen.

Nach über zwei Jahrzehnten Beschäftigung mit Leistungsemotionen ist Pekrun vor allem eines wichtig: „Ich möchte dem Schwarz-Weiß-Schema entgegenwirken, dass positive Stimmung immer gut sei und Unangenehmes immer schlecht.“ Auch Verwirrung zum Beispiel könne das Lernen befördern, sofern sie am Ende aufgelöst wird. Die Emotionen rund ums Lernen seien so komplex, dass es weniger einfache Antworten gebe als viele vermuten, sagt Pekrun.

Um die Komplexität der verschiedenen Gefühlslagen abzubilden, hat der LMU-Forscher die Kontroll-Wert-Theorie der Leistungsemotionen entwickelt. Grundlage ist dabei die Feststellung, dass Emotionen als

positiv oder auch negativ empfunden werden können. Sie können aktivieren oder deaktivieren. Wobei es positive Formen der Aktivierung gibt wie Lernfreude – und negative Formen, nämlich etwa die Angst, in einer Prüfung zu versagen. Aber auch Deaktivierung kann mit einer positiven Emotion verbunden sein, etwa Entspannung oder Erleichterung, ebenso wie mit etwas Negativem wie Langeweile oder Hoffnungslosigkeit.

Wobei Pekrun vor der Vermutung warnt, negative Emotionen hätten stets nur negative Wirkung aufs Lernen, und positive Emotionen hätten nur positive Folgen. So könne die Angst vor einem Misserfolg die Motivation steigern, sich durch eher dröge Aufgaben wie Vokabellernen zu kämpfen. Wer gleichzeitig vor lauter positiver Selbstgewissheit, dass ihm ohnehin alles gelingt, ganz entspannt darauf verzichtet, sich intensiv auf Prüfungen vorzubereiten, kann Misserfolge erleiden. Ausschließlich negativ sei es jedoch, wenn jemand nach Frustrationserlebnissen in Hoffnungslosigkeit versinkt.

Die Kontroll-Wert-Theorie stellt dabei in den Mittelpunkt, welches Ausmaß an Kontrolle über den eigenen Erfolg Menschen empfinden und welchen Wert eine Situation für sie hat, in der sie Leistung bringen. Wer in einer wichtigen Prüfung das Gefühl hat, dass er trotz aller Anstrengungen die Anforderungen, die von außen gestellt werden, nicht erfüllen kann, reagiert auf diesen Kontrollverlust womöglich mit Panik oder – wenn es gar keine positive Aussicht mehr gibt – mit Hoffnungslosigkeit und Resignation. Wer für eine als weniger wichtig empfundene Prüfung lernen muss, auf die er wenig Einfluss verspürt, langweilt sich hingegen eher.

Bei der Erforschung von Leistungsemotionen habe die Wissenschaft lange kaum in den Blick genommen, wie viele Dimensionen das Thema hat, erklärt Pekrun. Doch wer lernt, und dabei erfolgreich sein will, schaut nicht nur auf sich selbst, sondern er vergleicht sich mit anderen und schöpft daraus positive oder auch negative Emotionen. Auch Eltern richten Erwartungen an Schüler



Tafel und Kreide – ein Motiv, das Emotionen und Erinnerungen freisetzen kann.  
Foto: Fabian Sommer/dpa/Picture Alliance

und Studierende. „Zudem wird die Interaktion zwischen Lehrenden und Lernenden oft immer noch unterschätzt“, betont Pekrun: „Emotionen können ansteckend sein.“

Er findet es deshalb problematisch, wenn vor allem in den Naturwissenschaften Lehrer sich manchmal immer noch „als neutrale, emotional abstinente Sachwalter des Stoffes verstehen, die alles möglichst objektiv vermitteln wollen“. Es gebe inzwischen ausreichend wissenschaftliche Belege dafür, dass Unterricht erfolgreicher ist, wenn Lehrkräfte Begeisterung für ihr Fach zeigen – wenn sie sie denn haben. Aber auch in der Gegenrichtung seien Emotionen ansteckend: „Das ist keine Einbahnstraße, so wie das früher oft konzipiert wurde. Schüler oder Studierende können Lehrer mit negativen Emotionen anstecken und bis in den Burn-out treiben.“ Wie sehr die Erkenntnisse der Lernpsychologie und Pekruns Forschungen zu Leistungsemotionen inzwischen den Alltag an Schulen und Hochschulen prägen, lasse sich schwer sagen, räumt der LMU-Psychologe ein: „Es steht in den Lehrbüchern und wird auch im Pädagogikstudium vermittelt. Aber man hört auch, dass die Berufsanfänger beim Start in den Schulen gesagt bekommen: Vergesst, was in den Pädagogik-Büchern steht und was ihr an der Uni gehört habt! Das hier ist jetzt die Wirklichkeit.“ Aber auch in der wissenschaftlichen Welt sei es nicht immer einfach, Erkenntnisse in den Köpfen von Kollegen zu verankern, vor allem international betrachtet – selbst wenn diese Erkenntnisse immer besser abgesichert sind. Pekrun erzählt von erbitterten Kontroversen mit Kollegen aus ostasiatischen Ländern, die die Auffassung vertreten, dass es richtig und wichtig sei, Schüler in Furcht und Schrecken zu versetzen und sie zu beschämen, wenn sie nicht hinreichend lernen und in Prüfungen nicht die erwartete Leistung bringen. Internationale Studien, an denen er mitgewirkt hat, hätten jedoch gezeigt, dass solch „schwarze Pädagogik“ das Lernen nicht fördert – aber psychische Schäden anrichten kann. „Das ist eine psychologische Univer-

salie, das gilt also für Menschen auf der ganzen Welt gleichermaßen“, stellt Pekrun fest und ergänzt mit einem gewissen Bedauern: „Die pädagogischen Überzeugungen sind allerdings kulturspezifisch.“

Doch auch die Art und Weise, wie in Deutschland Leistung bewertet wird, passe oft nicht zu dem, was die Forschung zu Leistungsemissionen in den vergangenen Jahrzehnten gezeigt hat. Das traditionelle Notensystem gebe einem Schüler wenig Informationen über seine eigenen Talente und wie er sie entwickeln kann. Vielmehr ziele das deutsche Schulsystem immer noch stark darauf ab, Schülerinnen und Schüler innerhalb der Klasse miteinander zu vergleichen. Eine solche „sozialvergleichende Bewertung“ sorge zwar bei den Einser-Schülern für positive Erlebnisse und gebe ihnen gegebenenfalls auch den Anreiz, sich anzustrengen. Auf der Gegenseite aber würden viele schlechtere Schüler in Gefühle wie Scham und Hoffnungslosigkeit gedrängt, weil sie sich in die Schublade der „weniger Intelligenten“ einsortiert fühlen – was sich in Studien messen lasse. Das deutsche Bildungswesen habe daher noch Nachholbedarf, wenn es darum geht, die Leistung von Schülern zu beurteilen, ohne ihnen dadurch die Freude am Lernen zu rauben, findet Pekrun. Denn Angst vor einer negativen Bewertung von außen, also die extrinsische Motivation, kann die intrinsische Motivation, die auf den Erwerb von Fähigkeiten und Wissen um ihrer selbst willen zielt, durchaus beschädigen.

Bei der Erforschung solcher Zusammenhänge gebe es immer wieder Ergebnisse, die ihn auch nach vielen Jahren durchaus überraschen, erzählt Pekrun. So habe einige Zeit lang die Vermutung vorgeherrscht, dass Menschen mit durchschnittlicher oder auch hoher Begabung davon profitieren, in eine Gruppe echter Spitzenleute zu kommen: „In den Fußball übersetzt hieße das: Wenn ich mit Neuer und Lewandowski in einem Team spiele, wachse ich über mich selbst hinaus.“ Denn die insgesamt hohe Motivation in einer Elite-Gruppe sei ansteckend, so war die Ver-

mutung. Außerdem gebe es in solchen Gruppen Rollenmodelle dafür, wie man außerordentliche Leistung erbringt.

Nähere Untersuchungen, an denen er mitgearbeitet hat, hätten zwischenzeitlich aber gezeigt: Normalbegabte empfinden sich selbst als unterdurchschnittlich, wenn sie mit Hochbegabten zusammen lernen. Das schadet dem Selbstvertrauen, was wiederum Emotionen wie Angst und Scham erzeugen kann, die Motivation senkt und damit auch der Leistung schadet. Wobei Pekrun davor warnt, aus solchen Befunden verkürzte Schlüsse zu ziehen. Daraus lasse sich nicht ableiten, ob ein dreigliedriges Schulsystem, wie es etwa in Bayern Tradition hat, die Motivation und damit Lernerfolge besser fördert als ein System, das auf Gesamtschu-



**Prof. Dr. Reinhard Pekrun**

ist Inhaber des Lehrstuhls für Persönlichkeitspsychologie und Pädagogische Psychologie an der LMU. Pekrun, Jahrgang 1952, studierte an der Technischen Universität Braunschweig und der Universität Tübingen. Er war wissenschaftlicher Assistent an der Ruhr-Universität Bochum und an der LMU, wo er 1982 promoviert wurde und sich 1986 habilitierte. Er lehrte und forschte unter anderem an der Universität Regensburg, seit 2001 ist er zurück an der LMU. Pekrun war und ist Mitglied in zahlreichen Kommissionen im Bildungswesen, unter anderem war er Mitglied der deutschen Konsortien von PISA 2003 und 2006, und er ist Berater des internationalen PISA-Konsortiums.

len setzt. „Das müsste man systematisch untersuchen, aber das ist bis jetzt nicht hinreichend passiert.“ Zumal vor allem viele Gymnasiasten nach dem Wechsel die Erfahrung machen, dass sie nun nicht mehr die vermeintlich hochintelligenten Einser-Schüler sind, die sie oft in der Grundschule waren, was die Lernfreude dämpfen kann.

Eines lasse sich über das deutsche Schulsystem aber sicher sagen: Kinder aus Elternhäusern mit niedrigem Bildungsniveau haben – auch im internationalen Vergleich – weit geringere Chancen, einen hochwertigen Abschluss zu erzielen als Kinder, deren Eltern bereits über einen hohen Bildungsabschluss verfügen. Der Schulerfolg hat also nicht nur mit Intelligenz, sondern viel mit sozialer Herkunft zu tun. „Da haben wir nach wie vor einen ganz erheblichen Nachholbedarf“, stellt Pekrun fest, und er sieht vor allem einen Ansatzpunkt: „Ein sehr früh ansetzender Unterricht zu elementaren Fähigkeiten: Lesen, Schreiben, Sprachförderung. Das ist bisher nicht flächendeckend genug organisiert.“ Reinhard Pekrun hat dabei unterschiedliche Erfahrungen damit gesammelt, inwieweit Lernpsychologen wie er mit ihren Erkenntnissen in der Bildungspolitik Gehör finden. Er hat an den PISA-Studien mitgearbeitet, in denen unter dem Dach der Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) der Leistungsstand von Schülern in verschiedenen Ländern verglichen wird. Über die Rolle, die Bildungsministerien dabei gespielt haben, war er nicht immer glücklich: „Da wurde bis in die Formulierung der Fragebögen hineinregiert. Gerade bei den Themen Schülerverhalten und Lehrerverhalten sind da viele Dinge formuliert worden, die wissenschaftlich nicht sinnvoll waren“, erinnert sich Pekrun. Insgesamt allerdings findet er solche Vergleichsstudien wertvoll, weswegen er – nachdem er bei einigen PISA-Studien ausgesetzt hat – an der Untersuchung für das Jahr 2021 wieder mitarbeitet. Schließlich hat er ohnehin noch viele Fragen dazu, was beim Lernen eine Rolle spielt. ■



70%

## Der menschliche Faktor

Intelligenz der Märkte? Der Ökonom Klaus Schmidt untersucht, wie viel Vernunft dabei ist, wenn wir wirtschaftlich handeln – und wie sich Unvernunft bändigen lässt.

Von Nikolaus Nützel

Das Spiel mit den Preisen: Welche Summe geht bei welcher Käufergruppe? Der Onlinehandel wird künftig auch auf individualisierte Preise setzen; der rasante Fortschritt bei KI-gespeisten wird diese Form des Geschäfts noch raffinierter werden lassen, prognostiziert Klaus Schmidt.  
Foto: Robert Haas/SZ Photo

Die erste Antwort, die intelligente Menschen auf die Frage geben, lautet oft: „33“. Nach einigen Momenten des Überlegens aber haben sie noch ganz andere Lösungen parat. Mit dem Fragespiel zeigt der Volkswirtschaftsprofessor Klaus Schmidt Studierenden gerne,

## »Die Aufgabe: den Wohlstand für alle mehr«

dass es mitunter wirklich schwer ist, eine rundum rationale Entscheidung zu treffen. Vor allem dann, wenn der einzelne nicht weiß, wie rational oder irrational sich andere verhalten. „Rationality and Competition“ heißt der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierte Sonderforschungsbereich, für den LMU-Professor Schmidt als Sprecher nach außen auftritt. Er ist sicher: Die Arbeiten, die dort zum Themenfeld „Rationalität und Wettbewerb“ entwickelt werden, können etwas dazu beitragen, Verbraucher vor Fehlfunktionen der Märkte zu schützen. Und die Forschungen könnten vielleicht helfen, die Welt vor der Blindheit der Marktgesetze gegenüber der Zerstörung der Umwelt zu bewahren.

Doch wie lautet nun die Aufgabe in dem kleinen verhaltensökonomischen Experiment mit den vielen Antworten? Die Teilnehmer sollen eine ganze Zahl zwischen 1 und 100 auf einem Blatt notieren. Sie sollen dabei überlegen, welche Zahl zwei Drittel des Mittelwerts aller von den Teilnehmern notierten Zahlen am nächsten ist. Wer diese zwei Drittel des kollektiven Mittelwerts am besten trifft, bekommt zehn Euro als Belohnung.

Die erste Vermutung der Teilnehmer lautet in der Regel: Die frei gewählten Zahlen zwi-

schen 1 und 100, die die Spieler notieren sollen, dürften einen Mittelwert von 50 haben. Davon zwei Drittel wären 33. Wer aber etwas weiter denkt, und davon ausgeht, dass die anderen Spieler die gleiche Vermutung haben, dass also die meisten 33 notieren, der muss selbst 22 aufschreiben. Denn damit würde er die Belohnung erhalten. Wenn aber alle anderen auch auf 22 als beste Zahl kommen, die wiederum um ein Drittel unterboten werden muss, lautet die wirklich rationale Antwort irgendwann: 1. Denn das ist die niedrigste erlaubte Option. Weil man aber vermuten kann, dass doch nicht alle darauf kommen, ist klar: In der Wirklichkeit liegt die beste Antwort höher als 1. Aber wo? Das könnte man nur wissen, wenn sich die Irrationalität der anderen Mitspieler genau kalkulieren ließe.

Irrationalität exakt zu berechnen ist nicht möglich. Aber ihr Ausmaß und ihre Folgen lassen sich in Experimenten untersuchen und mit Modellen beschreiben. So haben die Forscher um Klaus Schmidt mit einer Versuchsordnung eine ernüchternde Erkenntnis belegt: Schon kleine Geschenke sorgen im Geschäftsleben dafür, dass Entscheidungsträger gegen die Interessen ihrer Auftraggeber handeln. Um zu untersuchen, wie Geschenke in einem Marktgeschehen wirken, haben die Münchner Forscher in einer Versuchsordnung drei Gruppen von Teilnehmern miteinander in Kontakt gebracht. Dabei lief der Austausch völlig anonym über Computerbildschirme. Zwischen den Teilnehmern waren Trennwände, sie konnten einander nicht sehen und nicht miteinander sprechen. Sympathie oder Antipathie konnten keine Rolle spielen.

Die erste Gruppe waren Verkäufer eines Produkts. Die Qualität des Produkts war einfach zu erkennen und standardisiert, es ging um Lotteriespiele mit bestimmten, klar erkennbaren Gewinnchancen. Die zweite Gruppe waren Einkäufer, die entscheiden mussten, welchem Anbieter sie im Auftrag von Kunden – die die dritte Gruppe bildeten – das

Produkt abkaufen. Die Verkäufer hatten dabei die Möglichkeit, den Einkäufern vorab kleine Geschenke in Form von „Tokens“ zu machen, die für die Teilnehmer des Experiments am Ende 20 Cent wert waren.

Das Ergebnis sei eindeutig, sagt Schmidt. Wenn es keine Möglichkeit zu Geschenken gibt, entscheiden sich die Einkäufer für das Produkt, das sie für das bessere halten – auch im Interesse ihrer Kunden. Der Markt funktioniert. Doch schon, wenn der Verkäufer ein Geschenk von 20 Cent gibt, bevorzugen die Einkäufer diesen Lieferanten – zum Nachteil der Kunden, in deren Interesse die Einkäufer eigentlich handeln sollen. „Und da sind wir ja noch weit unterhalb der Schwelle zur Korruption“, betont Schmidt. Er hat deshalb wenig Zweifel daran, dass beispielsweise Ärzte die Produkte von Pharmafirmen bevorzugen, von denen sie Zuwendungen erhalten – und seien es auch nur kleine Zuwendungen. Gut ablesbar sei dieser Zusammenhang in den USA. Das amerikanische Gesundheitswesen ist – gemessen am Bruttoinlandsprodukt – das teuerste der Welt. Und es ist nachgewiesen,

## Kunden auf der Verliererseite

dass die internationale Pharmaindustrie die amerikanischen Ärzte besonders intensiv mit Aufmerksamkeiten bedenkt. Bemerkenswert fand Schmidt dabei ein spezielles Ergebnis des Experiments: „Den Einkäufern ist bewusst, dass sie durch die Geschenke beeinflusst werden. Das bringt sie nicht davon ab, sich beeinflussen zu lassen. Und: Sie glauben, dass sich die anderen Einkäufer noch stärker beeinflussen lassen.“ Schmidt und seine Kollegen zeigen aber auch für andere Bereiche, auf welche Weise

Marktmechanismen zulasten vieler Verbraucher gehen können, wenn nicht gar der ganzen Gesellschaft. Ein bekanntes Beispiel seien Drucker. Seit Jahren schon bieten Hersteller Geräte zu einem Preis an, der die Produktionskosten nicht deckt, beispielsweise einen Laserdrucker für nur 65 Euro. Gleichzeitig kostet eine Original-Tonerpatrone des gleichen Herstellers 59 Euro, woran die Firma gut verdient. Sie muss zwar damit rechnen, dass es Käufer gibt, die sich den billigen Drucker erst kaufen, wenn sie recherchiert haben, dass andere Unternehmen Toner zu einem günstigen Preis anbieten, etwa für 19 Euro. Doch die Herstellerfirma verlässt sich darauf, dass es „naive“ Kunden gibt, die sich nicht so gut informieren oder die die Sorge haben, nur Original-Toner aus dem Haus der Herstellerfirma brächten die volle Qualität, erklärt Schmidt: „Hier ist klar, dass ein Teil der Kunden systematisch ausgebeutet wird.“

Er hat mit seinen Kollegen Modelle entwickelt, die zeigen, dass es aus der Sicht der Unternehmen gewinnmaximierend ist, sich auf die Irrationalität eines Teils der Kundenschaft zu verlassen. Egal, ob es um Drucker-Produzenten geht oder um Kreditkartenfirmen, die ihre Angebote vermeintlich kostenlos auf den Markt bringen und hinterher etwa an drastischen Überziehungszinsen verdienen. „Gesellschaftlich sind solche Geschäftsmodelle natürlich schädlich“, betont Klaus Schmidt. Deshalb seien immer wieder politische Eingriffe notwendig. Das Vorgehen der EU-Kommission gegen versteckte Preiselemente bei Flugreisen findet er deshalb genauso sinnvoll wie das Verbot von Mobilfunk-Roaminggebühren im EU-Ausland, das die Europäische Kommission unlängst durchgesetzt hat.

