

Faszination Forschung

Forschungshighlights der TUM

Technische Universität München

Das Wissenschaftsmagazin

September 2023 | Edition 30



Biophysik: Ströme regeln Wachstum von Adern

Globaler Süden – fünf beispielhafte Forschungsprojekte

Biomathematik – Krankheiten besiegen mit künstlicher Intelligenz

Geoinformatik – Stadtsimulationen beantworten wichtige Zukunftsfragen

ISSN 18653022



9 771865 302004

Schutzgebühr
EUR 9,00

Liebe Leserinnen und Leser,

Künstliche Intelligenz (KI) verändert unseren Alltag in vielen Bereichen – oft ohne dass wir es bemerken. Jetzt macht ChatGPT die KI für jeden nutzbar und vielen wird bewusst, welches Potenzial in dieser disruptiven Technologie steckt.

Gerade auch auf dem Zukunftskontinent Afrika entwickeln sich KI-Innovationen wirklich dynamisch. Neben technologischen spielen auch ethische Fragen eine große Rolle. Prof. Christoph Lütge bringt in Ghana afrikanische KI-Experten zusammen, um Fragen verantwortlicher und gerechter KI schon bei der Entwicklung zu berücksichtigen. Dies ist eines der Forschungsthemen zum Schwerpunkt „Globaler Süden“, den wir in dieser „Faszination Forschung“ präsentieren.

Prof. Andrea Winkler entwickelt einen günstigen Bluttest zur Diagnose von Bandwurm-Infektionen, die rund ein Drittel aller Epilepsie-Fälle in Tansania verursachen. Prof. Frank-Martin Belz und sein Team wollen wissen, wie der Aufbau einer nachhaltigen Stromversorgung in ländlichen Regionen Afrikas Unternehmensgründungen ermöglicht und so Familien- und Dorfstrukturen verändert.

Die knappen Ressourcen Wasser, Energie und Nahrung sind eng miteinander gekoppelt. Es braucht Wasser und Energie zur Produktion von Nahrungsmitteln. Prof. Jörg Drewes und sein Team denken in Kreisläufen, um die kleine Stadt Leh im Himalaya unabhängig von externer Wasserzufuhr zu machen.

Der Amazonas nimmt große Mengen an Kohlendioxid auf und bremst so die Erderwärmung. Prof. Anja Rammig will in einem internationalen Projekt herausfinden, wieviel CO₂ der Regenwald in Zukunft aufnehmen kann, um Klimamodelle zuverlässiger zu berechnen. Ihre Frage: Wächst der Wald umso stärker, je mehr CO₂ er aufnimmt, oder gibt es begrenzende Faktoren für das Wachstum.

Neben diesem Schwerpunkt über Forschungskoperationen im globalen Süden bietet diese Faszination Forschung weitere Einblicke in spannende Forschungsthemen der TUM. Prof. Karen Alim ist fasziniert von der Physik der Strömungen und will die Dynamik der Netzwerke vom Blutkreislauf über das Adergeflecht in Blättern bis zu den Versorgungsbahnen einer Pilzkultur verstehen.



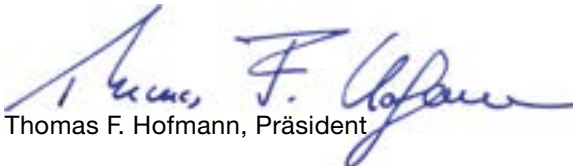
„Was wäre, wenn in Münchner Wohngebäuden Solarthermie das Wasser erwärmt oder mit Fernwärme oder Wärmepumpen geheizt wird?“, fragt Prof. Thomas Kolbe. Seine geodatenbasierten semantischen Stadtmodelle simulieren die potenziellen Energieeinsparungen.

In kleinen Maßstäben macht Prof. Eva Weig große Sprünge. Sie entwickelt Nanostrings, die ähnlich wie eine Gitarrensaiten in Schwingung versetzt werden können. Auch wenn dies derzeit noch Grundlagenforschung ist, sind Anwendungen in Sicht. Beispielsweise können die Nanosaiten als hochempfindliche Sensoren oder Zwischenspeicher in Quantencomputern eingesetzt werden.

Gerne gratuliere ich hier noch einmal unserem Leibnizpreisträger Prof. Fabian Theis. Lesen Sie in dieser Faszination Forschung, wie er Mathematik, KI und Biowissenschaften miteinander verbindet, um zu analysieren, wie Zellen funktionieren – abhängig vom Alter, Geschlecht, Lebensstil oder bei verschiedenen Erkrankungen eines Menschen.

Ich wünsche viel Vergnügen, neue Erkenntnisse und Inspiration beim Lesen!

Ihr


Thomas F. Hofmann, Präsident

Seite 06

Ströme regeln Wachstum von Adern



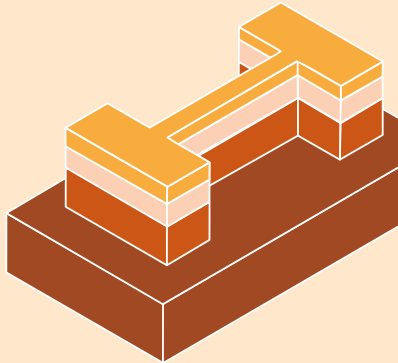
Seite 16

Krankheiten besiegen mit künstlicher Intelligenz



Seite 68

Die wohl größten Quanten- objekte der Welt



Seite 60

Was wäre, wenn?



Inhalt

06 Ströme regeln Wachstum von Adern

Die Physik der Strömungen hat einen fundamentalen Einfluss auf die Entwicklung von Netzwerken – auch auf das komplexe Netzwerk aus Blutgefäßen. Karen Alim untersucht mit ihrem Team, wie genau Strömungen Adern veröden und neu bilden lassen.

16 Krankheiten besiegen mit künstlicher Intelligenz

Fabian Theis setzt auf Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen, um große Datenmengen für Anwender nutzbar zu machen. Er möchte vor allem das Verhalten von Zellen verstehen.

24 Krebs behandeln ohne Kollateralschaden

Das Start-up-Unternehmen Plectonic hat einen Nanoschalter aus DNA entwickelt, der gezielte Antikörper-Immuntherapien ermöglicht.

60 Was wäre, wenn?

Energie sparen, autonome Fahrzeuge einsetzen und die Sicherheit erhöhen – das sind wichtige Ziele von Städten. Wie lassen sie sich erreichen? Thomas H. Kolbe entwickelt Stadtsimulationen, die wichtige Zukunftsfragen beantworten.

68 Die wohl größten Quantenobjekte der Welt

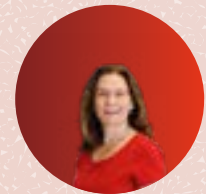
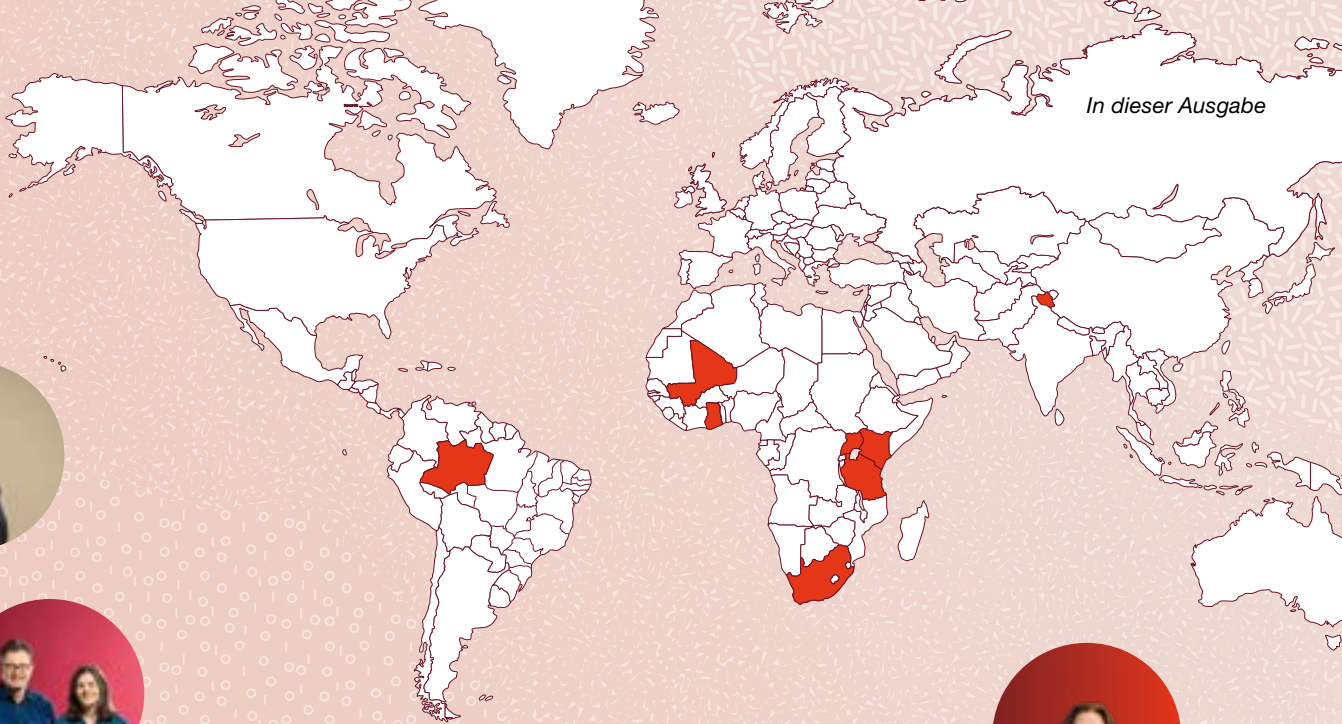
Eva Weig entwickelt Sensoren, die gleichzeitig makroskopisch mechanische Objekte und Quantenobjekte sind. Die extrem kleinen Saiten aus Halbleitermaterial könnten eines Tages kleinste magnetische Felder und Kräfte detektieren.

In dieser Ausgabe

03 Editorial

78 Autoren

78 Impressum



Seite 26

Globaler Süden

Vizepräsidentin Juliane Winkelmann darüber, warum und wie sich die TUM in verschiedenen Partnerschaften im Globalen Süden engagiert.

28 Ein Parasit mit Nebenwirkungen

Eine Schweinebandwurminfektion ist eine der Hauptursachen für Epilepsie im Globalen Süden. Andrea Winkler erforscht diesen Zusammenhang und konzentriert sich dabei nicht nur auf Behandlung und Diagnose, sondern auch auf eine verbesserte Prävention.

34 Bezahlbarer Strom für entlegene Dorfgemeinschaften

Frank-Martin Belz untersucht, welche unternehmerischen Aktivitäten sich ländlichen Regionen von Entwicklungsländern entfalten, wenn sie mit Energie versorgt werden. Esther Salvi erforscht die Schattenwirtschaft in solchen Regionen.

42 Künstliche Intelligenz und Ethik zusammenbringen

Ein Team um Christoph Lütge und Caitlin Corrigan hat eine Plattform mitgegründet, die afrikanische KI-Experten vernetzt – und eine ethische und nachhaltige KI-Entwicklung fördert.

48 Langfristige Ménage à trois

Wir brauchen eine zirkuläre statt einer linearen Sichtweise auf Wasser, Energie und Nahrung, sagt Jörg Drewes. Er und Daphne Keilman-Gondhalekar arbeiten an alternativen Lösungen für den Verbrauch dieser Ressourcen.

54 Wieviel CO₂ können Wälder künftig noch aufnehmen?

Der Amazonas-Regenwald nimmt einen großen Teil des Klimagases CO₂ auf und bremst so die Erderwärmung. Aber wie gut er das in Zukunft leisten kann, ist weitgehend ungeklärt. Ein großes Freilandexperiment soll diese Frage klären.

E Hier finden Sie die englische Ausgabe als PDF:

www.tum.de/faszination-forschung-30

Ströme regeln Wachstum von Adern

Die Physik der Strömungen formt lebende Netzwerke. Das gilt für die Netzwerke des Blutkreislaufs über das Adergeflecht in Blättern bis zu den Röhren, die Pilznetzwerke bilden. Prof. Karen Alim, Biophysikerin an der TUM, erforscht mit ihrem Team, wie genau Strömungen die Adern dazu bringen, sich anzupassen und zu wachsen. Das Ergebnis könnten neue Therapien gegen krankhafte Veränderungen von Blutgefäßen sein, die auf rein physikalischen Prinzipien beruhen.

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

Flows Govern how Veins Adapt E

The physics of flows plays a fundamental role in the organization of networks, including the complex circulatory system. TUM biophysicist Prof. Karen Alim and her team are investigating exactly how flows lead to blood vessels forming and vanishing.

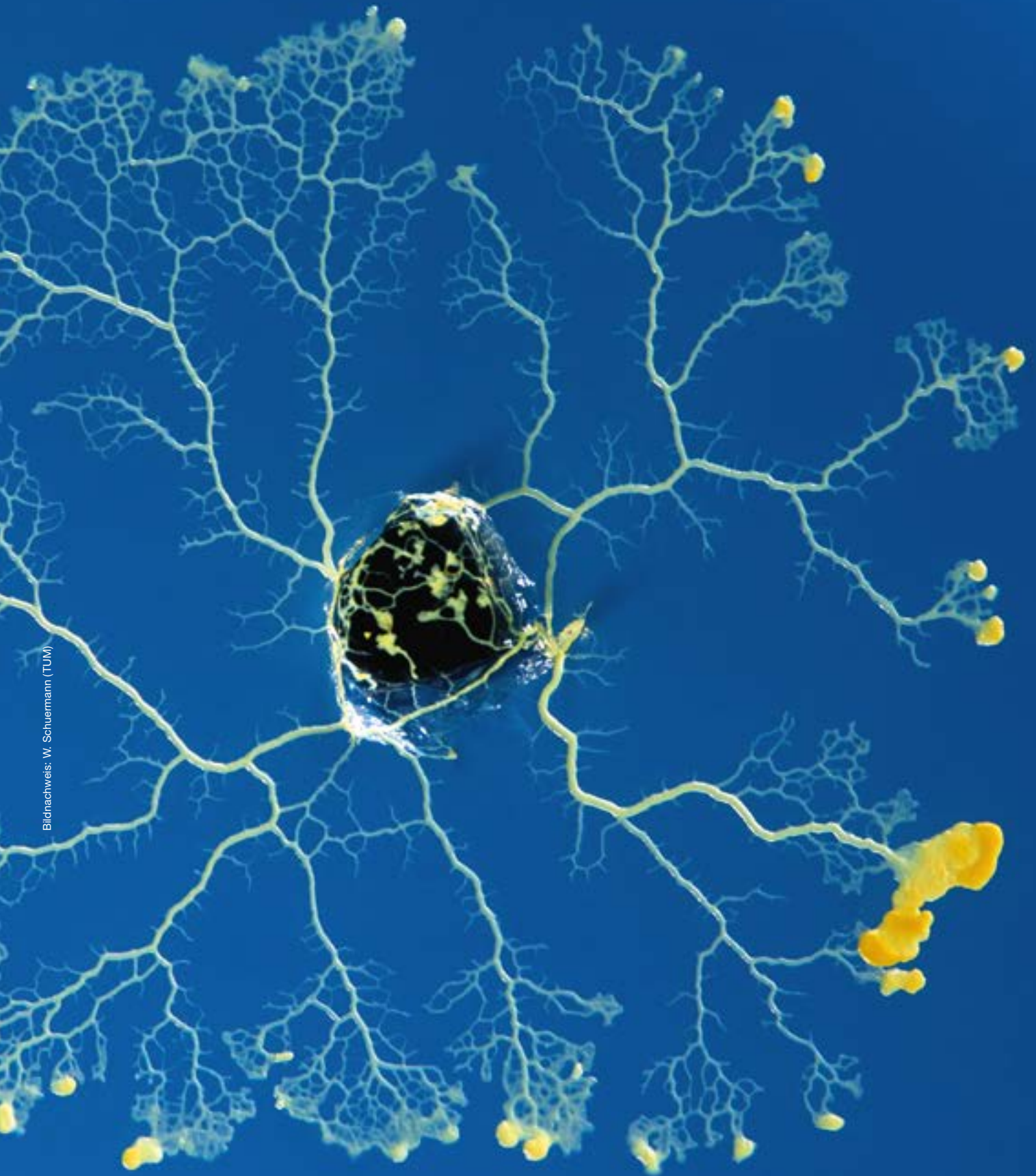
However, analyzing blood flows in vivo in animals and humans is exceptionally challenging. The scientists therefore focused on the supply pathways in a slime mold of the species *Physarum polycephalum*. Exactly the same physical principles apply in these pathways as in the human circulatory system. Their findings? In addition to the shear rate – a measure of different velocities in a flow – the entire network architecture also shapes the fate of each individual pathway or vein.

Alim is now examining small networks of human vascular cells with the help of biochips. She hopes that this chip model could reveal targeted ways to make individual blood vessels grow or vanish, which could lead to new treatments for pathological changes in blood vessels – based entirely on physical principles.

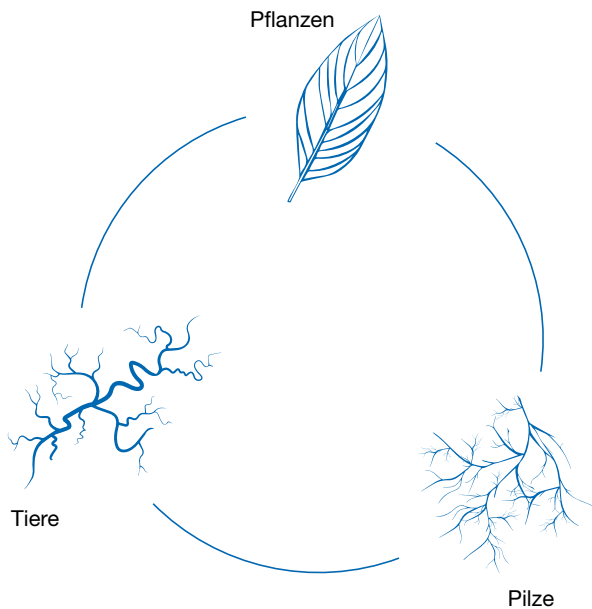
□

Link

www.bpm.ph.tum.de

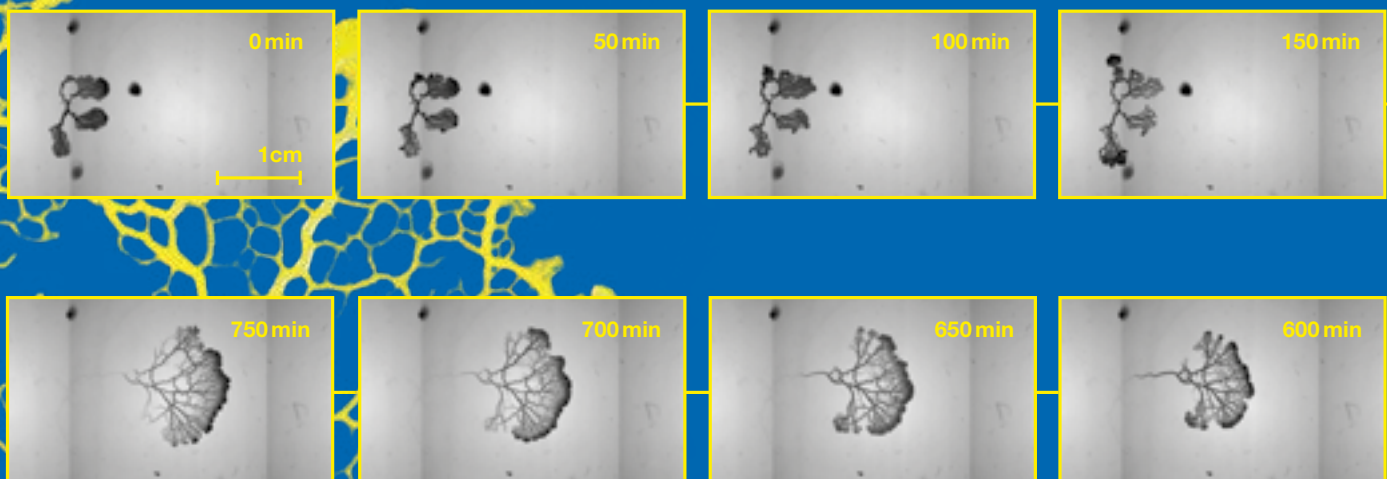


Bildnachweis: W. Schuermann (TUM)



Lebende Strömungsnetze sind ein elementarer Baustein des Lebens. Sie bilden die uns durchdringenden Blutgefäße genauso wie die Transportadern in Blättern. Bei Pilzen und Schleimpilzen stellen einzig und allein diese Transportnetzwerke den Körper dar.

Jeden Tag schlägt unser Herz gut 100.000 Mal – langsam auf dem Sofa, sehr schnell beim Sprint. In dieser Zeit pumpt der nur 300 Gramm schwere Hohlmuskel bis zu 7.000 Liter Blut durch Zentimeter dicke Schlagadern bis in filigrane, mikrometerdünne Kapillargefäße. Dieses komplexe Netzwerk aus Arterien und Venen organisiert sich dabei ständig neu – Adern veröden, neue Blutgefäße werden gebildet. Genau diesen stetigen Prozess des Werdens und Vergehens will Karen Alim, Biophysikerin an der TUM, mit ihrer Arbeitsgruppe genauer verstehen. Denn das Schicksal von Blutadern hängt nicht nur vom Verhalten und der Umwelt, Nährstoffen oder Giften ab. Auch die Physik der Strömungen hat einen fundamentalen Einfluss auf die Entwicklung von Netzwerken. „Sobald durch ein Netzwerk Blut strömt, reorganisiert es sich“, sagt Alim. Dabei geht es in lebenden und physikalischen Systemen immer darum, mit möglichst geringem Aufwand einen größtmöglichen Nutzen – in diesem Falle einen optimalen Blutkreislauf – zu erzielen. Doch viele Details der Wechselwirkung zwischen Blutströmung und Aderwachstum liegen heute noch im Dunkeln. Physikerinnen und Physiker müssen also gar nicht in die Weiten des Alls oder auf das Verhalten kleinster Quanten schauen, um neue Entdeckungen zu machen. Auch ganz nah, direkt in unserem Körper, schlummern noch ungeklärte Prozesse, deren Ursache und Wirkung sich mit der Sprache der Physik entschlüsseln lassen. „Hier dürfen wir noch Newton spielen“, begeistert sich Alim für das Forschungsfeld der Biologischen Physik. „Schon in meiner Jugend staunte ich zum Beispiel über den Lotuseffekt. Das inspirierte mich, die vielseitigen Techniken und Mechanismen der Natur genauer zu erforschen.“



Es liegt alles in der Physik

So wie der Fall eines Apfels Isaac Newton laut Legende den Impuls zur Beschreibung der Schwerkraft gab, bilden auch heute Beobachtung und Experiment die Basis für Modelle und allgemein gültige Theorien. Doch genau das gestaltet sich bei der detaillierten Analyse der Blutströme – egal ob Mensch oder Tier – sehr schwierig. „Aber viele Organismen – vom Tier über Pflanzen bis zum Pilz – bilden ähnliche Netzwerke“, sagt Alim. Sie weiß, dass sich deren Biologie extrem voneinander unterscheidet. „So liegt es nicht am genetischen Code, sondern an der Physik, die Dynamik der Netzwerke vom Blutkreislauf über das Adergeflecht in Blättern bis zu den Versorgungsbahnen einer Pilzkultur zu erklären.“

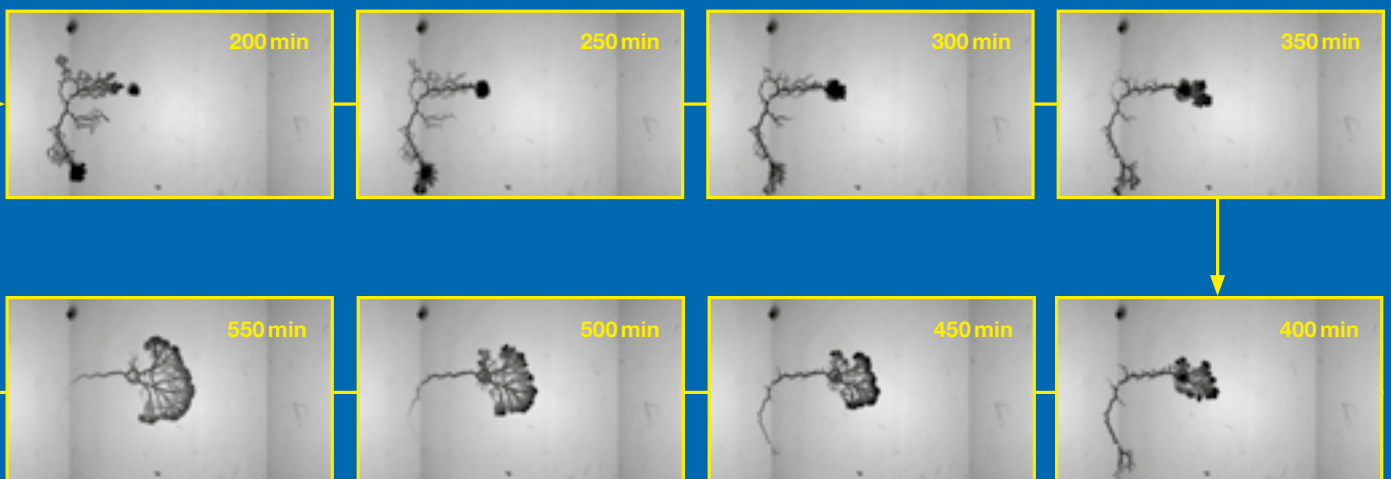
Genau diese allgemeine Gültigkeit physikalischer Prinzipien gibt dem etwa zwölfköpfigen, interdisziplinären Team um Karen Alim einen idealen Organismus für ihre Experimente an die Hand: ein Schleimpilz der Art *Physarum polycephalum*. Dieses einzellige Lebewesen – genetisch zwischen Tier und Pflanze eingeordnet – bildet ein sich stetig veränderndes Netzwerk aus zellulären Versorgungsleitungen. In einem so genannten Cytoplasmaströmen Nähr- und Signalstoffe durch ein flaches, zweidimensionales Netzwerk aus mikrometerfeinen Röhren oder Adern. Diese Schleimpilze pressten die TUM-Forschenden zwischen einen gläsernen Objektträger und eine hauchdünne Deckfolie. „Dort wachsen sie fröhlich und die Strömungen lassen sich durch ein Mikroskop beobachten und messen“, sagt Alim. ▷

