

Faszination Forschung

Forschungshighlights der TUM

Technische Universität München

Das Wissenschaftsmagazin

März 2024 | Edition 31



Kreislaufwirtschaft: Zu schade zum Wegwerfen

Erdsystemmodellierung – Wird unser Klima plötzlich kippen?

Künstliche Intelligenz – Wie medizinische KI vertrauenswürdig wird

Klimaneutralität – Wie schaffen wir die Wärmewende?

ISSN 18653022



9 771865 302004

Schutzgebühr
EUR 9,00

WE WALK THE TALK

TUM Sustainability Day
am 12. Juni 2024



www.tum.de/nachhaltigkeit

Mit der **TUM Sustainable Futures Strategy 2030** machen wir unsere Universität zur Gestalterin einer nachhaltigen Entwicklung – wissenschaftlich, ökonomisch, ökologisch und sozial. Das geht nur gemeinsam. Mit dem **TUM Sustainability Day** laden wir Sie ein, die

Vielfalt der Nachhaltigkeitsthemen und Aktivitäten der TUM zu erleben. Lassen Sie sich inspirieren. Vernetzen und engagieren Sie sich. **Forschungscampus Garching, Gebäude Maschinenwesen, Boltzmannstraße 15, Beginn: 12:00 Uhr**

Liebe Leserinnen und Leser

Kennen Sie das Bild „Earthrise“ von William Anders? Der Astronaut hat es während der Apollo 8 Mission 1968 aufgenommen und es zeigt unseren Planeten, von der Sonne beschienen, schwebend im All. Für mich symbolisiert das Foto auch, wie fragil unsere Erde ist. Die Herausforderungen durch den Klimawandel und einen Raubbau an Ressourcen nehmen zu – wir brauchen Lösungen, um unseren wirtschaftlichen Wohlstand zu erhalten und gleichzeitig ökologische Grenzen und soziale Gerechtigkeit zu wahren.

Die Lebensgrundlagen für zukünftige Generationen zu erhalten – daran arbeiten zahlreiche Forscherinnen und Forscher der TUM. Einige von ihnen und ihre Arbeit stehen im Mittelpunkt dieses Heftes, das sich unter anderem der Circular Economy widmet. Nehmen, Herstellen, Verbrauchen, Entsorgen – auf diesem linearen Wachstumsmodell basiert unsere heutige Wirtschaft. Das Konzept der Circular Economy oder Kreislaufwirtschaft bietet einen ressourcenschonenden Gegenentwurf, welcher das „End-of-Life“-Konzept durch die Reduzierung, alternative Wiederverwendung, das Recycling, die Rückgewinnung und die Rückführung von Materialien in Produktions-, Verteilungs- und Konsumprozessen ersetzt. Unsere Kompetenzen zu diesem Thema bündelt über alle Fachrichtungen hinweg das TUM Mission Network CirculaTUM, und es ist für mich deshalb ganz zentral für unsere Innovationsagenda. Magnus Fröhling und Johannes Fottner haben CirculaTUM federführend gegründet, beide stellen wir Ihnen vor. Für eine nachhaltige Zukunft ist auch eine Energieversorgung ohne fossile Brennstoffe wesentlich. Europa möchte 2050 der erste klimaneutrale Kontinent sein – Wissenschaftler berichten über ihre Forschungen und wie sich das Ziel erreichen lässt. Zum Beispiel spricht Kai Zosseder über das Potenzial von Geothermie. Thomas Hamacher betrachtet das gesamte Energiesystem und Christian Hepf untersucht, was digitale Lösungen beitragen können.

Als deutsche Flaggschiffuniversität wollen wir aber nicht nur an nachhaltigen Innovationen forschen, sondern uns selbst nachhaltig transformieren. Deswegen habe ich einen Vizepräsidenten für nachhaltige Transformation ernannt: Werner Lang, ein international anerkannter Experte für nachhaltiges Bauen. Er ist überzeugt, dass interdisziplinäre Forschung ein wichtiger Schlüssel für un-



sere Nachhaltigkeit ist, und er erklärt in diesem Heft, wie gut die TUM mit ihren Schools dafür aufgestellt ist. Nicht zuletzt laden Werner Lang und ich Sie alle herzlich ein zu unserem TUM Sustainability Day am 12. Juni 2024. Dort können Sie mehr über unsere TUM Sustainable Futures Strategy 2030 erfahren und sich selbst engagieren.

Nun lasse ich Sie eintauchen in die Welt unserer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und wünsche Ihnen viel Vergnügen, Inspiration und neue Eindrücke beim Lesen!

Ihr

Thomas F. Hofmann
Präsident

Seite 06

Wann gibt es keinen Weg mehr zurück?



Inhalt

06 Wann gibt es keinen Weg mehr zurück?

Klimamodelle können zeigen, wie sich klimatische Veränderungen oft über Jahre hinweg kontinuierlich aufbauen und zu einem Kipppunkt führen, der unumkehrbar sein kann. Niklas Boers und sein Team untersuchen, welche Parameter für solche Kipppunkte besonders relevant sind.