Auf die Frage, ob es nicht ganz natürlich sei, dass es Gewinner und Verlierer gibt und dass naive Käufer eben oft auf der Verliererseite stehen, hat Schmidt eine klare Antwort: „Die Aufgabe der Marktwirtschaft ist es nicht, Gewinner und Verlierer zu produzieren. Sondern es geht um ein gutes Ge-

samtergebnis, bei dem jeder das Beste aus seinen Möglichkeiten herausholen kann.“ Diese Überzeugung vertritt er auch als Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat des Bundeswirtschaftsministeriums. Dort versucht er, die Aufmerksamkeit von Politikern darauf zu lenken, wie sich eine Rationalität in die Marktwirtschaft bringen lässt, in der nicht nur die Profitmaximierung einzelner Firmen zählt, sondern die Mehrung des Wohlstands für alle.

Allerdings wächst seiner Ansicht nach derzeit die Gefahr, dass Verbraucher manipuliert werden. Bei jedem Kauf übers Internet, aber auch schon bei der Online-Suche nach Produkten, Reisen oder Versicherungen



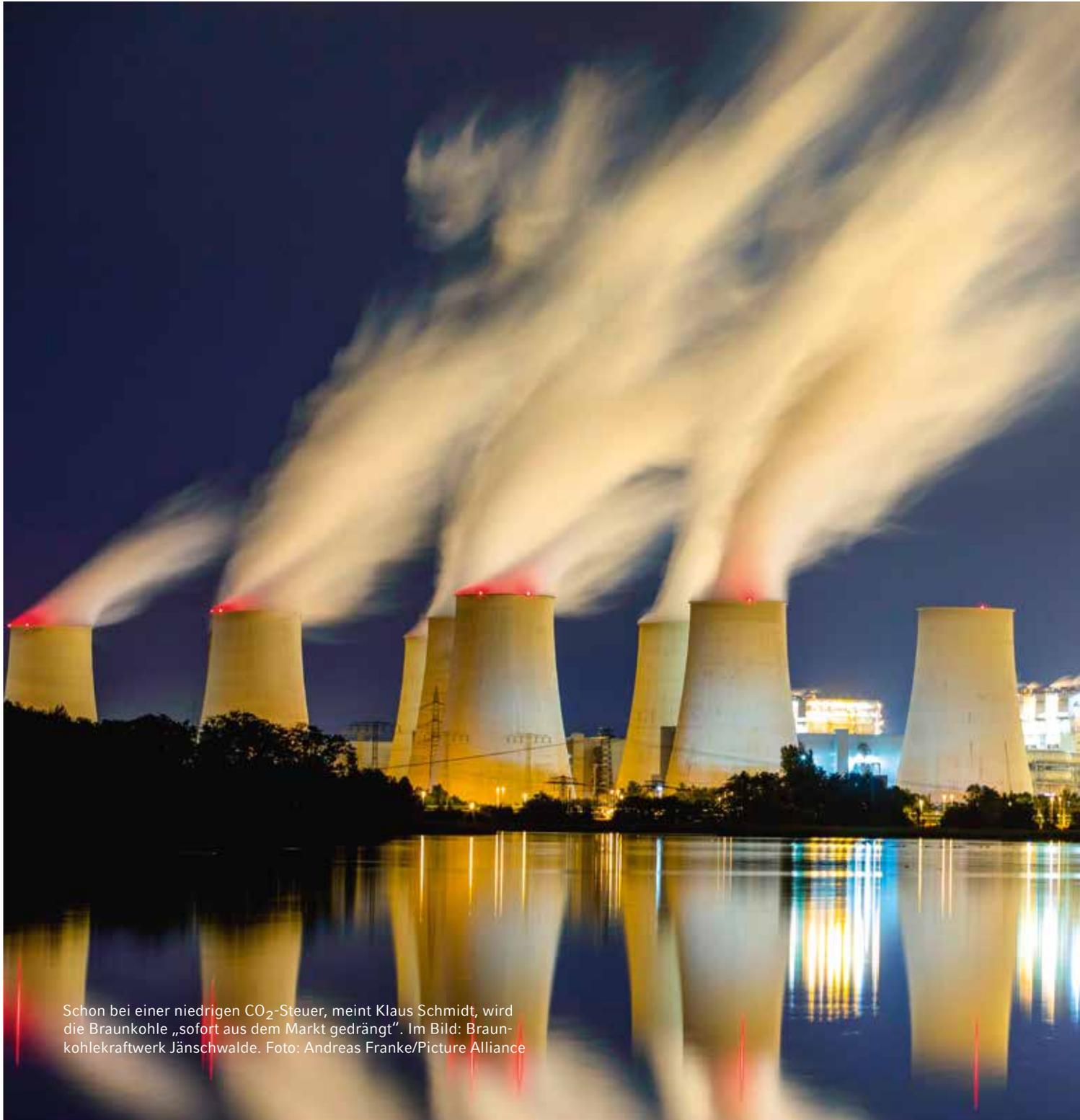
**Prof. Dr. Klaus M. Schmidt**

ist Ordinarius für Volkswirtschaftslehre am Seminar für Wirtschaftstheorie der LMU. Schmidt, Jahrgang 1961, studierte Volkswirtschaftslehre und Politikwissenschaft an der Universität Hamburg. In Volkswirtschaft wurde er an der Universität Bonn promoviert, wo er sich auch habilitierte. Seit 1995 ist Schmidt Professor an der LMU. Er hatte zwischen 2007 und 2011 eine Forschungsprofessur an der LMU und war mehrmals Gastprofessor in den USA, an den Universitäten Stanford, Yale, Berkeley und Harvard. Er ist der Sprecher des Sonderforschungsbereichs (SFB) „Rationality and Competition“, den die DFG finanziert. Zuvor war er bereits Sprecher des SFB „Governance and the Efficiency of Economic Systems“.

hinterlassen Konsumenten Spuren, die etwas darüber aussagen, wie wichtig ihnen der Preis eines Angebots ist, wie leicht sie sich von vermeintlichen Sonderangeboten beeinflussen lassen, wie gut sie in der Lage sind, eine Entscheidung aufzuschieben, um am Ende eine wohldurchdachte Wahl zu treffen. Der Versandhändler Amazon hat vor einiger Zeit bereits versucht, Preise auf einzelne Kunden zuzuschneiden, je nachdem, wie preissensibel sie waren. Amazon habe diese Praxis wieder zurücknehmen müssen, weil der Protest zu groß gewesen sei, stellt Schmidt fest. Doch er ist überzeugt: „Mit den rasanten Fortschritten der künstlichen Intelligenz wird das wiederkommen. Und es wird sehr viel raffinierter kommen, als wir es bislang hatten.“

Die Forschungen von Schmidt und seinen Kollegen zeigen aber genauso, dass sich der Irrationalität der Märkte etwas entgegenzusetzen lässt, auch in Zeiten von Künstlicher Intelligenz und Hochfrequenz-Aktienhandel: Anleitungen zum rationalen Handeln. So konnten die Wissenschaftler zeigen, dass Schüler, denen verständlich aufgezeigt wird, wie man klugerweise mit Geld umgeht, solche Informationen durchaus verstehen und umsetzen können. Und die Forscher haben auch gezeigt: Auf Wertpapiermärkten bilden sich Spekulationsblasen vor allem dann, wenn Marktteilnehmer beteiligt sind, die einer gewissen Naivität erliegen – von „low levels of cognitive sophistication“ ist in der entsprechenden englischsprachigen Veröffentlichung die Rede. Wenn man dafür Sorge, dass die Käufer von Wertpapieren besser verstehen, was sie tun, sei die Gefahr nachweislich geringer, dass sich Spekulationsblasen aufblähen, so das Ergebnis.

Die Fragen der Verhaltensökonomie, die er mit seinen Kollegen erforscht, haben allerdings nicht nur mit Verbraucherschutz oder der Bildung von Spekulationsblasen zu tun. Schmidt ist auch sicher, dass sein Fach etwas beitragen könne, damit die Welt nicht in eine Klimakatastrophe stürzt. Er findet es nicht überraschend, dass die Klimakonfe-



Schon bei einer niedrigen CO<sub>2</sub>-Steuer, meint Klaus Schmidt, wird die Braunkohle „sofort aus dem Markt gedrängt“. Im Bild: Braunkohlekraftwerk Jämschwalde. Foto: Andreas Franke/Picture Alliance



renzen in Kyoto und Paris keine umfassenden und nachhaltigen Erfolge gebracht hätten. In Kyoto sei die Grundidee gewesen, den weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß über eine Art von Verschmutzungsbudgets international zu steuern. „Wenn man das mathematisch beschreiben wollte, bekäme man einen hochkomplexen Vektor“, erklärt Schmidt. So komplex, dass es nicht verwunderlich sei, dass das Projekt zu wenig geführt habe. In Paris habe man auf Selbstverpflichtungen der einzelnen Länder gesetzt, die sie jeweils mit Maßnahmen umsetzen sollen, die sie individuell festlegen. Auch dieser Ansatz habe wenig gebracht.

Vielversprechender sei es, einen einheitlichen Preis festzusetzen, der auf den Ausstoß von Kohlendioxid als Steuer aufgeschlagen wird und von dem klar ist, wie er sich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten entwickelt. Ein solches Modell Sorge dafür, dass die externen Kosten, die durch eine Schädigung der Umwelt entstehen, direkt in die schädlichen Produkte – wie etwa Erdöl oder Kohle – eingerechnet werden. „Wenn wir das schon mit einem vergleichsweise niedrigen Aufschlag durchrechnen, wird etwa die Braunkohle sofort aus dem Markt gedrängt. Weil sie sich gegenüber Erdgas, das deutlich weniger klimaschädlich ist, vom Preis her nicht mehr behaupten könnte. Und auch nicht gegenüber erneuerbaren Energien.“

Besonders wichtig wäre es dabei, jetzt festzulegen, wie der CO<sub>2</sub>-Aufschlag in den kommenden Jahren steigen wird. „Heute weiß ich nicht, wo in zehn Jahren der Spritpreis liegt und wie entsprechend ein Auto mit Verbrennungsmotor im Vergleich zu einem Elektroauto von den Verbrauchskosten her dastehen wird“, erklärt Schmidt. Wenn aber klar wäre, dass der CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf Benzin und Diesel in fünf Jahren um einen deutlichen Betrag steigt und in weiteren fünf Jahren noch einmal, dann könnten Autokäufer auf einer berechenbaren Basis kalkulieren. „Das Gleiche gilt für einen Hausbesitzer, der darüber nachdenkt, in eine Wärme-

pumpe zu investieren oder für ein Unternehmen, das nach der kostengünstigsten Lösung für seine Energieversorgung sucht“, sagt Schmidt.

Schmidt hat mit seinen Kollegen in einem Experiment die Grundkonstellation der Klimaverhandlungen von Kyoto und Paris mit Verhandlungen über eine internationale CO<sub>2</sub>-Steuer verglichen. „Das war zwar in

## Experimente für eine CO<sub>2</sub>-Steuer

einem abstrakten und stark vereinfachten Laborexperiment, aber wir haben festgestellt: Wenn die Versuchsteilnehmer über diesen einheitlichen CO<sub>2</sub>-Preis verhandeln, kommen sie zu einem doppelt so guten Ergebnis wie bei den beiden anderen Verhandlungsdesigns.“ Demnächst will er mit Schülern und Studenten, die am „Model United Nations“ teilnehmen, das Ergebnis dieses Experiments weiter absichern. Und er ist überzeugt, dass dann noch klarer wird, welche Art von Verhandlungen am effizientesten sind, um den Ausstoß von Kohlendioxid zu senken: die über einen einheitlichen CO<sub>2</sub>-Preis, von dem nur festgelegt werden müsste, wie hoch er ist.

Schmidt will dabei realistisch bleiben. Er ist sich bewusst, dass es derzeit, international gesehen, starke Kräfte gibt, die fossile Energieträger weiter fördern wollen. Doch er ist überzeugt: In einigen Jahren werden die Probleme durch den Klimawandel so groß sein, dass die Staatengemeinschaft nach Wegen suchen muss, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß effizient zu senken. Dann werde aus der Volkswirtschaft und der Verhaltensökonomie ein Beitrag vorliegen: „Wir haben dann einen Vorschlag, von dem wir sagen: So könnten wir das schaffen.“ ■



Lernstoff für die Algorithmen: Daten von Gehirnschans in einem funktionellen Magnetresonanz-Tomographen (fMRT).  
Foto: Vo Trung Dung/Science Photo Library/Look at Sciences



# Muster-Schüler

Wie Algorithmen lernen können, Strukturen zu erkennen:  
Psychiatrische Diagnosen, Rekonstruktionen antiker Texte und bildgebende  
Verfahren in der Medizin – drei Anwendungsbeispiele von KI

# Raus aus dem Teufelskreis

Der Psychiater Nikolaos Koutsouleris entwickelt KI-basierte Verfahren, mit denen sich psychische Erkrankungen früh erkennen lassen.

Das Ausmaß ist gewaltig. Experten gehen davon aus, dass etwa jeder dritte Erwachsene im Laufe seines Lebens an einer psychischen Störung erkrankt. Nicht zuletzt wegen der stärker fordernden Lebensbedingungen ist die Tendenz in westlichen Industrienationen steigend. Vor allem Depressionen nehmen zu. Rund 30 Prozent der Erkrankungen verlaufen chronisch. Affektive und psychotische Störungen verursachen europaweit jährliche Kosten von 207 Milliarden Euro, etwa ebenso viel wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Ganz abgesehen von dem Leiden der Millionen Betroffenen: „Das sind enorme Kosten für die Gesellschaft“, sagt Nikolaos Koutsouleris, Psychiater und Leiter des Bereichs Früherkennung und Frührehabilitation psychischer Erkrankungen am LMU-Klinikum. Das Problem ist umso größer, da nur 30 bis 50 Prozent der psychotherapeutischen und pharmakologischen Behandlungen in der Psychiatrie effektiv sind. Trotz intensiver Forschungsanstrengungen hat sich die Erfolgsquote nicht wirklich verbessert. „Entscheidend sind die frühe Diagnostik und die Prognostik“, sagt Koutsouleris. Eine rechtzeitige Therapie kann betroffene Menschen vor einer langwierigen, schweren Erkrankung bewahren. „Wenn man jahrelang auf Hilfe warten muss und die Krankheit schon weit vorangeschritten ist, helfen die besten Medikamente und Therapien nichts mehr.“

Daher gründete Koutsouleris vor sechs Jahren an der LMU-Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie die Sektion für Neurodiagnostische Verfahren, 30 Forscher arbeiten hier inzwischen: Mediziner, Psychologen, Informatiker. Parallel initiierte er mit dem internationalen, EU-geförderten Projekt PRONIA die Forschung an neuartigen Prognose-Tools zur Früherkennung psychoti-

scher Erkrankungen. Es basiert auf selbstlernenden Algorithmen, die aus großen und komplexen Datensätzen charakteristische Muster einer speziellen psychischen Erkrankung herausfiltern sollen. Zum Trainieren lassen sich dabei nicht nur klinische und neuropsychologische Informationen, sondern auch bildgebende und genetische Daten verwenden. Psychische Erkrankungen seien sehr komplex, sagt Koutsouleris. „Oft mischen sich verschiedene Krankheitsbilder bei einem Patienten.“ Die schlaue Software soll den Forschern helfen, die Psychose-Risiken deutlich früher zu diagnostizieren, und die Diagnose selbst besser zu machen. Ziel sei es, so Koutsouleris, die Behandlung gezielt zu personalisieren. „Bislang sind wir

## Selbstlernende Systeme, selbst entwickelt

in der Psychiatrie oft in einer Art Blindflug, weil wir nicht wissen, welches Medikament bei wem am besten passt“, sagt der Psychiater. „Die Algorithmen können uns womöglich helfen, unnötige Therapien zu vermeiden. Psychopharmaka haben ja oft gravierende Nebenwirkungen. Auf der anderen Seite kann den Patienten gezielt und individuell geholfen werden, die ein besonders hohes Risiko für einen schlechten Krankungsverlauf haben.“

Künstliche Intelligenz und selbstlernende Software sind mittlerweile ein großes Thema in der Medizin. Eher beiläufig erzählt der Psychiater, er habe schon vor Jahren

begonnen, selbst die vektorbasierten Algorithmen zu entwickeln, ungewöhnlich in diesem hochspezialisierten Segment der künstlichen Intelligenz. „Mich interessiert das Thema schon lange“, sagt er. „Ich habe meine ersten Algorithmen vor mehr als zehn Jahren geschrieben.“ Den Begriff KI mag er nicht, er spricht lieber über „Muster-Erkennungs-Maschinen“. NeuroMiner heißt die von ihm entwickelte Algorithmus-Bibliothek, die auf frei verfügbarer Software basiert und darauf optimiert ist, Vorhersagen zu machen, wie wahrscheinlich in einem bestimmten Zeitraum eine Erkrankung bei einem Patienten auftritt und wie hoch die Wahrscheinlichkeit des individuellen Therapieansprechens ist. Es ist also ein sehr kliniknaher Ansatz, der darauf abzielt, nicht mehr nur Unterschiede zwischen Patientengruppen etwa mit Schizophrenien oder Depressionen zu beschreiben, sondern künftig auch individuelle Krankheitsverläufe und -ergebnisse vorherzusagen.