Bildnachweis: K. Alim (TUM), Grafiken: edlundsepp (Quelle: TUM)



„Hier dürfen wir noch Newton spielen.“

Karen Alim



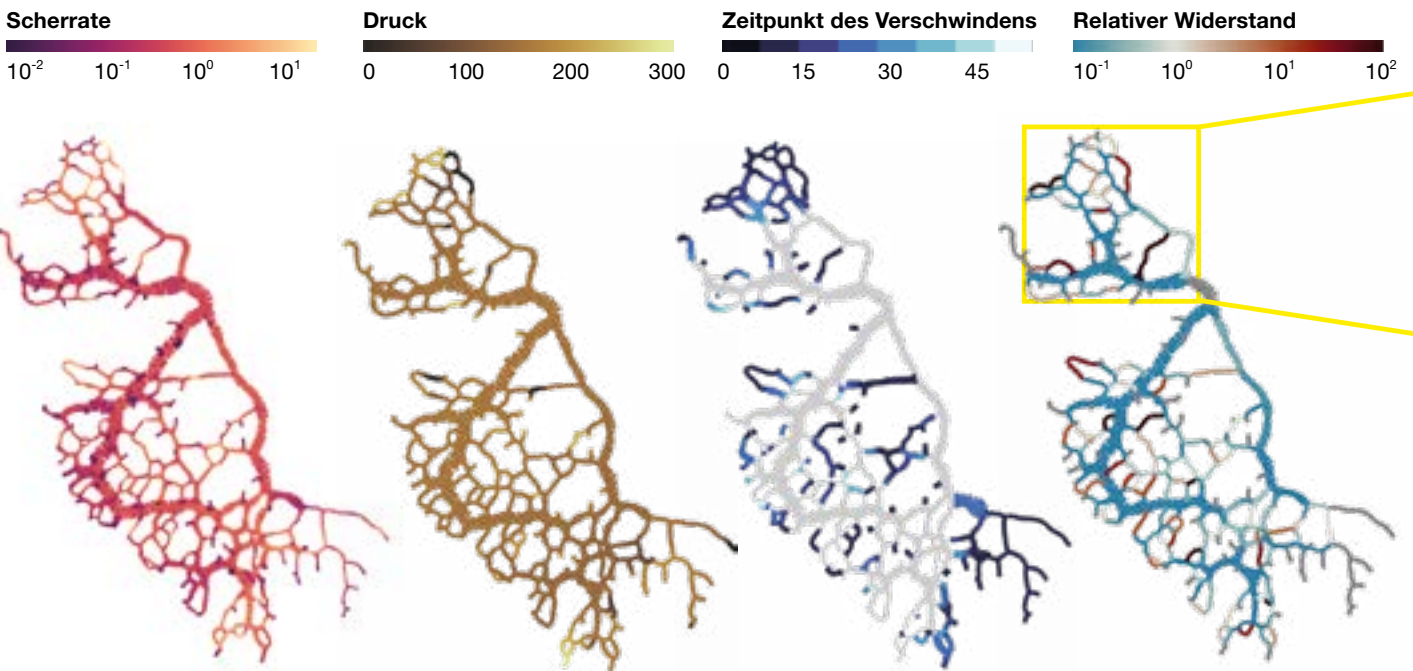


Zur ihrer Überraschung verhielten sich die Schleimpilze deutlich anders als erwartet. „Anfangs dachten wir, dass ausschließlich die Scherrate für die Entwicklung der Schleimpilz-Adern verantwortlich sei“, sagt Alim. Vereinfacht beschreibt eine Scherrate die unterschiedlichen Geschwindigkeiten einer Strömung durch eine Röhre: Am Rand wirken Reibungskräfte auf die Flüssigkeit und ver-

ringern das Tempo, in der Mitte dagegen kann sie ungehindert schneller fließen. Eine geringe Scherrate mit schwachen Scherkräften sollte zum Schrumpfen einer Ader führen, bis sie sogar verödet. Große Scherraten dagegen fördern das Aderwachstum – so die bisherige Annahme. Aber Alims Messungen stimmten mit dieser Vorhersage nicht überein. Trotz identischer Scherraten schrumpften

△ **Alims Labor hält die Schleimpilze in Flüssigkeit.** [1] Für ein Experiment entnehmen die Wissenschaftlerinnen eine kleine Menge und zentrifugieren sie. [2] Daraus nehmen sie Schleimpilz-Einzeller (Plasmodien) auf und verteilen 3–4 Tropfen auf der Petrischale. [3] Im Mikroskop wird das Wachstum der Schleimpilze beobachtet. [4] Der Schleimpilz richtet sein Netzwerk nach Nahrungsquellen – hier Haferflocken – aus.

Grafiken: edlun@sapp (Quelle: TUM); Bildnachweis: Stefan Woldig





3



4

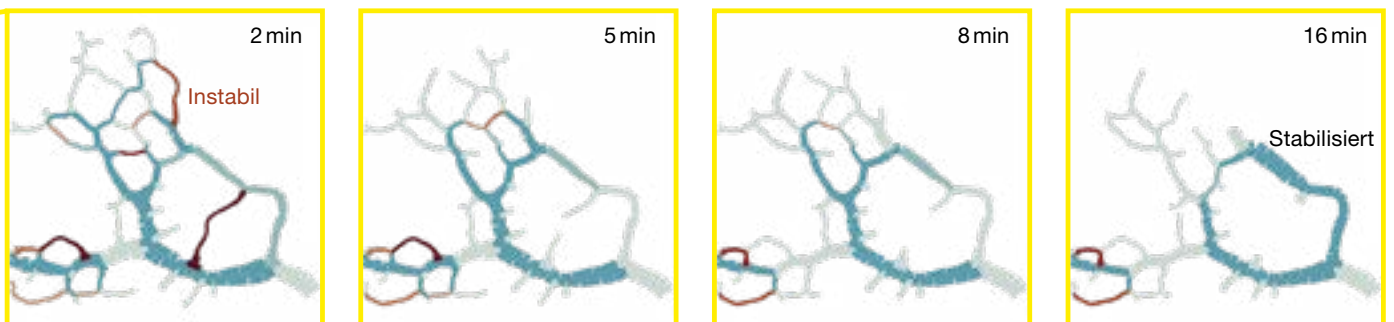
nur einige dieser Adern, andere blieben dagegen stabil. „Dieser eine Parameter der Scherraten oder Scherkräfte reichte zur Erklärung schlicht nicht aus“, sagt Alim. So musste es noch einen weiteren Faktor geben, der das Verhalten der Adern im Netzwerk erklären konnte. Mit vielen weiteren Beobachtungen – immer begleitet durch Modellrechnungen auf der Basis komplexer Strömungsgleichun-

gen – analysierten Alim und ihr Team das Verhalten der Adern immer genauer. Sie blickten nicht nur auf einzelne Adern, sondern auf das gesamte Netzwerk. Dieser erweiterte Fokus lieferte schließlich die Lösung.

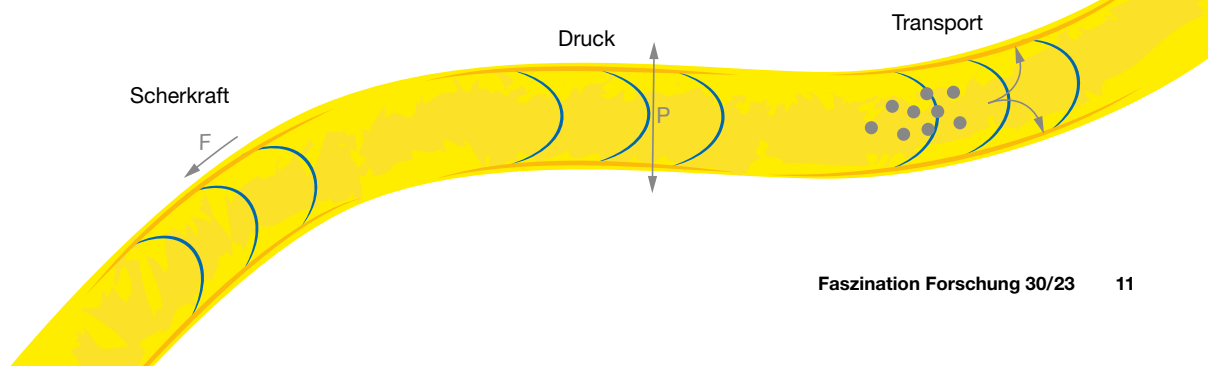
„Die gesamte Netzwerk-Architektur mit all den benachbarten, kleineren oder größeren Leitungsbahnen wirkt sich auf die einzelne Ader aus“, sagt Alim. ▶

▽
Die Scherkraft, aber auch Druck und Konzentrationsgradienten bestimmen, ob die Adern wachsen oder schrumpfen. Aber die Netzwerkarchitektur, also der Zustand benachbarter Adern, wirkt sich ebenfalls aus. Somit beeinflussen wachsende oder schrumpfende Adern auch das sie umgebende Netzwerk.

Zeitreihe der Reorganisation eines Netzwerks



- Flüssigkeit
- Röhrenwand
- Signalmolekül





Karen Alim und ihre Doktorandin
betrachten das Wachstum eines
Schleimpilzes im Lichtmikroskop.

*„Die gesamte Netzwerk-
Architektur [...] wirkt sich
auf die einzelne Ader aus.“*

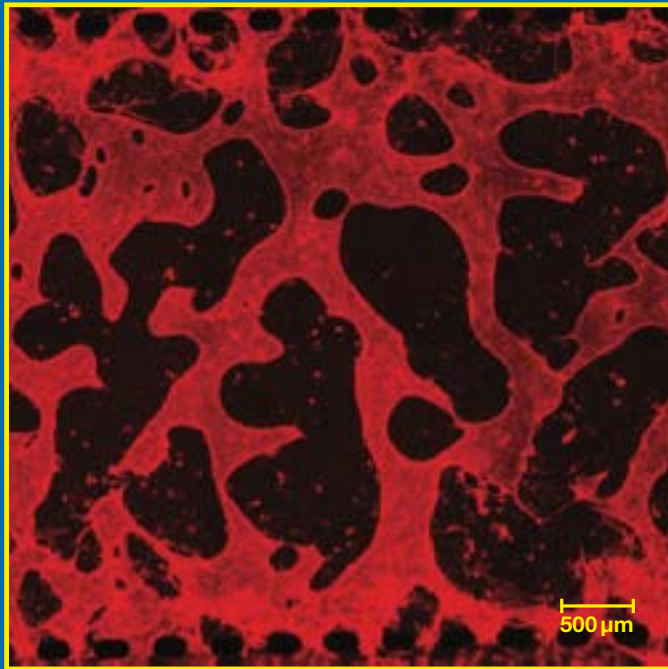
Karen Alim

So verödete beispielsweise eine kleine Ader, wenn in ihrer Nachbarschaft eine größere vorlag. Fanden sich in der Umgebung dagegen nur viele weitere kleine Adern, blieben alle erhalten. Diese Reaktion stellte sich allerdings nicht sofort, sondern immer mit einer Verzögerung von wenigen Minuten ein. Genau dieser Zeitversatz machte es schwierig, den Einfluss der Netzwerk-Architektur auf eine einzelne Ader zu entdecken. „Dabei ist diese Verzögerung

gut erklärbar. Denn die Zellen brauchen etwa Zeit, um zu reagieren“, sagt Alim.

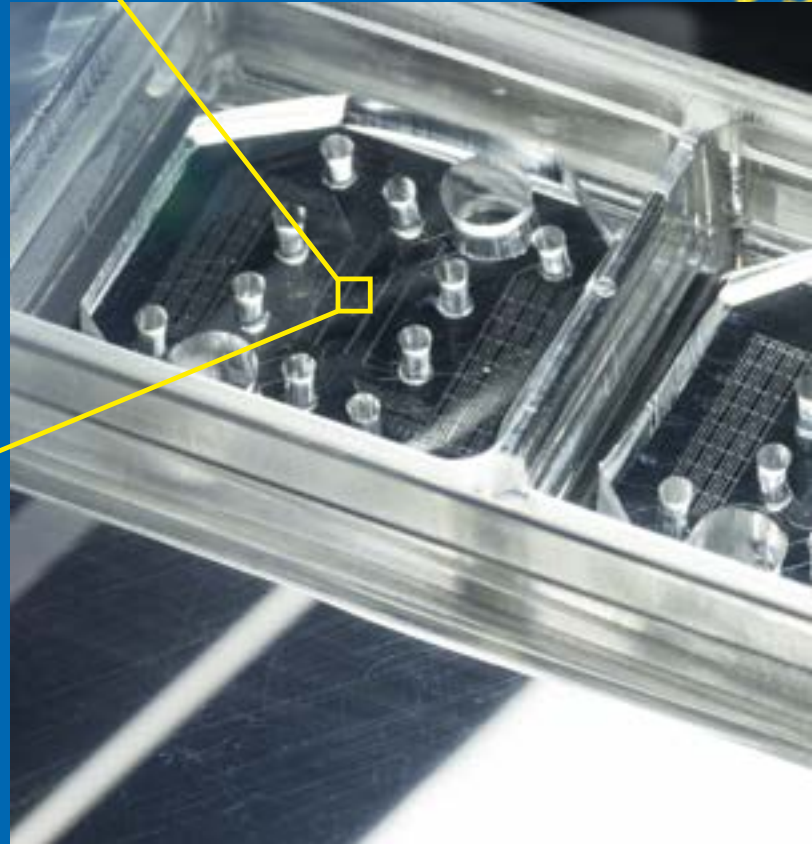
Scherrate der Strömung und die gesamte Netzwerk-Architektur bilden also die entscheidenden Faktoren, die über die Entwicklung einzelner Adern entscheiden. Alim ist davon überzeugt, dass dieser Zusammenhang auch für Blutgefäße von Mensch und Tier gültig ist. Jedoch sollte hier die Reorganisation des Netzwerks mit einigen





Experimente, um das Wachstum von Blutgefäßnetzen (oben) mit Hilfe eines Biochips (rechts) zu programmieren. Ein in den Hohlraum des Chips eingebrachtes Medium enthält Zellen, die menschliche Blutkapillarsysteme bilden. Die Zellen und ihr Netzwerk im Chip lassen sich füttern und mit Strömung steuern.

Stunden deutlich länger dauern als beim Schleimpilz. Daher plant sie aktuell weitere Experimente in denen eine Art Biochip als Beobachtungsobjekt dienen soll. Auf dem Chip sollen menschliche Gefäßzellen kleine Netzwerke – quasi rudimentäre künstliche Blutkreisläufe – bilden. Wieder könnten Beobachtungen und begleitende Modellrechnungen das Verhalten der Blutadern erklären helfen. „An solchen Chipmodellen wollen wir lernen, wie man Adern quasi programmieren, also gezielt vergrößern oder veröden kann“, sagt Alim.



„Wenn wir wissen, unter welchen Bedingungen Adern wachsen oder schrumpfen, ergeben sich viele Anwendungsmöglichkeiten“, sagt die Biophysikerin. Auf dieser Basis ließen sich in nicht allzu ferner Zukunft vielleicht neue Therapien gegen krankhafte Veränderungen bis zur Blockade von Blutgefäßen entwickelt. Umgekehrt ließen sich neu gebildete Adern, die einen gefährlichen Tumor mit Nährstoffen versorgen, gezielt veröden. „Das wäre ein toller Beleg, dass nicht nur die Biologie oder die nach neuen Wirkstoffen suchende Chemie, sondern auch die Physik zu Fortschritten in der Medizin führen kann“, sagt Alim. ■

Jan Oliver Löffken



Prof. Karen Alim

begeistert sich seit ihrer Jugend für Biophysik. Sie studierte Physik an der Universität Karlsruhe, an der LMU München und an der University of Manchester. Nach ihrer Promotion in theoretischer Physik (LMU) forschte sie als Postdoc an der Harvard University und 2015 als Leiterin der Forschungsgruppe „Biologische Physik und Morphogenese“ am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. Seit 2019 ist Alim Biophysik-Professorin an der TUM und vertieft dank eines Starting Grant des European Research Council (2020) die Strömungsforschung in biologischen Netzwerken vom Pilzgeflecht bis zum Blutkreislauf. Außerdem ist sie Prodekanin für Diversity und Talent Management der TUM School of Natural Sciences.

Krankheiten besiegen mit künstlicher Intelligenz



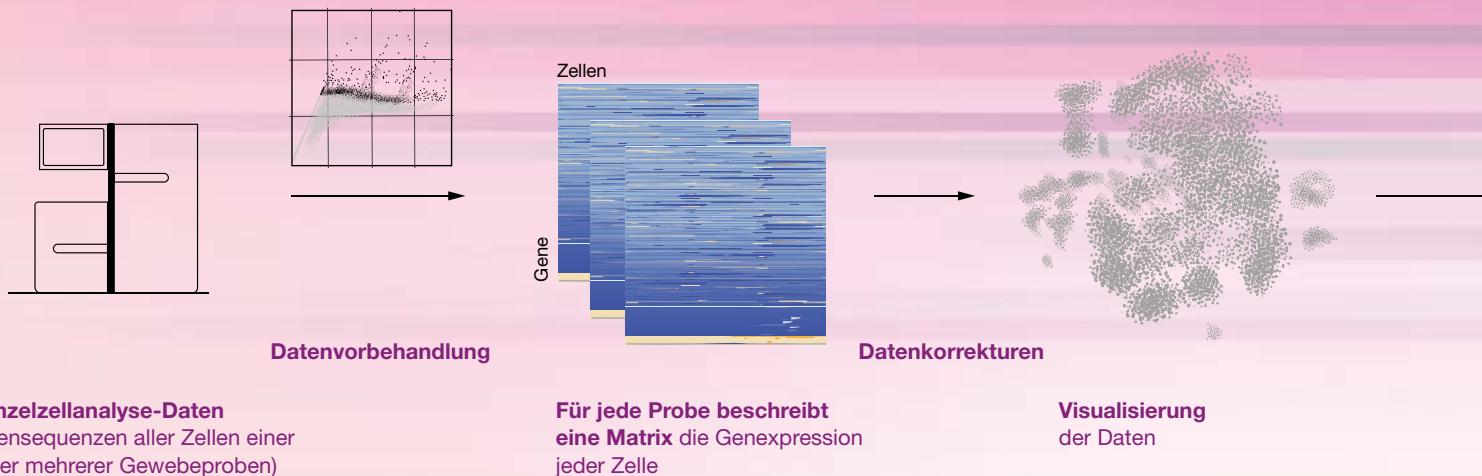
Die modernen Methoden der biomedizinischen Forschung erzeugen eine Unmenge an Daten. Darin Muster zu erkennen und daraus die richtigen Schlüsse zu ziehen, übersteigt die Fähigkeit von Menschen. Stattdessen kommen Computer zum Einsatz – und Mathematiker wie der diesjährige Leibnizpreisträger Prof. Fabian Theis, der in beiden Welten zu Hause ist: den Computer- und den Lebenswissenschaften.

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

Defeating Diseases with Artificial Intelligence E

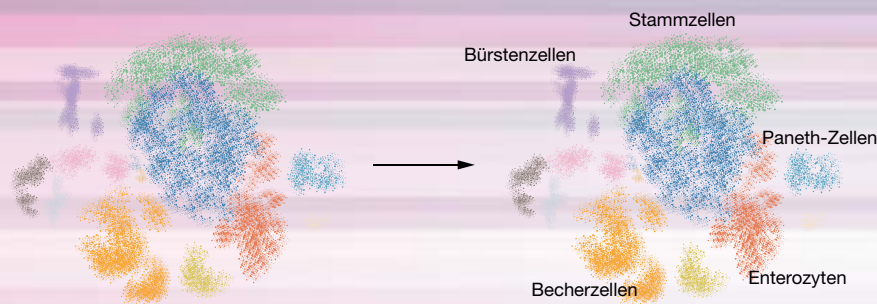
Modern methods used in biosciences produce a torrent of data that simply cannot be managed without the help of computers. Mathematician Fabian Theis is comfortable navigating the worlds of biosciences and computer sciences, harnessing artificial intelligence and machine learning to make large volumes of data usable for researchers. In his work, he strives above all to understand the behavior of cells. Theis uses single-cell genomics, an approach that enables him to determine which genes are active in a specific cell at a given time. This in turn makes it possible to examine the differences between cells in different tissues, in people with different lifestyles, or in healthy and sick individuals. In the Human Cell Atlas project, which aims to create a reference database of all human cell types, Theis has mapped the lungs. Another focus of his work is diabetes research. For example, Theis is developing tools with the ability to predict how insulin-producing pancreatic cells that lose their function due to diabetes will respond to different medications. □

Link
www.helmholtz-munich.de/en/icb/research-groups/theis-lab



In den Biowissenschaften hat längst die Mathematik Einzug gehalten. Dies liegt vor allem an den immensen Datenmengen – gerne plakativ als Big Data bezeichnet –, die inzwischen in vielen Forschungsdisziplinen anfallen und die ein menschliches Gehirn nicht mehr bewältigen kann. Dabei ist Big Data gar nicht so abstrakt, wie es scheint: „Im Prinzip“, so veranschaulicht es Fabian Theis, „fällt schon alles unter Big Data, was man nicht mehr mit einem Excel-Dokument auswerten kann.“ Der Professor für Mathematische Modellierung biologischer Systeme an der TUM und Leiter des Computational Health Center bei Helmholtz Munich muss es wissen, denn er hat sich auf die Auswertung großer Datenmengen spezialisiert. Dazu nutzt er künstliche Intelligenz – vereinfacht gesagt entwickelt er mit seinem Team ausgefeilte Software-Programme, die es ermöglichen, in den Daten nach Mustern zu suchen, daraus Schlüsse zu ziehen und so Forschungsergebnisse überhaupt erst nutzbar zu machen.

Dabei war Theis' Weg in die Biowissenschaften nicht vorgezeichnet. Erst nach dem Mathematik- und Physikstudium in Regensburg kristallisierte sich sein Interesse an Algorithmen heraus. Darunter versteht man eindeutige Handlungsvorschriften, die ein Programmierer einem Computer an die Hand gibt, um damit ein bestimmtes Problem zu lösen. Von da an stand das Problemlösen für Theis im Vordergrund. Herausforderungen fand er vor allem in den Biowissenschaften, weil sie auch viele medizinisch relevante Fragestellungen einschließen. „Ich finde es befriedigend, wenn man nicht nur Hypothesen aufstellt, sondern diese auch experimentell überprüfen kann“, erklärt der Mathematiker seine Vorliebe für die Biomedizin. „In der Biologie finden wir unglaublich komplexe Systeme wie Zellen, die noch gar nicht durch klare Modelle beschrieben werden können. Da gibt es für Mathematiker wie mich noch viel zu tun.“



Clusterbildung

Annotation: Jedem Cluster wird ein bestimmter Zelltyp zugeordnet

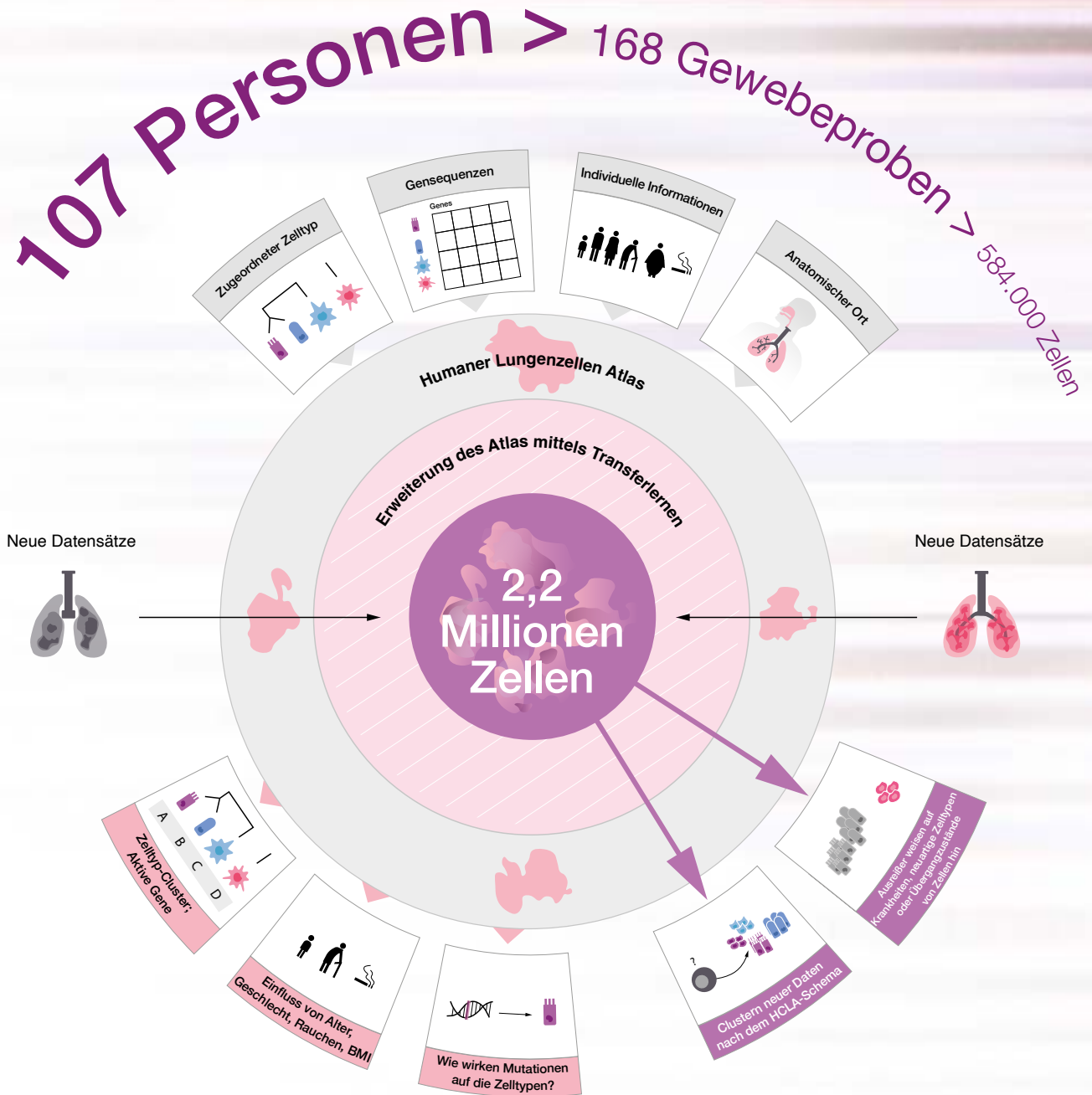
In beiden Welten zu Hause

Für seine Doktorarbeit wechselte Theis deshalb in die Biophysik; nur ein Jahr später folgte ein zweiter Dokortitel in Computerwissenschaften an der Universität Granada. Damit hatte der Wissenschaftler das Rüstzeug, um sich einem der komplexesten Systeme überhaupt zuzuwenden – der lebenden Zelle mit ihren tausenden von Genen, Proteinen und Stoffwechselwegen. Eine leistungsstarke Methode, mit der sich das Verhalten von Zellen verstehen lässt, ist die sogenannte Einzelzell-Genomik. Sie kann unterschiedliche Aspekte der Zelle in den Vordergrund rücken, wie das Erbgut selbst oder die Gesamtheit der Gene, die zu einem bestimmten Zeitpunkt aktiv sind. Letzteres interessiert Theis besonders, denn die aktiven Gene sind das, was die Identität einer Zelle ausmacht.