18 Bauen mit Hopfen

Das Start-up HopfON will aus Hopfenabfällen wiederverwertbare, klimafreundliche Baustoffe herstellen.

20 Kreislaufwirtschaft: Zu schade zum Wegwerfen

Zirkuläre Strategien sollen nachhaltige Stoff- und Produktkreisläufe schaffen. Magnus Fröhling und Johannes Fottner entwickeln Methoden, um kritische Faktoren für die Umsetzung etwa in der Automobilbranche zu analysieren und zu identifizieren.

32 Quantensensoren für Kernspintomografie

Ein Forscherteam unter Leitung der TUM hat einen Quantensensor aus Diamant entwickelt, mit dem sich die Auflösung in der magnetischen Bildgebung verbessern lässt.

34 Wie medizinische KI vertrauenswürdig wird

KI-Systeme in der Medizin müssen besonders vertrauenswürdig sein. Daniel Rückert und sein Forschungsteam konnten zeigen, wie Patientendaten beim Training von Algorithmen mit mathematischen Garantien zuverlässig geschützt werden können.

Seite 34

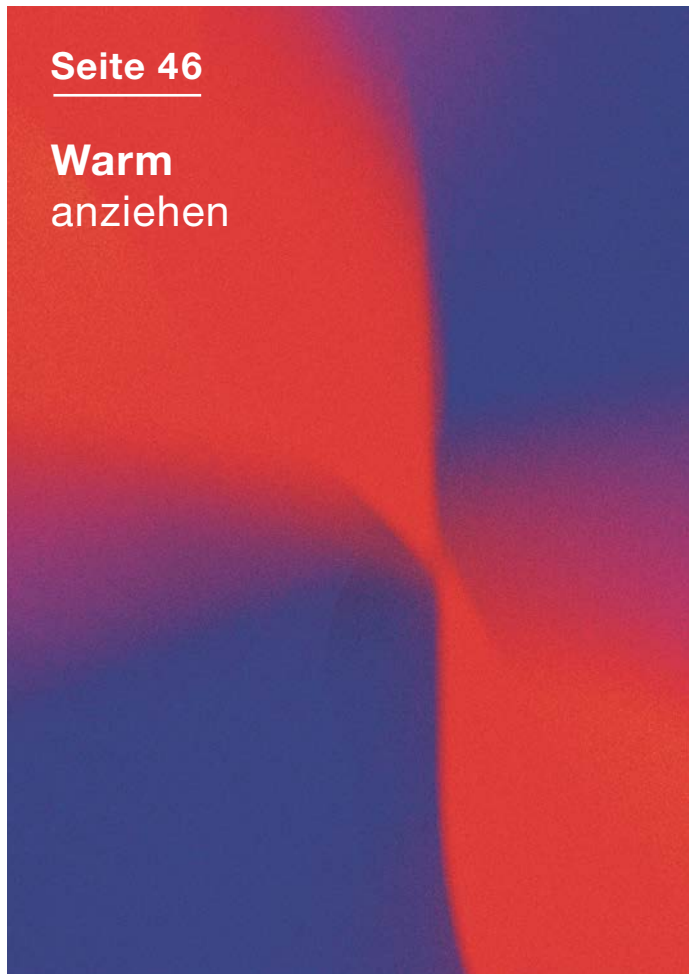
Wie medizinische KI vertrauenswürdig wird



Bildquellen: Magdalena Jooss, Juli Eberle

Seite 46

Warm anziehen



44 Proteine für Singapur

Singapur will bis 2030 ein Drittel seines Nahrungsmittelbedarfs vor Ort produzieren. TUM-Forscher helfen dabei, proteinreiche Lebensmittel auf Algenbasis zu entwickeln, die wie Hühnchen schmecken und eine ähnliche Textur und Konsistenz haben.

46 Warm anziehen

TUM-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler erforschen Strategien und Technologien, mit denen die Wärmewende gelingen kann – vom einzelnen Gebäude bis zu Kooperationen mit Kommunen, vom Ausbau der Geothermie bis zur Einführung digitaler Lösungen.

61 Wie kann Forschung die Transformation zur Nachhaltigkeit voranbringen?

Wir fragen den Vizepräsidenten für Sustainable Transformation der TUM, Werner Lang, wie Forschung dabei unterstützen kann, Lösungen für mehr Nachhaltigkeit in die Praxis umzusetzen.

In jeder Ausgabe

- 03 Editorial
- 66 Autoren
- 66 Impressum

E	Hier finden Sie die englische Ausgabe als PDF	www.tum.de/faszination-forschung
---	---	--

Wann gibt es keinen Weg mehr zurück?