Immer noch krankt die Vorhersagekraft der Algorithmen in bestimmten Bereichen der Medizin daran, dass zu wenige hochwertige Daten über spezifische Krankheiten vorliegen oder, wie bei psychiatrischen Krankheiten, die Krankheitsbilder nicht immer klar zu definieren sind. Um die Algorithmen zu verbessern, sammeln die Forscher im Rahmen von PRONIA an inzwischen zehn Kliniken in Europa und Australien möglichst detaillierte Informationen zu Psychosen und ihren ersten Anzeichen. Koutsouleris leitet das internationale Projekt.

Die Studienteilnehmer werden zwei Tage lang detailliert untersucht, die Ärzte führen ausführliche Gespräche mit ihnen über ihre Lebenssituation und die Vorgeschichte, sie füllen dabei standardisierte Fragebögen aus, deren Ergebnisse direkt in das Vorhersage-

Tool einfließen. „Ärztliches Wissen muss in eine Gleichung gepackt werden“, sagt Koutsouleris zum Vorgehen. Die Probanden machen zudem neuropsychologische Tests, lassen ihr Gehirn im Kernspintomographen

## Viel ärztliches Wissen in einer Gleichung

scannen und ihr Blut auf genetische Marker hin untersuchen, die ein mögliches Risiko für Psychosen angeben. Bislang haben 2000 Patienten teilgenommen, ein Drittel sind gesunde Menschen. Rund drei Viertel kommen regelmäßig alle drei Monate, sodass sich auch der Verlauf und mögliche Veränderungen gut dokumentieren lassen. Mit zunehmender Zahl der Teilnehmer soll das System sich immer weiter verbessern.

Bewusst trainierten die Forscher ihre Algorithmen zunächst nur mit klinischen Daten. Im Ergebnis erreichten sie damit eine Vorhersagekraft von immerhin 70 bis 80 Prozent, sie war bei Psychosen insgesamt besser als bei Depressionen. „Wir könnten ohne weitere Eingriffe in den Lernprozess sogar auf bis zu 90 Prozent Genauigkeit kommen, aber wir haben das Design der Algorithmen an den Klinikalltag angepasst“, sagt Koutsouleris. „Die Diagnostik- und Prognose-Tools sollen Ärzten ohne aufwendige Datenerhebung helfen, auch etwa Hausärzten, die wenig erfahren sind mit psychiatrischen Erkrankungen.“

Dass die Diagnose bei Depressionen weniger genau war als bei Schizophrenien, liege vermutlich daran, dass „Depressionen heterogener“ seien, meint der Psychiater. Depressionen haben höchst unterschiedliche Auslöser: Liebeskummer kann genauso dazugehören wie Cannabiskonsum, Stress oder eine beginnende Psychose. Die Gren-

zen zwischen Depression und psychotischen Erkrankungen seien vor allem in jungen Jahren nicht so klar.

Bei weiteren Studien zeigten sich die Möglichkeiten des modularen Lernsystems. Als die Forscher die Algorithmen zusätzlich mithilfe von Biomarkern aus strukturellen Kernspinaufnahmen trainierten, verbesserte sich die Vorhersagegenauigkeit bei Depressionen um das 10-fache, bei Schizophrenien immerhin um den Faktor 2 bei jenen Patienten, deren Prognose basierend auf klinischen Daten ungenau war. Als Biomarker für diese Psychosen konnten die Forscher spezifische Veränderungen im Volumen der Großhirnrinde identifizieren, auch Veränderungen im Kleinhirn und den Basalganglien. „Bestimmte Teilsysteme des Gehirns,



**Prof. Dr. Nikolaos Koutsouleris**

ist Professor für Neurodiagnostische Verfahren in der Psychiatrie an der LMU und Facharzt für Psychiatrie und Psychotherapie am Klinikum der LMU. Koutsouleris, Jahrgang 1976, studierte Humanmedizin an der LMU. Er war zunächst Assistenzarzt an der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der LMU. Er habilitierte sich an der LMU, Koutsouleris baute dort die Sektion für Neurodiagnostische Verfahren auf, ist Leiter des Bereichs Früherkennung und Frührehabilitation psychischer Erkrankungen und koordiniert das EU-finanzierte Projekt PRONIA („Personalized Prognostic Tools for Early Psychosis Management“).

die die Denkabläufe koordinieren und kontrollieren sowie unser Empathievermögen und Belohnungsverhalten steuern, sind für die Vorhersage wichtig“, sagt Koutsouleris. Dass die mittlerweile zehn Zentren in Europa und Australien unterschiedliche MRT-Geräte verwenden und auch die untersuchten Personen aus verschiedenen Regionen der Welt stammen, sieht Koutsouleris als Vorteil an. „So ist das System von Anfang an robuster“, sagt der Psychiater. „Die Erkrankung wird aufgrund der vielen lokalen Facetten in ihren Ausprägungen deutlich besser erfasst.“ Zudem bringen sich bei PRONIA Forscher aus Ländern mit unterschiedlichen Gesundheitssystemen ein, so werden spezifische Probleme vor Ort besser erfasst. Nur so bekäme man einen „Fingerprint der Erkrankung“ mit all ihren lokalen und individuellen Facetten. Das sei ein riesiger Vorteil gegenüber Ansätzen, die lokal begrenzt sind, sagt Koutsouleris.

Künftig wollen die Forscher verstärkt auch genetische Daten für ihre Algorithmen nutzen. Dabei geht es um Informationen über sogenannte SNPs (Single Nucleotide Polymorphisms). Von solchen individuell verteilten Abweichungen in einzelnen DNA-Bausteinen gibt es eine ganze Reihe, die bekanntermaßen Auswirkungen auf Gehirnstrukturen haben beziehungsweise in Bezug zu psychiatrischen Erkrankungen stehen. Gleichzeitig wollen die Wissenschaftler auch erforschen, warum bestimmte Arzneimittel bei manchen Personen wirken und bei anderen nicht, und so unerwünschte Nebenwirkungen vermeiden. Man will in internationalen Kooperationen künftig auch Untergruppen von Patienten untersuchen, um ein genaueres Bild bestimmter Erkrankungen wie Schizophrenien oder Depressionen zu bekommen. „Das Einbeziehen der Genetik wird die Vorhersagekraft verbessern“, sagt Koutsouleris. Aber eines stellt der Psychiater klar: „Egal wie gut die Algorithmen sind, sie werden in der Klinik nie den erfahrenen Arzt ersetzen.“ ■

Hubert Filser

# Im Fragmentarium

Der Altorientalist Enrique Jiménez nutzt künstliche Intelligenz, um 3000 Jahre alte Texte wiederherzustellen.

Manchmal entscheidet ein einziges Zeichen darüber, ob die Arbeit stockt. Der Altorientalist Enrique Jiménez arbeitet daran, die Anfänge der Weltliteratur zu rekonstruieren. In Mesopotamien entstanden einst die ersten Hochkulturen der Menschheit. Etwa ab 2500 vor Christus entwickelte sich eine reiche literarische Tradition, die zweisprachig war: Die Texte wurden in Sumerisch und Akkadisch in Keilschrift auf Tontafeln geschrieben. Das Problem für Wissenschaftler wie Jiménez: Die Texte sind lediglich in Fragmenten überliefert, manche nur wenige Zentimeter groß. Die Herausforderung ist, genau jene Stücke zu identifizieren, die zusammengehören, da das Schreibsystem mehrdeutig ist und die Lesart vom Kontext abhängt. „Es ist unglaublich irritierend, wenn man die Arbeit an einem Text aufgeben muss, weil ein einziges Zeichen fehlt und man weiß, dass es irgendwo ein Fragment gibt, das genau in diese Lücke passt“, sagt der LMU-Forscher.

Enrique Jiménez hat sich zum Ziel gesetzt, diese Lücken zu schließen, und setzt dabei auf künstliche Intelligenz. Für sein Vorhaben wurde er mit dem Sofja Kovalevskaja-Preis ausgezeichnet. Mit dem Programm unterstützt die Alexander von Humboldt-Stiftung den wissenschaftlichen Nachwuchs dabei, innovative Forschungsprojekte an einer Forschungseinrichtung ihrer Wahl zu verwirklichen. Jiménez hat sich für die LMU entschieden, wo er nun sowohl am Institut für Assyriologie arbeitet als auch am Lehrstuhl für Alte Geschichte und dort die Arbeitsgruppe „Electronic Babylonian Literature“ aufbaut. Das Team hat bereits begonnen, eine Datenbank zu erarbeiten, in die alle Textfragmente, soweit sie digitalisiert vorliegen, aufgenommen und transkribiert werden. Seit Projektbeginn im Mai

2018 wurden bereits 8000 Fragmente erfasst. „Ich hoffe, dass wir bis zum Ende dieses Jahres bei 15.000 sind. Dann wird man die Datenbank nach allen bislang unpublizierten Fragmenten aus der Bibliothek von Assurbanipal in einer Sekunde durchsuchen können.“

Der assyrische Herrscher Assurbanipal hatte vor etwa 2700 Jahren in der Stadt Ninive eine Bibliothek aufgebaut, um dort das gesamte Wissen seiner Zeit zu sammeln. Nach seinem Tod wurde sie im Jahr 612 vor Christus von Eroberern zerstört und all ihre Bestände wurden zerschlagen. Heute lagert

## 40.000 Tafeln aus dem British Museum

der Großteil der bislang gefundenen Tonfragmente im British Museum in London. Etwa die Hälfte ist bislang noch nicht erfasst – eine Arbeit, die Enrique Jiménez im Rahmen seines Projekts in Kooperation mit dem Museum leisten wird. Von Mai an werden zwei Mitarbeiter die restlichen Tontafelsammlungen aus dem British Museum fotografieren und damit den Digitalisierungsprozess beginnen. In den nächsten fünf Jahren sollen den Forschern 40.000 Fotografien von Keilschrifttafeln zur Verfügung gestellt werden.

Jiménez nutzt seit Jahren die Möglichkeiten, die die digitalen Medien in seinem Forschungsfeld eröffnen. Anfangs hat er noch selbst einfache Datenbanken programmiert, inzwischen arbeitet er mit Informatikern

zusammen. An der Yale University etwa war der Altorientalist am Cuneiform Commentaries Project beteiligt, in dessen Zuge Kommentarliteratur aus Mesopotamien online publiziert wurde. Auch Jiménez wird seine Ergebnisse über eine Webseite zugänglich machen. Momentan geht es noch darum, das Programm das akkadische Lexikon zu lehren und ihm alle möglichen Lesarten eines Zeichens beizubringen. „Unser Ziel ist es, dass das Programm Zeichensequenzen erkennt und automatisch in einer Textstelle mit den passenden Wörtern in Verbindung bringt. Für einen Computer ist es viel einfacher, das zu tun, als für einen Menschen. Ein Computer kann alle Lesarten gleichzeitig in Betracht ziehen und neue Fragmente automatisch mit den bereits erfassten Texten abgleichen.“ Zunächst geht es darum, Texte zu vervollständigen und wiederherzustellen. Geplant sind jedoch bereits Übersetzungen in mehrere Sprachen, neben dem Englischen auch ins Deutsche und Arabische.

In seiner Forschung konzentriert sich Jiménez auf literarische Texte, die im ersten Jahrtausend vor Christus im Gebiet des heutigen Irak zirkulierten – „eine Zeit, in der die akkadische Literatur eine Blüte erlebte“ –, und auf Texte, die eine poetische Struktur haben. Im Rahmen seines Projekts wird Jiménez einen Textkorpus von etwa 10.000 Zeilen bearbeiten. Dafür arbeitet er auch mit Anmar A. Fadhil von der Universität Bagdad zusammen, die literarische Tafeln aus der berühmten nordbabylonischen Bibliothek von Sippar verwahrt. Der Historiker Berossus, der im vierten und dritten Jahrhundert vor Christus lebte, liefert folgende Vorgeschichte der Bibliothek: Bevor er in die Arche stieg, habe der babylonische Noah sämtliche Schriften der me-



Erst Abschrift, dann Algrithmus: Am Ende sollen die Keilschriftfragmente zu einem Textkorpus geordnet sein.  
Foto: Christoph Olesinski/LMU

sopotamischen Tradition in der Stadt Sippar vergraben, um sie vor der drohenden Sintflut zu bewahren, als er hörte, dass die Flut bevorstand. Der Ort lag nahe der heutigen Stadt Bagdad, die Bibliothek wurde erst im Jahr 1986 entdeckt. Zu dem Korpus zählen das babylonische Welterschöpfungsepos *Enuma eliš* – „ein sehr schöner Text“, wie Jiménez sagt – und die Flutgeschichte. „Diese Literatur ist einerseits sehr anders als das, was wir heute kennen. Aber zugleich gibt es viele Parallelen, auch thematisch. Wir werden mit den irakischen Kollegen die wichtigsten literarischen Tafeln publizieren. Eine davon ist ein Fragment aus dem Gedicht vom leidenden Gerechten, dem babylonischen Hiob.“

In dem Gedicht wird ein gerechter Mann gestraft. Etwa in der Mitte des Textes wird der Mann erst bestraft und dann begnadigt, wobei ihm die Begnadigung durch Träume übermittelt wird. Durch die Zuordnung eines kleinen Fragments, das in der Bibliothek in Sippar entdeckt wurde, ist es den Altorientalisten gelungen, diese wichtige Stelle in dem Gedicht erstmals zu rekonstruieren. „Wir konnten nun die Traumpassage entschlüsseln. Seit 2000 Jahren konnte sie niemand lesen. Wir haben damit einen Text wiederhergestellt, der schon in der Antike ein Klassiker war, und können ihn so in die Moderne bringen.“

Auch Tonfragmente, die eine Hymne an den babylonischen Gott Marduk enthalten, konnte Enrique Jiménez zusammenführen. „Die Texte, die ich im Rahmen meines Projekts bearbeite, sind Poesie. Im Akkadischen bestehen sie aus zwei halben Versen und einer Zäsur in der Mitte, was man beim Lesen deutlich hört. Es ist sehr schwierig, diese poetische Struktur ins Deutsche zu übersetzen.“ In wissenschaftlichen Publikationen werden die Texte in der Regel wortwörtlich ins Englische übersetzt. Jiménez hat das wieder zusammengesetzte Fragment ins Deutsche übertragen, sodass sich nun folgende Zeilen lesen lassen (die neu ergänzten Zeilen sind kursiv dargestellt):

Marduk, deine Wut ist wie eine gewaltige Flut,  
Aber morgens tröstet deine Gnade *den Bestraften,*  
Der heftige, wütende Wind *hat sich beruhigt,*  
Wo die Wellen spielten, *sind die Ufer jetzt friedlich,*  
Die dunkle finstere Wolke *hast du erleuchtet.*  
Wo der Glutwind wehte, *klärst du den Tag.*  
Durch die Arbeit an den Texten erfahren die Wissenschaftler viel über den Alltag in Mesopotamien – sei es über Gegenstände, die üblicherweise in Gebrauch waren, oder das soziale Miteinander. So wird in dem Gedicht vom leidenden Gerechten etwa beschrieben, wie der Mann aufwacht und mit seinen Begleitern spricht – was zeigt, dass er einen



**Prof. Dr. Enrique Jiménez** ist seit 2018 Professor in der Abteilung für Alte Geschichte an der LMU. Jiménez, Jahrgang 1985, studierte Klassische und Hebräische Philologie an der Universidad Complutense de Madrid. Ein Studium der Assyriologie führte ihn unter anderem an die Yale University, USA, und die Universität Heidelberg. 2013 wurde Jiménez an der Universidad Complutense mit einer Arbeit über *Das Bild der Winde in der babylonischen Literatur* promoviert. Anschließend arbeitete er in Yale am Cuneiform Commentaries Project. 2017 kehrte er an die Complutense Universität zurück, ans Department für Hebräische und Aramäische Studien. 2017 wurde Enrique Jiménez mit dem Sofja Kovalevskaja-Preis ausgezeichnet.

Diener hatte und es zu dessen Aufgaben zählte, ihn zu wecken. „Auch von ihrer Funktion her ist die babylonische Literatur von unserer gar nicht so

## Was seit 2000 Jahren niemand lesen konnte

weit entfernt“, sagt Jiménez. So wurden die Klassiker nicht nur immer wieder kopiert, weil sie beispielsweise in der Schule als Übungen verwendet wurden, um Schreiben und Lesen zu lehren. Das Welterschöpfungsepos wurde traditionell Anfang des Jahres zum Neujahrsfest vorgetragen. Und den babylonischen Klassikern widerfuhr ein Schicksal, wie es auch heute noch manchen alten Werken zuteilwird: Sie wurden parodiert. „Anhand der Parodien sieht man, welches Verhältnis die Menschen in Mesopotamien zu ihren eigenen Traditionen hatten. Zum Beispiel wurde eine Zeile des Gedichts vom leidenden Gerechten leicht modifiziert, um sie lächerlich zu machen. Wir haben heute eine ähnliche Beziehung zu unseren literarischen Traditionen. Einerseits gibt es einen großen Respekt vor den Klassikern, zugleich kann man mit ihnen spielen.“

Gerade bei den Parodien gibt es jedoch sehr viele Lücken, weil die Tontafeln in viele Stücke zerbrochen sind. „Ich glaube, dass es mithilfe des Computers gelingen wird, die ganze akkadische Literatur in den kommenden 40, 50 Jahren zu rekonstruieren.“ Die digitalen Möglichkeiten sind für den Altorientalisten dabei nur Mittel zum Zweck: „Wir entwickeln den Algorithmus nicht, um etwas Abstraktes zu tun, sondern um konkrete Texte wiederherzustellen. Ohne die Klassiker zu kennen, kann man eine Zivilisation nicht verstehen.“ ■

Nicola Holzapfel

# Daten zur Demenz

Der Informatiker Christian Wachinger arbeitet an künstlicher Intelligenz, um Muster in Gehirnen sichtbar werden zu lassen, die früh auf neurodegenerative Erkrankungen hindeuten.