An dieser Stelle eine kurze Erinnerung: Jede Zelle eines Menschen besitzt das gleiche Erbgut und doch gibt es Leber-, Haut- Lungen- oder auch Immunzellen, die alle unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Der Grund dafür: In unterschiedlichen Zelltypen sind verschiedene Gene aktiv und nur diese tragen zu den Eigenschaften der Zelle bei. Forschende können die Aktivität eines Gens

nachweisen und auf diese Weise verschiedene Zelltypen miteinander vergleichen, aber genauso junge und alte Zellen eines Gewebes oder gesunde und kranke Zellen. Solche Untersuchungen werden schon länger gemacht, doch meistens werden dazu Gewebestücke aus einer Vielzahl an Zellen untersucht. Erst seit kurzem ist es möglich, mit sehr empfindlichen Methoden tatsächlich nur eine einzige, winzige Zelle zu untersuchen. Theis vergleicht die herkömmliche Methode gerne mit einem Obstsalat, denn sie liefert immer einen Mittelwert über viele Zellen – so wie das Geschmackserlebnis beim Essen des Obstsalats. „Heute können wir uns dagegen eine einzelne Frucht herauspicken und untersuchen“, freut sich der Forscher. Man kann sich also gut vorstellen, dass die Einzelzell-Genomik ein mächtiges Instrument ist, um der Funktion von Zellen auf den Grund zu kommen. Aber die Ergebnisse einer einzelnen Zelle können doch keine Big Data sein? „Doch“, sagt Theis. „Denn wir sehen uns natürlich in jeder Zelle sehr viele verschiedene Gene an und das oft bei Millionen von einzelnen Zellen. So kommen wir schnell auf ungeheure Datenmengen.“





Humane Zellatlanten sollten die Diversität der Menschen möglichst gut erfassen. Theis' Team entwickelte das sogenannte Transferlernen, um gezielt weitere Datensätze, vor allem von kranken Menschen, in den Zellatlas der Lunge (Human Lung Cell Atlas - HLCA) zu integrieren. Sie erweiterten den HLCA von 14 Datensätzen mit Daten von insgesamt 584.000 Zellen von 107 Menschen auf 44 Datensätze, die Daten 2,2 Millionen Zellen von 444 Menschen umfassen

Referenzdatenbank aller menschlichen Zelltypen

An dieser Stelle kommt das **Maschinelle Lernen**¹ zum Einsatz. Dabei werden Algorithmen mit großen Sätzen aus bekannten Daten trainiert, bis sie auf der Basis des Gelernten auch neue Datensätze interpretieren können. „Wenn es uns mit unseren Methoden gelingt, die in den Daten versteckten Botschaften zu verstehen, können wir anfangen, die richtigen Fragen zu stellen“, freut sich Theis. „Denn letztlich möchten wir nicht nur neue Methoden entwickeln, sondern auch neue Anwendungen in der biomedizinischen Forschung finden.“ Ein sehr schönes Beispiel dafür ist der Humane Zellatlas, ein wissenschaftliches Großprojekt, das von mehreren hundert Arbeitsgruppen auf der ganzen Welt gemeinsam durchgeführt wird. Ziel ist es, genaue Karten von allen Organen des menschlichen Körpers zu erstellen, um damit zu beantworten, wie diese Organe funktionieren und wie sie sich unterscheiden – bei Menschen unterschiedlichen Alters und Geschlechts, in Abhängigkeit vom Lebensstil und bei verschiedenen Krankheiten. Dafür haben die Arbeitsgruppen gemeinsam weltweit Millionen Zellen aus verschiedenen Organen und Geweben analysiert und katalogisiert. „Wir wollen mit unserem Atlas ein Modell der Wirklichkeit entstehen lassen“, schildert Theis, der Teil des Organisationskomitees ist, die Vision. „Für mich ist das ungeheuer spannend, denn ich wollte schon immer das große Bild sehen.“ Weil diese Aufgabe so komplex ist, wurde sie in Teilprojekte unterteilt: Für jedes Organ wurde ein eigener Atlas geschaffen. Theis kümmerte sich mit einem Team aus mehreren Arbeitsgruppen um die Lunge. Einige Gruppen arbeiteten dafür im Labor mit dem Lungengewebe und erzeugten so die Daten, die dann von anderen Gruppen wie der von Theis aufbereitet und ausgewertet wurden. Durch die Corona-Pandemie konnte der Münchner Forscher auch gleich die Leistungsfähigkeit der neuen Datenbank testen: „Ich frage mich immer, wo ich einen

1 Maschinelles Lernen

ist ein Zweig der Künstlichen Intelligenz, bei dem Algorithmen durch große Datensätze darauf trainiert werden, Muster und Korrelationen in großen Datensätzen zu finden.

sinnvollen Beitrag leisten kann“, so Theis. „Da COVID-19 in erster Linie die Lunge betrifft, wollten wir unseren Lungenatlas nutzen, um mehr über die Krankheit herauszufinden.“ Tatsächlich konnte Theis' Team erklären, warum insbesondere ältere Männer und Raucher anfällig sind für eine Infektion mit dem COVID-19-Erreger: Ihre Lungenzellen bilden mehr von dem Rezeptor, den das Virus als Einfallspforte in die Zellen nutzt. Natürlich ist so ein Atlas nie fertig, denn die Forschungsteams tragen immer neue Datensätze bei und verfeinern so die Ergebnisse. Aber die Hauptarbeit ist gemacht, wie Theis stolz berichtet: „Die 1.0-Version unseres Lungen-Atlas wurde jetzt veröffentlicht.“ ▶

Integration verschiedenster Datensätze in den Humanen Zellatlas

Ein Mammut-Projekt wie der Humane Zellatlas hat seine ganz eigenen Schwierigkeiten. Eine davon ist die Tatsache, dass die zugrunde liegenden Ergebnisse in einer Vielzahl von Laboren rund um die Welt erarbeitet wurden. Überall werden die Experimente zur Messung der Genaktivität in den Zellen, wenn auch nach den gleichen Protokollen, ein ganz kleines bisschen anders durchgeführt. Und das spiegelt sich auch in den Daten wider. Um die verschiedenen Datensätze trotzdem miteinander in Einklang zu bringen, kommt wieder Maschinelles Lernen ins Spiel, diesmal eine Variante, die als Transferlernen bezeichnet wird. Mit Hilfe einer von Theis' Team entwickelten Software kann der Computer das, was er an einem Datensatz gelernt hat, auf einen anderen, mit etwas andersartigen Daten, übertragen. So können jederzeit neue Datensätze aus anderen Laboren in den Atlas integriert werden, und andere Forscher können den Atlas nutzen, um ihre eigenen Datensätze zu verstehen.

„Ich will lernen mit Zellen zu sprechen.“

Fabian Theis

Die Besten nach München holen

Spitzenforschung ist heute nur noch mit Kooperationen möglich. So arbeitet auch Theis mit anderen Arbeitsgruppen zusammen, die im Nasslabor Experimente mit Zellkulturen machen und dann ihre Daten Theis zur Analyse übergeben. Die Zusammenarbeit ist dabei so eng, dass Doktoranden in der Regel zwei Arbeitsgruppen angehören und so schon während der Ausbildung beide Welten kennenlernen – die Welt der Biowissenschaften und die Computerwelt. „Auf diese Weise lernt der Nachwuchs, beide Sprachen zu verstehen“, ist Theis überzeugt. Um exzellente Studienabgänger für eine Doktorarbeit nach München zu bringen, hat er die Munich School of Data Science ins Leben gerufen, die aus rund 200 internationalen Bewerbungen pro Semester die besten 10 auswählt. Gefördert wird diese Einrichtung durch die beiden Münchner Hochschulen TUM und LMU, Helmholtz Munich und das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum.

Erst kürzlich hat Theis mit dem Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft den wichtigsten deutschen Forschungspreis erhalten. Dieser spült 2,5 Mio. Euro in die Kassen des Biomathematikers und beflügelt seine Forschung. „Ich will lernen mit Zellen zu sprechen“, sagt der Preisträger und meint das durchaus ernst. Indem die Forscher die Reaktion von Zellen auf Input von außen modellieren, können sie simulieren, wie zwei Zellen miteinander kommunizieren oder wie sie auf ein bestimmtes Medikament reagieren. „Wie die Zellen eines bestimmten Patienten auf ein Medikament reagieren werden“, präzisiert Theis. Herzlich willkommen – Sie sind in der Medizin der Zukunft angekommen! ■

Larissa Tetsch

Maschinelles Lernen in der Diabetes-Forschung

Vor dem Hintergrund, dass zu Helmholtz Munich ein auf Diabetes spezialisiertes Forschungszentrum gehört, überrascht es nicht, dass Theis verschiedene Fragestellungen rund um die tödliche Stoffwechselkrankheit bearbeitet. „Mit unserem Einzelzell-Genomik-Ansatz konnten wir eine Erklärung dafür finden, warum bestimmte Zellen der Bauchspeicheldrüse beim Typ-2-Diabetes – dem sogenannten Altersdiabetes – mit der Zeit die Fähigkeit verlieren, auf den Blutzucker zu reagieren“, bringt der Forscher ein Beispiel und führt aus, wie er gemeinsam mit seinem Kollegen Heiko Lickert – einem Spezialisten für die bei Diabetes veränderten Bauchspeicheldrüsenzellen – nach Wirkstoffen sucht, die diesen Prozess umkehren. Die Einzelzell-Genomik kann dabei den Erfolg der Medikamente überwachen und irgendwann vielleicht sogar ganz ohne Experimente vorhersagen, wie eine Zelle auf ein bestimmtes Medikament reagieren wird. Ein großer Schritt in Richtung „Personalisierte Medizin“. Das sieht wohl auch der renommierte Europäische Forschungsrat so, denn er fördert das Projekt finanziell großzügig.

In Zusammenarbeit mit der Augenklinik der LMU München verwendet Theis Maschinelles Lernen außerdem, um einen Algorithmus zur Erkennung der diabetischen Retinopathie zu trainieren. Diese Folgeerkrankung von Diabetes mellitus Typ 1 ist die häufigste Ursache für eine Erblindung im Erwachsenenalter. Zum Training wurden öffentliche Datensätze aus Bildern des Augenhintergrunds von Gesunden und Erkrankten verwendet. Nach dem Training erkannte der Computer Krankheitssymptome auch auf unbekanntem Bildern. „In München mit seiner großen Facharztdichte brauchen wir das nicht unbedingt“, schränkt Theis ein. „Aber in ländlichen Gebieten kann unser Algorithmus Hausärzte bei der Risikoabschätzung unterstützen, und eines Tages kann vielleicht sogar ein Arzt in Afrika die Augen seiner Patienten mit dem Handy untersuchen.“



Prof. Fabian Theis

hat in Regensburg Mathematik und Physik studiert und anschließend in Biophysik (Regensburg) und in Computerwissenschaften (Granada) promoviert. Nach Forschungsaufenthalten in Japan, den USA und am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen sowie der Habilitation in Regensburg wechselte er als Associate Professor an die TUM. Dort hat er seit 2013 den Lehrstuhl für Mathematische Modellierung inne und leitet bei Helmholtz Munich das Computational Health Center sowie das Institute of Computational Biology. Theis ist Mitglied im Munich Data Science Institute der TUM, das sich als zentrale Schnittstelle und Innovationsplattform für Fragen und Lösungen aus Datenwissenschaften, Maschinellem Lernen und Künstlicher Intelligenz versteht. Zudem leitet er zusammen mit zwei Kollegen die Münchner Einheit des internationalen Forschungsnetzwerks European Laboratory for Learning and Intelligent Systems (ELLIS) mit derzeit rund 30 Standorten überall in Europa. Seit 2020 ist er Co-Vorsitzender des KI-Rats der Bayerischen Staatsregierung. Außerdem ist Theis wissenschaftlicher Direktor der Kooperationseinheit für Künstliche Intelligenz (Helmholtz AI) und assoziiertes Fakultätsmitglied am Wellcome Sanger Institute in Hinxton, UK. Seine wissenschaftliche Leistung wurde mehrfach ausgezeichnet, zuletzt mit einem ERC Advanced Grant und dem Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

Cancer Treatment Without Collateral Damage

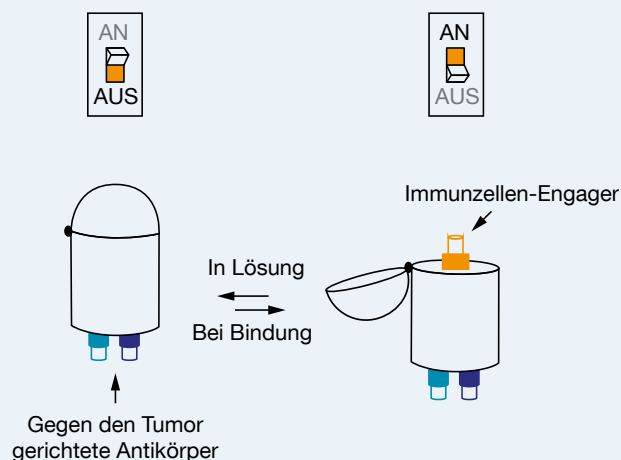
E

Targeted attack on cancer cells without harming healthy ones: The start-up Plectonic has developed a nano-switch made from DNA that enables targeted antibody immunotherapies. □

Krebs behandeln ohne Kollateralschaden

Für viele Patienten sind die herkömmlichen Krebstherapien lebensrettend. Wenn jedoch gesunde Zellen in die Schusslinie geraten, bedeutet dies für die Patienten oftmals eine erhebliche Einschränkung ihrer Lebensqualität. Hier kommt das Start-up Plectonic mit einer bahnbrechenden, neuen Methode ins Spiel: DNA-Nanoschalter, mit deren Hilfe das körpereigene Immunsystem gezielt Krebszellen bekämpfen kann, ohne dabei gesunde Zellen zu schädigen.

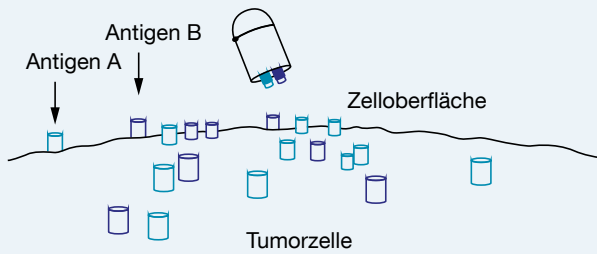
Link

www.plectonic.com

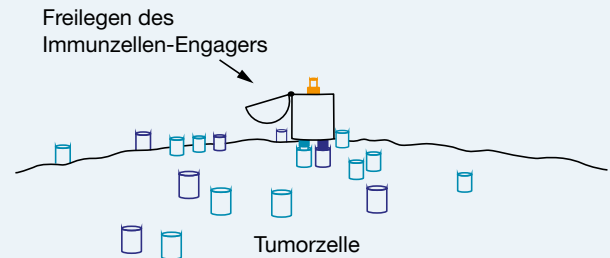
Der aus DNA bestehende Nanoschalter LOGIBODY wird nur aktiviert, wenn ein Antikörper an eine Zielzelle mit zwei verschiedenen Antigenen bindet.

Bereits zu Beginn hatte das Start-up-Unternehmen Plectonic hochgesteckte Ziele – aber auch einen langen Weg vor sich, um diese zu erreichen. „Aus einem Biophysiklabor heraus die Immuntherapie gegen Krebs revolutionieren zu wollen, gleicht der Gründung eines Formel-1-Teams, wenn alles, was man hat, ein Führerschein ist“, sagt Dr. Klaus Wagenbauer, einer der Mitbegründer des Unternehmens. Er lernte seine Partner, Dr. Jonas Funke und Dr. Benjamin Kick, an der TUM im Labor von Prof. Hendrik Dietz' Labor kennen, wo sie an verschiedenen Promotionsprojekten im Bereich DNA-Origami forschten. Dieser Ansatz nutzt die Fähigkeit der DNA zur Selbstassemblierung, Faltung und Codierung von Informationen. So lassen sich winzig kleine molekulare Vorrichtungen erzeugen, die bestimmte Aufgaben erfüllen können. Am Ende ihrer Doktorarbeit suchten die drei Wissenschaftler nach einer praktischen Anwendung für DNA-Origami. „Uns kam schon recht bald die Idee, dass die Technologie medizinisch nutzbar sei, denn DNA-Origami ist wie geschaffen dafür. Wichtig ist aber, für welche Art der therapeutischen Anwendung man sie nutzt. Man kann damit Arzneistoffe gezielt an bestimmten Stellen freisetzen, aber unsere Idee, zielgerichtete Immuntherapien gegen Krebs zu realisieren, schafft einen echten Vorteil gegenüber bisherigen Therapien“, sagt Funke.

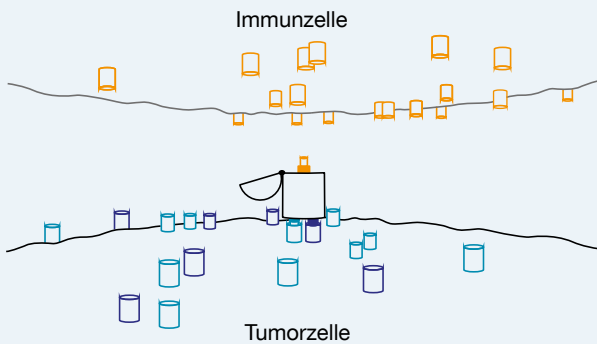
Ein Hauptproblem bei einigen heutigen Immuntherapien besteht darin, dass sie Tumorzellen anhand lediglich eines einzigen Antigens erkennen. Häufig weisen aber gesunde Zellen dieses Antigen ebenfalls auf, und dann zerstört die Behandlung nicht nur Krebszellen, sondern



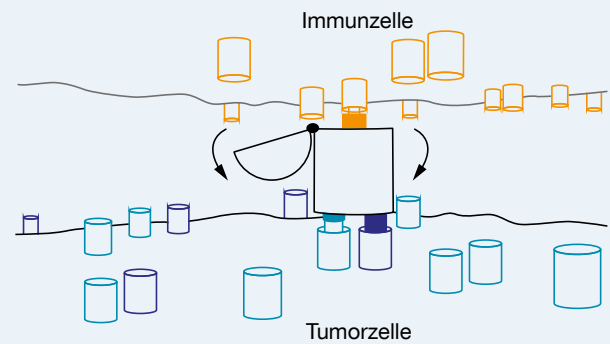
1. Bindung an ein tumor-spezifisches Antigen-Muster



2. Der Schalter wird aktiviert und verändert seine Form



3. Immunzellen werden zur betroffenen Zelle befohlen (Immunzellen-Engaging)



4. Die Tumorzelle wird zerstört

auch gesunde Zellen. Und genau das ist so innovativ an der LOGIBODY-Technologie, die das Gründertrio Wagenbauer, Funke und Kick mit Unterstützung ihres Mentors und Plectonic-Mitbegründers Dietz entwickelte: Der aus DNA gebaute LOGIBODY-Nanoschalter soll sich nur anschalten, wenn sich ein Antikörper an eine Zielzelle mit zwei unterschiedlichen Antigenen bindet. „Wir nennen die Lösung ‚Schalter‘, denn genau wie beim Anschalten einer Lampe soll ein Arzneistoff am Ort des Tumors angeschaltet, also aktiviert werden“, erklärt Kick.

Zwei anstelle von nur einem Antigen anzusteuern macht also den Unterschied – denn beide Antigene zusammen sind ein unverwechselbarer Fingerabdruck der Tumorzelle. Bindet also ein gegen einen Tumor gerichteter Antikörper an eine Zelle, die nur eines der zwei erforderlichen Antigene aufweist, bleibt der Schalter aus. Bindet der Antikörper dagegen an eine Zelle mit beiden Antigenen, wird der Schalter aktiviert und verändert seine Form. Damit wird ein weiterer Antikörper zugänglich, dieser befiehlt den körpereigenen Immunzellen, konkret den Killer-T-Zellen, an die betroffene Zelle zu binden und sie zu zerstören. Dank des LOGIBODY-Schalters werden also Tumorzellen, die bisher unter dem Radar des Immunsystems geblieben waren, erkannt und getötet, ohne dass gesunde Zellen ins Kreuzfeuer geraten.

Finanziert durch die GO-Bio-Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), die Else-Kröner-Fresenius-Stiftung sowie dem Preisgeld aus dem

m4 Award des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, nahm das Forscherteam bereits eine Reihe wichtiger Meilensteine. Zunächst zeigten sie in Zellkulturen, dass ihre Origami-Strukturen an Antikörper auf Tumorzellen binden und Killer-T-Zellen zu den Krebszellen hin befehlen. Zu ihrer großen Freude konnten sie auch demonstrieren, dass die Mechanismen auf lebende Mäuse übertragbar sind. „Wir sind Hendrik Dietz sehr dankbar – er ist nicht nur ein super Mitgründer, sondern ließ uns in seinem Labor arbeiten. Das gehört zum Munich Institute for Biomedical Engineering (MIBE), einem der Integrativen Forschungsinstitute der TUM, und deshalb bedanken wir uns auch bei MIBE-Geschäftsführer Bernhard Gleich für die tolle Unterstützung“, sagt Funke. Jetzt haben die drei große Pläne für die Zukunft ihres Unternehmens, in dem aktuell 15 Menschen arbeiten. Umsetzen werden sie diese mit einer Förderung durch die Bundesagentur für Sprunginnovationen (SPRIND). Das Gründerteam hat bereits einen aus seiner Sicht äußerst vielversprechenden Leitkandidaten für die Behandlung einer bestimmten Blutkrebs-Variante, sie verfügen über einen stabilen Herstellungsprozess für ihre LOGIBODY-Technologie und sie planen in den nächsten Jahren einen Zulassungsantrag bei der US-amerikanischen Arzneimittelzulassungsbehörde FDA. Danach, so ihre Hoffnung, können sie ihr Verfahren zur Behandlung fester Tumoren einsetzen. „Klingt einfach!“, sagt Kick mit einem Lächeln. ■

Sarah Puschmann

Engagement der TUM im Globalen Süden

**Drei Fragen an Prof. Juliane Winkelmann,
Vizepräsidentin für Internationale Allianzen & Alumni**

Frau Prof. Winkelmann, warum engagiert sich die TUM in vielfältigen Partnerschaften mit Institutionen aus dem Globalen Süden?

Als führende und global agierende Universität trägt die TUM die Verantwortung, technischen Fortschritt, Wissen und unternehmerische Fähigkeiten nicht nur vor Ort in Bayern, sondern auch gemeinsam mit ihren Partnern im Sinne des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns in anderen Weltregionen zu fördern und zu entwickeln. Dies schließt selbstverständlich auch den Globalen Süden ein, in dem – je nach Ansatz – bis zu 85% der Weltbevölkerung leben. Es ist mittlerweile ja eine Binsenweisheit: Lösungen für die großen Herausforderungen unserer Zeit können und werden wir nur in globaler Zusammenarbeit erarbeiten. Um unserer Verantwortung gerecht zu werden, wollen wir also wissenschaftliche Talente befähigen bzw. dazu anregen, im Globalen Süden die technologischen als auch ökonomischen Rahmenbedingungen zu schaffen, die gemeinsamen Wohlstand und Prosperität generieren.

Unser Magazin berichtet über Forschung an der TUM. Die TUM ist im Globalen Süden unter anderem mit Bildungs- und Austauschprogrammen engagiert. Welchen Anteil nimmt die Forschung ein?