Wird unser Klima plötzlich kippen, wenn wir so weitermachen wie bisher? Und wenn ja, wann und wie schnell? Welche Folgen würde das haben? Niklas Boers, Professor für Erdsystemmodellierung an der TUM, und sein Team suchen darauf Antworten. Mit mathematischen Methoden beschreiben sie, wie das Klima unserer Erde funktioniert. Sie testen ihre Modelle an Daten aus der Vergangenheit und versuchen damit Prognosen zu erstellen. Der TUM-Mathematiker Prof. Christian Kuehn sorgt dafür, dass das Ganze auch theoretisch auf verlässlichen Beinen steht.

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

How Close is the Point of No Return?

E

The search for climatic tipping points: Participating in the European TiPES project, Niklas Boers, Professor of Earth System Modeling at TUM, is applying mathematical methods with his team to describe how our planet's climate works. The researchers use past climate data to test their models and endeavor to produce forecasts. Tipping points at which abrupt changes occur in the climate system are a particular focus of their research. TUM mathematician Prof. Christian Kuehn also ensures that the entire project is on a sound theoretical footing.

Our Earth's climate system is not the only possible stable state: instead, there may be different variants, such as warm and cold states. Between these states, there are tipping points at which the climate can transform relatively swiftly from one state to another. While paleontologists have found indications of this, geological findings have proven that the Earth has alternated between warm phases and ice ages many times.

In mathematical terms, tipping points are critical thresholds; exceeding these thresholds triggers an abrupt, lasting transformation in the state or development of a system. □