Aktuell leben weltweit rund 47 Millionen Menschen mit einer Demenz. Bis zum Jahr 2050 werden Prognosen zufolge mehr als 140 Millionen betroffen sein. Neurodegenerative Erkrankungen frühzeitig zu erkennen wird daher immer wichtiger. Denn nur dann können Therapien den Verlauf zumindest noch verlangsamen. Informatiker bringen hier nun einen neuen Ansatz in die Medizin: Sie wollen mithilfe künstlicher Intelligenz Krankheiten wie Alzheimer sehr viel früher diagnostizieren. „Maschinelles Lernen kann Ärzten helfen, Alzheimer anhand von Kernspin-Aufnahmen schon bei ersten Veränderungen im Gehirn zu erkennen“, sagt LMU-Neuroinformatiker Christian Wachinger. „Algorithmen können Zusammenhänge und Muster in den Bilddaten erfassen, die Ärzte schwer mit dem bloßen Auge erkennen können.“ So könnte Maschinelles Lernen in der Diagnostik die Grenzen der Medizin verschieben und sie damit von Grund auf verändern. Selbstlernende Systeme könnten bald in der klinischen Praxis zum Einsatz kommen.

Die Algorithmen brauchen jedoch, und das stellt die Informatik gerade im Bereich der Medizin vor Herausforderungen, große Datenmengen, um präzise zu werden. Das sei ähnlich, wie man es von Go-Programmen kenne: „Solche Programme waren auch deshalb so schnell stärker als die besten Go-Spieler, weil sie endlos gegeneinander spielten und ihre Strategien anhand neuer Spielsituationen so verfeinern konnten“, sagt Wachinger, der an der Kinder- und Jugendpsychiatrie der LMU das Labor für künstliche Intelligenz in der medizinischen Bildgebung leitet. „Im klinischen Bereich brauchen wir bei jeder Fragestellung Tausende Datensätze von Patienten, um die Systeme gezielt trainieren zu können.“

Solch große Datenmengen fallen in der Regel nicht in einzelnen Kliniken an. Daher bildeten sich in jüngster Zeit internationale Forschungsk Kooperationen, die auf eigens geschaffene spezialisierte Datenbanken wie die US-amerikanische Alzheimer-

## Personen als Vektoren in drei Dimensionen

Datenbank ADNI zurückgreifen können. Forscher haben dort rund 2000 Personen erfasst, die regelmäßig ihr Gehirn mit bildgebenden Verfahren wie MRT (Kernspin) oder PET (Positronen-Emissions-Tomographie) untersuchen oder auch ihr Genom sequenzieren lassen. Der Großteil der Probanden leidet an Gedächtnisstörungen, es kommen aber auch gesunde Menschen in die beteiligten Kliniken.

„Für uns Informatiker sind solche medizinischen Datenbanken sehr wertvoll“, sagt Wachinger. Mithilfe von mehr als 6000 Gehirnaufnahmen hat er seine Algorithmen trainiert. Jede Person wird dabei als hochdimensionaler Vektor dargestellt, der alle relevanten Daten wie Alter, medizinische Details oder sogar genetische Marker erfassen kann. In der Trainingsphase nutzen die Algorithmen codierte MRT-Bilddaten. Die Lern-Algorithmen sind dabei wie übereinander geschichtete neuronale Netze aufgebaut. Die verschiedenen Ebenen sind darauf spezialisiert, bestimmte Eigenschaften eines digitalen Bildes zu erkennen, Formen, Muster, sogar Krümmungen.

Jeder Knoten des Netzes ist vielfach mit anderen Knoten und anderen Schichten verknüpft. Die Verknüpfungen passt das System während des Lernprozesses analog zum Gehirn an eigene „Erfahrungen“ an. Die Algorithmen treffen dann im Idealfall immer bessere Vorhersagen wie etwa genaue Krankheitsdiagnosen.

Wachingers Algorithmen können mittlerweile mit hoher Treffsicherheit gesunde Menschen von Patienten mit Diagnosen, die von leichter kognitiver Beeinträchtigung über vaskuläre Demenz bis hin zu Alzheimer reichen, unterscheiden. Sie können auch zeitliche Vorhersagen machen, darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit jemand in sechs oder zwölf Monaten an Alzheimer erkrankten.

Entscheidend für den Erfolg der Vorhersage ist die richtige Wahl von sogenannten Biomarkern, also von Besonderheiten in den Bildinformationen, die auf Krankheiten hinweisen. Dickemessungen am Cortex kämen hier genauso infrage wie Formanalysen der Gehirnwindungen. Letzteres ist ein völlig neuer Ansatz. Die räumliche Geometrie lässt sich dabei über Schwingungsmuster darstellen, die verschiedene Resonanzfrequenzen auslösen. Veränderungen in der Form können sehr früh auf Abbauprozesse im Gehirn hindeuten. Dies ist hilfreich, um bei der Früherkennung von Demenzen die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Vorhersage zu erhöhen. Wachinger kann anhand des neuen Ansatzes zur Formanalyse spezieller Gehirnregionen zeigen, dass sich bei Alzheimer Hirnstrukturen wie Hippocampus (zuständig für Erinnerungsvermögen und emotionale Verarbeitung) und Amygdala in beiden Gehirnhälften asymmetrisch verändern. Je weiter die Demenz vorangeschritten war,

umso größer war die Asymmetrie. Am geringsten war sie in der Vergleichsgruppe gesunder Menschen. „Die festgestellte Asymmetrie in den Hirnstrukturen könnte im frühen Stadium ein Biomarker für Alzheimer sein“, sagt Wachinger.

Allerdings sei es nicht eben trivial, das Gehirn anhand der Scans in sauber getrennte Gehirnregionen zu unterteilen. „Auf dem Bild sind das ja alles mehr oder weniger graue Bildpunkte.“ Wachinger verwendet selbstlernende Systeme der Segmentierung, um die verschiedenen Gehirnregionen digital sauber voneinander zu trennen. Die über zehn Millionen Bildpunkte eines MRT-Gehirnscans werden dabei in rund hundert wichtige Volumeninformationen umgewandelt. In dieses Komprimieren der Informationen stecken die Forscher sehr viel medizinisches und technisches Detailwissen, es ist das Kernstück der Technologie. „Als Informatiker komme ich zwar eher aus der Methodenecke“, sagt Wachinger. „Aber es ist toll, wenn man als Techniker im medizinischen Bereich Impulse geben und Menschen helfen kann.“ Das auf neuronalen Netzen basierende Verfahren baut auf existierender Software auf wie FreeSurfer aus dem Harvard-Umfeld, wo Wachinger als Postdoc am MIT (Massachusetts Institute of Technology) und der Harvard Medical School arbeitete. Der Neuroinformatiker entwickelte aber nun mit dem Anfang 2019 veröffentlichten Algorithmus QuickNAT eine Technologie, die die Segmentierung und anschließende Volumenmessung innerhalb von 15 Sekunden schafft. So schnell, dass ein Arzt die Diagnose des Algorithmus erhalten könnte, während ein Patient noch im MRT-Gerät liegt. „Das Verfahren könnte man schnell in den klinischen Alltag einbauen. Wie bei einem Bluttest bekäme ein Arzt sozusagen Labordaten, eine Art Normwert aus dem Gehirn“, sagt Wachinger. „Die Entscheidung, was er mit der Information anfängt, bleibt dabei beim Arzt.“ Um die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen, entwickelte Wa-

chinger einen eigenen Web-Service für Ärzte (<http://quicknat.ai-med.de>). Mediziner können dort MRT-Bilder hochladen und auswerten.

Trotz solcher Fortschritte warnt der Informatiker davor, die Aussagen der Algorithmen als absolute Größen zu nehmen. „Wir können mit unseren Methoden immer nur Wahrscheinlichkeiten liefern, deshalb geben wir als wichtige Größe auch immer die Unsicherheit des Verfahrens mit an. Die Entscheidung über die Behandlung“, betont Wachinger noch einmal, „bleibt bei den Ärzten.“ Warum Alzheimer-Patienten offenbar in Regionen wie Amygdala, Putamen oder Hippocampus asymmetrisch Gehirnschubstanz verlieren, ist bislang unklar. Um mögliche Ursachen für die Asymmetrie



**Dr. Christian Wachinger**

leitet das Labor für künstliche Intelligenz in der medizinischen Bildgebung ([www.AI-Med.de](http://www.AI-Med.de)) an der Klinik und Poliklinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie der LMU, das durch das Zentrum Digitalisierung Bayern gefördert wird. Wachinger, Jahrgang 1982, studierte Informatik an der TU München, wo er auch promoviert wurde. Postdoktorand war er in der Medical Vision Group des Computer Science and Artificial Intelligence Lab am Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA, und am Lab for Computational Neuroimaging an der Harvard Medical School, Boston, USA.

zu bestimmen, hat ein Team um Wachinger jüngst genetische Daten aus sogenannten SNPs analysiert. Solche Single Nucleotide Polymorphisms, genetische Varianten in nur einzelnen DNA-Bausteinen, sind in vielen KI-Ansätzen in der Medizin mittlerweile Lernstoff für die Algorithmen. Einige der SNPs jedenfalls beeinflussen offenbar das Risiko für bestimmte neurodegenerative Erkrankungen. Den Informatikern gelang es, zwei neue, bislang unbekannte Gen-Schnipsel mit den Asymmetrien im Gehirn in Verbindung zu bringen. Wachingers Erkenntnisse könnten ein Impuls für Biomediziner sein, hier nach Ursachen zu forschen.

Trotz all der Euphorie bremst Wachinger die Erwartungen. „Wir müssen anhand der Flut von Veröffentlichungen auch skeptisch bleiben, wie gut die KI-Methoden jeweils wirklich sind“, sagt er. Fast belustigt erzählt er vom aktuellen Boom der Technologie, an dem jeder Anteil haben wolle. So sei die vergangene Hauptkonferenz NIPS für neuronale Informationsverarbeitung im kanadischen Montreal innerhalb von elf Minuten ausgebucht gewesen. „Das ist ein Andrang wie bei einem Rockkonzert“, sagt Informatiker Wachinger. „Das ganze Feld ist am Explodieren. Da ist es schon schwer, das Relevante vom Irrelevanten zu unterscheiden.“

Gleichzeitig jedoch bleibt das Potenzial enorm. Die Algorithmen seien für unterschiedliche Krankheiten wie Autismus, Diabetes oder psychiatrische Erkrankungen wie Depressionen trainierbar, so Wachinger. „Wir brauchen nur große Datenmengen, gute Daten und gute Biomarker, bei Diabetes etwa Aufnahmen von Leber und Niere.“ Erste Kontakte zur UK Biobank in England, die hochaufgelöste Ganzkörper-MRT von 100.000 Personen sammelt, oder der deutschen Langzeitgesundheitsstudie *Nationale Kohorte* gibt es bereits – es ist ein weiteres Einsatzgebiet für Wachingers Algorithmen. ■

Hubert Filser

# „Hat das mit Intelligenz zu tun?“

Der Informatiker Thomas Seidl und der Statistiker Bernd Bischl debattieren über Maschinelles Lernen, andere Formen von KI und darüber, warum es wichtig ist zu verstehen, wie Rechner damit zu ihren Ergebnissen kommen.

Interview: Hubert Filser und Martin Thurau

Beim Online-Banking oder beim Einkaufen im Internet: Immer öfter begegnen uns im Alltag Chatbots. Würden Sie in jedem Fall erkennen, ob Sie es mit einem Bot, einer Software also, zu tun haben oder einem Menschen?

**Seidl:** Man muss ihm die richtigen Fragen stellen. Je mehr die ins Allgemeinwissen gehen, umso leichter kann man den Bot enttarnen. Je spezieller und technischer sie sind, desto schneller wird der Bot die Antwort haben. Ich weiß aber nicht, ob wir in zehn Jahren noch den Unterschied erkennen können.

Mit welcher Frage könnte man einen Bot austricksen?

**Seidl:** Bots können zum Beispiel nicht gut mit Ironie umgehen. Auch Wortspiele, emotionale und eher unlogische Fragen verwirren sie.

**Bischl:** Man kann auch den Kontext wechseln oder Bezug nehmen auf Punkte, die vorher schon im Dialog vorkamen. Aber Bots sind immer besser getarnt. Es gab da ein Experiment, in dem ein Bot sich als ukrainischer Jugendlicher ausgegeben hat, der noch nicht gut Englisch kann. Der war schwer zu enttarnen, weil das Fehlerhafte ja gleichsam zu seiner Rolle gehörte.

Google hat einen neuen Sprachassistenten namens Duplex, der für seinen Nutzer telefonisch zum Beispiel einen Tisch im Restaurant reservieren oder Friseurtermine ausmachen kann. Anfangs klang er so, als wäre er ein Mensch. Sollten Bots offenbaren, dass sie keine Menschen sind?

**Bischl:** Auf jeden Fall, ich möchte schließlich wissen, mit wem ich rede. Der Gesetzgeber könnte ganz einfach erzwingen, dass das kenntlich ist.

**Seidl:** Jeder Mensch hat ein Bedürfnis zu verstehen, mit wem er es zu tun hat. Deswegen sind ja auch die ersten paar Minuten Small Talk auf einer Party wichtig, um einen ersten Eindruck von seinem Gegenüber zu gewinnen. Ohne diese Einschätzung sind Gespräche sehr anstrengend. Man weiß dann nicht, über was man reden und wie offen man sein kann, was man nicht ansprechen sollte. Also ganz klar: Eine Basis für den Dialog wird nur dadurch gelegt, dass Bots offenlegen, dass sie keine Menschen sind. Solche Transparenz war schon immer wichtig. Aber früher waren die Unterschiede offensichtlicher, weil das Künstliche dem Menschlichen nicht so zum Verwechseln ähnlich war.

Künstliche Intelligenz wird derzeit oft als epochaler Technologiesprung verkauft. Fachkonferenzen sind mitunter innerhalb von Minuten ausgebucht. So einen Hype gibt es sonst nur bei Rockkonzerten.

**Bischl:** Das stimmt. Dabei existieren die Grundlagen von KI mit dem Gedanken der neuronalen Netze schon seit mehr als hundert Jahren. Und die technischen Grundlagen aus der Informatik gibt es bereits seit den 1970ern. Im Jahr 2006 dann kam der eigentliche Durchbruch für sogenannte Deep-Learning-Verfahren, das ist die heute gängigste KI-Technologie. Sie wird breit eingesetzt für ganz unterschiedliche Aufgaben, die von der Gesichtserkennung bis zur

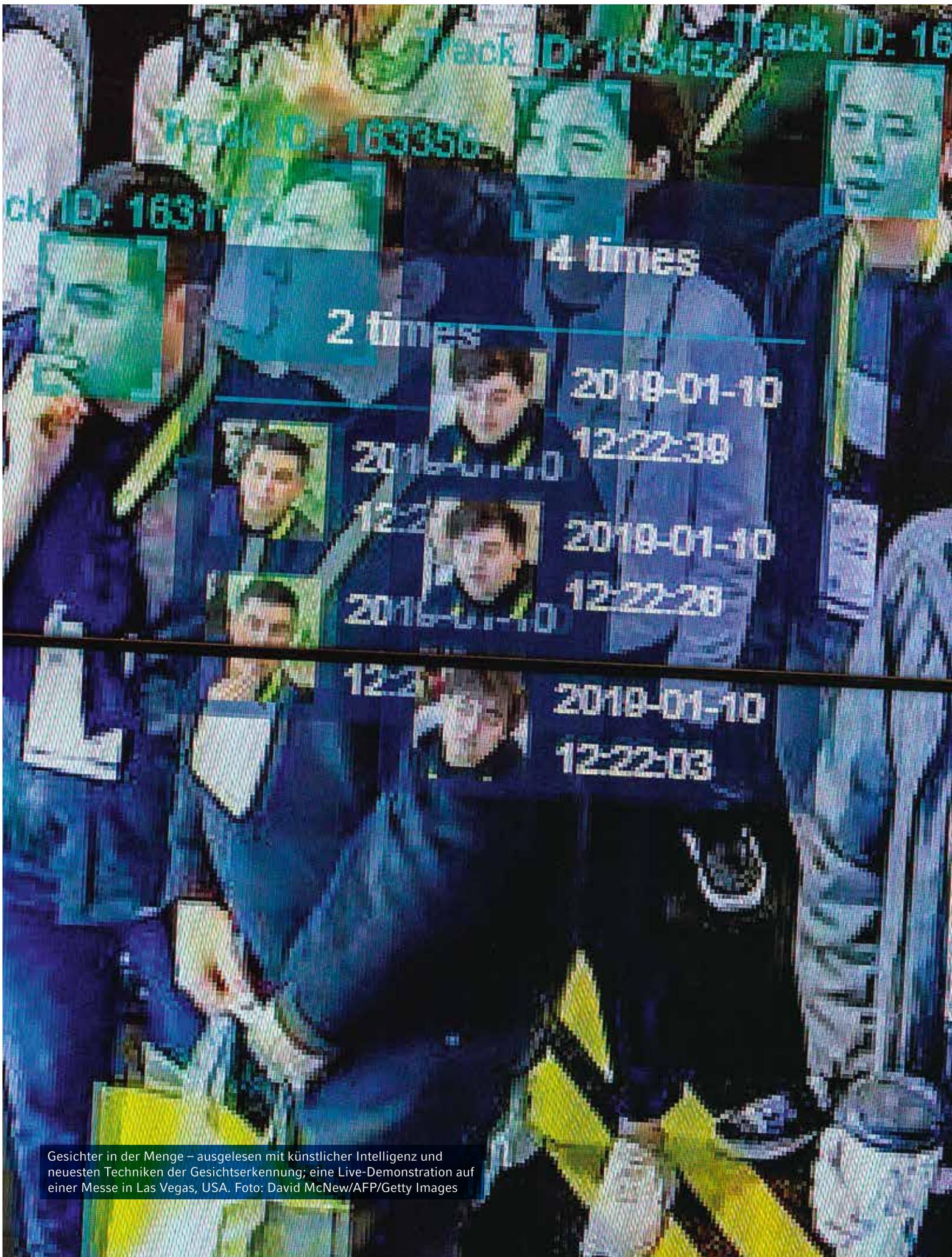
Logistik und der Maschinenwartung reichen. Auch wenn noch nicht in allen Details verstanden ist, warum sie so gut funktioniert; noch gibt es da offenbar versteckte Probleme.

**Seidl:** Lange Zeit hatte sich nichts Wesentliches verändert – bis die rasant steigenden Rechnerleistungen und schnelle Grafikkarten, die wir vor allem der Spiele-Industrie zu verdanken haben, eine neue technische Grundlage geschaffen haben. Es gibt heute extrem billige Hardware, früher brauchte man Spezialrechner, um mit Deep-Learning-Ansätzen zu experimentieren.