Die TUM steht dem Humboldtschen Ideal folgend für exzellente Lehre und Forschung und ich möchte behaupten, dass ohne hervorragende Forschung exzellente Lehre nur schwer denkbar ist. Insofern ist Forschung ganz natürlich ein essentieller Bestandteil unserer Zusammenarbeit mit dem Globalen Süden – eine ganze Reihe spannender Bei-

spiele werden ja in diesem Heft dargestellt. Sehr spannend an der Forschungszusammenarbeit mit dem Globalen Süden: Häufig wird geforscht, um einen unmittelbaren Impact zu erzeugen. Es kann sehr befriedigend sein, wenn man sieht, wie die lösungs- und anwendungsorientierte Forschung, die man betreibt, unmittelbare Auswirkungen vor Ort hat. Man denke an die SEED Living Labs, die in Gemeinschaften erstmals Elektrizität verfügbar machen und den Impact erforschen.

Was können die Wissenschaftlerinnen der TUM aus der gemeinsamen Forschung mit Kollegen des Globalen Südens lernen?

Forschung lebt vom Einbezug vielfältiger Perspektiven und unterschiedlichen Wissens – das ist in der Zusammenarbeit mit dem Globalen Süden nicht anders als an anderer Stelle. In der Vergangenheit wurden allerdings die Perspektiven und das Wissen im Globalen Süden in der wissenschaftlichen Kooperation bisweilen marginalisiert und Zusammenarbeit fand nicht immer auf Augenhöhe statt. Da sind wir heute weiter: Wir verstehen, dass wir viel von den Kolleginnen und Kollegen und Communities im Globalen Süden lernen können und müssen, sei es über soziokulturelle und wirtschaftliche Rahmenbedingungen vor Ort, natürliche Gegebenheiten oder darüber, welche Fragestellungen besonders relevant sind oder welche Daten wo und wie zu erfassen sind. Nur gemeinsam lassen sich komplexe Themen erforschen – da hat jede Seite viel einzubringen. ■



Bildnachweis: Astrid Eckert/TUM; Grafiken: edlundsepp

Was bedeutet „Globaler Süden“?

Der Begriff ‚Globaler Süden‘ soll die Situation von Ländern in unserer globalisierten Welt möglichst wert- und hierarchiefrei beschreiben. Ein Land des globalen Südens ist ein politisch, wirtschaftlich oder gesellschaftlich benachteiligter Staat. Demgegenüber wird Ländern des Globalen Nordens eine privilegierte Position bezüglich Wohlstands, politischer Freiheit und wirtschaftlicher Entwicklung zugeschrieben. Die Bezeichnungen sind nur bedingt geografisch zu verstehen. So werden Australien und Neuseeland dem Globalen Norden zugeordnet, Länder wie Afghanistan und die Mongolei wiederum dem Globalen Süden.

Ein Parasit mit Nebenwirkungen

Eine Infektion mit dem Schweinebandwurm ist eine der Hauptursachen für Epilepsie, an der circa 50 Millionen Menschen weltweit, vor allem im Globalen Süden leiden. Mit der richtigen Therapie ist die Krankheit heilbar. Noch besser ist jedoch gute Aufklärungsarbeit und Prävention unter dem One Health-Ansatz.



Tansania

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

A Parasite with Side Effects

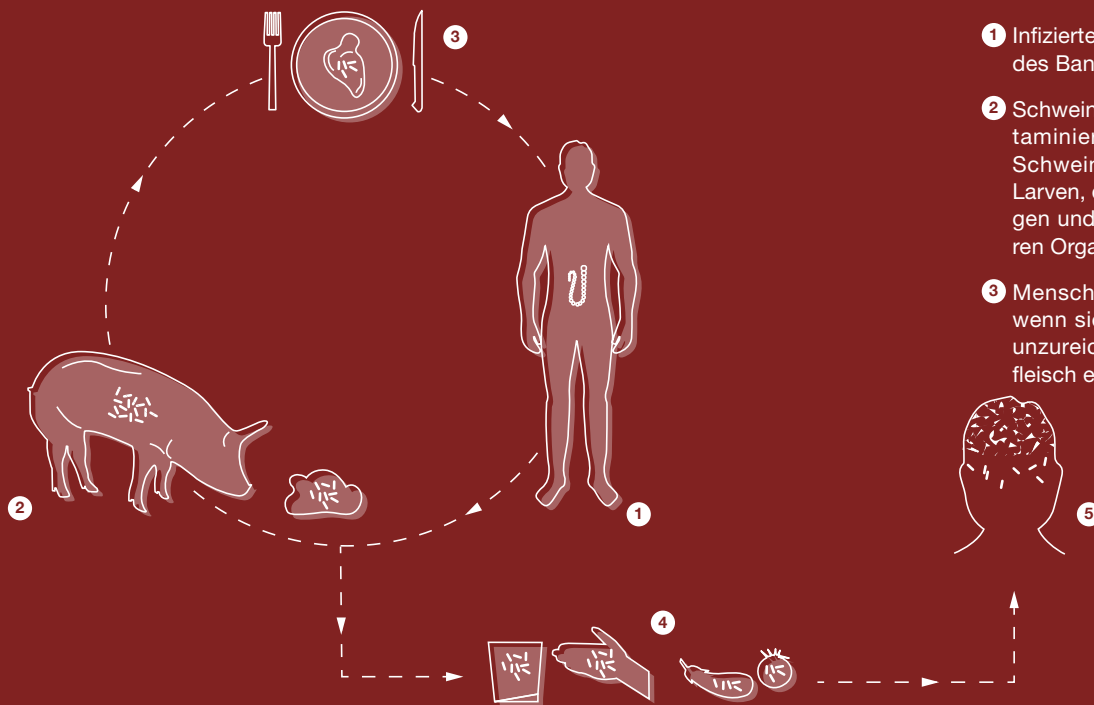
E

Neurological disorders account for the largest burden of disease and the second highest mortality worldwide. Professor Andrea Winkler researches the link between epilepsy and neurocysticercosis – an infection with pork tapeworm (*Taenia solium*) larvae in the brain. Her focus, however, is not only on developing new diagnostic and therapeutic options, but also on improved prevention as part of a One Health approach. □

Link

www.med.tum.de/de/center-global-health

www.neurologie.mri.tum.de/de/arbeitsgruppen/globale-neurologie-neuroinfektiologie



1 Infizierte Menschen scheiden die Eier des Bandwurms aus.

2 Schweine nehmen die Eier über kontaminierten Kot auf. Im Darm des Schweins schlüpfen aus den Eiern Larven, die die Darmwand durchdringen und sich in Muskeln oder anderen Organen als Zysten ablagern.

3 Menschen nehmen die Zysten auf, wenn sie kontaminiertes rohes oder unzureichend gekochtes Schweinefleisch essen.

4 Menschen nehmen die Eier versehentlich über verunreinigtes Wasser, Gemüse, Früchte oder auch Hände auf.

5 Die Larven schlüpfen im Darm, durchdringen die Darmwand und wandern durch die Blutgefäße in das Gewebe. Sie siedeln sich hauptsächlich im Gehirn ab und verursachen dort Neurozystizerkose.

Neurozystizerkose: eine Hauptursache von Epilepsie. Der Lebenszyklus des Schweinebandwurms (*Taenia solium*) umfasst den Menschen als Hauptwirt und das Schwein als Zwischenwirt; durch mangelnde Hygiene und sanitäre Einrichtungen kann der Mensch zufällig zum Zwischenwirt werden und eine Neurozystizerkose entwickeln.

Im Jahr 2002 reist Andrea Sylvia Winkler nach Tansania. Während andere in der Savanne auf Fotosafari gehen, will die junge Ärztin dort den Menschen helfen, die an Epilepsie leiden. Schnell merkt sie, dass bisher nur sehr wenig über diese Krankheit und die lokalspezifischen Ursachen bekannt ist. Auch heute, mehr als zwanzig Jahre später, hat die Expertin für Globale Neurologie von der TUM das Thema nicht mehr losgelassen. „Für einen großen Teil der Patienten gibt es die Hoffnung auf Heilung“, erklärt Winkler.

Neurologische Krankheiten wie Epilepsie, aber vor allem auch Schlaganfall und Demenz, haben weltweit die größte Krankheitslast und die zweitgrößte Mortalität und betreffen immer mehr auch den Global Süden. Doch gerade in ärmeren Ländern haben die Krankheiten oft andere Ursachen, sodass spezifische Forschung notwendig ist.

Anders als etwa in Deutschland werden rund ein Drittel aller Epilepsie-Fälle in Tansania durch eine Infektion mit dem Schweinebandwurm *Taenia solium* verursacht. Dieser

Parasit lebt vornehmlich als Larve im Muskelgewebe von Schweinen und als ausgewachsener Bandwurm im Darm von Menschen. Über verunreinigtes Wasser und Nahrungsmittel, aber auch mangelnde Hygiene können Menschen jedoch die Eier dieses Bandwurms aufnehmen. Aus den Eiern schlüpfen Larven, jede etwa einen halben bis einen Zentimeter groß, die die Darmwand durchdringen und in Muskeln, Haut oder vor allem das Gehirn gelangen können. Die Larven verkapseln sich und werden daher vom Immunsystem nicht erkannt. Viele der Patientinnen und Patienten sind jahrelang symptomfrei und haben keine Ahnung davon, dass sie eine tickende Zeitbombe in sich tragen. Erst wenn ein bisher unbekannter Trigger dazu führt, dass das Immunsystem die verkapselten Larven angreift, kommt es zu einer Entzündungsreaktion, die unter anderem starke Kopfschmerzen, Lähmungen, Einschränkungen der intellektuellen Fähigkeiten oder eben Epilepsie auslösen kann. Mediziner sprechen von einer Neurozystizerkose (NCC).

Vernachlässigte Tropenkrankheit

Nicht nur in Tansania kommt der Schweinebandwurm vor, auch andere Länder in Subsahara-Afrika, Lateinamerika oder Südostasien sind betroffen. Trotzdem gehört **NCC**¹ zu den vernachlässigten Tropenkrankheiten. Es gibt bisher nur wenig Forschung auf diesem Gebiet. Fördermittel? Fehlanzeige. Andrea Winkler muss anfangs also vor allem die Geldgeber davon überzeugen, dass es sich lohnt, in die Forschung zu Prävention und Behandlung solcher arbeitsbedingten Krankheiten zu investieren. Ihre Forderung ist klar: „Wir Europäer müssen das Thema ernst nehmen! Wir haben eine moralisch-gesellschaftliche Verpflichtung dazu und wir werden aufgrund der Migration auch in Europa immer mehr NCC-Fälle sehen. Außerdem generiert die Forschung an NCC wertvolle Erkenntnisse, die sich auf andere neurologische Erkrankungen übertragen lassen.“

Seit 2016 gibt es in dieser Hinsicht große Fortschritte. Mit Hilfe von Fördergeldern aus dem Bundesministerium für Bildung und Forschung wie auch der EU konnten die Kooperationsprojekte SOLID und CYSTINET-Africa gestartet werden. Andrea Winkler, inzwischen Oberärztin in der Neurologie an der TUM und Professorin für Global One Health an der Universität Oslo, ist Co-Direktorin von CYSTINET-Africa. Ebenfalls mit an Bord sind ihre Kollegin

1 Neurozystizerkose (NCC)

Als Neurozystizerkose bezeichnet man eine Infektion mit Larven des Schweinebandwurms im Gehirn, die zu neurologischen Erkrankungen, wie beispielsweise Epilepsie, führen kann.

Prof. Clarissa Prazeres da Costa von der TUM sowie vier Forschungsinstitute und Universitäten aus Tansania, Sambia und Mosambik. Gemeinsam wollen sie herausfinden, wie man NCC besser diagnostizieren und behandeln kann. Gleichzeitig soll Aufklärungsarbeit vor Ort die Bevölkerung für diese Krankheit sensibilisieren.

Ein Problem bisher war, dass eine NCC nur mit bildgebenden Verfahren wie CT oder MRT zweifelsfrei diagnostiziert werden kann. Doch die dafür notwendigen Geräte sind teuer und in Afrika selten zu finden. Im Rahmen von SOLID wurde ein günstiger und einfach durchzuführender Bluttest entwickelt, der sehr gute Hinweise darauf liefert, ob jemand mit dem Schweinebandwurm infiziert ist oder nicht. Nur wer einen solchen positiven Bluttest erhält, soll anschließend weiter untersucht werden. Der Test wurde bereits im Krankenhaus und im Feld getestet. Die Ergebnisse wurden vor kurzem in *The Lancet Infectious Diseases* veröffentlicht. ▶



Während ihres Aufenthalts in Tansania untersucht Andrea Winkler ein Kind auf mögliche neurologische Erkrankungen.

Interdisziplinäre Forschung für bessere Prävention

Das Besondere an beiden Projekten ist die Interdisziplinarität. „Wir sehen das Problem nicht nur als ein Medizinisches“, sagt Andrea Winkler. Sie, selbst Medizinerin, weiß nur zu gut, wo die Grenzen ihres Fachgebiets liegen. Kann man Millionen von Menschen, die an NCC leiden, eine adäquate Behandlung mit teuren Medikamenten und komplizierten Operation bieten? Leider nein. Kann man Neuinfektionen verhindern oder zumindest vermeiden? Ja, das ginge.

Also geht sie einen Schritt zurück. An den Zeitpunkt, bevor eine Behandlung überhaupt notwendig wird. Daher sind auch Veterinärmedizinerinnen und Sozialwissenschaftlerinnen Teil des Teams. Gemeinsam beraten sie, wo die Probleme liegen, was verbessert werden muss. Gemeinsam mit Vertretern aus der Politik und anderen Entscheidungsträgerinnen entwickeln sie Policies, die unter anderem in Leitlinien von lokalen und globalen Entscheidungsträgern, wie beispielsweise der Weltgesundheitsorganisation (WHO), aufgenommen werden. „Unser Augenmerk liegt nicht nur auf der Therapie, sondern auch auf dem präventiven Ansatz, denn eine Behandlung beim Mensch ist zwar möglich, aber teuer“, erklärt Winkler.

Fachleute reisen in die Dörfer und sprechen mit den Menschen über die Verbreitung des Parasiten und wie man ihn eindämmen kann. Dazu gehört, kein rohes Schweinefleisch zu essen, kranke Tiere mit günstigen Wurmmitteln zu behandeln und die Tiere in Ställen zu halten, damit sie nicht frei durch die Dörfer laufen und sich an der Fäzes

„Wir Europäer müssen armutsbedingte Krankheiten ernst nehmen. Wir haben eine moralisch-gesellschaftliche Verpflichtung dazu und wir werden aufgrund von Migration auch in Europa immer mehr NCC-Fälle sehen.“

Andrea Sylvia Winkler

von Leuten, die den Bandwurm tragen, infizieren können. Über allem steht der globale One Health-Ansatz, also dass man die Gesundheit des Menschen nur erreichen kann, wenn auch Tiere und Umwelt gesund sind.

Um diesem Ziel näher zu kommen, hat Andrea Winkler im Jahr 2017 gemeinsam mit Clarissa Prazeres da Costa – und unterstützt durch die Abteilung für Neurologie und das Institut für Medizinische Mikrobiologie, Immunologie und Hygiene – das Center for Global Health an der TUM ins Leben gerufen. Ziel des Zentrums ist es, Forschungs- und Lehrprojekte zum Thema Globale Gesundheit zu initiieren und Fachleute unterschiedlicher Disziplinen miteinander zu vernetzen: „Wir treten aus dem nationalen Rahmen heraus und kooperieren weltweit.“ ■

Claudia Doyle



Prof. Andrea Sylvia Winkler

hat an der LMU München Medizin studiert und in Neurowissenschaften promoviert. Anschließend erwarb sie einen zweiten Dokortitel von der University of London in klinischer Neurologie. Seit 2011 ist sie Oberärztin in der Neurologie an der TUM sowie Gründungsdirektorin des TUM Center for Global Health zusammen mit Prof. Prazeres da Costa. Ihre Berufung auf eine Professur für Global One Health erhielt Andrea Winkler 2016 an der Universität Oslo. Seit Mai 2023 hält sie eine Gastprofessur an der Harvard Medical School. Ein Schwerpunkt ihrer Arbeit ist die Forschung an vernachlässigten neurologischen Krankheiten in Subsahara-Afrika zusammen mit dem One-Health-Ansatz.

Bezahlbarer Strom für entlegene Dorfgemeinschaften

Was passiert, wenn Solarstrom ins Dorf kommt? Prof. Frank-Martin Belz und sein Team untersuchen in ländlichen Regionen von Entwicklungsländern, welche unternehmerischen Aktivitäten sich entfalten, wenn diese mit Energie versorgt werden.

Link

www.ie.mgt.tum.de/en/sustainability

www.seed.tum.de



Mali
Kenia
Uganda

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

Informal Economies: The West Needs to Abandon its Misconceptions

E

Prof. Frank-Martin Belz is setting up living labs in rural regions of developing countries and investigating what entrepreneurial activities unfold when an energy supply is available. His doctoral student Esther Salvi is researching the shadow economy in such rural regions. The sector is neither regulated nor taxed or supervised by the state and is characterized by oral agreements, traditions or rites. □



Prof. Frank-Martin Belz

studierte Betriebswirtschaftslehre an der Universität Mannheim, promovierte und habilitierte an der Universität St. Gallen (Schweiz). Er ist Professor für unternehmerische Nachhaltigkeit an der TUM School of Management und Direktor des TUM SEED (Sustainable Energies, Entrepreneurship and Development) Center, das international und interdisziplinär ausgerichtet ist.

„Weltweit haben rund 700 Millionen Menschen keinerlei Zugang zu Elektrizität. Die meisten von ihnen leben in Sub-Sahara Afrika – weit weg vom nationalen Stromnetz. Hier können sogenannte Mini Grids, bestehend aus Photovoltaikanlagen und Batterien, zuverlässig bezahlbaren Strom für ein ganzes Dorf liefern“, erläutert Frank-Martin Belz, Professor für unternehmerische Nachhaltigkeit an der TUM.

Die Dorfgemeinschaften könnten damit ihre Mühlen antreiben, die Felder mit Wasserpumpen bewässern – und die lokale Wirtschaft voranbringen. In der Regel setzt sich letztere aus familiären Kleinunternehmen zusammen, die meist in der Landwirtschaft tätig sind. Mit einer sicheren Stromversorgung könnten die Frauen und Männer auch einen Internetkiosk, eine TV-Bar oder eine Näherei betreiben.

In der Vergangenheit hat sich Belz mit Nachhaltigkeitsaktivitäten von Großunternehmen in Industrienationen beschäftigt. Dabei fiel ihm die mangelnde Bereitschaft für Veränderung auf. Der passionierte Triathlet wollte aber etwas bewegen, also veränderte er sich selbst: Er richtete sein Forschungsinteresse auf Gründer, „die soziale und ökologische Ziele verfolgen und unternehmerische Lösungen für Nachhaltigkeitsprobleme entwickeln“.

„Die letzten zehn Jahre meiner Karriere“, erzählt der 57jährige, „will ich den Zusammenhang von nachhaltigen Energien und Unternehmertum im Globalen Süden erforschen. Dabei spielen für mich nicht nur wissenschaftliche Publikationen eine Rolle, sondern auch der Aufbau sogenannter Living Labs, in denen wir Mini-Grids in ländlichen Regionen bauen und die Menschen mit Strom aus regenerativen Quellen versorgen.“

„Ich baue sogenannte Living Labs auf, indem wir Mini-Grids in ländlichen Regionen bauen und die Menschen mit Strom aus regenerativen Quellen versorgen.“

Frank-Martin Belz

Ein solches Reallabor entstand in Uganda. Gemeinsam mit Projektpartnern haben die Forscher in Kyampisi ein Stromnetz mit 28 Solarpaneelen inklusive Speicher aufgebaut. Nun untersucht das TUM-Forschungsteam, welche wirtschaftlichen Aktivitäten entstehen, wenn ein lokales Netz die Stromversorgung sichert. Bislang verrotten Papayas und Mangos auf den Feldern. Der Zugang zu Energie stärkt die dortigen Bauern und ermöglicht ihnen, ihre Früchte zu lagern und weiterzuverarbeiten. So können sie wirtschaftlich wachsen und ihre Lebensqualität verbessern. ▶





Aus einem vorherigen Mini-Grid-Projekt in Kenia wissen die Forschenden, dass die lokalen Stromnetzbetreiber nicht nur auf Privatkunden setzen können, um profitabel zu wirtschaften. Sie benötigen auch eine bestimmte Anzahl Kleinstunternehmer, die den Strom abnehmen und bezahlen. Derzeit versuchen die Beteiligten gemeinsam mit den Mikrounternehmern in Kyampisi ein entsprechendes Geschäftsmodell zu gestalten, um eine nachhaltige Entwicklung anzustoßen.

Ein zweiter Faktor betrifft soziale Aspekte: Stellt sich der wirtschaftliche Erfolg ein, erwächst daraus eine finanzielle Verpflichtung gegenüber der Großfamilie. Hier gilt es zu erforschen, welchen Weg die Neugründungen einschla-

gen, wie sich die Familiensituation ändert und welche Möglichkeiten sich Frauen eröffnen. Mit dem Bereich informelle Ökonomie ergab sich ein weiteres Forschungsfeld, das Belz' Team in Mali untersucht hat.

Belz erinnert die derzeitige Situation in den ländlichen Regionen Afrikas an Deutschland Anfang des 20. Jahrhunderts: Der Aufbau der Energieversorgung war die Grundlage für den wirtschaftlichen Erfolg. Bis 2030 möchte der gebürtige Konstanzer die notwendige Infrastruktur aufbauen, um acht Dörfer in verschiedenen afrikanischen Staaten zu elektrifizieren und damit die Entwicklung von ca. 8000 Menschen fördern. ■

Eve Tsakiridou

Schattenwirtschaft:

Der Westen muss sich von seinen falschen Vorstellungen verabschieden

Als Doktorandin am Lehrstuhl für unternehmerische Nachhaltigkeit erforschte Dr. Esther Salvi im ländlichen Mali in Feldstudien, wie die Schattenwirtschaft funktioniert. Der Sektor folgt ungeschriebenen Gesetzen wie zum Beispiel mündlichen Absprachen, Traditionen oder Riten und wird weder vom Staat reguliert noch von ihm besteuert oder beaufsichtigt.

Dr. Salvi, wie sind Sie auf Ihr Forschungsgebiet gestoßen?

Ich verbrachte mehrere Wochen in fünf ländlichen Gemeinden in Mali und befragte dort Ladenbesitzer, Farmer, Landwirte, Schweißer, Friseure, Dorfvorsteher, Frauen in führenden Positionen und religiöse Oberhäupter. Je mehr ich mit diesen Privatunternehmern sprach, umso besser verstand ich, wie entscheidend ihre Rolle innerhalb der Gesellschaft und für die lokale Entwicklung ist. Ich erkannte, dass sie nicht in das Bild des „klassischen“ Unternehmers passen und realisierte, wie wichtig es ist, ihre Kultur, die ungeschriebenen Gesetze, nach denen sie ihr Verhalten und ihre wirtschaftlichen Aktivitäten ausrichten, zu verstehen.

Inwieweit unterscheidet sich Ihr Forschungsgebiet von anderen?

Wir arbeiten interdisziplinär und müssen uns von westlich geprägten, falschen Vorstellungen verabschieden. Diese ländlichen, informellen Unternehmer agieren in einem Umfeld, das zu den fragilsten weltweit zählt, wo staatliche Behörden ineffizient arbeiten oder völlig fehlen. Um wirklich zu verstehen, wie sie ihre Geschäfte führen, wie sie einen Mehrwert für die Gesellschaft generieren, müssen wir auch eine soziologische und anthropologische Perspektive einnehmen. ▶

Was sind die wichtigsten Ergebnisse Ihres Projekts?

Informelle Unternehmerinnen im ländlichen Mali sind mit brüchigen formellen Strukturen konfrontiert, weil die Landesregierung von den Menschen in den Dörfern zu weit entfernt ist, um ihre Bedürfnisse zu verstehen, und deshalb nicht wirksam regulierend in die wirtschaftliche Dynamik vor Ort eingreift und keine funktionierenden Dienstleistungs- und Infrastrukturen bereitstellt. Die Gemeinden auf dem Land verfügen jedoch über ein Netzwerk gut funktionierender inoffizieller Organe zur Lenkung der wirtschaftlichen Aktivitäten. Sie unterscheiden sich von Dorf zu Dorf und gründen sich auf Regeln der Großfamilien, Praktiken der Gemeinschaft sowie ethnische Traditionen.

In bäuerlich geprägten Dörfern darf man beispielsweise kein Geschäft eröffnen, wenn man nicht zuvor die Felder der Familie bestellt oder den Lebensunterhalt des Familienclans gesichert hat. Der Clan umfasst dabei in der Regel die Ehepartner, die Eltern und Brüder sowie unverheirateten Schwestern des Ehemannes, seine Großeltern usw. Außerdem muss sichergestellt sein, dass der Dorfvorsteher die Erlaubnis zur Geschäftsgründung in der Gemeinde erteilt.

Was hat Sie am meisten beeindruckt?

Am eindrucklichsten fand ich den Reichtum dieser Dörfer. Wir sehen ja für gewöhnlich nur, woran es dort mangelt: fehlende Infrastruktur, keine sichere Stromversorgung, mangelnde Durchsetzung der Rechtsvorschriften etc. In Bezug auf ihre kulturellen Praktiken, Traditionen und sozialen Werte sind diese Gemeinschaften jedoch außerordentlich reich. Die Menschen dort – einschließlich der Geschäftsleute – sind eine Solidargemeinschaft, in der man einander versteht, sich umeinander kümmert und gegenseitig unterstützt. Bei ihren Alltagsaktivitäten orientieren sie sich oftmals eher an den Bedürfnissen der Gemeinschaft als an ihren eigenen. Die Unternehmen im ländlichen Mali zeigen uns Beispiele für Alternativen zu unserem kapitalistischen Unternehmertum.