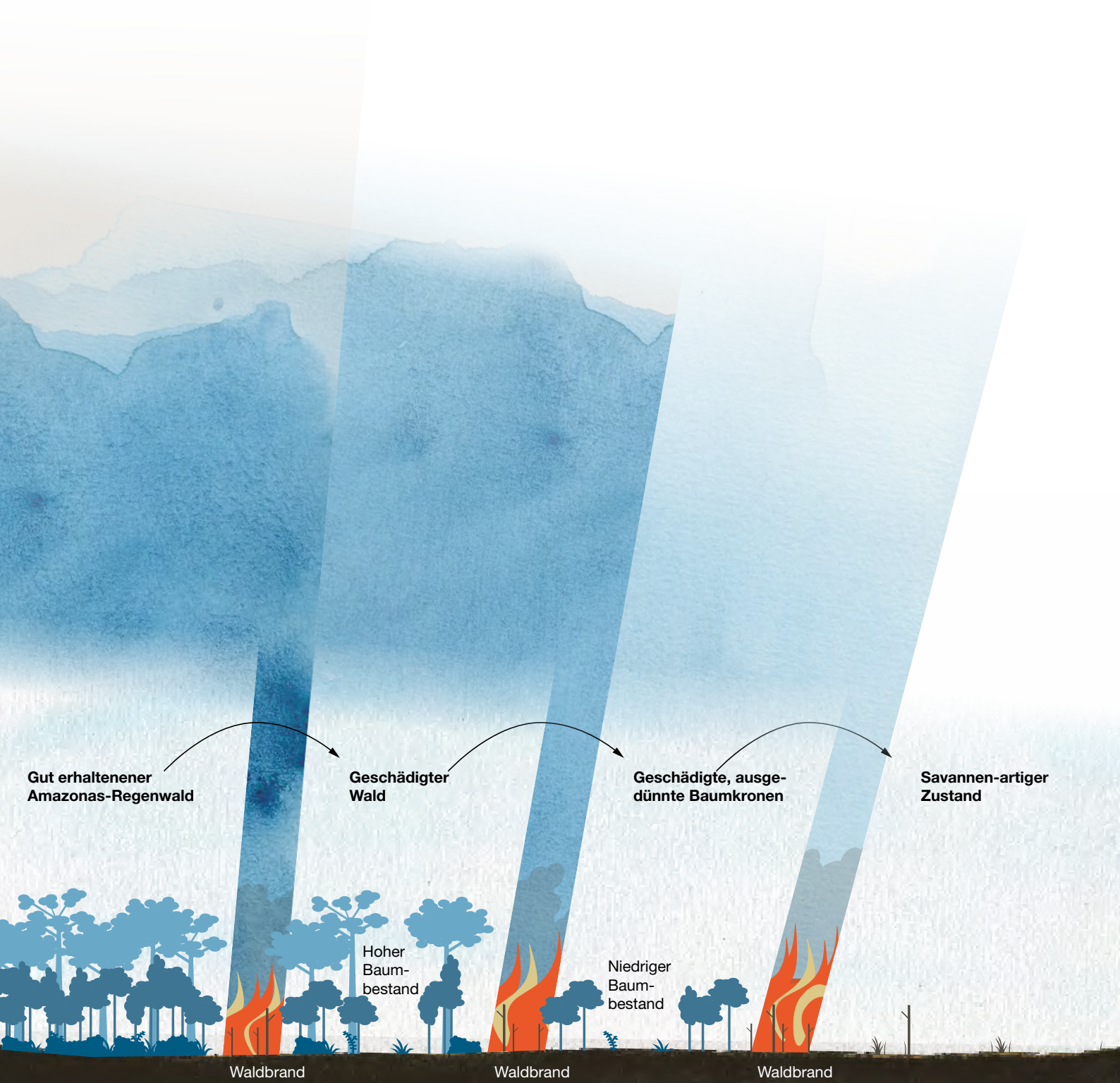


Link

www.asg.ed.tum.de/esm

www.tipes.dk/

www.math.cit.tum.de/math/personen/professuren/kuehn-christian/



Wenn der Wissenschaft vorgeworfen wird, sie sitze im Elfenbeinturm und habe keinen Bezug zur realen Welt, dann ist Niklas Boers das perfekte Gegenbeispiel. Er verbindet Mathematik und theoretische Physik mit Fragen, die heute an Relevanz kaum zu übertreffen sind: Er und seine Leute untersuchen, wie sich das Klimasystem unserer Erde in Zukunft entwickeln wird.

Der heute 39-jährige Mathematiker und theoretische Physiker Niklas Boers hatte irgendwann keine Freude mehr an der rein theoretischen Arbeit und suchte sich deshalb für seine Doktorarbeit ein Gebiet, das praktische Relevanz hat: „So kam ich zur Klimamodellierung.“ Heute ist er einer der führenden Forscher auf diesem Gebiet, und er hat ein extrem spannendes Thema im Visier, das die Zukunft der ganzen Menschheit betrifft: Kipppunkte im Klimasystem. Dazu hat er unter anderem das Großprojekt TiPES ins Leben gerufen, bei dem 18 Universitäten und Forschungslabors aus zehn europäischen Ländern zusammenarbeiten. Am 1. März 2024 startete das Folgeprojekt ClimTip, das er von der TUM aus koordiniert.

Das Kippen des Regenwalds in einen savannenartigen Zustand ist ein iterativer, mit positiven Rückkopplungen verbundener Prozess. Abholzung und Schädigung der Wälder reduzieren den Feuchtegehalt im System und erhöhen die Wahrscheinlichkeit für Brände. Feuer wiederum dünnt die Unterholzvegetation aus, der Boden wird trockener, was die Bildung neuer Feuer begünstigt usw.

Der Regenwald ist in Gefahr

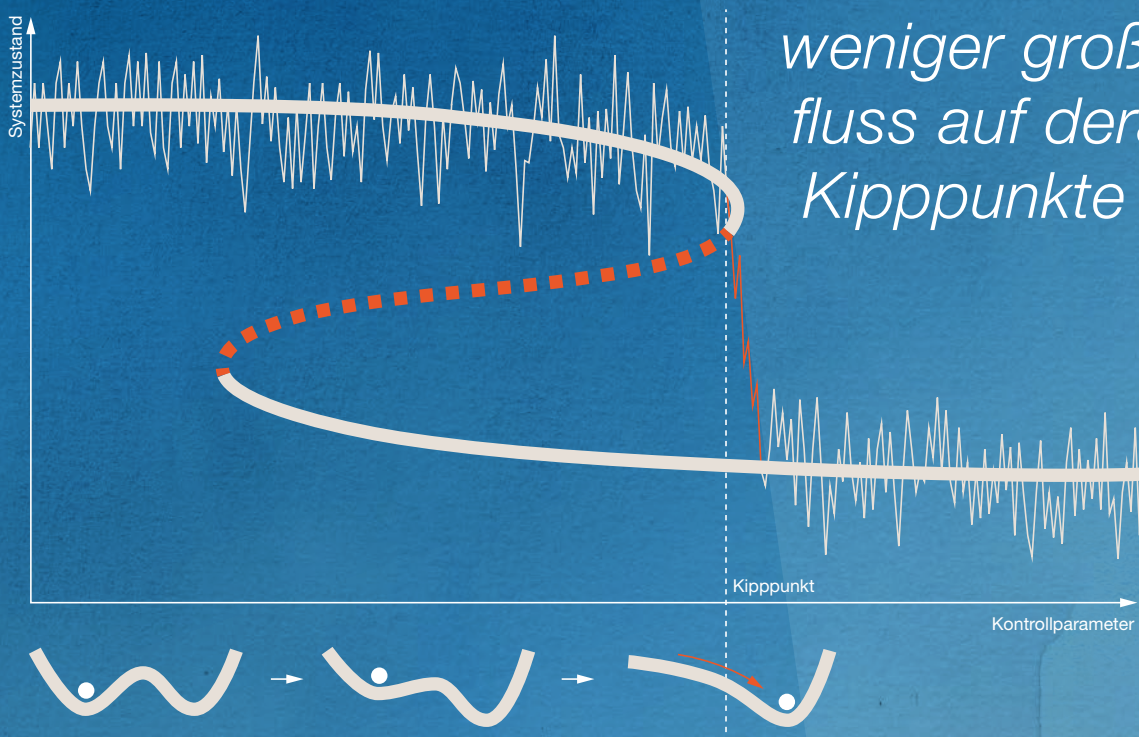
„Die Idee zu TiPES entstand 2015 in meiner Zeit als Postdoc an der Ecole Normale Supérieure in Paris bei Michael Ghil“, sagt Boers. Der israelisch-amerikanische Mathematiker und Physiker Ghil gilt als einer der Väter der theoretischen Klimadynamik. Er verstand es bereits Ende der 70er Jahre, mathematische Modelle für Luft- und Wasserströmungen zu entwickeln, die die wichtigsten Klimaphänomene beschreiben, und im Lauf der Jahrzehnte verfeinerte er sie immer mehr. Dabei wandte er Instrumente der modernsten Mathematik an. Bei seinen Berechnungen erkannte er, dass das Klimasystem unserer Erde nicht das einzig mögliche stabile ist, sondern dass es unterschiedliche Varianten geben kann, zum Beispiel warme und kalte Zustände. Dazwischen gibt es Kipppunkte, an denen das Klima relativ schnell von einem in den anderen Zustand wechseln kann. Paläontologen hatten so etwas schon vermutet, weisen doch geologische Befunde darauf hin, dass sich früher warme Phasen und Eiszeiten mehrfach abwechselten. Mathematisch gesprochen, stellen Kipppunkte oder englisch Tipping Points kritische Schwellenwerte dar, deren Überschreiten den Zustand oder die Entwicklung eines Systems abrupt und nachhaltig verändert.