Was genau aber führte zum Durchbruch im Jahr 2006?

**Bischl:** Von diesem Jahr an konnte man erstmals gut nachweisen, dass sich Deep-Learning-Architekturen tatsächlich effizient trainieren lassen. Dieser Durchbruch ist einigen wenigen Laboren zu verdanken, die seit den 1990er-Jahren am Ball geblieben sind und diese Verfahren weiterentwickelt haben, obwohl ein Großteil der Experten sie nicht für realisierbar hielt und sich abgewendet hat. Jetzt kommen im Jahr Hunderte entsprechende Veröffentlichungen heraus.

**Seidl:** Dass Chatbots schon heute so verblüffend gut funktionieren, liegt an Deep-Learning-Verfahren. Wenn sie noch ein bisschen mehr Semantik kennen und irgendwann einmal Ironie lernen, verstehen sie uns irgendwann in sehr hohem Maße. Womöglich erkennen wir Chatbots künftig daran, dass sie uns eben nicht mehr missverstehen, was dagegen ja selbst zwischen Menschen, die sich nahestehen, durchaus vorkommt.



Gesichter in der Menge – ausgelesen mit künstlicher Intelligenz und neuesten Techniken der Gesichtserkennung; eine Live-Demonstration auf einer Messe in Las Vegas, USA. Foto: David McNew/AFP/Getty Images

3330

Track ID-163012

Track ID-163012

9 times

2 times

2018-01-10

12-22-40

2018-

12-22

2019-

12-05

2018-01-10

12-22-32

2018-0

10:01:3

Track ID

8 times

2018-01-10

12-22-38

2018-01-10

12-22-37

Was kann denn KI jetzt tatsächlich schon, außer sich zu unterhalten?

**Bischl:** Da müssten wir vielleicht erst einmal definieren, was Sie unter künstlicher Intelligenz verstehen.

Spötter sagen, KI sei immer das, was man gerade noch nicht kann.

**Bischl:** Das finde ich gar nicht so falsch. Von vielen Dingen, die in der Vergangenheit als KI galten, sagt man heute: „Hat das eigentlich mit Intelligenz zu tun?“ Das finde ich ganz lustig. Was zum Beispiel inzwischen als stupides Suchen gilt, war mal sehr herausfordernd. KI könnte also, um mal eine vorläufige Definition zu geben, so etwas sein wie das algorithmische Lösen von Herausforderungen und Problemen, für die menschliche Intelligenz entweder erforderlich zu sein scheint oder bisher in der Vergangenheit sehr hilfreich war. Die meisten Wissenschaftler in diesem Feld würden KI aber keinesfalls als Imitation menschlicher Intelligenz verstehen.

Sondern?

**Bischl:** Wir am Münchner Zentrum für Maschinelles Lernen, dem MCML, stehen beispielsweise für den Bereich Maschinelles Lernen, ein mathematisch gut definierbares Gebiet, in dem es im Wesentlichen um das Erkennen oder Prognostizieren von funktionalen Zusammenhängen in Daten geht. Algorithmen können lernen, dass auf einem Bild ein bestimmtes Objekt oder eine bestimmte Person zu sehen ist. Man kann damit auch prognostizieren, dass ein Medikament für eine bestimmte Person ein bisschen besser funktioniert als für eine andere. Man kann aus ihren genetischen Daten auch ihr Risiko dafür abschätzen, ob eine Prädisposition für eine Krebserkrankung vorliegt. Mit diesen Werkzeugen lässt sich sehr, sehr viel machen. Deswegen wird das von einem gewissen Komplexitätsgrad an dann gerne als künstlich intelligentes Verhalten interpretiert. Ich allerdings würde das nicht als Intelligenz bezeichnen.

Aber was ist es dann? Nur Mustererkennung?

**Bischl:** Die Frage ist, ab welcher Grenze wir etwas mit dem Label künstliche Intelligenz versehen wollen. Ich bin Mathematiker, mein Ziel ist es jedenfalls nicht, menschliche Intelligenz zu imitieren. Ich möchte Probleme lösen.

**Seidl:** Für mich hat Intelligenz schon sehr viel mit Imitation zu tun. Was selbstlernende Systeme tun und was kleine Kinder in der Familie nachahmend lernen – da sehe ich schon Parallelen. Bei vielen Lernverfahren sind die Daten in Baumstrukturen organisiert. Was an der Wurzel steht, wird später nur selten umgruppiert. Die Parallele dazu ist: Was ich als Kind gelernt habe, prägt nachhaltig fürs Leben. Oder nehmen Sie das Lernen durch Versuch und Irrtum; bei Maschinen nennen wir das Reinforcement Learning. Das ist im Grunde nichts anderes als etwa der Belohnungseffekt, den Kinder haben, wenn sie Aufmerksamkeit von ihren Eltern bekommen. Auch das steuert ihr Verhalten. Wir Menschen bilden uns wahnsinnig viel darauf ein, wie besonders wir sind. Aber dann ticken wir doch nach mehr oder minder simplen Mustern. Das zu reflektieren, finde ich einen spannenden Seiteneffekt der KI-Forschung, vielleicht hilft uns das, uns als Menschen besser zu verstehen.

**Bischl:** Das müssten aber andere Disziplinen leisten, die mit uns zusammenarbeiten.

Sie sagten, dass viele aktuelle KI-Anwendungen auf Deep Learning basieren. Wie funktioniert das?

**Seidl:** Deep Learning ist eine Variante des Maschinellen Lernens, eine spezielle Art, mathematische Funktionen zu beschreiben und zu lernen.

**Bischl:** Das System lernt funktionale Zusammenhänge mithilfe tiefer künstlicher neuronaler Netze, und die Verfahren sind in der Tat davon inspiriert, wie Lernen im Gehirn durch das Verschalten von Neuronen funktioniert. Im Wesentlichen steht hinter künstlichen Netzen ein mathematischer Optimie-

rungsprozess, das Lernen moduliert die Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen des Netzes. Und bei einem tiefen neuronalen Netz kann, sehr stark vereinfacht

## Inspiziert von der neuronalen Verschaltung

gesagt, die erlernte Funktion extrem kompliziert sein. Besonders gut funktioniert es heute für die Analyse von Sprach- und Bilddaten.

Ist die Technologie dahinter eine grundlegend andere als früher?

**Bischl:** Ja, sicher. Schließlich sind erst heute die Rechenkraft und genügend große Datenmengen verfügbar, die es ermöglichen, die Systeme umfassend zu trainieren.

**Seidl:** In der frühen KI-Ära wollte man in der Sprachverarbeitung etwa alle Regeln von Grammatik und Semantik verstehen und modellieren, auch die Ausnahmen. Mit dem Deep Learning wird es möglich, alles aus Beispielen lernen zu lassen. Man füttert die Rechner einfach mit einer schier Fülle von Schriftstücken, mit Jahrzehnten von Tageszeitungen, Parlamentsreden, Büchern, Doktorarbeiten, wissenschaftlichen Artikeln. Und das System beobachtet, was passiert, identifiziert selbst Regelmäßigkeiten und Ausnahmen. Man spart sich also die sogenannte Merkmalsextraktion, die macht das System automatisch.

Und das funktioniert gut?

**Seidl:** Ja, überraschend gut, vielleicht zu gut, weil es dazu verleiten kann, es sich einfach zu machen und Ergebnisse und deren Zustandekommen gar nicht mehr so genau zu prüfen. Für manche Anwendungen kann man sich da schon fragen, ob man Systeme



Gerichte aus der Restaurantküche: Digitale Tools machen nicht nur die Onlinebestellung beim Lieferservice möglich, sondern ordern auch telefonisch einen Tisch im Lokal.  
Foto: Blaha Petr/Picture Alliance/APA/picturedesk.com

auf die Menschheit loslassen sollte, die nicht wirklich gut evaluiert sind. Das ist aktuell ein großes Thema in der Forschung. Auch wir am MCML arbeiten an solchen Fragen. Das Stichwort ist „Explainable AI“. Ist das, was das selbstlernende System macht, noch nachvollziehbar?

Können Sie ein Beispiel skizzieren?

**Seidl:** Stellen Sie sich folgende Konstellation vor: Ein Arzt nutzt KI-Verfahren für die Krebsdiagnostik. Und der Computer liefert ihm die Aussage: Der untersuchte Patient hat einen besonders aggressiven Tumor. Was fängt der Arzt mit dieser Aussage an? Ist sie aus seiner Sicht plausibel? Ist sie mit seiner Untersuchung und seinem Erfahrungswissen kompatibel? Er will ja die Diagnose selbst verstehen und muss sie schließlich auch dem Patienten erklären können. Bei Deep Learning ist zwar die Mathematik von den Experten sehr gut verstanden. Aber der Inhalt steckt in riesigen Matrizen von Zahlen, die man nicht verstehen kann – schon gar nicht als Anwender. Die Semantik ist weg. Kann also der Arzt dem System blind vertrauen? Sich darauf verlassen zu müssen, dass es ja an einer genügend großen Zahl von Beispielfällen trainiert wurde, ist ziemlich unbefriedigend.

**Bischl:** Das ist ein ganz wichtiger Punkt. Früher hat man versucht, Regelsysteme manuell zu bauen. Die Grundstruktur war letztlich oft durch Expertenwissen vorgegeben, man verwendete nachvollziehbare kausale Zusammenhänge. Dann wurde das Gesamtsystem komplexer, bestand aus immer mehr Einzelbausteinen, war aber im Prinzip noch sehr gut nachvollziehbar. Da war ein Vertrauen da, weil man ja Vertrauen in die Einzelbausteine hatte. Leider hat dieser Ansatz oft nur für Teilbereiche funktioniert, das Gesamtsystem war zu kompliziert. Heutzutage bewältigen unsere statistisch lernenden Systeme das Gesamtsystem, allerdings besteht es nicht mehr aus verständlichen Teilstrukturen. Um dieses Wissen aus den Deep-Learning-Systemen wieder herauszu-

ziehen, müssen wir nun im Nachhinein viel Arbeit hineinstecken. Manche Experten zweifeln an, ob uns dieser Erkenntnisgewinn wirklich nach vorne bringt. Wichtig sei doch, dass die Aussagen stimmten.

Genügt das tatsächlich?

**Bischl:** Nein, es gibt eine ganze Menge Anwendungsgebiete, wo die Vorhersagen alleine nicht reichen. In der Medizin wie schon angesprochen, etwa bei Operationen. Immer dann, wenn es um risikobehaftete Entscheidungen geht. Denn da muss der Mensch die Kontrolle behalten. Wir wissen aus langjähriger Erfahrung, dass auch gute Computerprogramme immer fehlerbehaftet sind. Wenn man in Systeme nicht mehr hineinschauen kann, kann man sie auch nicht verbessern. Auch im Interesse der Ingenieure ist es also wichtig, Transparenz zu schaffen. Es ist extrem wichtig, dass sich die Algorithmen noch interpretieren lassen.

Welches Eigenleben Algorithmen haben, zeigt ein simples Beispiel, das Furore gemacht hat, weil der Mensch sich von KI-Systemen in Schach und Go besiegen lassen musste.

**Seidl:** Es heißt immer: „Maschinen sind ja nicht kreativ, das zeichnet uns als Menschen aus.“ Das Gegenbeispiel dazu ist das AlphaGo, das den Großmeister Lee Sedol im Go besiegte. Warum? Weil das Programm in seinen Millionen Trainingsspielen Taktiken und Strategien erfunden hat, die Menschen noch nicht kannten.

Und der Mensch reagierte tatsächlich fast beleidigt, weil eine Maschine kreativer war als er.

**Seidl:** Mich schreckt das nicht. Das ist ein Brettspiel, nicht das reale Leben. Das ist eine eingeschränkte Welt, die aus einer Handvoll Regeln besteht. Es handelt sich also um einen zwar sehr, sehr großen, aber endlichen Suchraum. Das kann man mit genügend Rechenleistung knacken, das nenne ich algorithmische Intelligenz.

**Bischl:** Dagegen steht die menschliche Intelligenz, die wir schlicht brauchen, um zu überleben, um etwa die Straße sicher zu überqueren.

**Seidl:** Die Frage ist doch: Ist der geniale Schachspieler intelligent oder der, der sein Leben gut meistert?

Was schreckt Sie dann?

**Seidl:** Mir fällt ein Alltagsbeispiel ein, das

## Der Bus zockelt vom Bahnhof zum Kurzentrum

aber durchaus für eine fatale Entwicklung stehen kann. Letztens war bei mir die Zirkulationspumpe vom Warmwasser kaputt, so dass ein Installateur kommen musste. Als ich fragte, ob er den Fehler schon gefunden habe, sagte er, da stecke zu viel KI drin. Was sich früher mit ein paar einfachen Handgriffen reparieren ließ, ist jetzt hoch technisiert, ein klassischer Fall von Overengineering. Die Pumpe musste ich wegwerfen, eine wahnsinnige Ressourcenverschwendung. Eine nicht intelligente Pumpe wäre die bessere Wahl gewesen, die gibt es aber nicht mehr. Da verkehrt sich gerade etwas ins Gegenteil.

**Bischl:** Ja, es gibt einen Trend, der mir Sorge bereitet. Es gibt einfache und vermeidbare Fehler in Systemen, die sich stark, mitunter verheerend auswirken, weil es um hochkritische Anwendungen geht.

Was sind das für Fälle?

**Seidl:** Etwa der Absturz der beiden Boeing-Flugzeuge.

**Bischl:** Ja, das ist ein altbekanntes Problem aus der Informatik. Technische Systeme werden manchmal überkomplex, weil man einem Hype zu sehr vertraut. Und dann pas-

sieren Fehler, die Geld kosten und im schlimmsten Fall Menschenleben.

**Seidl:** In der Boeing, die vor Kurzem in Äthiopien abgestürzt ist, war serienmäßig eine Automatik eingebaut, die auf einer Sensormessung basiert und das Flugzeug in den richtigen Flugwinkel bringen soll. Dieser Sensor war fehlerhaft, einen zweiten, wie sonst bei kritischen Bauteilen üblich, gibt es in diesem Flugzeugtyp nicht. Die Piloten haben versucht, den Fehler manuell zu korrigieren, die Automatik hat dagegen gearbeitet. Boeing war bei dieser Serie von seinem langjährigen Glaubenssatz abgewichen, dass der Pilot der Chef ist und nicht die Maschine. Die Software gab Entscheidungen vor, die der Pilot nicht kontrollieren konnte. Das geschah nicht auf der Basis eines neuronalen Netzes, es handelte sich um eine einfache Regelungstechnik. Man kann das trotzdem in Zusammenhang mit KI diskutieren, denn für diesen Sachverhalt finde ich es unerheblich, ob es sich um eine einfache oder eine komplizierte Funktion handelt.

Gibt es beim autonomen Fahren ein ähnliches Thema? Wie kann man da sicher gehen?

**Seidl:** In Bad Birnbach in Bayern gibt es schon einen Bus, der autonom zwischen Bahnhof und Kurzentrum hin und her zockelt. Und in der nächsten Ausbaustufe fährt er dann vielleicht noch einige Hotels an. Das finde ich genau richtig. Wir müssen ganz langsam Erfahrungen in einem geschützten Bereich sammeln. Das gilt auch für andere Anwendungen der KI. Wie und überhaupt welche Neuerungen man umsetzt, muss man von Fall zu Fall entscheiden.

**Bischl:** Das zu entscheiden, sind wir allerdings die Falschen. Die Gesellschaft sollte eine Art Wunschliste für mögliche Anwendungen zusammenstellen. Wir Experten können dabei helfen, können beraten und technische Konsequenzen besser verstehbar machen. Einblick und Transparenz sind Grundvoraussetzungen, um solche Fragen diskutieren zu können. Nur so kann eine



„Einblick und Transparenz sind Grundvoraussetzungen. Nur so kann eine Gesellschaft entscheiden, wo für sie der Nutzen beim Einsatz von KI überwiegt“, sagen Bernd Bischl (links) und Thomas Seidl. Foto: ole/LMU

Gesellschaft entscheiden, wo für sie der Nutzen beim Einsatz von KI überwiegt und wo nicht, und die Rahmenbedingungen entsprechend setzen, ohne gleich die Entwicklung zu bremsen.

Kontrolle und Transparenz – sie gelten vielen auch als Grundbedingung für die Forschungsstrukturen. Dabei findet KI-Forschung derzeit immer mehr in Firmen statt. **Seidl:** In der Tat: Unternehmen in den USA kaufen zum Teil ganze Forschungsgruppen aus den Universitäten heraus. Wenn sie es nicht machen, so das Kalkül, macht die Konkurrenz das Geschäft. Das Dilemma ist: Wenn sie es zu schnell und flächendeckend tun, graben sie sich selbst das Wasser ab, weil es den gut ausgebildeten Nachwuchs dann bald nicht mehr gibt. Um das zu verhindern, ließen sich Partnerschaften zwischen Unternehmen und Universitäten bilden. Wissenschaftler aus den Firmen

könnten sich in Lehre und Nachwuchsförderung an den Hochschulen engagieren.

**Bischl:** Wer wie ich gerne an der Universität frei forscht und dem die Lehre am Herzen liegt, für den hält sich der Reiz eines hochbezahlten Firmenjobs in Grenzen. Als Mitglied der Gesellschaft löst die gegenwärtige Entwicklung in mir große Bedenken aus. Forschung und Ausbildung sollten an der Universität stattfinden. Dafür gibt es gute Gründe. Zum einen geht es um Kontrolle: Als Wissenschaftler bin ich der Öffentlichkeit verpflichtet, ein Unternehmen ist das nicht. Ich möchte nicht, dass eine Firma den Dauen auf wichtigen Erkenntnissen hat. Was ist, wenn ein Unternehmen wie Google sie geheim hält? Derzeit gehen deren Forscher oft auf Konferenzen, die Ergebnisse sind öffentlich. Aber was ist, wenn sich das in zehn Jahren ändert? Eine Gesellschaft muss den Zugang zu Wissen kontrollieren können.

#### **Prof. Dr. Bernd Bischl**

ist Professor und Leiter der Arbeitsgruppe für Computational Statistics an der LMU. Bischl, Jahrgang 19XX, studierte Informatik, künstliche Intelligenz und Data Science an der Universität Hamburg, der University of Edinburgh und der Technischen Universität Dortmund, wo er auch promoviert wurde. 2014 wechselte er an die LMU.