Was können wir darüber hinaus noch aus Ihren Erkenntnissen zur Schattenwirtschaft lernen?

Grundsätzlich kann man im ländlichen Mali nicht erfolgreich wirtschaften, wenn man diese Dynamik nicht versteht. Auch Nichtregierungsorganisationen oder Sozialunternehmen, die dort tätig werden möchten, müssen sich mit diesen informellen Regeln auseinandersetzen. ■

Eve Tsakiridou





Dr. Esther Salvi

promovierte im Mai 2023 an der TUM School of Management mit summa cum laude. In ihrer Dissertation entwickelte sie eine theoretische Grundlage für Schattenwirtschaft. In dieser Zeit war sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für unternehmerische Nachhaltigkeit an der TUM und Forschungskordinatorin des dort angesiedelten SEED Center. Sie studierte im Bachelor Lebensmitteltechnik an der Universität Turin und hat einen Master-Abschluss in Ernährungswissenschaften von der Universität Mailand. Seit Mai 2023 arbeitet sie als Post-Doktorandin an der LMU School of Management in München.

Künstliche Intelligenz und Ethik zusammenbringen

KI hat für afrikanische Länder großes Potential, ihr Einsatz birgt aber teils andere ethische und soziale Herausforderungen als in Industrienationen. Ein Team des Institute of Ethics in Artificial Intelligence hat eine Plattform mitgegründet, die afrikanische KI-Experten vernetzt – und eine ethische und nachhaltige KI-Entwicklung fördert.

Link

www.gov.sot.tum.de/en/wirtschaftsethik

www.ieai.sot.tum.de

www.rainafrika.org



Ghana

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

Resolving Conflicts Between Artificial Intelligence and Ethics

E

Artificial intelligence can help African nations make decisive strides forward, for example in agriculture, healthcare and urban development. TUM is also involved in numerous AI-related projects through its partner network in Africa. Sustainability and ethical aspects play a far more significant role in AI development in Africa than in Europe or the USA. A team at the TUM Institute of Ethics in Artificial Intelligence (IEAI) has co-founded a platform that connects African AI experts and promotes ethical, sustainable AI development. □

Künstliche Intelligenz fällt einem nicht als erstes zu Afrika ein. Und doch ist die KI auf dem afrikanischen Kontinent ein großes Thema. Ein Grund dafür ist, dass die Technologie keine Großindustrie oder klassische Fabriken erfordert und ihre Entwicklung nicht unbedingt kapitalintensiv ist.

Viel wichtiger aber: Mit KI können afrikanische Länder Entwicklungsschritte vollziehen, die ohne die Technologie nicht machbar wären. In der für den Kontinent wichtigen Landwirtschaft kann KI beispielsweise Düngung und Bewässerung optimieren. In der Stadtplanung lassen sich mittels KI-basierter Erdbeobachtung informelle Siedlungen – vulgo: Slums – erkennen und in die Planung einbeziehen. Und im Gesundheitswesen kann KI dabei unterstützen, die medizinische Lage der Landbevölkerung zu verbessern. Viele afrikanische Forscher und Wissenschaftler arbeiten mit europäischen Institutionen zusammen. Auch die TUM unterhält in Afrika ein weitreichendes Partnernetzwerk und ist an vielen KI- und anderen Projekten beteiligt. Dabei zeigte sich durchweg, dass dort neben den technologischen Fragen vor allem nachhaltige und ethische Aspekte eine große Rolle spielen – möglicherweise viel stärker als in Europa oder in den USA.

Diese „Responsible KI“ hat in afrikanischen Ländern aus gutem Grund einen hohen Stellenwert. Ist beispielsweise die KI-basierte Überwachung von informellen Siedlungen auf den ersten Blick ein rein technisches Problem, so können die ethischen Folgen das ganze Projekt fragwürdig erscheinen lassen. Wenn aufgrund solcher Daten die Bagger anrücken, weil die Regierung die Existenz einer solchen Siedlung nicht an die Öffentlichkeit bringen will, sind die nicht intendierten Konsequenzen des Projekts gravierend. Die leidenden Bewohner werden vertrieben und müssen sich eine neue Heimat suchen.

Prof. Christoph Lütge kann reihenweise Geschichten von solch ethisch problematischen Folgen von KI-Entwicklungsprojekten erzählen. Der Direktor des Institute of Ethics in Artificial Intelligence (IEAI) an der TUM und Mitgründer des „Responsible KI“-Netzwerkes in Afrika ist überzeugt, dass KI ohne ethische Reflexionen grundsätzlich nicht funktionieren wird – und dass diese Überlegungen am besten gleich bei der Entwicklung von KI-Anwendungen berücksichtigt werden sollten. „Wir haben auf der ganzen Welt immer wieder ähnliche ethische Probleme mit der KI“, erklärt Lütge. „Deshalb ist es wichtig, dass man nicht nur lokal arbeitet, sondern die Probleme über Vernetzung angeht.“



Mitglieder des TUM IEAI nehmen an einer Konferenz zum Thema „Responsible AI and Ethics – A Panacea to Digital Transformation in Sub-Saharan Africa“ an der KNUST in Ghana teil. Rain-Africa organisierte dieses Event zusammen mit dem KNUST Responsible AI Lab.



Afrikanische KI-Experten vernetzen

In den letzten Jahren hat das IEAI mehrere Netzwerke eingerichtet, um die Diskussion über ethische Herausforderungen im Umgang mit KI voranzubringen und soziale Verwerfungen zu verhindern. Eines davon – das „Responsible AI Network Africa“ (RAIN-Africa) – legt den Fokus speziell auf die Länder Afrikas. Es entstand im Jahr 2020 auf Basis einer Partnerschaft zwischen der Fakultät für Elektrotechnik und Computertechnik der Kwame Nkrumah University of Science and Technology in Ghana (KNUST) und dem IEAI. Gründer von RAIN sind neben Lütge seine Mitarbeiterin Dr. Caitlin Corrigan, der TUM-Doktorand Laud Ammah und Prof. Jerry Kponyo von der KNUST.

„Mit RAIN-Africa bringen wir afrikanische KI-Experten zusammen“, erklärt IEAI-Executive Director Caitlin Corrigan. „Die Plattform-Nutzer sollen gemeinsame Projekte zu den ethischen und sozialen Herausforderungen an der Schnittstelle von Technologie und menschlichen Werten diskutieren und entwickeln – insbesondere auch in Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung.“

Konkret organisiert Corrigan auf der Plattform Events, Online-Workshops und Live-Konferenzen – unterstützt von Kollegen der TUM in München und der KNUST in Ghana. „Die Wissenschaftler und KI-Experten können sich auf dieser Plattform austauschen – etwa über aktuelle Projekte und wie sie diese realisieren. Darüber hinaus können sie Forschungspartner in ihren Themenbereichen finden“, sagt Corrigan. Mit einer Reihe von virtuellen und persönlichen Workshops will das RAIN-Projekt auch die internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit fördern.

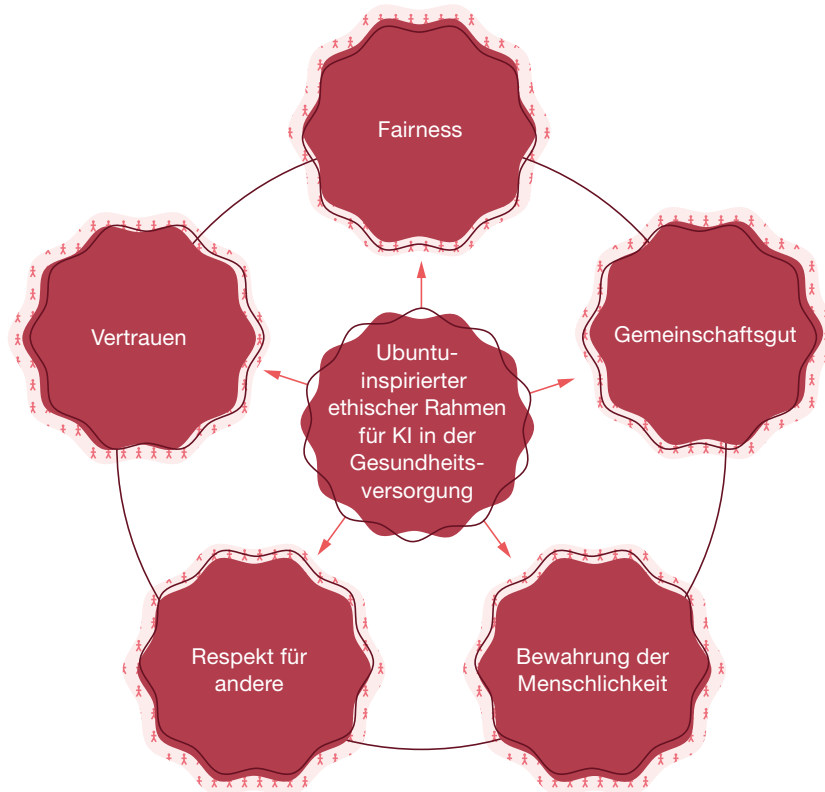
Professor Mrs. Rita Akosua Dickson, Vizekanzlerin der KNUST, spricht bei der „Responsible AI and Ethics Conference“ in Kumasi, Ghana

Der Nutzen für die Gemeinschaft steht im Zentrum

Eine immerwährende ethische Herausforderung auf den Konferenzen und Workshops der RAIN-Africa-Plattform ist Fairness. „Die zentrale Frage für viele ist, ob der Nutzen dieser Technologie fair, also gerecht, verteilt ist oder ob nur wenige davon profitieren“, erklärt Corrigan. „Dieser Aspekt ist in Afrika sehr wichtig.“

Besonders die Menschen im südlichen Afrika berufen sich dabei auf einen speziellen ethischen Ansatz – die Ubuntu-Ethik. Anders als die individualistisch orientierten westlichen Ethikkonzepte – Kantianismus, Utilitarismus und Tugendethik – begreift die Ubuntu-Ethik das Individuum als untrennbar mit anderen Menschen verbunden und priorisiert die Gemeinschaft vor dem Individuum: Weil das Wohlergehen des Einzelnen und seiner Gemeinschaft miteinander verwoben ist, treten individuelle Rechte hinter den gemeinschaftlichen Nutzen zurück.

Dieses Ethik-Konzept hat ganz konkrete Effekte: „Wenn eine Gemeinschaft eine Health Care App nutzen kann, sollte das Individuum seine Daten freigeben“, sagt Corrigan. „Beispielsweise wird der Datenschutz bei einer Covid Tracing App zu Teilen aufgegeben – aber dafür kann die App die Gemeinschaft schützen.“ Diese Thematik kam laut Corrigan auf den jüngsten RAIN-Africa-Konferenzen in Ghana immer wieder zur Sprache – wurde aber im Kontext der Covid-19 Pandemie auch in anderen Ländern gehäuft diskutiert. ▶



Die Ubuntu-Ethik betont die gegenseitige Verbundenheit und Abhängigkeit aller Menschen. Sie bietet einen vielversprechenden Rahmen, um ethische Aspekte bei KI für die Gesundheitsversorgung zu berücksichtigen. Forscher am IEAI haben zusammen mit Partnern in Namibia den hier dargestellten Ansatz entwickelt.

Auch Geschwindigkeit hat manchmal einen höheren Stellenwert als individueller Datenschutz – besonders in kritischen Fällen. „Auf der letzten RAIN-Africa Konferenz wurde die ‚Verantwortung‘ diskutiert, eine KI-fähige App so schnell wie möglich in die Gesellschaft zu bringen, auch wenn sie nicht perfekt ist“, sagt Corrigan. Entwickler aus afrikanischen Ländern möchten Menschen helfen, die vielleicht zu weit weg von einem Krankenhaus wohnen oder keinen Arzt vor Ort haben. Deshalb kann es wichtig sein, derartige Apps schnellstmöglich einzusetzen, um sie dann iterativ zu verbessern. „Solche sozial nützlichen Anwendungen sind oft mit der Frage verbunden, wie wir ‚verantwortlich‘ definieren und wie ethische Belange miteinander in Konflikt geraten können. Zum Beispiel, ob man den Datenrechten Vorrang vor der Förderung des Zugangs zur Gesundheitsversorgung einräumen sollte.“

Diese Beispiele sind nur ein Bruchteil der gesamten Bandbreite ethischer Probleme im Zusammenhang mit KI, die bei RAIN-Africa diskutiert werden, um Lösungen zu verschiedenen Herausforderungen in Bezug auf nachhaltige Entwicklung zu erarbeiten. Mit großer Wahrscheinlichkeit wären solche Netzwerke auch in anderen Regionen von Nutzen – sie könnten weltweit Diskussionen über KI und Ethik zusammenbringen. ■

Klaus Manhart

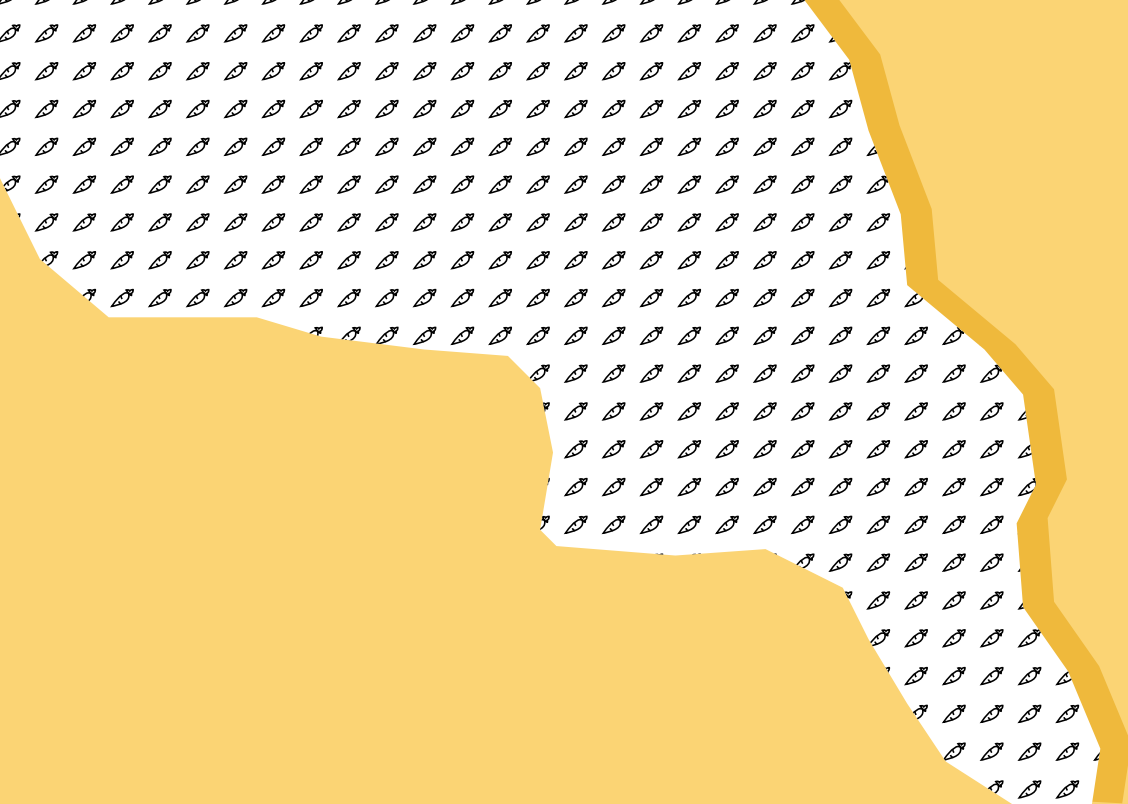


Prof. Christoph Lütge

ist seit 2010 Lehrstuhlinhaber für Wirtschaftsethik an der TUM und seit 2019 Direktor des Instituts für Ethik in der KI (IEAI). Er hat Wirtschaftsinformatik und Philosophie studiert, an der TU Braunschweig promoviert und 2005 an der LMU München habilitiert. Im Jahr 2007 wurde er mit einem Heisenberg-Stipendium ausgezeichnet. 2020 ernannte ihn die Universität Tokio zum Distinguished Visiting Professor. Christoph Lütge lehrte als Gastprofessor in Harvard, Pittsburgh, Taipeh, Kyoto und Venedig und ist Mitglied des wissenschaftlichen Beirats der europäischen KI-Ethik-Initiative AI4People sowie der deutschen Ethik-Kommission für Automatisiertes und Vernetztes Fahren. Seit einiger Zeit engagiert er sich in Afrika. Im März 2023 unternahm er eine ausgedehnte Reise in die Region südlich der Sahara und besuchte mit RAIN-Africa verbundene Universitäten in Südafrika, Namibia, Kap Verde und Senegal.

Dr. Caitlin Corrigan

beschäftigt sich seit über zehn Jahren mit Fragen der nachhaltigen Entwicklung in Afrika. Sie hat an der Universität von Pittsburgh in Public and International Affairs promoviert und sich dafür mit der Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen speziell in Afrika südlich der Sahara befasst und dafür Feldforschung in Botswana und Südafrika betrieben. Außerdem war sie Program Development Manager am Africa Studies Program der University of Pittsburgh, wo sie Forschungsprojekte und Stipendienanträge entwickelte. An der TUM ist Caitlin Corrigan als Exekutivdirektorin für die Entwicklung und Koordinierung aller Forschungs- und Verwaltungsaktivitäten des IEAI verantwortlich und gestaltet in enger Zusammenarbeit mit dessen Direktor die Agenda des IEAI.

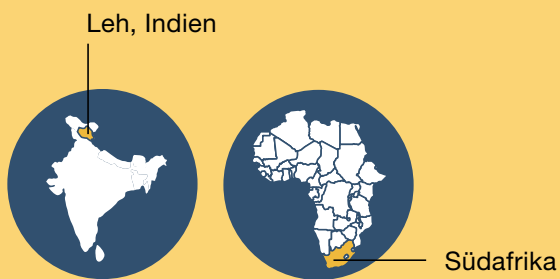


Link

www.cee.ed.tum.de/en/sww/home/
www.nexus.wasser.tum.de

Langfristige **Ménage à Trois**

Wenn Wasser, Energie und Nahrung sich zusammentun, um die Welt zu retten – dann handelt es sich um die internationale Forschungsinitiative zum Water-Energy-Food (WEF) Nexus. Die Forschenden entwickeln alternative Lösungen für den Verbrauch natürlicher Ressourcen in großen und kleinen Städten und deren Umland weltweit.



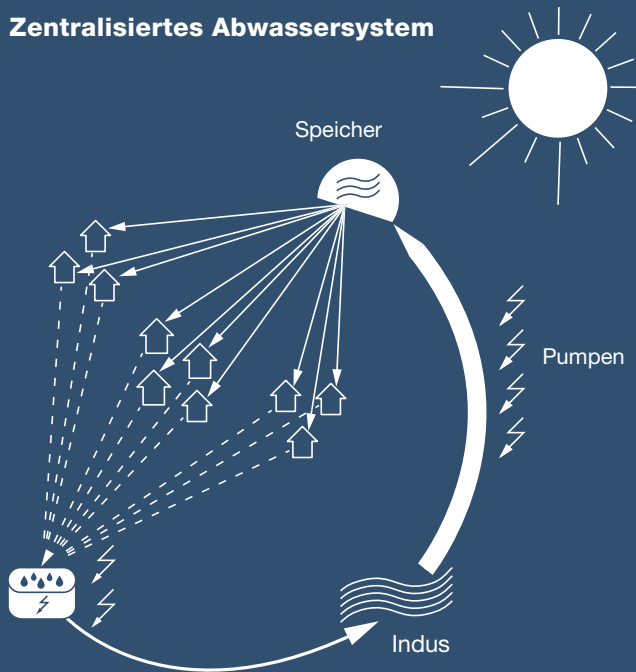
Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

A Long-Term Ménagement à trois

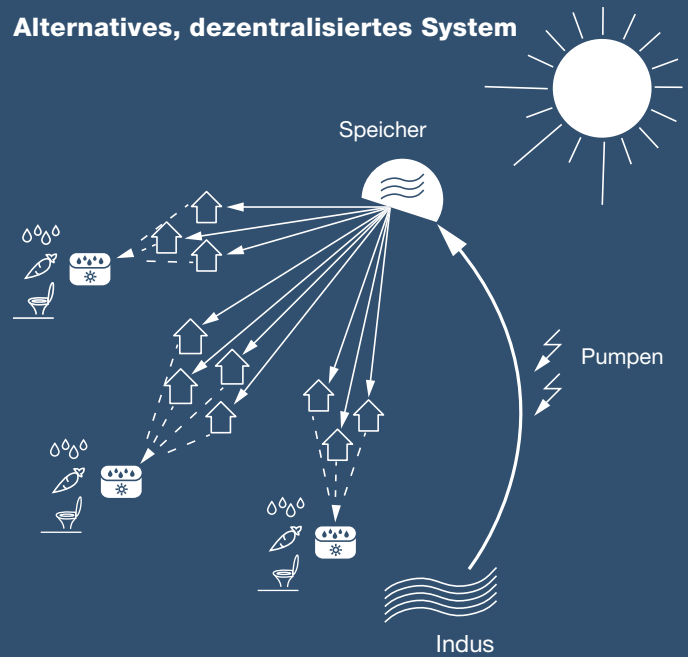


Water, energy and food: Prof. Jörg Drewes and Dr. Daphne Keilmann-Gondhalekar are working on alternative solutions to reduce consumption of these resources in large and small cities. One example is Leh, a city in the Indian Himalayas, which is grappling with a shortage of water. There, they are developing a decentralized system for reusing water, which could give the city greater independence from external and distant sources of water. □

Zentralisiertes Abwassersystem



Alternatives, dezentralisiertes System



 Kläranlage – betrieben mit konventionellen Energiequellen

 Kläranlage – betrieben mit Sonnenenergie

Ein mit den Bewohnern der Stadt Leh entwickeltes Konzept für ein dezentrales Abwassersystem. Das Wasser wird lokal wiederverwendet, beispielsweise für Gemüseanbau oder Toilettenspülung. Ein solches System bräuchte weniger Frischwasser und Energie, der Abwasserstrom wäre kleiner und der lokale Anbau von Nahrungsmitteln würde gefördert.

Morgens Zähne putzen und duschen, das Radio einschalten und einen Kaffee kochen: Was für viele Menschen selbstverständlich ist, ist vor allem in großen Städten organisatorisch ein Kraftakt. Insbesondere da die Nachfrage nach natürlichen Ressourcen wie Wasser, Energie und Nahrungsmitteln steigt – auch und wegen der Folgen des Klimawandels. Beispielsweise erhöht die Hitze in Los Angeles den Energieverbrauch, da Gebäude noch stärker gekühlt werden. Das Schmelzen der Gletscher in den Schweizer Alpen verringert den Wasserbestand, so dass Wasser zugeführt werden muss. Das sind nur zwei von vielen Beispielen, wie sich der Klimawandel auswirkt. Deswegen müssen wir den Ressourcenverbrauch auf ein nachhaltiges Niveau senken.

Wie schaffen wir das? Nicht nur durch weniger Verbrauch, sondern auch durch eine integrierte Planung der Sektoren Wasser, Energie und Nahrung, die eng zusammenhängen. Schließlich benötigt die Landwirtschaft ebenso wie Energieerzeugungsanlagen Wasser. Und um Wasser und Lebensmittel zu transportieren, bedarf es der Energie. Plant man die Versorgung integriert, lassen sich Synergien

nutzen. Anders gesagt: In einer Ménage à trois wären Wasser, Energie und Nahrung gleichberechtigte Partner, die sich brauchen und unterstützen – und viel miteinander reden, um ihre Beziehung optimal zu gestalten.

Die Betrachtung dieser Wechselwirkungen sind allerdings bisher kaum in Lehre und Forschung und vor allem nicht in der Umsetzung angekommen. „Wir brauchen eine zirkuläre statt einer linearen Sichtweise“, betont Prof. Jörg Drewes, der den Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft an der TUM leitet. Hier gibt es seit 2017 die von Dr. Daphne Keilmann-Gondhalekar geleitete Forschungsgruppe Urban Water-Energy-Food Nexus. Gemeinsam haben sie 2021 die Forschungs- und Lehragenda Nexus@TUM ins Leben gerufen.

„Wir brauchen eine zirkuläre statt einer linearen Sichtweise auf Wasser, Energie und Nahrung.“

Jörg E. Drewes

Eine kleine Stadt im Himalaya als Modell für nachhaltige Ressourcenverwaltung

Mehrere Pilotprojekte haben Drewes, Keilmann-Gondhalekar und Team bereits durchgeführt, etwa in Indien und im Niger, aber auch in Bayern. Sie interessieren sich für Regionen, in denen es an natürlichen Ressourcen mangelt und in denen neue Lösungen gefragt sind, die nicht durch die öffentliche Hand finanziert werden. Etwa die kleine Stadt Leh im indischen Himalaya, mitten in der Wüste. Die Stadt ist in den letzten Jahrzehnten durch den Tourismus exponentiell gewachsen und kämpft mit begrenzten Wasserressourcen. Drewes, Keilmann-Gondhalekar und Team sind hier bereits seit mehr als zehn Jahren aktiv. Klassische Konzepte, die extern entwickelt und finanziert wurden, führten bisher nicht zum gewünschten Erfolg – wie etwa der zeitaufwändige und kostspielige Plan, Wasser per Pipeline nach Leh zu pumpen. Die Nexus-Forschenden haben den Wasserbedarf erfasst und analysiert und viele Gespräche mit den Bewohnerinnen und Bewohnern geführt. Sie sind sich einig: Statt Wasser von außen in die Stadt zu transportieren, sollte das Abwasser, das in Leh anfällt, erfasst, behandelt und wiederverwendet werden. In jedem Hotel, Gästehaus und Haushalt lässt sich das verbrauchte Wasser in ein dezentrales Sys-

tem einspeisen und damit beispielsweise Felder bewässern, wo es den Pflanzen auch als Dünger zugutekommt. Ein solches System reduziert den Bedarf an Frischwasser, verringert den Abfallstrom, spart Energie und erzeugt lokal Nahrungsmittel. Zudem macht es die Stadt auch unabhängiger, als wenn sie Wasser von außen zuführen und bezahlen muss. „Das Beispiel zeigt: Es braucht neue Konzepte, die zusammen mit den Menschen vor Ort entwickelt, umgesetzt und finanziert werden“, weiß Dr. Keilmann-Gondhalekar.