Ein besonders einleuchtendes Beispiel, das heute von großer Aktualität ist, ist die Abholzung des Regenwaldes: In diesem Ökosystem zirkuliert viel Wasser und wird zwischen Atmosphäre und Regenwald ausgetauscht, was zu ausgiebigen Regenfällen führt. Roden die Menschen immer größere Flächen, vermindern sich die Wassertransporte durch die Luft, und es wird irgendwann ein Kipppunkt erreicht, an dem das Ökosystem insgesamt austrocknet und damit unaufhaltsam zusammenbricht – mit schwerwiegenden Folgen für die gesamte Flora und Fauna, aber auch für das Weltklima. Ein solches Kippen könnte innerhalb weniger Jahrzehnte passieren.

Genau solche Tipping Points zu erforschen und nach Möglichkeit vorherzusagen ist das Ziel der EU-Horizon-Projekte TiPES und ClimTip. In mühsamer Kleinarbeit gewann Boers die wichtigsten einschlägigen Forscherinnen und Forscher Europas zu dieser Zusammenarbeit. „Das ist wie ein großes Mosaik. Jeder macht das, was er am besten kann, wir tauschen uns intensiv untereinander aus und fügen am Ende alles zusammen“, so Boers als stellvertretender Koordinator von TiPES. Das Projekt wurde mit 8,5 Millionen Euro gefördert und ging am 29. Februar 2024 nach viereinhalb Jahren zu Ende. ClimTip wird sogar noch etwas umfangreicher sein, Niklas Boers wird es koordinieren. ▶

„Wir erforschen, welche Parameter man in den Simulationen besonders berücksichtigen muss und welche weniger großen Einfluss auf derartige Kippunkte haben.“

Christian Kuehn



Ein sehr einfaches Beispiel für einen Kippunkt ist das Verhalten einer Kugel in einem Potenzialtopf. So lange die Wände dieses Topfes noch relativ steil sind, wird die Kugel nach einer Auslenkung immer wieder zu ihrem Ausgangspunkt zurückrollen. Verändert sich ein Systemparameter so, dass die Wände flacher werden, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Kugel aus dem Potenzialtopf herausrollt und in einen benachbarten Topf fällt, aus dem sie nicht mehr zurück kann. Damit hätte sie einen Kippunkt überschritten. Selbst wenn man die Systemparameter zurücksetzt und so den ursprünglichen Topf wieder herstellen würde, bliebe die Kugel in ihrem neuen Zustand. Mathematisch nennt man dieses Verhalten Bifurkation, und der Wert des Kontrollparameters, an dem das System in einen anderen Zustand springt, ist der Bifurkations- oder Kippunkt. Klimamodellierer versuchen nun herauszufinden, ob man in den Klimamessungen derartige Abflachungen vor einem möglichen Kippunkt bereits beobachten kann.

Welche Daten sind wichtig, welche nicht?

Klimamodelle sind extrem komplexe Gebilde, die die Grenzen der verfügbaren Computerpower ausreizen. So rechnen die Forscherinnen und Forscher ihre Modelle auf den leistungsfähigsten Großrechnern der Welt, und manche benötigen monatelange Rechenzeit. Die Ergebnisse können zeigen, wie klimatische Veränderungen, die zum Beispiel oft jahrelang kontinuierlich ansteigen, sich plötzlich aufschaukeln und zu einem Kipppunkt führen, der womöglich unumkehrbar ist. In der Physik und Mathematik wird in diesem Kontext von Feedbacks und nichtlinearer Dynamik gesprochen, die daraus resultierenden „Bifurkationen“ sind ein mathematisches Konzept, um abrupte Übergänge im Erdsystem zu beschreiben.