#### **Prof. Dr. Thomas Seidl**

ist Inhaber des Lehrstuhls für Datenbanksysteme und Data Mining an der LMU. Seidl, Jahrgang 1966, studierte Informatik an der Technischen Universität München und wurde an der LMU promoviert, wo er sich auch habilitierte. Nach einer Vertretungsprofessur an der Universität Konstanz war er von 2002 an Inhaber des Lehrstuhls Informatik 9 (Data Management and Data Exploration), bevor er 2016 nach München zurückkam.

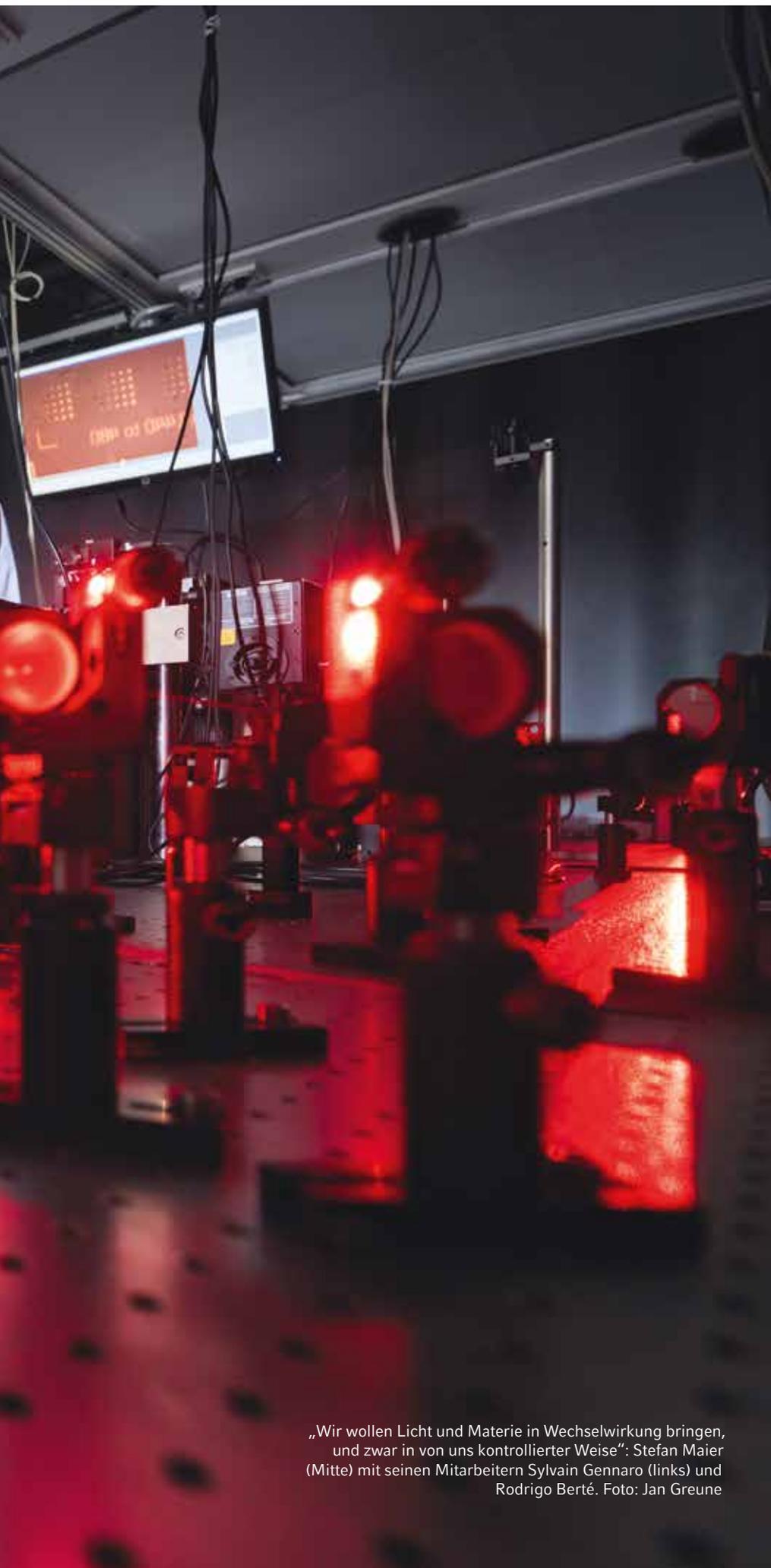
Thomas Seidl und Bernd Bischl leiten zusammen mit Prof. Dr. Daniel Cremers, Technische Universität München, das Munich Center for Machine Learning (MCML).



# Licht unter Kontrolle

Stefan Maier erforscht die Wechselwirkung von Licht und Materie auf kleinstem Raum. Mit winzigen Antennen und anderen Nanostrukturen versucht er, optische, elektrische und mechanische Prozesse in der Nanowelt zu steuern und die Energieumwandlung effizienter zu machen.

Von Hubert Filser



„Wir wollen Licht und Materie in Wechselwirkung bringen, und zwar in von uns kontrollierter Weise“: Stefan Maier (Mitte) mit seinen Mitarbeitern Sylvain Gennaro (links) und Rodrigo Berté. Foto: Jan Greune

Wer Stefan Maier auf die Physik des Lichts anspricht, kann sicher sein, dass er viel zu erzählen hat, und das in kurzer Zeit. Maier ist ein renommierter Physiker, vor gut einem Jahr vom Imperial College in London an die LMU berufen worden und gerade damit beschäftigt, den Aufbau seiner stetig wachsenden Forschergruppe am neuen Nano-Institut zu organisieren. Man begegnet vielen jungen Forschern auf den Gängen, der Reinraum steht kurz vor der Freigabe, viele der Labore im dritten Stock sind bereits eingerichtet. „Wir wollen Vorgänge beeinflussen, die mit Licht zu tun haben“, so beginnt Maier seine Erzählung. „Wir wollen Licht mit Materie in Wechselwirkung treten lassen, und zwar in von uns kontrollierter Art und Weise. Uns geht es dabei um die Synthese von Optik und Nanotechnologie.“ Solche Grundlagenforschung verspricht Innovationen in wichtigen Zukunftsfragen: Zum Beispiel geht es Maiers Team um Fragen nachhaltiger Energiekonversion – der Umwandlung etwa der Energie des Sonnenlichts in chemische Energie. Mit Licht aber, betont der Nanophysiker, sei bei seiner Forschung nicht nur das sichtbare Spektrum gemeint, sondern auch UV-Strahlung, Infrarotlicht, Terahertz bis hin sogar zu Mikrowellen – also jegliche Art elektromagnetischer Wellen.

Aber es gibt da ein Problem, wenn man wie Maier in seinen Experimenten mit Licht in die Nanowelt vordringen will. Da es sich bei Licht um elektromagnetische Wellen handelt, gibt es das Problem der Beugung und die sogenannte Beugungsgrenze. Dies ist eine physikalische Barriere, die etwa verhindert, dass sich mit Lichtmikroskopen kleinste Strukturen wie Viren oder sogar einzelne Atome oder gar nur wenige Nanometer große Quantenpunkte erkennen lassen. Die Folge: Licht lässt sich somit auch nicht auf einen so kleinen Bereich fokussieren. Lichtmikroskopen ist die Nanowelt schlicht versperrt. Und optische Glasfasern

können auch nicht so weit verkleinert werden, dass sie auf einen Computerchip passen.

Doch als Physiker fasziniert es Maier, Grenzen der Physik zu überwinden. Die Beugungsgrenze ist immer etwa halb so groß wie die Wellenlänge des einstrahlenden Lichts. „Je längerwellig aber die Strahlung wird, desto größer wird das Problem bei den so kleinen Nanostrukturen. Es gibt keine gute Überdeckung von Lichtwellen und Materiestruktur“, sagt Maier. Und damit praktisch keine Wechselwirkung mehr.

Der Physiker erforscht einen Weg, die Beugungsgrenze zu überwinden oder trickreich zu überlisten. Er arbeitet dabei mit sogenannten plasmonischen Antennen. Gemeint sind nanometerkleine Metallstrukturen, die speziell auf Lichteinfang in einem bestimmten Wellenlängenbereich ausgelegt sind. Man koppelt mit ihrer Hilfe sozusagen Licht an Elektronenschwingungen in Metall-Nanostrukturen. Je nach räumlicher Struktur dieser winzigen Gebilde lässt sich so eine sehr starke Wechselwirkung erreichen, sie absorbieren oder streuen Licht. „Der Clou ist, dass durch diese neuen Nano-

## Das Geheimnis des alten Kelches

strukturen Licht in einem kleinen Bereich von wenigen Dutzend Nanometern um die Struktur herum konzentriert wird“, sagt Stefan Maier. „Man bekommt einen ultrakleinen Lichtfleck, wir nennen das einen Hotspot.“ Damit ist die Beugungsgrenze überwunden. „Vor ein paar Jahrzehnten dachte man noch, das sei mit der nun erzielten Kontrolle unmöglich“, sagt Maier.

Der Begriff „plasmonische Antennen“ lässt anklingen, dass die Strukturen das Elektro-

nenplasma zur Schwingung anregen. „Den Namen haben wir zu meiner Zeit am Caltech geprägt“, dem renommierten California Institute of Technology in Pasadena, erzählt Maier. „Kurz danach habe ich den wohl ersten Einführungstext zu diesem Thema geschrieben“, sagt Maier. Es wurde sogar ins Russische und Chinesische übersetzt. So seien viele Nachwuchsforscher in aller Welt in die Thematik eingeführt worden.

Doch eigentlich, sagt der Physiker, sei die Methode, die hinter dieser technischen Neuerung steht, ziemlich alt. „Das Verfahren wird schon seit mehr als 1500 Jahren angewendet, und zwar für die Farbgebung von Glas.“ Stefan Maier erzählt vom Lycurgus-Kelch, der im British Museum in London zu sehen ist. Er stammt aus der spätrömischen Zeit im 4. Jahrhundert, ein im Licht wunderbar grünlich schimmerndes Gefäß mit aufwendigen Verzierungen, das zeigt, wie König Lycurgus von Ambrosia-Kraut in die Unterwelt gezogen wird. Der Becher birgt ein Geheimnis, das mit dem Glas und Nanotechnologie zu tun hat: Durchstrahlt man den Becher, wirkt er plötzlich rötlich. Das liegt an den im Glas enthaltenen winzigen Metallteilchen.

„Kleine Metallstrukturen aus Gold oder Silber können mit Licht sehr stark wechselwirken“, erklärt Stefan Maier. Licht trifft auf die Metallstruktur und regt die Elektronen zu Schwingungen an, eine ganze Elektronenwolke schwingt dann hin und her. Trifft das Licht mit der richtigen Frequenz auf, verstärkt sich die Bewegung der Elektronenwolke. Das verstärkt Lichtstreuung und Lichtabsorption bei dieser Resonanzwellenlänge – und führt dann zum Changieren der Farbe, wenn im Glas solche winzigen Metallstrukturen verteilt sind.

Genau dieses Prinzip steckt auch hinter den plasmonischen Antennen. Nach Jahrzehnten der Grundlagenforschung rücken inzwischen auch Anwendungen ins Blickfeld der Forscher. Damit sie aber Realität werden können, ist es notwendig, das Licht noch

detaillierter kontrollieren zu können, denn man muss eine jeweils optimale Licht-Materie-Wechselwirkung in jedem Wellenlängenbereich erreichen. Die Wissenschaftler experimentieren mit verschiedenen Metal-

## Ohne Probleme bis zum niedrigen Infrarotbereich

len und Antennenformen. Für die Antennen verwenden sie hauptsächlich Gold, Silber, Kupfer und Aluminium, aber auch neue hybride Nanomaterialien. Der Aufbau der winzigen Antennen ist dabei bisweilen sehr komplex.

Auch ganz ungewöhnliche Formen gibt es; Stefan Maier erzählt von Antennen, die sogar der Form eines Katzenkopfes ähneln, um eine ideale Abstrahlung zu erreichen. Die Formen werden im Rechner modelliert und anschließend im Nanomaßstab gebaut. In der Entwicklung solcher Antennen stecke sehr viel Entwicklungsarbeit, sagt Physiker Stefan Maier. Daran arbeite nicht nur sein Team, auch andere führende Nanophotonik-Gruppen aus der ganzen Welt forschten daran.

Die mit viel theoretischem Wissen ausgefüllten Nanometallstrukturen erlauben es inzwischen, fast alle gewünschten Resonanzfrequenzen vom UV-Licht bis zum niedrigen Infrarotbereich sehr gut einzustellen. „Diese Probleme sind mittlerweile gut gelöst“, sagt Maier. „Nur mittleres Infrarot macht uns noch Probleme“, fügt der Physiker hinzu. Aber da sei seine Gruppe auf einem guten Weg. Im Nano-Institut würde dafür gerade umfangreiches Equipment aufgebaut.

Die Nanofabrikation spielt für die Forschung inzwischen eine Schlüsselrolle. Erst mit Techniken wie der Elektronenstrahl-

thographie lassen sich die bis ins Kleinste theoretisch ausgearbeiteten Metall-Nanostrukturen auch herstellen. Stefan Maier interessiert sich für Strukturen, die er auf einem Chip aufbringen und mit Wellenleitern oder anderen Halbleiterstrukturen kombinieren will. Im Reinraum des Instituts lassen sich direkt vor Ort neue Strukturen und Hybridmaterialien fertigen und in den Laboren dann sofort die Eigenschaften testen.

Damit wird auch der Weg geebnet, der zu neuen Anwendungen führen soll. Der Bedarf ist groß, die Möglichkeiten sind enorm. In der Nanophotonik könnte es eine Reihe von Anwendungen geben, beispielsweise Lichtmodulatoren im Bereich der nicht-linearen Optik. Auch auf dem Gebiet der Energieumwandlung sind die Erwartungen groß, neuartige Solarzellen könnten damit möglich werden. Die chemische Energieumwandlung bietet ebenso ein großes Potenzial, hiermit beschäftigt sich auch Professor Emiliano Cortés an Maiers Lehrstuhl. Ein interdisziplinäres Team von Physikern und Chemikern arbeitet mit plasmonischer Katalyse.

In allen Fällen geht es um die Wechselwirkung von Licht und Materie. Die Forscher versuchen auf unterschiedlichem Weg, die Effizienz von Systemen zu erhöhen. In der Nanophotonik zum Beispiel sind die plasmonischen Antennen im Prinzip in der Lage, etwa die Lichtabstrahlung von Quantenpunkten zu beschleunigen. Damit lässt sich eine Lichtquelle erzeugen, die sich sehr viel schneller modulieren lässt, im Bereich von einigen Hundert Picosekunden. Solche Entwicklungen sind im Hinblick auf Quantencomputer und schnelleren Informationstransport interessant. Die Antennen wirken hier wie ein Beschleuniger.

Auch in Fragen der Energieumwandlung ist das Potenzial groß. Um beispielsweise Solarzellen so billig und so effizient wie möglich zu machen, müsste man sie möglichst dünn und leicht bauen. Doch um Licht überhaupt absorbieren zu können, war bis-

lang aufgrund der Beugungsgrenze eine gewisse Dicke notwendig. Ziel ist es nun, Licht mithilfe der plasmonischen Antennen auf einen kleineren Bereich zu konzentrieren und so dünnere und leichtere Solarzellen möglich zu machen. „Dafür müssen wir Licht an Materieschwingungen koppeln“, sagt Maier. Das Ziel ist beispielsweise, die Stromausbeute von Solarzellen zu erhöhen, indem man den Absorptionsgrad erhöht und sozusagen mehr Licht ins Material bringt. Gelingt dies, steigt der Wirkungsgrad.

Gleiches gilt für die Katalyse, ein chemisches Verfahren, für das in diesem Fall ebenfalls Sonnenlicht die nötige Energie liefert. Die Forscher testen hier neue Materialien wie Zirkoniumnitrid für die Antennen. Ziel ist es, die Nanostrukturen mit Materialien für die Katalyse zu verbinden.



**Prof. Dr. Stefan Maier**

ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik – Hybride Nanosysteme an der LMU. Maier, Jahrgang 1975, studierte Physik an der Technischen Universität München und am Caltech (California Institute of Technology), Pasadena, USA, wo er auch seinen PhD machte. Er war Postdoktorand ebenfalls am Caltech, bevor er nach einer Station an der University of Bath, Großbritannien, ans Imperial College London, Großbritannien, ging. Dort war er zuletzt Inhaber des Lee-Lucas Chair in Experimental Physics; Ende 2017 wurde er an die LMU berufen.

Die Antennen konzentrieren dabei sozusagen das einfallende Sonnenlicht auf die Oberfläche, das dort dann im Rahmen einer Katalyse etwa eine chemische Reaktion auslöst. „Solche hybriden Nanosysteme zu entwickeln ist eine der Kernaufgaben des Lehrstuhls“, sagt Stefan Maier. „Wir müssen Strukturen für die Lichtabsorption mit aktiven Strukturen der Katalyse verbinden, ohne die Ausbeute der Lichtabsorption oder die Funktionalität der Katalyse zu zerstören. Beides muss man verbinden, das ist die Hauptaufgabe.“

Im Detail funktioniert die Kombination nach einer Art Baukastenprinzip. „Das ist wie Lego“, sagt Maier. Die Forscher müssen ausprobieren, welche Antennen zu welchen Katalysatoren passen. Die Herstellungsprozesse zu entwickeln ist eine chemische und technologische Herausforderung. Manche Materialien lassen sich eher mit Top-Down-Verfahren herstellen, mit Elektronenstrahl-lithographie etwa, andere eher mit kolloidaler Chemie, wie sie der benachbarte Lehrstuhl von Jochen Feldmann betreibt. „Hier versprechen wir uns gute Synergieeffekte aus der Zusammenarbeit“, sagt Stefan Maier.