Leh hat ihr eine weitere wichtige Erkenntnis geliefert: „Wir brauchen neue Rechenmodelle für die Kalkulation potenzieller Bedarfe“, sagt Keilmann-Gondhalekar, „denn die kurzfristig günstige Lösung ist es in der Regel nicht auf lange Sicht.“ So mag der Bau eines dezentralen Wassersystems teurer als eines zentralen sein. In klassische Berechnungen fließt aber der in Zukunft stark steigende Wert von Wasser in der Regel noch nicht ein. Die Forschenden setzen daher auf die sogenannte multi-criteria decision making analysis. Das ist eine Methode zur Entscheidungsfindung, bei der mehrere Kriterien, die nicht leicht zu quantifizieren oder zu vergleichen sind, gleichzeitig berücksichtigt werden. ▶

„Das Beispiel der indischen Stadt Leh zeigt: Es braucht neue Konzepte, die zusammen mit den Menschen vor Ort entwickelt, umgesetzt und finanziert werden.“

Daphne Keilmann-Gondhalekar

Wasser marsch für die Umwelt

In Südafrika entwickelt das Team von Drewes derzeit Konzepte für sogenannte informelle Siedlungen – also Slums. Strom gibt es hier ebenso wenig wie Wasser oder adäquate Sanitäre Lösungen, die Menschen können keine Felder anlegen und Nahrung produzieren. Das Abwasser belastet Bäche und Flüsse, was zu gesundheitlichen Problemen führt. Die Probleme sind miteinander verknüpft und können sich gegenseitig in einer Abwärtsspirale verstärken.

Bei diesem wie bei allen anderen Projekten sammeln die Forschenden Informationen, erfassen den Bedarf an Wasser, Energie und Nahrung, Studierende verfassen wissenschaftliche Arbeiten zu möglichen Ansätzen: erneuerbare Energien wie Solarenergie, Windenergie und Biomasse einsetzen, Biogas aus Abfällen erzeugen oder Regenwasser nutzen. „Letzteres passiert noch nicht einmal in einer modernen Stadt wie München“, sagt Drewes. „Es gibt

viele Ideen und auch bereits Lösungen, wir setzen sie aber leider noch nicht um.“ Keilmann-Gondhalekar ergänzt: „Wir müssen dringend ins Handeln kommen.“ Deswegen geht Nexus@TUM weit über technische Aspekte hinaus. Es gilt, Menschen zu motivieren, Akzeptanz zu schaffen, Transformationswege aufzuzeigen, verschiedenste Stakeholder inklusive Regierungen zu überzeugen, Umweltingenieurinnen und -ingenieure für Nexus-Ansätze auszubilden und vieles mehr. Darum sind bei Nexus@TUM etwa auch Forschende aus den Sozial- und Politikwissenschaften gefragt. „Unsere Forschungen sind dann sinnvoll, wenn wir interdisziplinär aufgestellt sind, und die Umsetzung gelingt nur, wenn wir mit den Menschen vor Ort vertrauensvoll und langfristig in einem transdisziplinären Ansatz zusammenarbeiten“, sagt Drewes. ■ *Gitta Rohling*

Machen Sie mit!

Nexus@TUM freut sich auf die Teilnahme von Forschenden aus allen Disziplinen. Informationen unter: www.nexus.wasser.tum.de





Prof. Jörg E. Drewes

leitet seit 2013 den Lehrstuhl und die Versuchsanstalt für Siedlungswasserwirtschaft an der TUM. Vor seiner Berufung an die TUM war er in den USA Professor an der Colorado School of Mines und Forschungsleiter am „NSF Engineering Research Center on Reinventing the Nation’s Urban Water Infrastructure“. Er ist Mitglied im wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) und stellvertretender Sprecher der Trinkwasserkommission beim Bundesministerium für Gesundheit.

Dr. Daphne Keilmann-Gondhalekar

ist Stadtplanerin und Leiterin der Nexus Forschungsgruppe am Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft an der TUM mit den Schwerpunkten integrierte Stadtplanung, Urban Water-Energy-Food Nexus und Multi-Stakeholder-Prozesse. Sie hat an der Universität Tokio promoviert und war Postdoctoral Associate am Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Wieviele CO₂ können Wälder künftig noch aufnehmen?



Amazonien

Die tropischen Regenwälder schlucken große Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid. Ob sie durch deren Anstieg künftig besser wachsen oder nicht, soll jetzt ein großes Freilandexperiment im Amazonas-Gebiet zeigen, bei dem der Wald mit Kohlendioxid begast wird. Mit dabei ist die Ökosystemmodelliererin Prof. Anja Rammig.

Link

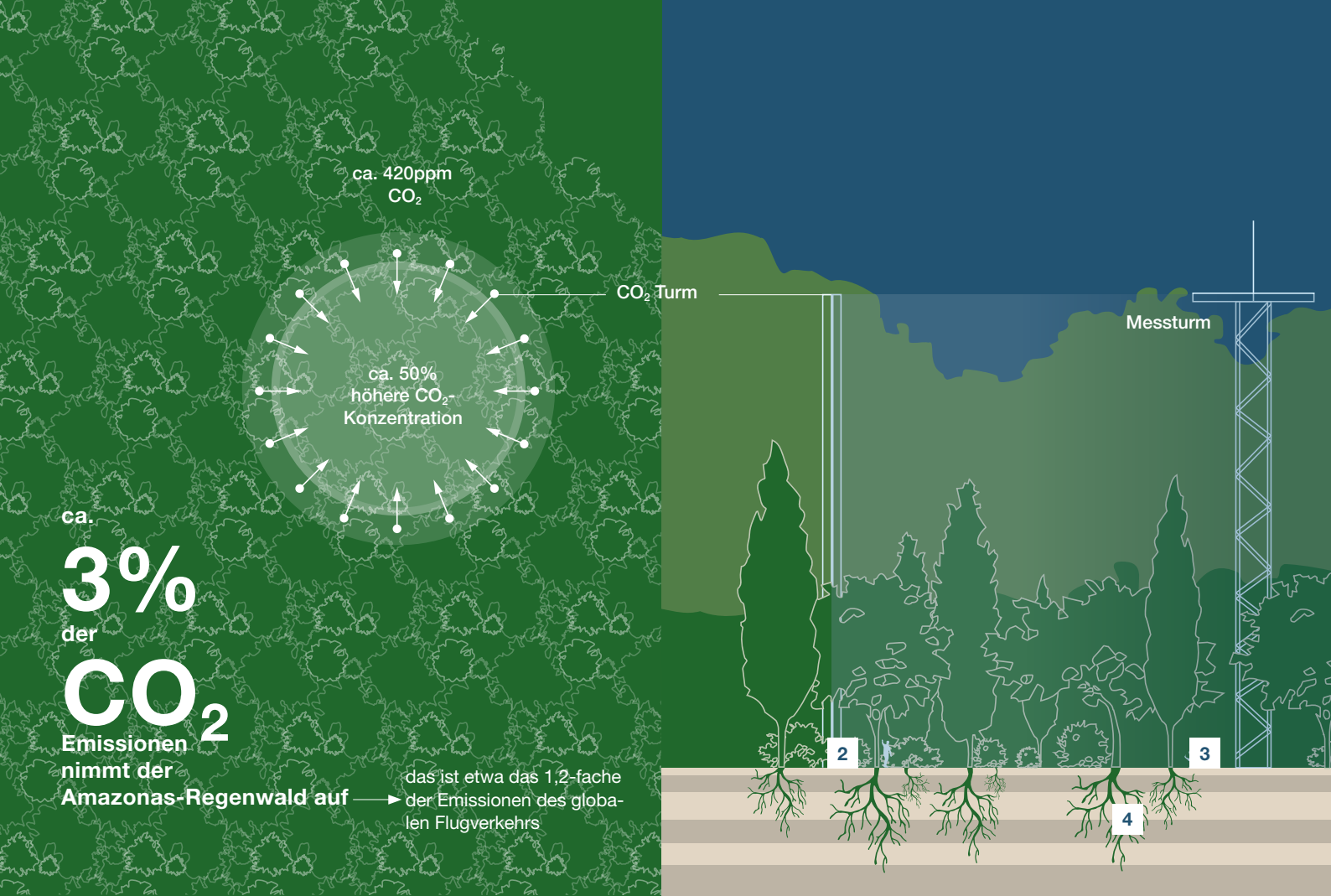
www.l sai.wzw.tum.de

www.amazonface.unicamp.br/en/

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

How much CO₂ can Forests Absorb in the Future? E

Amazonia plays a vital role in the Earth's climate system. It absorbs a significant proportion of the greenhouse gas carbon dioxide (CO₂) and mitigates climate change. The amount of CO₂ that the Amazon rainforest can take up in the future is an important parameter in global climate models – but has, until now, remained somewhat unclear. Instead, climate models rely on the simpler assumption that the forest will grow more as it absorbs more CO₂. Whether that is actually the case, or whether limited nutrient supplies might inhibit growth at a certain point, is now the subject of an international experiment that involves subjecting specific sections of the Amazon rainforest to elevated CO₂ levels. Ecosystem modeler Prof. Anja Rammig is part of the research team. □

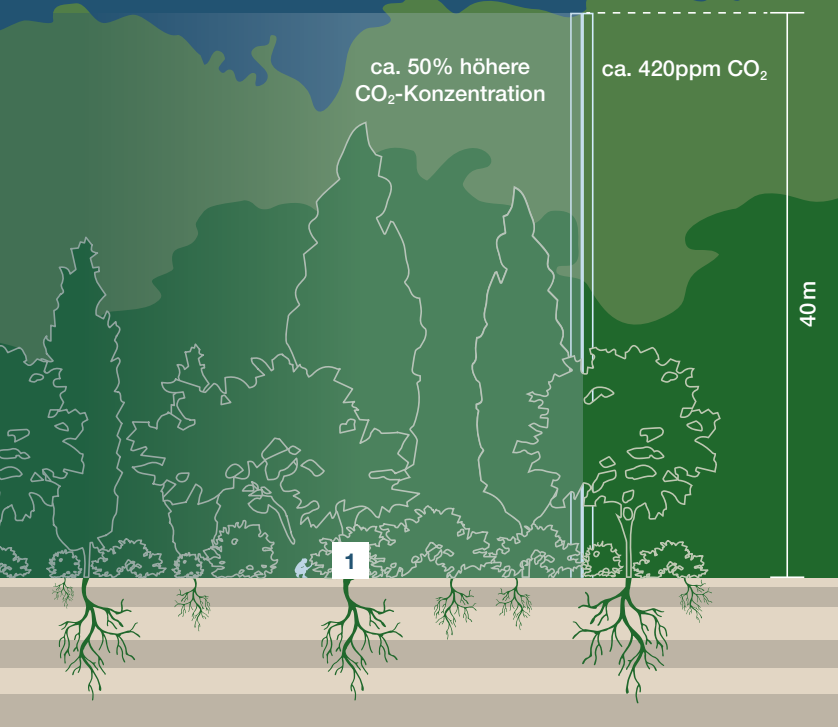


Der Regenwald am Amazonas ist riesig. Das schier endlose Grün erstreckt sich über eine Fläche, die rund vierzehnmal größer als Deutschland ist. Dieser Wald ist nicht nur als Heimat für Tiere und Pflanzen von Bedeutung. Er spielt auch eine wichtige Rolle für das Klima der Erde. So nimmt er einen großen Teil des Kohlendioxids (CO₂) auf, das die Menschheit durch die Verbrennung von Öl, Gas und Kohle freisetzt. Ohne diesen Wald würde der Klimawandel noch schneller voranschreiten. Wie viel Kohlendioxid der Amazonas-Regenwald künftig speichern kann, ist allerdings noch weitgehend unbekannt, weil bisher nie ein Feldexperiment untersucht hat, wie dieses riesige Ökosystem das Klimagas verarbeitet.

Ein Wald aus Gas sprühenden Türmen

Bisher machen Klimamodelle vereinfachend die Annahme, dass steigende Kohlendioxid-Konzentrationen in der Atmosphäre das Wachstum des Waldes fördern. Schließlich nehmen Pflanzen das Gas aus der Luft auf und wandeln es durch die Photosynthese in energiereiche Kohlenstoffverbindungen, also Kohlenhydrate, um. Diese benötigen sie zum Beispiel für das Wachstum von ihrer Biomasse wie Stamm oder Wurzeln. Ein großes internationales Projekt

untersucht jetzt erstmals genau, ob diese Annahme – je mehr CO₂, desto mehr Wachstum – tatsächlich stimmt. Dafür werden im Herzen des Regenwaldes in der Nähe der brasilianischen Stadt Manaus zahlreiche Türme aufgebaut – insgesamt 96 Stück, jeder knapp 40 Meter hoch. Von den Türmen aus wird der Wald mit Kohlendioxid begast. Die Wissenschaftler simulieren damit höhere Kohlendioxid-Konzentrationen, wie sie für die Mitte dieses Jahrhunderts erwartet werden. Amazon Free-Air CO₂ Enrichment – AmazonFACE – ist ein Freiland-CO₂-Düngeexperiment, das seit rund zehn Jahren geplant wurde und nun in die ersten Baumaßnahmen gemündet ist. Zu dem internationalen Forscherteam gehört auch Anja Rammig, Expertin für Ökosystemmodellierung an der TUM. „Wir stellen den Bäumen damit sehr viel mehr CO₂ zur Verfügung als gewöhnlich und können dann messen, wie das gesamte Ökosystem reagiert“, sagt sie. Es sei keinesfalls sicher, dass die Bäume besser wüchsen. So sei es auch denkbar, dass das Wachstum der Bäume durch Nährstoffmangel im Boden ausgebremst würde – zum Beispiel, wenn sich durch das verstärkte Wachstum lebenswichtige Phosphorverbindungen verknäpften.

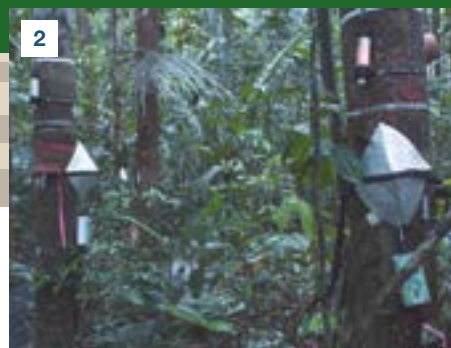


Freiland statt Laborexperiment

Anja Rammig baut am Computer die komplexen Prozesse in Ökosystemen nach, um sie besser zu verstehen und Prognosen zu machen. Zu diesem Zweck übersetzt sie natürliche Vorgänge in Zahlen, etwa in Mengen an Kohlenstoff, der zwischen der Atmosphäre, den Blättern und den Wurzeln eines Baumes und dem Boden ausgetauscht wird. Für diese Ökosystemmodelle benötigt sie Messwerte und Zahlen, die die Wirklichkeit abbilden. Und daran mangelte es bislang. Zwar gab es Experimente, in denen Wissenschaftler im Labor einzelne Pflanzen höheren CO₂-Konzentrationen aussetzten. Doch ist es etwas anderes, ein solches Experiment im Freiland an einem ganzen Waldstück durchzuführen – gewissermaßen am lebenden Objekt. Nur so ließen sich die natürlichen Vorgänge in ihrer ganzen Komplexität erfassen, sagt Anja Rammig. Nicht zuletzt, weil erhöhte CO₂-Konzentrationen noch ganz andere weitreichende Effekte haben können. ▶



Messung der Photosynthese-Aktivität in den Blättern



Messung des Umfangs von und des Saftflusses in den Baumstämmen



Monitoring von Boden- und Wurzelatmung



Analyse von Änderungen in Bodenprozessen, hier Wurzelproben



Prof. Anja Rammig

studierte Biologie an der FAU Erlangen und promovierte 2005 an der ETH Zürich in Umweltwissenschaften. Danach arbeitete sie als Post-Doc an der Universität Lund in Schweden. Von 2008 bis 2015 forschte Anja Rammig am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Seit 2015 hat sie an der TUM School of Life Sciences die Professur für „Land-Surface-Atmosphere Interactions“ inne.



Zentraler Messturm in der Mitte des im sich Aufbau befindenden CO₂-Rings

Mehr CO₂ – weniger Regen?

Pflanzen nehmen CO₂ über kleine Spaltöffnungen in den Blättern auf. Zugleich verdunsten sie durch die Öffnungen Wasserdampf. Enthält die Luft mehr Kohlendioxid, so die Annahme, können die Pflanzen ihre Spaltöffnungen nicht mehr so weit öffnen. Dadurch verringerte sich dann auch die Verdunstung. Und das könnte zum Problem für den gesamten Wald am Amazonas werden. Der Wald erzeugt durch die Verdunstung nämlich seinen eigenen Regen. Was tagsüber an Feuchtigkeit aufsteigt, prasselt gegen Abend wieder herab. Verdunsten die Blätter weniger, könnte sich die Regenmenge verringern. Es würde trockener. Auch solche Effekte wollen die Forschungsteams im Regenwald bei Manaus untersuchen.

Inzwischen wurden die ersten Türme errichtet. 16 Türme umringen jeweils ein untersuchtes Waldstück. Sechs Waldstücke sollen es insgesamt werden. Zwei sind bereits fertig. Ende dieses Jahres werden dort die CO₂-Hähne aufgedreht. Etwa zehn Jahre lang soll das AmazonFACE-Projekt insgesamt laufen. Das Team wird in dieser Zeit eine Fülle an Parametern messen – Photosynthese, Wasserflüsse, das Wachstum der Bäume, der Wurzeln, der Blätter oder auch den Nährstoffgehalt im Boden. Anfang 2024 soll das Projekt erste Ergebnisse liefern.

Anja Rammig erhofft sich davon viele neue Daten für die Ökosystemmodelle, deren Ergebnisse auch in die Berechnungen des Weltklimarates einfließen. „Unsere Modelle können nur so gut sein wie die Daten, mit denen sie gefüttert werden“, sagt sie. „Ideal wäre es, wenn die Messergebnisse aus dem Regenwald in einigen Jahren direkt in unsere Modelle einfließen und wir die Vorgänge quasi in Echtzeit modellieren könnten.“ Das Schicksal des Regenwaldes am Amazonas und der Verlauf der Erderwärmung dürften sich dann sehr viel zuverlässiger vorhersagen lassen als heute. ■

Tim Schröder

Was wäre, wenn?

Stadtsimulationen beantworten wichtige Zukunftsfragen

Energie sparen, autonome Fahrzeuge einsetzen und die Sicherheit erhöhen – das sind wichtige Ziele von Städten. Wie lassen sie sich erreichen? Geodatenbasierte, semantische Stadtmodelle zeigen es. Sie simulieren Zukunftsszenarien und bieten damit eine wichtige Entscheidungsgrundlage.

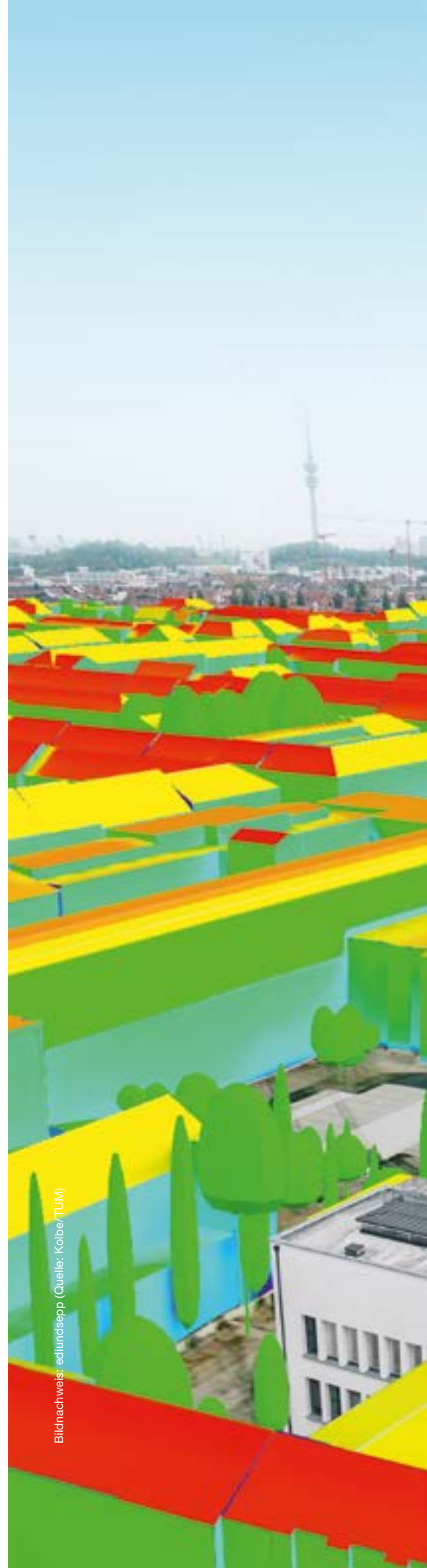
Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

What if...? Urban Simulations Provide Answers E to Key Questions for the Future

Saving energy, promoting autonomous driving and improving safety: these are important goals shared by many cities. But how exactly can we achieve them? Geodata-based semantic city models are showing us the way. Prof. Thomas H. Kolbe and his team research 3D models like this, which integrate a wide range of data – on aspects including traffic, infrastructure, cell phone towers, building structures and construction projects. They use these models for tasks such as calculating the future energy consumption of residential buildings in Munich up to 2035. □

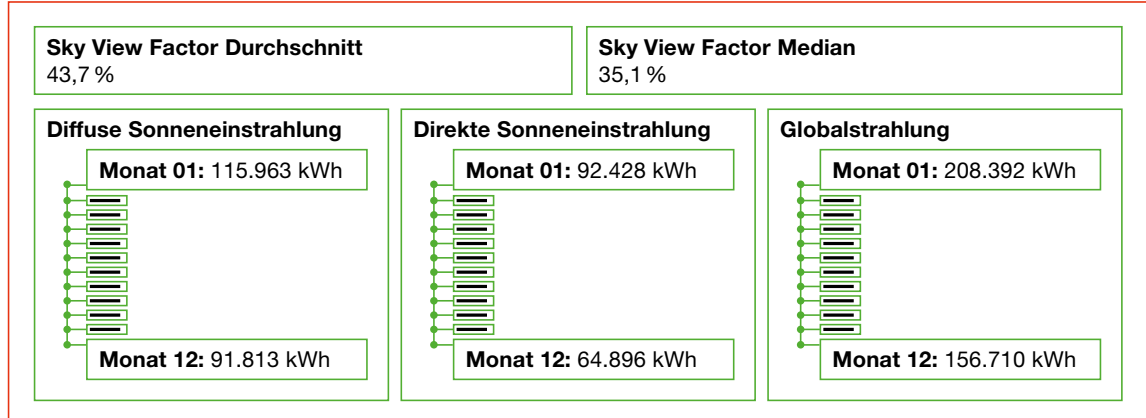
Link

www.asg.ed.tum.de/gis
www.3dcitydb.org



Bildnachweis: ecludnsepp (Quelle: Kolbe/TUM)





Semantische 3D-Stadtmodelle lassen sich für verschiedene Anwendungen mit den jeweiligen Daten beliebig anreichern. Dieses Modell von München zeigt die Energie der diffusen und direkten Sonneneinstrahlung auf den verschiedenen Oberflächen eines Gebäudes, angegeben in Monats- und Jahressummen. Auch die Information, wie viel Prozent des Himmels sichtbar ist (Sky View Factor SVF), wird für die einzelnen Flächen berechnet und für jedes Gebäude aggregiert.

Was wäre, wenn die Münchnerinnen und Münchner ihre Wohngebäude von Öl- und Gasheizungen auf Fernwärme und Wärmepumpen umrüsten würden? Wenn sie bei Warmwasser vor allem auf Solarthermie setzen? Und wenn Fußbodenheizungen in großem Stil Radiatoren ersetzen?

Ja, was wäre dann? Ein geodatenbasiertes, semantisches Modell der Stadt München zeigt es, denn es kann anhand der in ihm enthaltenen Gebäudeinformationen die potenziellen Energieeinsparungen ermitteln.