Wahrscheinlichkeitsrechnung trifft nichtlineare Dynamik

Christian Kuehn untersucht auf theoretische Art und Weise, wie zuverlässig Klimamodelle sein können: „Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Arten, die Welt mathematisch zu betrachten.“

Entweder man verfolgt die physikalischen Vorgänge entlang ihrer deterministischen Gesetzmäßigkeiten und erhält so bestimmte Werte, die dann aber aufgrund vieler Störungen durch äußere Einflüsse gewisse Unsicherheiten haben (Rauschen). Diese können sich addieren oder auslöschen. Man muss deshalb bei jedem Ergebnis im Auge behalten, welche Unsicherheit es beinhaltet.

Oder man betrachtet alle Vorgänge als Wahrscheinlichkeiten, wie etwa einen Würfel, der zufällig Zahlen anzeigt. Auch aus deren Zusammenspiel kann man bestimmte Gesetzmäßigkeiten ableiten, und hier muss man beim Ergebnis die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der es eintritt. So können bestimmte Kipppunkte sehr unwahrscheinlich sein, aber wenn sie eintreten, katastrophale Folgen haben (high impact, low probability).

„Die Wahrheit liegt zwischen den beiden Sichtweisen“, sagt Christian Kuehn und entwickelt deshalb eine Kombination aus nichtlinearer Dynamik und Wahrscheinlichkeitstheorie, um Modelle robuster zu machen.

Um derartig komplexe Sachverhalte überhaupt auf dem Computer simulieren zu können, muss man viele Vereinfachungen treffen. Und hier tauchen sofort grundlegende Fragen auf: „Darf man das? Funktioniert das? Wie wirkt sich das aus?“ Um sicherzustellen, dass derartige Computermodelle auch mathematisch seriös sind und die Wirklichkeit möglichst gut beschreiben und nicht nur künstliche Effekte produzieren, kooperiert Niklas Boers mit Christian Kuehn, 41. Der Mathematiker leitet seit 2016 – nach Stationen an verschiedenen renommierten mathematischen Forschungsinstituten wie der University of Cambridge in England und der Cornell University (USA) – an der TUM die Professur für „Mehrskaligkeit und Stochastische Dynamik“. Seine Erkenntnisse wendet er auch auf viele praktische Bereiche an, etwa auf Neurowissenschaften, Epidemiologie, Meinungsbildung, Fluidmechanik oder medizinische Fragen. 2011 kam Kuehn mit dem Thema Klimamodellierung in Kontakt und fand das Thema so faszinierend, dass er sich näher damit befasste. Boers und Kuehn trafen sich 2016 auf einer Tagung, und seit 2017 arbeiten sie eng zusammen. Kuehn und sein Team entwickeln auf rein theoretischem Wege Regeln und Prüfmechanismen, die sicherstellen, dass bei solchen Modellierungen keine unsinnigen Ergebnisse entstehen. „Wir erforschen, welche Parameter man in den Simulationen besonders berücksichtigen muss und welche weniger großen Einfluss auf derartige Kipppunkte haben“, sagt Kuehn. „Insgesamt versuchen wir, eine Art Werkzeugkasten für die Klimamodellierer zu erstellen, aus dem sie sich je nach ihren Voraussetzungen und Zielen die richtigen Verfahren herauspicken können.“ Denn es gibt ganz unterschiedliche Herangehensweisen, die für einzelne Fragestellungen mal besser, mal schlechter geeignet sind. ▶

Klimasysteme, die in Gefahr sind zu kippen:

TiPES und ClimTip untersuchen eine ganze Reihe von Tipping Points im Klimasystem der Erde. Derartige Kippunkte werden vom Menschen beeinflusst, unter anderem durch die Erderwärmung. Hier vier Beispiele:

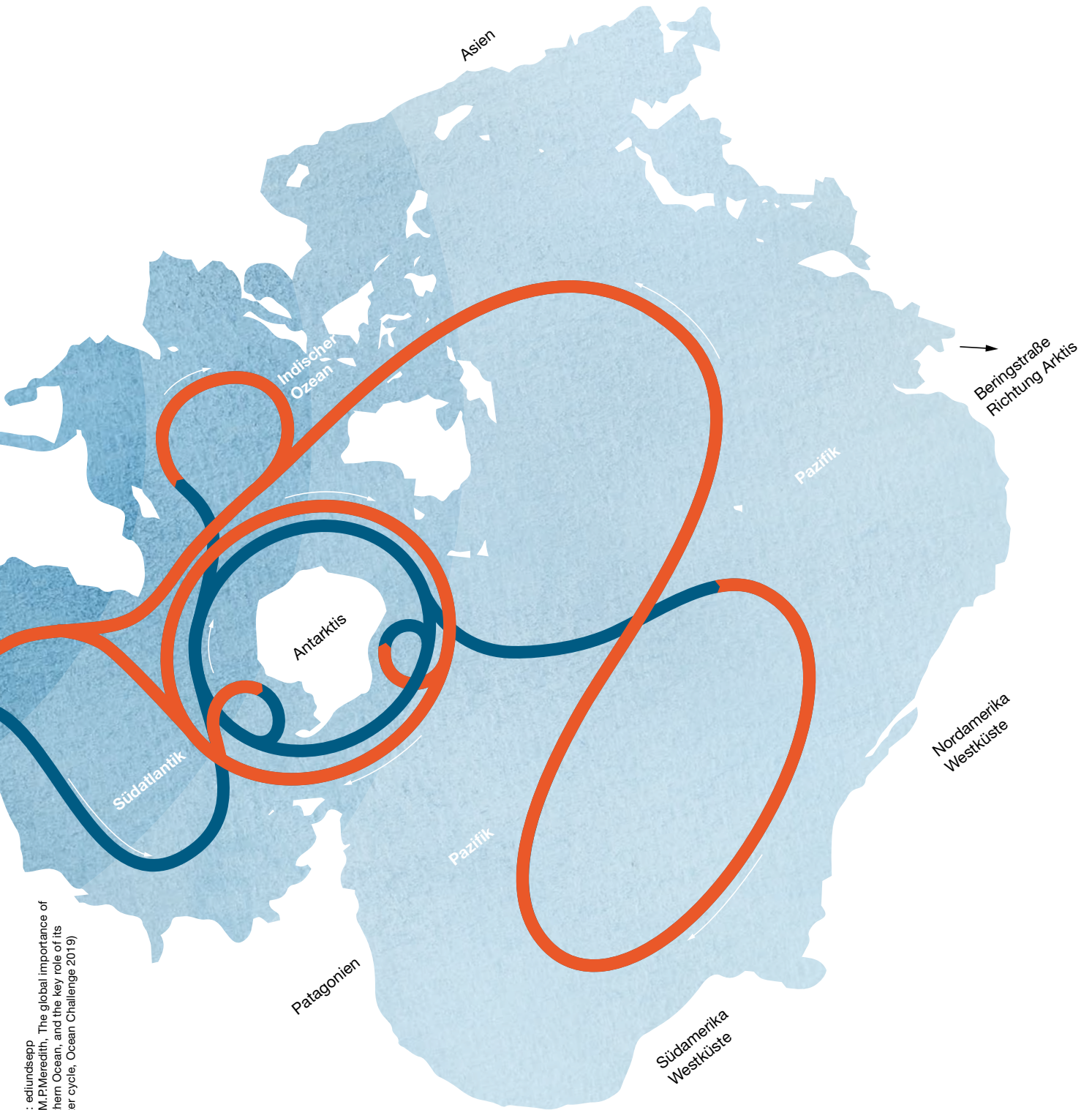
1 Wenn die obersten, weißen Schichten **des Eisschildes in Grönland** schmelzen, kommt dunkleres Eis an die Oberfläche. Dieses absorbiert immer mehr Sonnenwärme, gleichzeitig wird der Eisschild niedriger, und auf dieser geringeren Höhe ist es auch wärmer. Beides verstärkt das Abschmelzen; die Effekte schaukeln sich auf, bis sie nicht mehr reversibel sind. „In einer Studie konnte ich zeigen, dass ein Teil des Grönlandeisschildes im Lauf des letzten Jahrhunderts bereits an Stabilität verloren hat“, sagt Niklas Boers.

2 Eine Ozeanströmung, die **Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)**, fließt im Atlantik an der Meeresoberfläche von Süden nach Norden, sie wird getrieben durch Dichteunterschiede. Da auf dem Weg stetig ein Teil des Wassers verdunstet, vergrößert sich der Salzgehalt der Strömung immer weiter. Das warme, salzhaltige Wasser kommt im Nordatlantik an und kühlt dort ab. Dieses dann sehr kalte, salzige Wasser ist so schwer, dass es in die Tiefe absinkt. Das ist der Motor für die Ozeanzirkulation. Je mehr Salz durch die Strömung nach Norden transportiert wird, desto stärker ist dieser Motor. Leider gilt aber auch: Je mehr Süßwasser etwa durch Eisschmelze in Grönland in den nördlichen Atlantik kommt, desto schwächer kann die Zirkulation werden. Sollte die AMOC einen Kippunkt überschreiten, hat das weitreichende Auswirkungen auf das globale Klima. Ganz konkret würde es beispielsweise zu einer deutlichen Absenkung der durchschnittlichen Temperatur vor allem im nördlichen Europa führen.