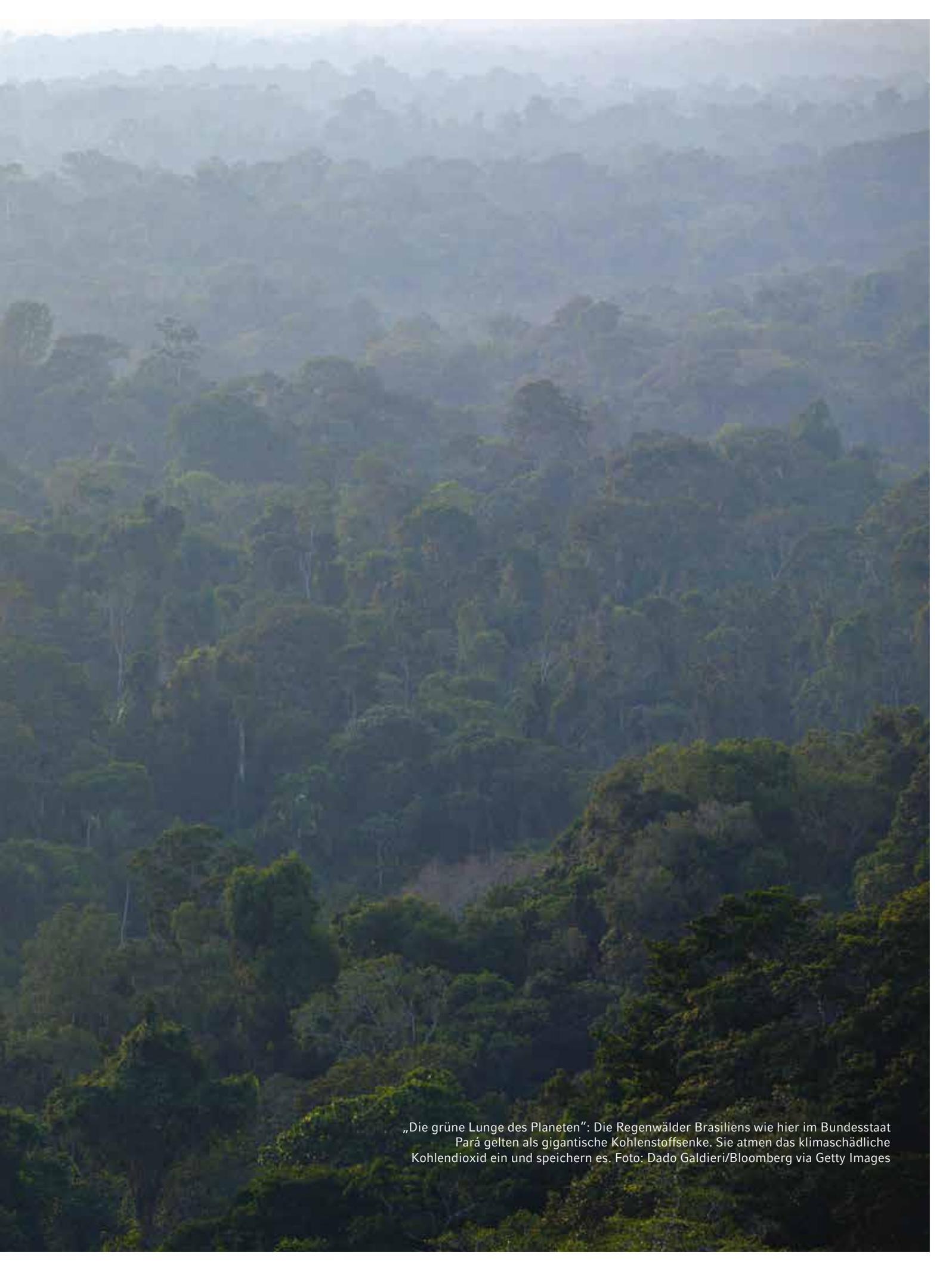
Überhaupt sei ein Fortschritt in seinem sehr speziellen Arbeitsfeld nur mit interdisziplinärer Zusammenarbeit möglich, so Maier. So arbeitet ein junges, internationales Team aus Physikern, Materialwissenschaftlern, Chemikern, Mathematikern sowie Experten für Mikroskopie, Lasertechnik, Computersimulation und Theorie am Institut. Auffallend hoch ist der Anteil junger Forscher, sie kommen aus aller Welt. „Nachwuchsförderung ist mir sehr wichtig“, sagt Maier, der in seiner Zeit am Imperial College London mehr als drei Jahre Director of Postgraduate Studies war. Der interdisziplinäre Ansatz und eine starke Nachwuchsförderung gehörten zur Philosophie des Instituts. Sie seien für ihn wichtige Gründe gewesen, sagt Maier, ans neue Münchner Nano-Institut zu kommen, mitten ins „Herz dieser lebendigen Stadt“. ■

An aerial photograph of a vast, dense tropical forest. The foreground shows a thick canopy of green trees, with some taller, more prominent trees. The background is a hazy, layered expanse of forest, suggesting a large-scale landscape. The lighting is soft, creating a misty or ethereal atmosphere.

# Der Wert der Vegetation

Rodung, Waldbewirtschaftung und Agrarproduktion: Die Geografin Julia Pongratz untersucht, welchen Einfluss die Landnutzung auf das Klima hat.

Von Martin Thureau



„Die grüne Lunge des Planeten“: Die Regenwälder Brasiliens wie hier im Bundesstaat Pará gelten als gigantische Kohlenstoffsenke. Sie atmen das klimaschädliche Kohlendioxid ein und speichern es. Foto: Dado Galdieri/Bloomberg via Getty Images

Der Tag, an dem die Brasilianer Jair Bolsonaro zum Präsidenten machten, war auch für das Weltklima kein gutes Datum. Der Rechtspopulist und neue starke Mann hatte schon im Wahlkampf getönt, er werde mit dem „Umweltaktivismus“ seiner Vorgänger aufräumen, das ließ nichts Gutes ahnen. Nicht dass die Regierungen zuvor Vorkämpfer für den Klimaschutz gewesen wären, doch was Bolsonaro seit seinem Amtsantritt im Januar 2019 ins Werk zu setzen verspricht, ist eine Zerstörung mit Ansage und torpediert alle Anstrengungen der Weltgemeinschaft, den Treibhauseffekt zu dämpfen.

Mehr als drei Millionen Quadratkilometer des brasilianischen Hinterlandes sind tropischer Regenwald, eine riesige Fläche, eine noch weitgehend ursprüngliche Landschaft und aus Sicht von Klimaexperten eine gigantische Kohlenstoffsänke: Bäume atmen das klimaschädliche Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ein und speichern es. Etwa ein Zehntel des Urwaldes, eine Fläche von der Größe der Bundesrepublik, ist in den letzten gut 30 Jahren in Brasilien vernichtet worden. Die ursprüngliche Vegetation fiel meist allenfalls halble-

## Die rote Linie weist klar nach oben

galer Abholzung oder Brandrodung zum Opfer, die Wälder mussten Rinderfarmen und Sojafeldern weichen. Bolsonaros Vorgänger hatten das Tempo der Zerstörung in den vergangenen Jahren drosseln können. Damit ist nun Schluss. Die Wochenzeitung *Die Zeit* etwa titelte besorgt: „Was wird aus der grünen Lunge des Planeten?“

Das ist eine Frage, die auch Julia Pongratz in ihrer wissenschaftlichen Arbeit beschäftigt. Aufmerksam beobachtet die Klimafor-

schlerin, welches Ausmaß solche Landnutzungsänderungen, wie sie in der Fachsprache erst einmal wertfrei heißen, annehmen – im brasilianischen Regenwald und anderswo auf der Erde. Und sie versucht herauszubekommen, was es für das globale Klima bedeutet, wenn Wälder zu Äckern oder Weiden werden, oder auch nur Mischwälder zu Monokulturen. Wie sehr verstärkt das den Treibhauseffekt? Welche Wechselwirkungen lassen sich beobachten? Allerdings, so fragt Julia Pongratz, seit verganginem Jahr Inhaberin des Lehrstuhls für Physische Geographie und Landnutzungssysteme an der LMU, auch: Welche Formen von Land- und Forstwirtschaft könnten helfen, das Aufheizen der Erdatmosphäre abzumildern?

Es ist eine einfache Grafik, die Julia Pongratz zeigt, nur eine rote Linie, wenn auch mit leichten jahreszeitlichen Schwankungen, doch ist sie in ihrer Aussage so klar und unerbittlich, als gälte es, sämtliche Bemühungen um den Klimaschutz einfach durchzustreichen. Sie zeigt die Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre. Der rote Strich weist klar nach oben: Allein in den vergangenen 50 Jahren, so zeigt die kontinuierliche Messung, ist die Konzentration des Treibhausgases um rund 20 Prozent gestiegen. „Trotz der internationalen Abkommen zum Klimaschutz hat es keine offensichtliche Reduktion des CO<sub>2</sub>-Anstiegs gegeben“, sagt Julia Pongratz. „Aber ohne all diese Anstrengungen wäre die Kurve vermutlich noch steiler.“

Durch „menschliche Aktivitäten“ sind seit 1750, so zeigen Bilanzen des internationalen Global Carbon Project, in das Julia Pongratz involviert ist, rund 660 Gigatonnen Kohlenstoff freigesetzt worden, was in etwa 2,4 Teratonnen Kohlendioxid entspricht. Dass der globale CO<sub>2</sub>-Ausstoß deutlich und später rasant anstieg, kam allerdings erst mit der Industrialisierung. Doch nur ein Teil – gut 40 Prozent – des Kohlenstoffes ging in die Atmosphäre und trug dort zum Treibhauseffekt bei; mittlerweile liegt dieser Wert eher bei 45 Prozent. Den großen Rest haben zur

einen Hälfte die Ozeane aufgenommen und zur anderen Böden und Pflanzen.

Das zeigt, welche wichtige Rolle die Vegetation für das Klima spielt – und der Einfluss des Menschen darauf. Julia Pongratz hat in den vergangenen Jahren am Max-Planck-Institut (MPI) für Meteorologie, Deutschlands wohl erster Adresse für Klimaforschung, viel dazu gearbeitet. Sie leitete bis

## Kirchenbücher liefern Daten für Klimamodelle

zu ihrem Wechsel nach München die Forschungsgruppe „Forstwirtschaft im Erdsystem“, die aus dem angesehenen Emmy-Noether-Programm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde.

Etwa drei Viertel der gesamten eisfreien Landfläche sind unter der Regie des Menschen. Auf einem Viertel hat er die ursprüngliche Vegetation im Laufe der Geschichte vernichtet, die restlichen Flächen werden zu zwei Dritteln in der einen oder anderen Art bewirtschaftet: Etwa ein Viertel dessen, was im Laufe eines Jahres an pflanzlicher Biomasse nachwächst, der terrestrischen Nettoprimärproduktion, wie es in der Fachsprache heißt, schöpft der Mensch für seinen Bedarf ab. Diese Ausbeutung der Natur bleibt nicht ohne Folgen für das Klima: Etwa ein Drittel des Kohlendioxids, das jemals durch menschliche Aktivitäten freigesetzt wurde, stammt aus Änderungen der ursprünglichen Vegetation.

Doch wie groß sind die Klimaeffekte tatsächlich, wenn Menschen in großem Stil die Vegetation verändern? Lange Zeit war der Blick fast ausschließlich auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energieversorgung und im Verkehr gerichtet, wenn es um den Klimawandel ging. Und in der Tat ver-

ursacht sie heute den weitaus größten Teil der Kohlendioxidemissionen. „Aus Landnutzungsänderungen stammen demgegenüber etwa zehn Prozent des jährlich emittierten Kohlendioxids“, bilanziert Julia Pongratz. Das klinge zunächst nicht nach dem alles entscheidenden Posten. Doch dieses Bild ist nicht vollständig, denn die landwirtschaftliche Produktion setzt noch andere Treibhausgase frei: Lachgas aus der Düngung, Methan aus der Viehzucht und dem Reisanbau. Rechnet man dies in die jährlichen Gesamtemissionen ein, kommt man auf einen Anteil aus der Landnutzung von nahezu einem Drittel. In einer ganzen Reihe vor allem einkommensschwächerer und weniger industrialisierter Staaten trägt die Landnutzung mehr zum Treibhauseffekt bei als die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Und das Riesenland Brasilien ist die Nummer eins, was die Emissionen aus der Landnutzung angeht.

Jeder Kahlschlag also greift massiv in den Kohlenstoffkreislauf ein. Doch nicht nur solche biochemischen Prozesse beeinflussen den Treibhauseffekt, es spielt auch eine Reihe physikalischer Effekte eine Rolle. Die Albedo etwa, der Anteil des reflektierten Sonnenlichtes, steigt, wenn der dunkle Wald verschwindet und auf der Fläche beispielsweise Getreide wächst. Das immerhin hat einen kühlenden Effekt. Gleichzeitig aber sinkt mit dem Verlust von Blattfläche die – kühlende – Transpiration, was wiederum zu einem Aufheizen der Fläche führt. In einem Wald kommen etwa sieben Quadratmeter Blattfläche auf einen Quadratmeter Boden, in einem Urwald sogar bis zu zwölf. Damit kann ein Wald ungleich mehr Feuchtigkeit abgeben als etwa ein Getreidefeld.

Solche lokalen kleinräumigen Änderungen im Wasser- und Wärmehaushalt können sich auf größerer Skala sozusagen auch in fernen Regionen auswirken, weil sie durch die Luftströmungen weitergetragen werden. Erst kürzlich entwickelte Pongratz' Gruppe eine Methode, die Effekte rechnerisch voneinander zu trennen. Bis dahin fielen die

Fernwirkungen oft unter den Tisch, weil Beobachtungsdaten nur lokale Änderungen erfassen können. Eine weitere Schwierigkeit: „Das Klimasystem reagiert nicht linear“, sagt Julia Pongratz. „Es macht eben schon einen Unterschied für die lokalen Temperaturen, ob Sie die ersten oder die letzten zehn Prozent eines Waldes abholzen.“

Wie aber lassen sich die Abschätzungen für die Landnutzung in die Klimamodelle einbauen? „Als ich mit dem Studium fertig war, 2005, war es gelungen, einen Kohlenstoffkreislauf und die wichtigen damit verbundenen klimarelevanten Prozesse in die großen globalen Modelle einzupassen. Das waren die ersten echten Erdsystemmodelle, wie sie heute gang und gäbe sind. Damals war das wirklich revolutionär“, sagt Julia Pongratz.



**Prof. Dr. Julia Pongratz**

ist Inhaberin des Lehrstuhls für Physische Geographie und Landnutzungssysteme an der LMU. Pongratz, Jahrgang 1980, hat an der LMU und an der University of Maryland Physische Geografie studiert. Promoviert wurde sie in Hamburg; ihre Dissertation am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg wurde unter anderem mit der Otto-Hahn-Medaille der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet. Anschließend arbeitete sie als Postdoktorandin am Department of Global Ecology der Carnegie Institution in Stanford, USA. Von 2013 an leitete sie die Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe „Forstwirtschaft im Erdsystem“, bevor sie im Frühjahr 2018 an die LMU wechselte.

Das MPI hat ein eigenes Klimamodell entwickelt, bei dem Atmosphäre, Ozean und Vegetation miteinander in den Simulationen interagieren. „Solche globalen gekoppelten Modelle sind besonders aufwendig.“

Da Kohlendioxid sich lange in der Atmosphäre hält und anders als Methan etwa nicht chemisch abgebaut wird, zählen nicht nur die aktuellen Emissionen, sondern im Grunde alles, was sich über die Jahrtausende hin an Treibhausgasen gehäuft hat. Doch die historische Dimension hatte bis dahin niemand rekonstruiert. In ihrer Doktorarbeit hat Julia Pongratz das Ausmaß der Landnutzung und damit auch der CO<sub>2</sub>-Freisetzung im gesamten vergangenen Jahrtausend quantifiziert – im globalen Maßstab. Um eine solche Abschätzung zu ermöglichen, sammelte sie beispielsweise Bevölkerungsdaten aus Kirchenbüchern und Dokumentationen von Volkszählungen. Für eine Zeit ohne nennenswerten globalen Handel lässt sich damit einigermaßen verlässlich auf die landwirtschaftlich genutzte und dafür entwaldete Fläche hochrechnen. Danach wurden schon im Jahrtausend vor der Industrialisierung in der Bilanz gut 100 Gigatonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt.

2014 machte eine Untersuchung, an der Julia Pongratz maßgeblich mitgearbeitet hatte, Furore, weil sie die Klimaforschung erneut zum Umdenken zwang. „Entwaldung und Landnutzung zeigen Effekte gleicher Größenordnung. Wenn Sie einen Wald stehen lassen, ihn bewirtschaften, seine Artenzusammensetzung ändern, kann sich das ähnlich stark auf die lokalen Temperaturen auswirken, als wenn Sie ihn umgeschlagen hätten. Das hat die Klimawissenschaft bislang weitgehend ignoriert“, sagt Pongratz. Im vergangenen Jahr erschien im renommierten Fachblatt *Nature* eine weitere Arbeit mit Pongratz' Beteiligung, die solche Effekte auch für die Kohlenstoffspeicherung quantifizierte: Ohne einen anthropogenen Einfluss könnte die Vegetation global gesehen gut 900 Gigatonnen Kohlenstoff speichern. Aktuell kommt sie auf etwa 450 Gigatonnen.