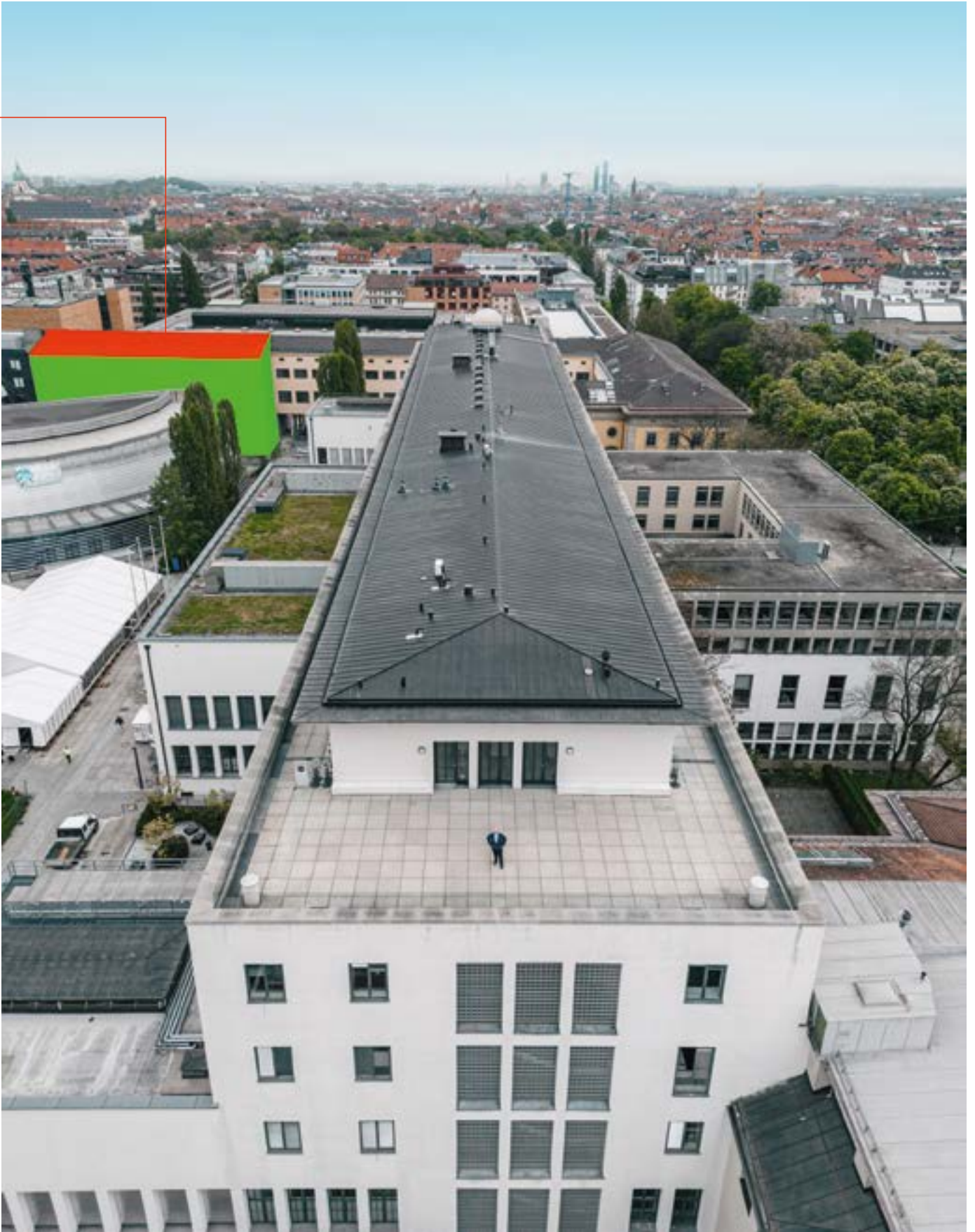
Nicht nur visuell, sondern semantisch in 3D

Wo kommen die Informationen her? Die Geodaten kommen von Behörden wie Landesvermessungs- oder Katasterämtern, dazu gehören topographische Karten, Luft- und Satellitenbilder. Sensoren wiederum liefern Daten über Verkehr, Umwelt und Infrastruktur. Unternehmen aus den Bereichen Telekommunikation, Verkehr und Immobilien können ebenfalls Daten zur Verfügung stellen, zum Beispiel über Mobilfunkmasten, Verkehrsbewegungen und Bauvorhaben.

Von Berlin über New York bis Tokio nutzen weltweit viele

Städte solche 3D-Modelle. Was das ist, lässt sich im Vergleich am besten erklären: Die 3D-Ansichten von Google Maps etwa nutzen ein rein visuelles Modell, das keine semantischen Daten enthält, das heißt Informationen zu den Objekten sind nicht hinterlegt. Hier gibt es keine Informationen, ob es sich um Büros oder Wohnhäuser handelt, wie alt die Gebäude sind, wie viele Stockwerke sie haben und so weiter. Bei geobasierten, semantischen Modellen sind solche Daten vorhanden. „Daher können diese Modelle sehr gut Informationen aus verschiedenen Themenbereichen zusammenführen und Szenarien zu verschiedenen Fragen simulieren“, sagt Prof. Thomas H. Kolbe, der als Inhaber des Lehrstuhls für Geoinformatik an der TUM an solchen Modellen forscht.

Nutzen lassen sich diese 3D-Modelle, um Vorhersagen über den Energieverbrauch zu treffen, wie die Analyse der Wohngebäude in München zeigt. Wichtig sind sie auch für die Stadt- und Verkehrsplanung oder das Sicherheits- und Katastrophenmanagement. „Diese vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten faszinieren mich“, sagt Kolbe. „Gemeinsam mit Experten aus verschiedenen Disziplinen entwickeln wir sie weiter und integrieren immer mehr Daten.“



Anwendungen

von Stadtplanung bis Katastrophenmanagement



Stadtplanung

Beispiel: In welchen Gebieten lassen sich neue Wohnflächen entwickeln?

Wichtige Daten (WD): Alle Gebäude inkl. 3D-Geometrie, Nutzungsart, Baujahr und Stockwerke



Verkehrsplanung

Beispiel: Wo lassen sich autonom fahrende Kleinbusse ideal einsetzen?

WD: Fahrstreifengenaue Straßenraummodelle, Verkehrsstärke- und Bedarfszahlen, Gelände- und Gebäudemodelle



Energieplanung

Beispiel: Welche Energiemaßnahmen sind in welchen Bereichen effizient?

WD: Alle Gebäude inkl. 3D-Geometrie, Nutzungsart, Baujahr



Immobilienmanagement

Beispiel: Welchen Verkaufs- und Versicherungswert haben Immobilien?

WD: Alle Gebäude inkl. 3D-Geometrie, Nutzungsart, Baujahr und Stockwerke



Sicherheits- und Katastrophenmanagement

Beispiel: Wo liegen Gefahrenzonen bei einer Überflutung, einem Terroranschlag oder einem Tsunami?

WD: Gelände- und Gewässermodell sowie alle Gebäude und Verkehrswege in einem potenziell gefährdeten Gebiet



Immer bessere Prognosen – dank interdisziplinär gesammelter und harmonisierter Daten

So beispielsweise auch bei einem Forschungsprojekt, bei dem Kolbe und sein Team untersuchten, wie stark die Sonne auf Münchens Gebäude strahlt und diese damit erwärmt. Auf der Südseite wärmen sie sich stärker auf als auf der Nordseite – klar. Dächer heizen sich stärker auf als Fassaden. Bäume und Schornsteine aber werfen Schatten, und eine schlechte Luftqualität reduziert die Sonneneinstrahlung. Bei diesem Projekt stammen die Geodaten von der Bayerischen Vermessungsverwaltung (LBDV), die Informationen zur Kalibrierung der solaren Einstrahlungsenergie von der NASA. Die Daten zum Baumbestand wurden mit Hilfe von Methoden erhoben, die das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung in Dresden entwickelt hat. All diese Informationen integrierte Kolbes Team in ein semantisches, dreidimensionales Stadtmodell. Im Ergebnis entstand ein Modell der Stadt, das zeigt, in welchen Bereichen sich Photovoltaik und Solarthermie lohnen.

Für die Zusammenarbeit ist es wichtig, Datensätze standardisiert zu erstellen. Dazu dient der CityGML-Standard, dessen Entwicklung Kolbe initiiert hat und federführend vorantreibt. Hier ist definiert, wie Gebäude, Straßen, Brücken oder auch Bäume digital beschrieben sein sollen. Das macht die Modelle vergleichbar und damit auch wirtschaftlich. Viele Länder und Städte weltweit stellen ihre 3D-Modelle mittlerweile CityGML-konform als Open Data kostenfrei zur Verfügung. So können immer mehr Daten einfließen, sodass die Simulationsergebnisse immer detaillierter werden. Einige Städte haben sogar bereits digitale Zwillinge im Einsatz, also eine virtuelle Echtzeit-Repräsentation ihrer selbst. Was wäre also, wenn eine Stadt klimaneutral, fahrerfrei oder katastrophensicher werden will? Die Modelle weisen den Weg. ■

Gitta Rohling

„Diese Modelle können Informationen aus verschiedenen Themenbereichen zusammenführen und Szenarien zu verschiedenen Fragen simulieren.“

Thomas H. Kolbe

3DCityDB – eine open-source Datenbank für 3D-Stadtmodelle

Die preisgekrönte 3D City Database ist eine kostenlose Geodatenbank zum Speichern, Darstellen und Verwalten virtueller 3D-Stadtmodelle. Sie enthält den CityGML-Standard mit semantisch reichhaltigen und multi-skaligen Stadtobjekten und erleichtert so komplexe Analyseaufgaben weit über die Visualisierung hinaus. 3DCityDB wird seit mehr als 14 Jahren produktiv und kommerziell an vielen Orten der Welt und in zahlreichen Forschungsprojekten eingesetzt.

www.3dcitydb.org



Prof. Thomas H. Kolbe

studierte Informatik an der Universität Dortmund und promovierte an den Universitäten Vechta und Bonn. In Bonn arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent und Oberingenieur. Anschließend war er Inhaber des Lehrstuhls „Methodik der Geoinformationstechnik“ an der TU Berlin. Seit 2012 ist er Inhaber des Lehrstuhls für Geoinformatik an der TUM. Hier erforscht er Methoden, um Städte räumlich, zeitlich und semantisch zu analysieren, zu modellieren und zu visualisieren. Er ist Initiator und Mitautor von CityGML, dem internationalen Standard zur Modellierung, zur Speicherung und zum Austausch semantischer 3D-Stadtmodelle. Seit 2021 ist er Kernmitglied des Munich Data Science Institute.

Klimaneutralität in München?

Mehr als 100.000 Wohngebäude gibt es in München, die beheizt, gekühlt und beleuchtet sein wollen. Damit verursachen sie Treibhausgasemissionen. Aber nicht nur damit. Neben dieser direkten Energie gibt es die sogenannte graue Energie. Das ist die Energie, die beim Gebäudebau sowie bei der Herstellung, dem Transport, dem Einbau und der Entsorgung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage, Sanitär- und Elektroinstallationen, Beleuchtungssystemen und Sicherheitstechnik verbraucht wird.

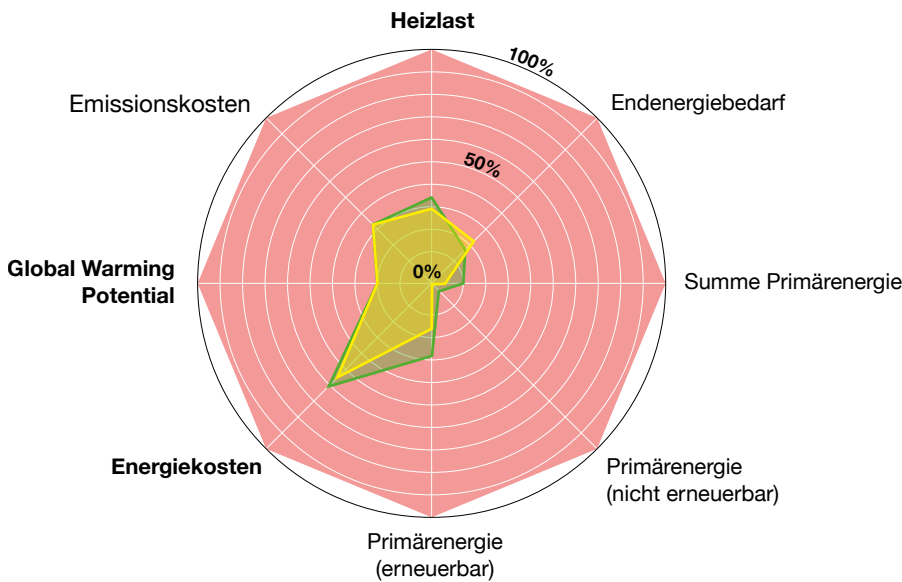
Diese graue Energie wird bei der Analyse des Energieverbrauchs oft nicht berücksichtigt. Das untersuchte Hannes Harter in seiner Dissertation, die er 2021 in Kooperation mit Kolbes Lehrstuhl durchführte. Er entwickelte eine Methode auf der Grundlage eines geodatenbasierten, semantischen Stadtmodells, die nicht nur die direkte, sondern auch die graue Energie in die Analysen einbezieht. Ein Novum. Im Modell enthalten sind die Informationen, welche Anlagen für das Heizen, das Trinkwarmwasser und die Wärmeübergabe derzeit vorhanden sind. Anschließend lassen sich folgende Fragen mit Zahlen hinterlegen: Wie hoch wären die Kosten für den Tausch der Anlagen? Wie hoch wäre die graue Energie? Wie hoch wäre der Energieverbrauch danach?

Sein Modell schätzt den zukünftigen Energieverbrauch der Wohngebäude in München bis 2035 in zwei Szenarien. In Szenario 1 kämen beim Heizen Gas, Fernwärme und Wärmepumpen zum Einsatz, Szenario 2 dagegen verzichtet komplett auf Gas. Beide Szenarien setzen beim Warmwasser rein auf Solarthermie und bei der Wärmeübergabe auf Fußbodenheizungen. Generell können auch andere Szenarien durchgerechnet werden.

Die schlechte Nachricht: In punkto Wohngebäude würde München sein Ziel, bis 2035 klimaneutral zu sein, nicht erreichen. Die dafür notwendigen Umrüstungen wären in beiden Szenarien so aufwändig und teuer, dass sie schlicht nicht realistisch sind. Und weil Gebäude immer wieder erneuert werden müssen, kann der Gebäudesektor gar nicht komplett klimaneutral werden. Die gute Nachricht: Umrüstungen können durchaus deutlich Energie einsparen. „Wir sollten daher nicht den Kopf in den Sand stecken, sondern solche Stadtmodelle nutzen, um zu analysieren, in welchen Bereichen sich Umrüstungen am meisten lohnen“, sagt Thomas Kolbe.

Was wäre, wenn...

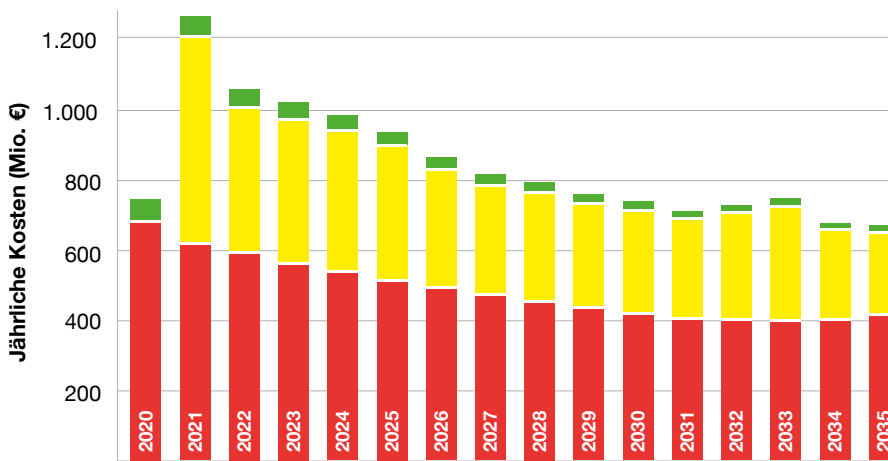
alle Wohngebäude Münchens energetisch saniert würden?



Ist-Zustand: Heizenergie aus Gas (70 %), Öl (20 %) und Fernwärme (10 %)

Szenario 1: Heizenergie aus Wärmepumpen (70 %; überwiegend erneuerbar betrieben), Gas (20 %) und Fernwärme (10 %). Warmwasser aus Solarthermie; 100 % Fußbodenheizung

Szenario 2: Wie Szenario 1, aber Heizenergie ausschließlich aus Fernwärme (80 %, 90 % davon mit erneuerbarer Energie) und Wärmepumpen (20 %)



Emissionskosten

Kosten graue Energie für technische Gebäudeausrüstung

Kosten Heizung und Warmwasser

Jahr

Jährliche Kosten für Energie und Emissionen, wenn alle Wohngebäude in München zwischen 2020 und 2035 so saniert werden, dass sie Szenario 1 erfüllen. Auch nach abgeschlossener Sanierung bleiben erhebliche Kosten für direkte und graue Energie sowie für Emissionen. (Anfängliche Emissionskosten 25 €/t CO₂e; jährlicher Anstieg der Energie- und Emissionskosten 5 %; jährlicher Anstieg der Baukosten 2 %).

Die wohl größten Quantenobjekte der Welt



10 μm

Die Nanosaitte befindet sich zwischen diesen Elektroden (siehe S. 72)

In der Welt der Quanten, also des Allerkleinsten, der Größte zu sein, das dürfte ja eigentlich keine besondere Schwierigkeit darstellen. Aber dabei gleichzeitig die in dieser Welt üblichen Gesetze einzuhalten, das ist fast ein Ding der Unmöglichkeit. Professorin Eva Weig strebt dies mit ihrem Team an. Die Forschenden bauen mechanische Quantensensoren, die so groß sind, dass man sie unter dem Elektronenmikroskop sehen kann. Sie könnten vielleicht eines Tages wichtige Bausteine einer neuen Quantentechnologie sein.

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-30

The World's Largest Quantum Objects

E

Quantum systems are normally minute in size, made up of one or several elementary particles, atoms or, at the very most, molecules. Prof. Eva Weig, holder of the Chair of Nano and Quantum Sensors at TUM, is going far beyond this scale. Together with her team, Weig uses semiconductor materials to develop extremely fine strings that can vibrate with precision, making them macroscopic mechanical objects and quantum objects at the same time. The groundbreaking aspect of these quantum-mechanical objects, which can be seen under an electron microscope, is that they are designed to function at room temperature – which makes it significantly easier to apply them in practice. Until now, such objects had to be cooled to close to absolute zero. One day, these objects could become fundamental components of vital sensors or components in quantum computers. □

Link

www.ee.cit.tum.de/nan/

Wann ist ein Objekt ein Quantenobjekt?

In der Welt des Allerkleinsten gibt es Objekte, die Eigenschaften besitzen, die unserem natürlichen Empfinden völlig zuwiderlaufen und mit der klassischen Physik nicht zu erklären sind:



Wenn man ihre Energie misst, können sie nicht genau an einem Ort lokalisiert werden und umgekehrt. Man nennt dieses Gesetz die Heisenbergsche Unschärferelation.



Sie können nur ganz bestimmte Energiezustände annehmen. Dazwischen gibt es keinen kontinuierlichen Übergang, sondern nur Quantensprünge. Daher rührt auch ihr Name „Quantenobjekte“.



Sie können aber in einer Überlagerung verschiedener Zustände existieren. Erst wenn man eine Messung vornimmt, nagelt man sie auf einem bestimmten Zustand fest. Diese Eigenschaft benutzt man unter anderem im Quantencomputer.



Sie können mit anderen Quantenobjekten verschränkt sein – Einstein nannte das „spukhafte Fernwirkung“. Wenn eines der Objekte seinen Zustand verändert, tun das die damit verschränkten Objekte ebenfalls. Deshalb lassen sich Quantenobjekte auch teleportieren.



Zeigt ein Objekt eine oder mehrere dieser Eigenschaften, bezeichnet man es als Quantenobjekt.

Für den Normalbürger mit gesundem Menschenverstand klingen die Vorgänge in der Quantenwelt eher nach Märchen: Teilchen, die sich in Wellen verwandeln und umgekehrt; Partikel, die sich per Telepathie verständigen; Katzen, die gleichzeitig tot und lebendig sind, oder Objekte, die simultan an zwei verschiedenen Stellen sind. Aber es sind keine Märchen, sondern die Grundlagen unserer modernen Welt. Ohne diese erstaunlichen Phänomene gäbe es heute keinen Computer, keinen Laser, keine Kernspintomographie, ja nicht einmal einen gewöhnlichen Fernseher. Das, was dem gesunden Menschenverstand so unerklärlich und rätselhaft erscheint, hat seine Existenz inzwischen millionenfach in der Praxis bewiesen.

Und die Entwicklung geht rasant weiter: Diese Eigenschaften der Quantenwelt, die uns jetzt noch so seltsam vorkommen, werden vielleicht bald ebenso selbstverständlich die Grundlage einer neuen Quantentechnologie sein wie heute Elektrizität oder Halbleitertechnik. In ihr werden all diese Phänomene nicht nur im Verborgenen zum Tragen kommen, sondern ganz bewusst eingesetzt werden. Allerdings ist die Wissenschaft gerade erst dabei, die technischen Bausteine für diese neue Quantenwelt zu entwickeln. Da werden Atome oder Ionen in Fallen eingesperrt, Designeratome in Festkörper eingebaut oder feinste elektrische Übergänge in Supraleitern erzeugt. Dazu Bauelemente, die diese Elemente verbinden sowie ein- und ausschalten können.

Schwingende Nanosaiten

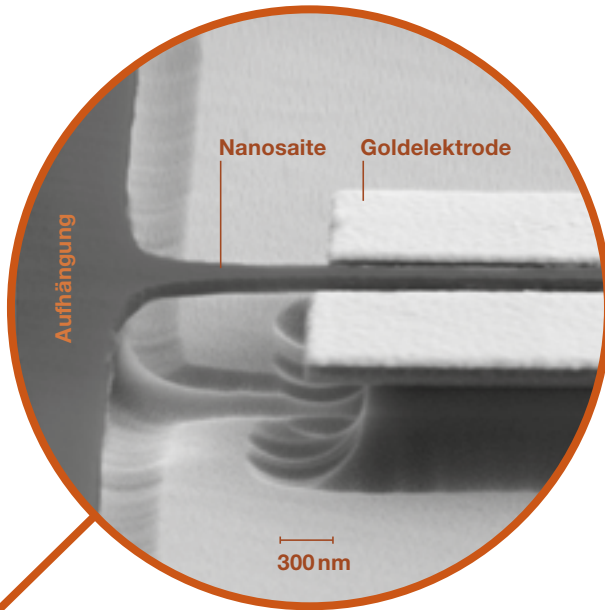
Normalerweise sind Quantensysteme einzelne oder mehrere Elementarteilchen, Atome oder höchstens Moleküle. Eva Weig geht mit ihrem Team aber einen ganz anderen Weg: An ihrem Lehrstuhl für Nano- und Quantensensorik entstehen extrem kleine Saiten aus Keramik- bzw. Halbleitermaterial, die aber makroskopische Objekte sind: Sie enthalten etwa eine Billion, also 10^{12} Atome. Ein solches System als Quantenbaustein? Das klingt exotisch, und das ist es auch, aber dieser Ansatz hat eine ganze Reihe von Vorteilen. „Unsere Objekte kann man vergleichen mit Nano-Gitarrensaiten, die man durch Zupfen in Schwingung versetzt“, erklärt die Physikerin, „und diese können sich unter bestimmten Bedingungen wie quantenmechanische Systeme verhalten. Sie können also bestimmte Zustände annehmen, die gespeichert, übertragen, ja sogar mit anderen verschränkt werden können. Ich finde das faszinierend.“ Mit ihrer Länge von bis zu 50 Mikrometern gehören diese Nano-Strings heute zu den größten quantenmechanischen Systemen, die es auf der Welt gibt. ▶



Bildnachweis: Magdalena Jooss; Grafiken: edlundsepp

Prof. Eva Maria Weig

hat ihre Liebe zu München nie verloren. Hier wurde sie geboren, hier studierte sie Physik an der LMU, hier promovierte sie 2004 am Lehrstuhl für Festkörperphysik. Auch wenn sie danach als Postdoktorandin nach Santa Barbara in Kalifornien ging, kehrte sie 2008 wieder nach München zurück, wo sie von 2007 bis 2012 als Hochschulassistentin und von 2008 bis 2009 als Vertretungsprofessorin an ihrem alten Institut an der LMU tätig war. Ab 2013 leitete sie als Professorin der Universität Konstanz am Fachbereich Physik die Arbeitsgruppe für nanomechanische Systeme. Zum 1. Oktober 2020 wurde sie an die TUM berufen, wo sie seither den Lehrstuhl für Nano- und Quantensensoren inne hat. Eva Weig ist außerdem Direktorin des TUM Zentrums für QuantumEngineering.



„Die Herstellung unserer Prototypen ist heute noch sehr aufwändig.“

Eva Weig



Bildnachweis: Magdalena Jooss

△ **Oben:** Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer **Nanosaiten** zwischen zwei Goldelektroden.

△ **Unten:** Im Lauf ihrer Forscherinnen-Karriere hat Eva Weig unzählige Tage und Wochen im Reinraum verbracht. Heute, als Professorin, legt sie den Reinraumanzug nur mehr zu besonderen Gelegenheiten an.



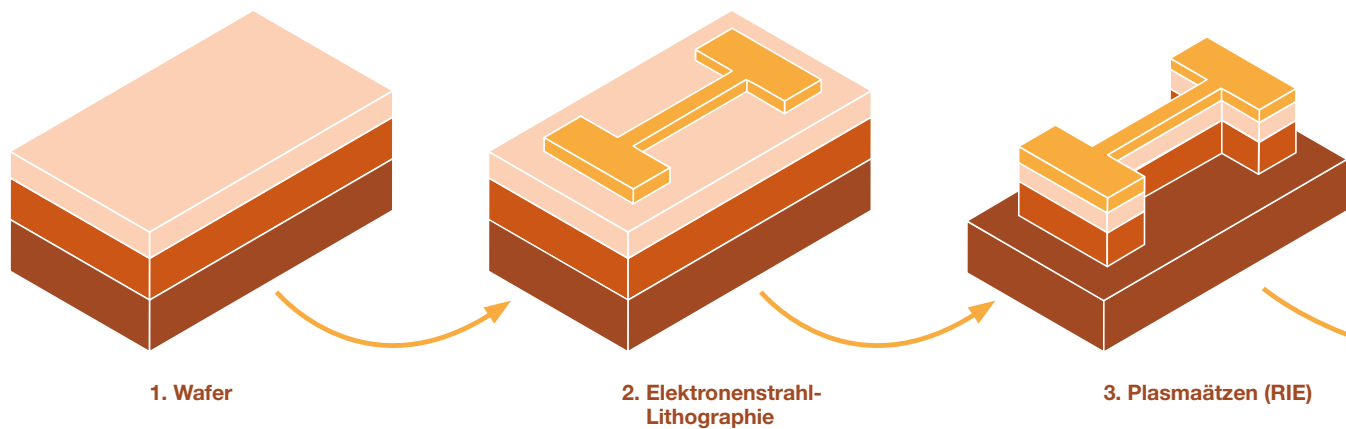
Das Fachgebiet ist noch jung: Im Frühjahr 2010 erregte der 29-jährige Aaron D. O'Connell an der University of California in Santa Barbara mit seiner Doktorarbeit weltweites Aufsehen. Es war ihm unter Anleitung seines Doktorvaters Andrew N. Cleland gelungen, ein supraleitendes Quantenbit, wie es in Quantencomputern verwendet wird, mit einer schwingenden, makroskopischen mechanischen Zunge – er selbst nannte sie „Surfbrett“ – zu koppeln. Das gelang ihm durch einen supraleitenden Schaltkreis. Der Trick dabei war, dass die Zunge piezoelektrisch war, sich also unter einer elektrischen Spannung verformt und umgekehrt. Damit war zum ersten Mal weltweit die Verbindung zwischen der Quantenwelt, also der Welt des Allerkleinsten, mit unserer „normalen“ Makrowelt gelungen. Die Fachzeitschrift Science zeichnete diese Errungenschaft als „Durchbruch des Jahres 2010“ aus und nannte sie „die erste Quantenmaschine“.

Dieser Durchbruch gelang nur deshalb, weil das schwingende Objekt von allen äußeren Einflüssen abgeschirmt wurde: Es wurde sehr stark gekühlt und befand sich in einer abgedunkelten Vakuumkammer. Inzwischen haben mehrere Gruppen auf der Welt ähnliche Erfolge erzielen können, allerdings immer nur im Bereich tiefster Temperaturen.

△ **Chipbearbeitung im Reinraum:** Unter dem Abzug wird die Probe belichtet, um sie für die Lithographie vorzubereiten. Nach der Belichtung wird die Lackschicht entwickelt.

Extreme Kühlung ist nicht nötig

Die Nanostrings von Eva Weig sind allerdings noch wesentlich feiner als das System von O'Connell. Sie und ihre zehn Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter versuchen nun, es bei Zimmertemperatur zu einem quantenmechanischen System zu machen. Das würde die Anwendbarkeit für viele Zwecke erleichtern oder überhaupt erst ermöglichen. Bei der Herstellung ihrer Nanosaiten benutzen die Forschenden Reinräume, in denen sie mit Hilfe von Elektronenstrahl-Lithographie in mühsamer Kleinarbeit Schicht auf Schicht auf Silizium-Wafer auftragen und an bestimmten Stellen wegätzen oder wegbrennen. So entsteht am Ende ein kleines Wunderwerk, bei dem die Saite eine typische Länge von 30 bis 50 Mikrometern und eine Dicke von weniger als 100 Nanometern hat. „Die Herstellung unserer Prototypen ist heute noch sehr aufwändig“, sagt Eva Weig, „unsere Masterstudenten wenden dafür etwa die Hälfte ihrer Arbeitszeit auf, aber man kann das später mit der entsprechenden Prozessführung auch industriell fertigen.“ Anschließend werden die Saiten in einer Vakuumkammer erst einmal exakt vermessen. Sie dürfen nicht mit Luft in Berührung kommen, denn der Zusammenstoß mit Luftmolekülen würde sie sofort abbremsen, ähnlich wie der Wind die Wasserwellen auf einem See stört. Das „Anzupfen“ besorgt man mit Laserlicht, elektrischen Feldern oder auch Schallwellen. ▶



▷ **Links:** Die Nanosaiten werden bei Raumtemperatur in einer Vakuumkammer gemessen. Das Labor verfügt über verschiedene Messanordnungen.

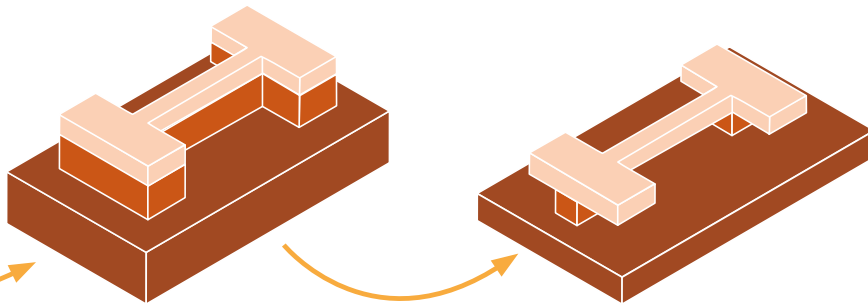
Rechts: Blick von oben in eine Kammer mit einem Mikrowellenhohlraum zur Messung der Schwingungen der Saite. Der transparente Chip enthält die – für das menschliche Auge unsichtbare – Nanosaiten.

Solche Nanostrings haben eine außergewöhnliche Güte: Eva Weig und ihr Team haben sie inzwischen ständig weiter verbessert, und so können heute manche dieser Saiten für ein paar Millisekunden immer mit der gleichen Frequenz schwingen. Für quantenmechanische Vorstellungen bedeutet dies eine ungeheuer lange Zeit. Übertragen auf eine normale Gitarrensaite würde diese etwa eine Stunde lang im gleichen Ton schwingen. „Das ist wirklich aufsehenerregend“, sagt die Physikerin, „denn aufgrund dieser Fähigkeit könnte man solche Systeme als Zwischenspeicher für quantenmechanische Informationen nutzen, zum Beispiel zum Parken von Qubits in Quantencomputern.“ Das gibt es bis heute noch nicht. Für die Übertragung gäbe es verschiedene Wege, entweder ähnlich wie im Experiment von O’Connell oder mit Lasern.

Die Fähigkeit der schwingenden Nanosaiten, ihre Frequenz sehr lang konstant zu halten, war bisher nur bei extrem tiefen Temperaturen möglich. Mit den neu produzierten Prototypen gelingt dies jedoch sogar bei Raumtemperatur, weil die Saite nur sehr wenig Energie an ihre Umgebung abgibt. Allerdings reagiert sie besonders empfindlich auf jede äußere Störung. Das kann man sich aber zunutze machen und sie mit gezielten „Störungen“ beeinflussen. Auf diese Weise kann man sie an andere Systeme

▷



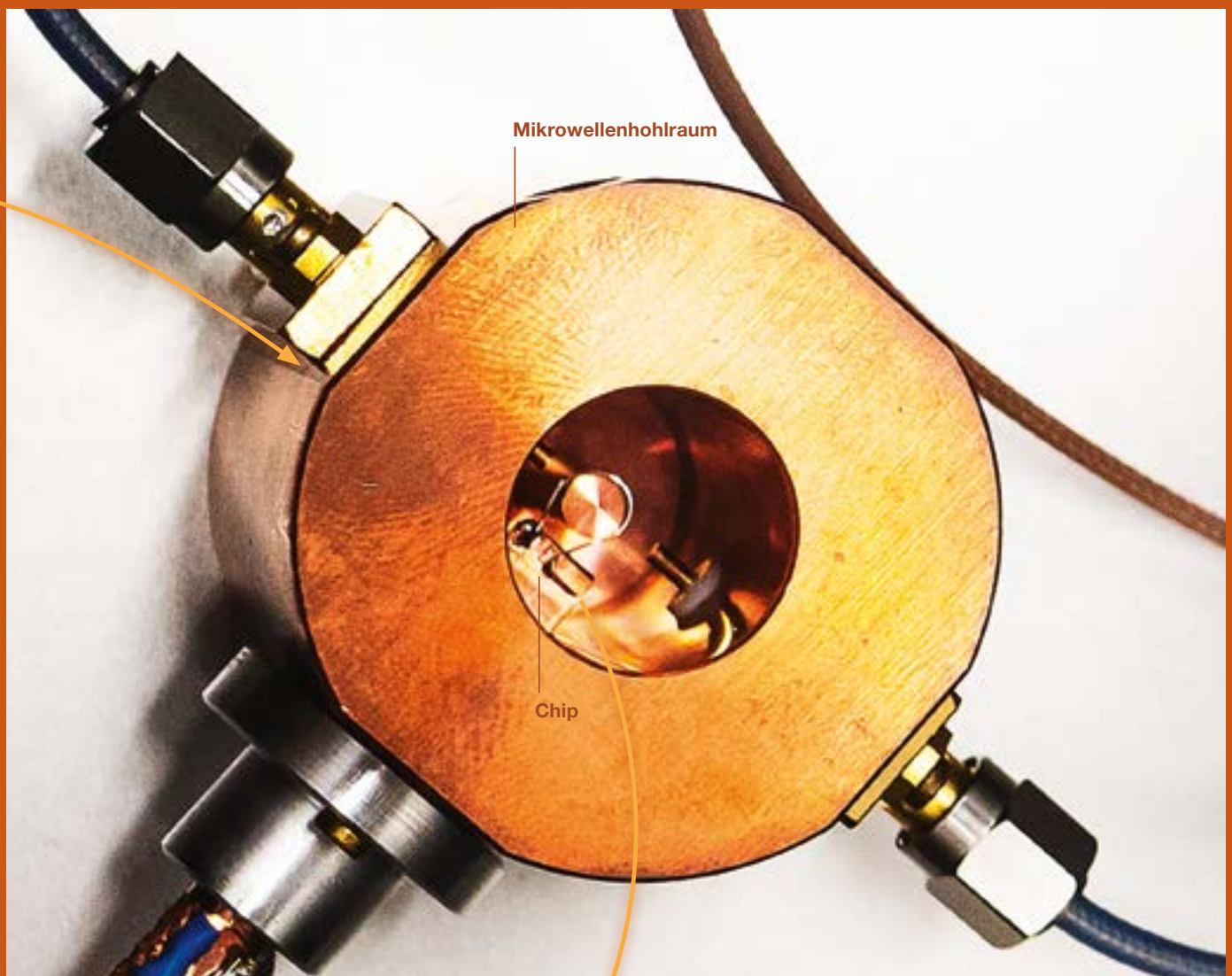


4. Entfernung der Maske

5. Nasschemisches (HF) Ätzen;
überkritisches Trocknen

- Bauelemente-
schicht
- Substratschicht
- Opferschicht
- Metallmaske

Die aus **Keramik oder Halbleiter-Material** bestehenden Nanosaiten werden größtenteils genauso hergestellt wie konventionelle Computerchips. Schicht für Schicht wird die gewünschte Struktur aufgetragen und dann an bestimmten Stellen wieder entfernt.



„Es gehört noch zur Grundlagenforschung, aber erste Anwendungen spitzen schon raus.“

Eva Weig



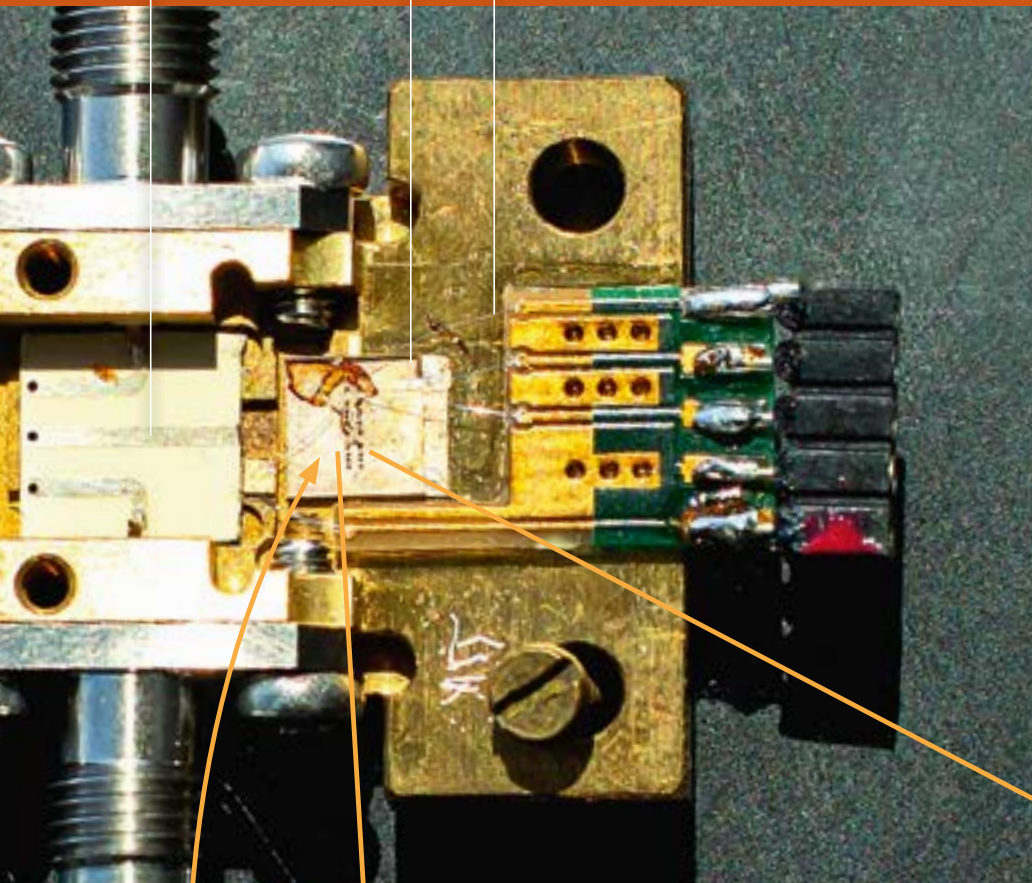
ankoppeln, sie damit manipulieren oder als Detektor verwenden. „Mich fasziniert dieses Gebiet“, sagt Eva Weig. „Es gehört noch zur Grundlagenforschung, aber erste Anwendungen spitzen schon raus. In zehn Jahren wird es die sicherlich geben.“

Bei derartigen praktischen Anwendungen zielt man im Prinzip immer auf die Wechselwirkung der Saite mit dem, was man messen möchte. Dabei hilft eine quantenmechanische Eigenschaft, die sie hat: Sie kann neben ihrem Grundzustand auch angeregte Energiezustände annehmen. Diese Zustände sind hier aber durch die Gesetze der Quantenmechanik genau festgelegt. So kann man die Saite durch die Kopplung mit einer Messgröße beispielsweise zwischen zwei Zuständen hin- und herspringen lassen, also genau die Eigenschaft, die man für einen Quantensensor benötigt. Das Team um Eva Weig hat zu diesem Zweck schon eine ganze Reihe von Testplattformen aufgebaut. „Unser Ziel ist tatsächlich ein Quantensensor, der bei Raumtemperatur arbeitet“, sagt die Forscherin. „Damit könnte man kleinste magnetische Felder detektieren oder auch Kräfte, vielleicht sogar Spin-Effekte.“

Demnächst wird der Lehrstuhl von Eva Weig in neue Labore auf dem Garching Forschungsgelände umziehen. Die derzeitigen sind für die Experimente nicht hundertprozentig geeignet, denn lassen sich nicht gut genug gegen äußere Einflüsse wie etwa Schwingungen abschirmen. Die Arbeiten gehen dann in viele Richtungen weiter: So wollen die Forschenden versuchen, den Grundzustand ihrer Systeme zu erreichen. Das ist bisher noch nicht gelungen, wäre aber für die Grundlagenforschung von großem Interesse. Eine weitere Forschungsrichtung zielt auf andere Formen, denn das Prinzip, mechanische Schwingungen als Quantenobjekt zu benutzen, funktioniert nicht nur mit einer Saite. Die Garchinger untersuchen auch Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die wie ein Grashalm auf einer Unterlage wachsen, oder Nanomembranen, die wie ein winziges Trommelfell aussehen, oder Säulenreihen im Nanoformat, deren Mini-Köpfchen gleichmäßig hin- und herschwingen. Was sich am Ende in der Praxis am besten bewährt, werden weitere Untersuchungen zeigen. ■

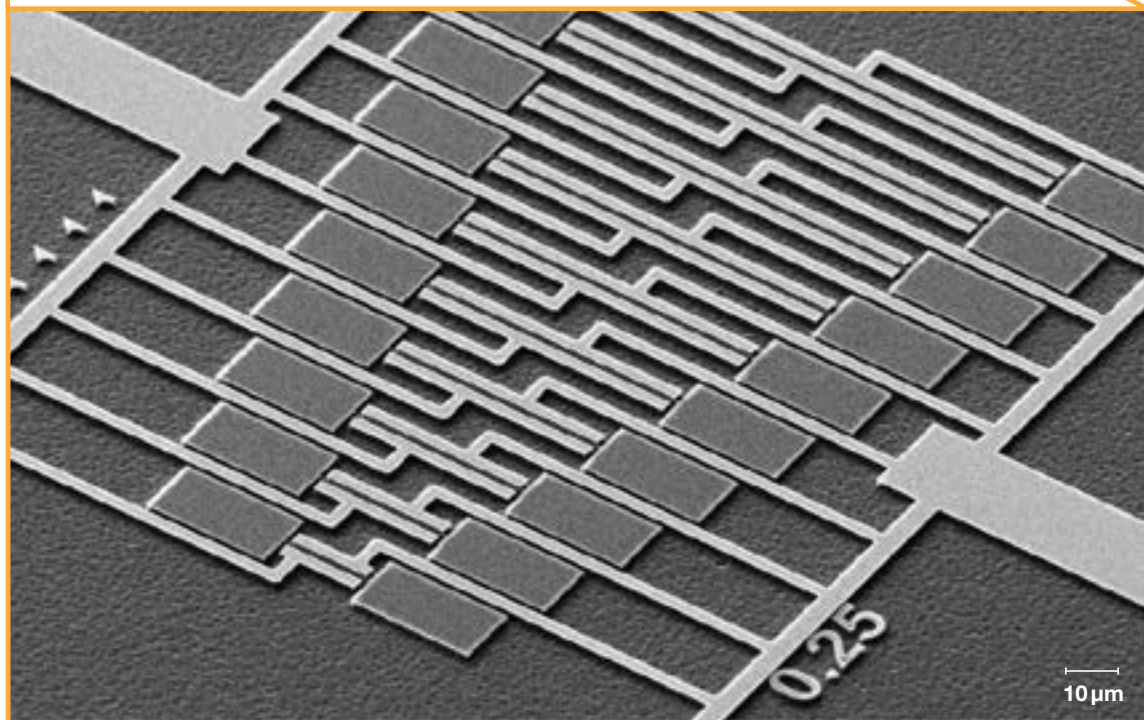
Brigitte Röthlein

Mikrowellenhohlraum Chip Bonddrähte



◁ **Integrierte Plattform zur Steuerung der Nanosaiten.** Der 5 x 5 mm große Chip mit den Nanosaiten befindet sich in der Mitte. Der Mikrowellenresonator links davon kontaktiert über Bonddrähte an die Goldelektroden, die ein elektrisches Feld um die Nanosaite erzeugen. Die Platine auf der rechten Seite stellt die Verbindung zum Messsystem her.

▽ **Der durchsichtige Chip** aus Keramik enthält ein Set mit 12 verschiedenen langen Nanosaiten. Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zeigt die Saiten, die sich jeweils zwischen zwei Goldelektroden befinden. Jede Saite lässt sich einzeln ansteuern und messen.



Autoren

Claudia Doyle ist Wissenschaftsjournalistin und schreibt hauptsächlich über Themen aus den Bereichen Medizin, Klimawandel und Ökologie. Ihre Geschichten sind in der „Süddeutschen Zeitung“, „Spiegel+“, der „Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung“ und zahlreichen Zeitschriften und Radiosendern erschienen. Sie ist Absolventin der Deutschen Journalistenschule in München und besitzt einen Masterabschluss in Journalismus sowie einen Bachelor in Biochemie. www.writingaboutscience.de

Jan Oliver Löffken studierte Physik, Geophysik und Journalismus in Aachen und Hamburg. Er forschte am Helmholtz Forschungszentrum DESY an Nanopartikeln. Danach wurde er Wissenschaftsredakteur bei der Tageszeitung „Die Welt“. 2001 gründete er die Nachrichtenagentur „Wissenschaft aktuell“. Gleichzeitig publiziert er Geschichten zu Energie, Grundlagenphysik, Klimathemen und Materialforschung in vielen Zeitschriften und Magazinen. www.wissenschaft-aktuell.de

Dr. Klaus Manhart ist freier Autor für IT und Wissenschaft. Er studierte Logik und Wissenschaftsphilosophie sowie Sozialwissenschaften an der LMU München. Nach seiner Doktorarbeit über „Modellierungsmethoden der Künstlichen Intelligenz in den Sozialwissenschaften“ arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der LMU und der Universität Leipzig auf den Gebieten Computersimulation, Spieltheorie und Künstliche Intelligenz. Seit 1999 arbeitet er als freier Autor in München. www.klaus-manhart.de

Sarah B. Puschmann ist Wissenschaftsjournalistin. Sie schreibt über Biologie, Ökologie und Weltraum für das European Molecular Biology Laboratory (EMBL), die European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), das Smithsonian, für Live Science und verschiedene Magazine. Sie hat einen Masterabschluss in Creative Writing und je einen Bachelor in Creative Writing und Physik. www.sarahpuschmann.com

Gitta Rohling M.Sc., M.A., arbeitet unter der Marke „Tech Talks“ als PR-Beraterin, Redakteurin und Texterin. Rund um Technologie, Wissenschaft und Innovation unterstützt sie Unternehmen und Organisationen bei ihrer gesamten Kommunikation. www.tech-talks.de

Dr. Brigitte Röthlein arbeitet seit vielen Jahren als Wissenschaftsjournalistin für Zeitungen, Zeitschriften und TV sowie als Buchautorin. Sie hat ein Diplom in Physik und promovierte in Kommunikationswissenschaft, Pädagogik und Geschichte der Naturwissenschaften. Ihr Hauptinteresse liegt in der Grundlagenforschung. Seit vielen Jahren beschäftigt sie sich mit Themen aus der Quantenphysik. Sie ist Autorin der Bücher „Die Quantenrevolution“ und „Schrödingers Katze“. Letzteres erschien 1999 und ist aktuell in der 15. Auflage erhältlich. www.roethlein-muenchen.de

Tim Schröder ist Wissenschaftsjournalist. Nach seiner Zeit als Redakteur für die Tageszeitung „Berliner Zeitung“ wurde er freier Autor in Oldenburg. Er schreibt regelmäßig Beiträge für die „Süddeutsche Zeitung“, die „Neue Züricher Zeitung“ und die Zeitschrift „Mare“. Er ist spezialisiert auf Grundlagen- und Angewandte Forschung und auf die Themen Energie und Umwelt. www.schroeder-tim.de

Dr. Larissa Tetsch hat in Bonn Biologie studiert und im Fach Mikrobiologie promoviert. Anschließend war sie an der LMU München in der Grundlagenforschung und später in der Mediziner Ausbildung tätig. Seit 2015 arbeitet sie als freie Wissenschafts- und Medizinjournalistin und betreut zusätzlich als verantwortliche Redakteurin das Wissenschaftsmagazin „Biologie in unserer Zeit“. www.larissatetsch.de

Dr. Eve Tsakiridou hat Philosophie und Biologie studiert und im Bereich Hirnforschung promoviert. Das journalistische Handwerkzeug hat sie bei der Westdeutschen Allgemeinen Zeitung gelernt. Sie arbeitet als Autorin und Podcasterin mit den Schwerpunkten Technologie und Wissenschaft. Dabei interessiert sie vor allem, welche Auswirkungen technologische Fortschritte auf Mensch und Gesellschaft haben. www.explainingscience.info



©2023 für alle Beiträge Technische Universität München, Corporate Communications Center, 80290 München. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Aufnahme in Onlinedienste und Internet, Vervielfältigung auf Datenträgern nur mit ausdrücklicher Nennung der Quelle: „Faszination Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München“.

Impressum

Faszination Forschung

Das Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München, gefördert durch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder

Herausgeber

Prof. Thomas F. Hofmann,
Präsident der Technischen Universität München

Redakteurinnen

Dr. Jeanne Rubner (verantwortlich), Dr. Christine Rüth, Tina Heun-Rattei

Bildredakteurin

Andrea Klee

Übersetzung und Lektorat

Baker&Company, München

Design und Layout

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Autorinnen und Autoren in dieser Ausgabe

Claudia Doyle, Jan Oliver Löffken, Dr. Klaus Manhart,
Sarah B. Puschmann, Gitta Rohling, Dr. Brigitte Röthlein,
Tim Schröder, Dr. Larissa Tetsch, Dr. Eve Tsakiridou

Fotografen

Kats David, Juli Eberle, Astrid Eckert, ediundsepp, Magdalena Jooss,
Patrick Reimers, João M. Rosa, Stephan Rumpf, Stefan Woidig

Redaktionsanschrift

Technische Universität München
Corporate Communications Center
80290 München

Webseite

www.tum.de/faszination-forschung

E-Mail

faszination-forschung@zv.tum.de

Druck

Druckerei Joh. Walch GmbH & Co. KG, Augsburg

Auflage

71.500

ISSN: 1865-3022

Erscheinungsweise

Zweimal jährlich

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe

September 2023

Titelfoto

Stefan Woidig/TUM

Sprachgebrauch

Nach Artikel 3 Abs. 2 des Grundgesetzes sind Frauen und Männer gleichberechtigt. Alle Personen- und Funktionsbezeichnungen im Magazin beziehen sich in gleicher Weise auf Frauen und Männer.



Die TUM Innovation Networks werden gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Freistaat Bayern im Rahmen der Exzellenzstrategie von Bund und Ländern.

Gefördert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