Die Differenz, die den Verlust markiert, geht gut zur Hälfte auf Änderungen der Landbedeckung zurück, zur knappen anderen Hälfte auf die Landnutzung. „In einer dritten Arbeit konnten wir diese Größenordnung auch mit Modellierungen bestätigen. Wir müssen also unsere globalen Modelle unbedingt um das Landmanagement erweitern.“ Doch das ist schwierig, nicht nur, weil sich lokale Effekte mit Fernwirkungen überlagern, sondern auch, weil man kleinräumig gewonnene Daten braucht, um das Landnutzungs-Patchwork adäquat abzubilden. Ein besonders genaues und detailreiches Bild der globalen Emissionen zu zeichnen, das hat sich das bereits erwähnte Global Carbon Project, ein Team von Klimaforschern unter der Ägide der Vereinten Nationen zur Aufgabe gemacht. Pongratz koordiniert die Arbeiten, die die Emissionen aus der Landnutzung abschätzen. In einem Projekt etwa versuchen die Wissenschaftler, die Biomassebestände für ganz Europa aus Satellitendaten hochzurechnen. Am Ende sollen dabei hochaufgelöste aus Beobachtungen gespeiste Modelle herauskommen. Auch in den Weltklimarat, nach dem englischen Titel mit IPCC abgekürzt, ist Pongratz eingebunden. So gehört sie zu den Autoren des IPCC-Berichtes und koordiniert zwei Projekte zum Kohlenstoffkreislauf und zu Landnutzungsänderungen mit. Schon in diesem Sinne ließe sich der Titel der Antrittsvorlesung verstehen, die Julia Pongratz Anfang des Jahres an der LMU gehalten hat: *Ackern für den Klimaschutz*. Doch der Wissenschaftlerin ging es um etwas anderes: um die Frage, ob bestimmte Formen der Landnutzung dazu beitragen könnten, die Folgen des Klimawandels so weit abzuschwächen, dass er noch unter Kontrolle bleibt. Mittlerweile sind sogenannte Negativemissionstechnologien ins Blickfeld gerückt. Sie zielen darauf ab, den Kohlenstoff durch Speicherung dem Kreislauf zu entziehen. Als eine im wahrsten Sinn bodenständige Variante gilt eine breit angelegte Aufforstung. Nutzte man Flächen, die den Szenarien

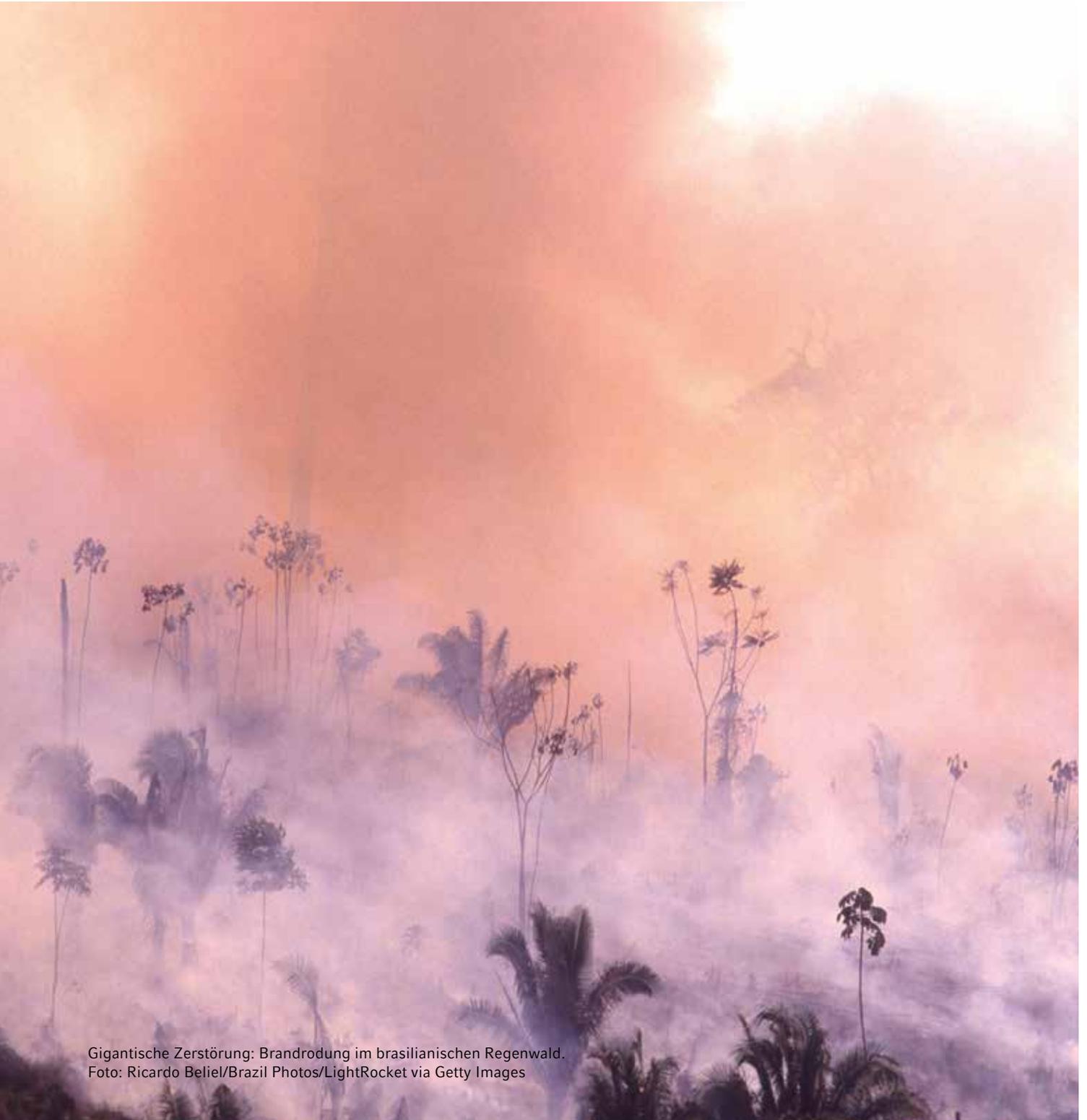
zufolge nicht mehr für die Landwirtschaft benötigt würden, so haben Julia Pongratz und ihr Hamburger Kollege Sebastian Sonntag errechnet, könnte das die Zunahme von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre bis zum Jahre 2100 um weit mehr reduzieren als bislang angenommen. Einem „plausiblen Szenario“ zufolge verminderte das das Ansteigen der globalen Durchschnittstemperatur um etwa 0,3 Grad.

Aufs Ganze gesehen ist die Sache für Pongratz so klar wie dringlich: Die bisherigen globalen Anstrengungen für den Klimaschutz reichen nicht. Die Ziele, die das Kyoto-Protokoll gesteckt hatte, werden nur teilweise erreicht. Das Paris-Abkommen von 2015 ist schon deswegen weniger streng, weil es den Staaten der Weltgemeinschaft überlässt, die Ziele selbst zu formulieren. Zusammengenommen werden diese Anstrengungen das definierte Ziel, die globale Durchschnittstemperatur nicht um mehr als 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau ansteigen zu lassen, weit verfehlen, wenn Bevölkerung, Industrie und Politik ihr Verhalten nicht grundlegend ändern. „Derzeit steuern wir eher auf drei Grad zu“, sagt Pongratz.

„Es bleibt nicht mehr viel Zeit, umzusteuern“, mahnt die Klimaforscherin. Die verschiedenen Szenarien, die Forscher in aller Welt mit ihren Modellen durchgerechnet haben, stimmen in einem Punkt überein: Bis Mitte dieses Jahrhunderts muss der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf null gehen, danach müssen die Emissionen rechnerisch negative Werte annehmen. Dafür müsse der Höhepunkt der Emissionen „schon deutlich vor dem Jahr 2030“ überschritten sein.

„Als ich in der Klimaforschung anfang“, erinnert sich Julia Pongratz, „stand noch schlicht das Erkenntnisinteresse im Vordergrund. Jetzt, mit der Frage, ob sich das 1,5-Grad-Ziel noch erreichen lässt, hat meine Arbeit eine ganz andere Dringlichkeit bekommen.“ Die Politik eines Jair Bolsonaro ist da nur eines der Hindernisse, die dem Klimaschutz entgegenstehen. ■





Gigantische Zerstörung: Brandrodung im brasilianischen Regenwald.  
Foto: Ricardo Beliel/Brazil Photos/LightRocket via Getty Images

# Büchertisch



Das Ende der Räterepublik: Weiße Fahne auf der Maximilianstraße,  
München 1919. Foto: SZ Photo/Süddeutsche Zeitung Photo



## Hitlers Probebühne

Eisner, Landauer, Toller, Mühsam: Für wenige Monate wurden vier Literaten zu Revolutionären, alle vier stammten aus jüdischen Familien. Sie wollten einen demokratischen Staat schaffen, der sich klar vom wilhelminischen Kaiserreich abgrenzte. Es war einer dieser Zufälle der Geschichte, sagt Michael Brenner, Professor für Jüdische Geschichte und Kultur an der LMU, der Juden für einen kurzen historischen Moment, in der letztlich gescheiterten Münchner Revolution und Räterepublik, auf die politische Bühne brachte. Brenner untersucht in seinem neuen Buch *Der lange Schatten der Revolution* die Motive der Revolutionäre, ihr zwiespältiges Verhältnis zur jüdischen Gemeinde Münchens und wie sie auf seltsame Weise daran beteiligt waren, dass plötzlich die „Judenfrage“ virulent und München schnell zur zentralen Bühne des deutschen Antisemitismus wurde. Mittendrin agierte Adolf Hitler, der in dieser Zeit den Kern seines politischen Weltbildes entwickelte. Es gab erste antisemitische Massenveranstaltungen, auf denen er sprach und seine neue Rolle probte. „Reisende, meidet Bayern!“ schrieb Kurt Tucholsky bereits 1921. Brenners Buch ist eine intensive Spurensuche nach den antisemitischen Anfängen in „Hitlers München“. (huf)

Michael Brenner: *Der lange Schatten der Vergangenheit. Jüdischer Verlag im Suhrkamp Verlag, Berlin 2019, 400 Seiten, 28 Euro*



## Not und Scham

Sie arbeiten auf Minijob-Basis in einem Callcenter oder schlafen bei der Tochter auf dem Flur: Frauen, deren Rente nicht zum Leben reicht. Irene Götz, Professorin am Institut für Empirische Kulturwissenschaft und Europäische Ethnologie an der LMU, und ihr Team haben ein Buch über Altersarmut von Frauen in München geschrieben, in dem sie die Ergebnisse des Projekts „Prekärer Ruhestand“ vorstellt. „Fast keine Frau, die alleine in einem Haushalt wirtschaftet, kommt mit ihrer Rente zurecht“, sagt Irene Götz. In ihrem Buch beschreibt sie den Alltag der Betroffenen, schreibt von der Scham, die diese angesichts ihrer Armut empfinden. Nicht alle haben den Mut, zum Sozialamt zu gehen, um Grundsicherung zu beantragen. Wer sich dafür entscheidet, muss seine „Bedürftigkeit“ Jahr für Jahr neu nachweisen, auch durch die Vorlage von Kontoauszügen. „Die Frauen werden abhängig, von Ämtern, Familie, Freunden, wollen das aber nicht“, sagt Götz, die auch die Ursachen der weiblichen Altersarmut aufzeigt. Die Alltagsszenen bleiben dem Leser nachhaltig in Erinnerung, und das ist durchaus gewollt: „Nur wenn man ermessen kann, wie es den Älteren geht, wie sie knapsen müssen und leiden, versteht man, dass sich politisch etwas ändern muss.“ (nh)

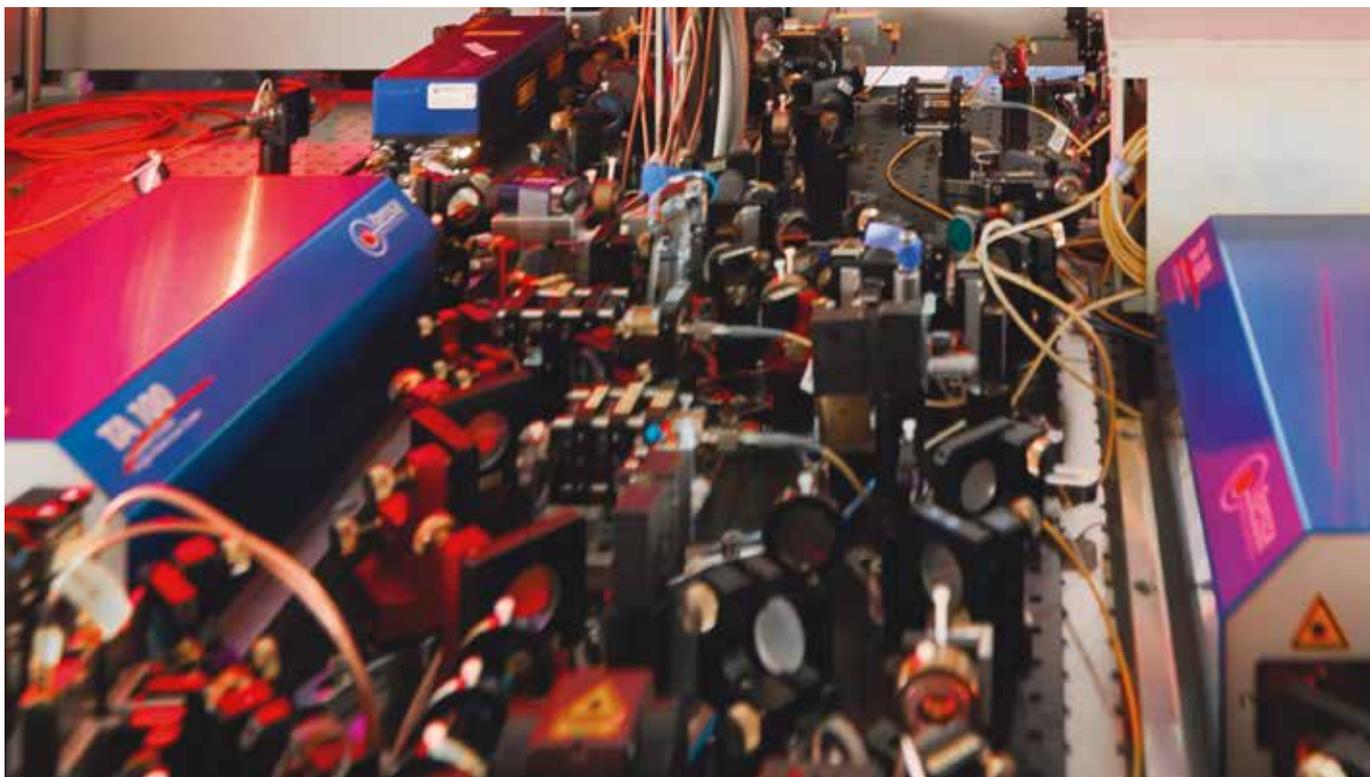
Irene Götz: *Kein Ruhestand. Wie Frauen mit Altersarmut umgehen. Verlag Antje Kunstmann, München 2019, 320 Seiten, 20 Euro*



## Wachprogramm beenden!

Manche halten Schlafen immer noch für eine Zeitverschwendung, doch der Chronobiologe Till Roenneberg hält wacker dagegen. Er wehrt sich, den Schlaf in einen Tagesablauf gepresst zu wissen, der von Arbeit oder Schule dominiert ist. Wer mit dem Wecker aufwache, habe nicht zu Ende geschlafen, sagt er. Das sei wie bei einer „Waschmaschine, die ihr Waschprogramm nicht beendet hat“. Sein neues Buch *Das Recht auf Schlaf* versteht der Autor denn auch als „Kampfschrift für den Schlaf“. Man müsse auf seine innere Uhr hören. Schlaf sei eine Art wichtiger „Boxenstopp“ für das Gehirn, der Körper brauche diese Zeit, um wichtige „Arbeiten“ zu erledigen – und schalte bewusst ab. Oder besser: Er schalte das Bewusstsein ab, um „das unbewusste Gehirn im Tiefschlaf mit langsamen, synchronisierten elektrischen Wellen durchfluten“ zu können. Reißt man es da heraus, kann es die auf biochemischer Ebene notwendigen Aufräumarbeiten im Gehirn nicht erledigen – so sinkt auf Dauer die Gehirnleistung. Roenneberg appelliert an seine Leser, sich die nötige Erholung zu erlauben. „Schlaf ist der Teil des Lebens, der das Wachsein möglich macht“ – und nicht ein verschwendetes Lebensdrittel. (huf)

Till Roenneberg: *Das Recht auf Schlaf. dtv Verlagsgesellschaft, München 2019, 272 Seiten, 20 Euro*



Erkenntnisse aus der Welt der Quanten: Grundlagenforschung in Immanuel Blochs Labor. Foto: Jan Greune

## Die Zukunftsfrage

# Steht eine Quantenrevolution bevor?

**Immanuel Bloch**, Ordinarius für Experimentalphysik an der LMU und Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik: „Es zeichnet sich deutlich ab, dass die Quantenmechanik ein großes Potenzial bietet für eine Vielzahl von Anwendungen. Das verspricht in der Sensorik, der Messtechnik, beim Computing, in der Quantensimulation oder der Kommunikation neue Wege zu eröffnen, wie wir künftig mithilfe der Quantenmechanik messen, kommunizieren oder rechnen. Ob es dann immer gleich eine Revolution ist, wird die Zukunft zeigen. In der Tat stehen Wissenschaft und Technik noch vor gewaltigen Herausforderungen. Am weitesten gediehen im Sinne von Anwendungen ist die Quantenkommunikation, die absolut abhörsichere Kommunikationswege schaffen soll. Unter Sicherheitsaspekten, aber auch für Unternehmen, die ihre Betriebsgeheimnisse schützen wollen, wäre das eine entscheidende Innovation.“

**Harald Weinfurter**, Professor für Experimentalphysik an der LMU: „Um nicht noch einen Hype zu befördern, sollte man mit allzu übertriebenen Formulierungen vorsichtig sein. Aber es gibt in der Tat erfolgversprechende Versuche, Quantenteilchen für Anwendungen nutzbar zu machen. In der Metrologie sind das etwa neue Systeme, die hoch empfindliche Magnetfeldmessungen erlauben. Auch die Entwicklung des Quantencomputers schreitet voran. Er könnte, um nur ein Beispiel zu nennen, neuartige Untersuchungen in Physik und Chemie möglich machen. Mit großen numerischen Rechnungen wird versucht, zum Beispiel Festkörpereffekte wie den Magnetismus besser zu verstehen. Systeme, die aus mehr als 50, 60 Atomen bestehen, lassen sich auf herkömmlichen Computern jedoch kaum berechnen. Aber schon mit relativ kleinen Quantencomputern, wie sie derzeit entwickelt werden, wird das möglich sein.“ Protokolle: math

**Lesen Sie im nächsten Heft ein ausführliches Gespräch zu Fortschritten in den Quantentechnologien.**

### Impressum

#### Herausgeber

Präsidium der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München

#### Konzept und Redaktion

Kommunikation & Presse LMU  
Luise Dirscherl (verantwortlich)  
Martin Thureau (federführend)

#### Autoren dieser Ausgabe

Maximilian Burkhart (mbu), Hubert Filser (huf),  
Monika Gödde (göd), Nicola Holzapfel (nh),  
Nikolaus Nützel, Martin Thureau (math)

#### Design

Christoph Olesinski

#### Online-Redaktion

Thomas Pinter

#### Auflage

9000 Exemplare

#### Erscheinungsweise

halbjährlich

#### Druck

Kriechbaumer Druck GmbH & Co. KG,  
München  
Einsichten. Das Forschungsmagazin wird auf  
Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft gedruckt.

#### Distribution

Mathias Schiener

#### Redaktionsadresse

Geschwister-Scholl-Platz 1  
80539 München  
Tel.: 089 2180 3808  
E-Mail: Einsichten@lmu.de

[www.lmu.de/einsichten](http://www.lmu.de/einsichten)

Unter dieser Adresse können Sie  
Einsichten. Das Forschungsmagazin  
auch kostenlos abonnieren.