3 Das Kippen der AMOC würde auch zu massiven Veränderungen in den **tropischen Monsunsystemen** führen. Diese könnten in Folge eines AMOC-Kollapses innerhalb kurzer Zeit kippen, was den Menschen kaum Zeit ließe, sich anzupassen.

4 Die Abholzung des **Regenwaldes**: In diesem Ökosystem zirkuliert Wasser, was zu Regenfällen führt. Roden die Menschen immer größere Flächen des Regenwaldes, vermindern sich die Wassertransporte durch die Luft, und es wird irgendwann ein Kippunkt erreicht, an dem das Ökosystem innerhalb weniger Jahre austrocknet und damit zusammenbricht – mit schwerwiegenden Folgen für die gesamte Flora und Fauna, aber auch für das Weltklima.

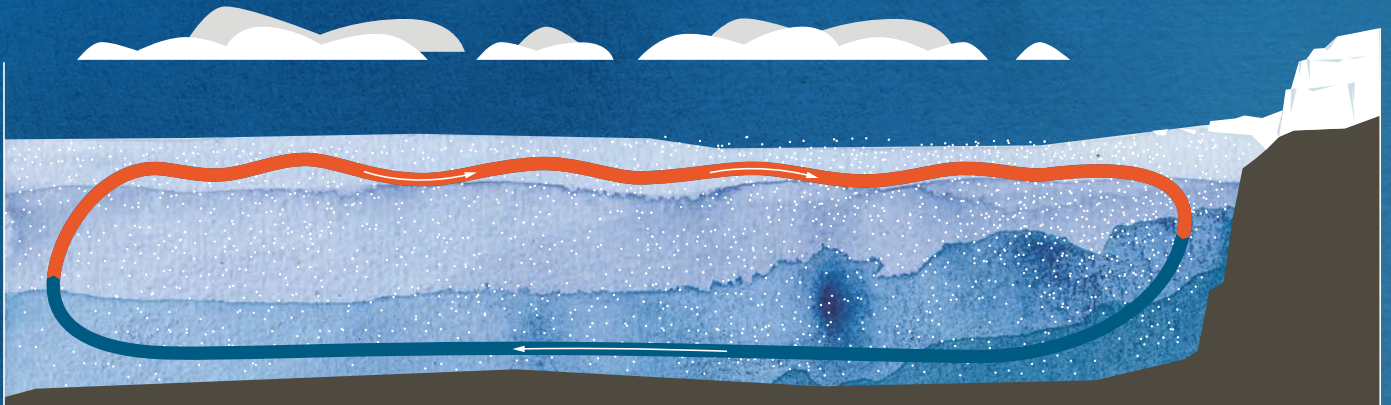




Grafiken: edlundsepp
(Quelle: M.P.Meredith, The global importance of the Southern Ocean, and the key role of its freshwater cycle, Ocean Challenge 2019)



Warmes, salzhaltiges Wasser strömt nach Norden und kühlt nahe der Eisschelfe ab. Das kalte und salzhaltige (und daher schwere) Wasser sinkt in die Tiefe und strömt nach Süden.



Der schmelzende Eisschild verdünnt das salzhaltige Oberflächenwasser. Es wird leichter und die Zirkulation wird schwächer.



Irgendwann stoppt die thermohaline Zirkulation. Die nördliche Hemisphäre wird kühler und trockener.

Das Grönlandeis schmilzt ab

Eine Frage, die Niklas Boers und Christian Kuehn besonders intensiv untersucht haben, sind die Wärmeströmungen im Nordatlantik. Hier wirken mehrere Effekte zusammen: Erstens die Winde, die große Wassermassen vor sich her treiben, zweitens die Temperatur, denn die nach Norden strömenden Wassermassen kühlen sich ab und werden so schwerer, und drittens der Salzgehalt des Wassers, denn mehr Salz macht das Wasser noch schwerer. Im Nordatlantik angekommen, sinken diese schweren Wassermassen in die Tiefe des Ozeans. Betrachtet man das Zusammenspiel dieser zum Teil gegenläufigen Effekte, erkennt man, dass es im Atlantik eine riesige Ozeanströmung gibt, die „Atlantic Meridional Overturning Circulation“ (AMOC). Sie ist hauptsächlich verantwortlich für die gemäßigten Temperaturen auf unserem Kontinent.

Wenn nun jedoch das Grönlandeis – auch wegen der Erderwärmung – zunehmend abschmilzt, gerät an ihrem Nordende immer mehr leichtes Frischwasser in die Strömung, was das Gesamtsystem verlangsamt. Boers und sein Team haben sich nun gefragt, wie lange das noch gehen kann, bevor es umkippt. „Der aktuelle Strömungszustand ist laut Studien der schwächste seit mindestens 1500 Jahren“, sagt Boers. „Wir wollten nun herausfinden, ob es sich um ein rein lineares Abschwächen oder um eine Destabilisierung in Richtung eines kritischen Punktes handelt. An diesem Kipppunkt würde die Strömung abrupt deutlich schwächer. Wir fanden heraus, dass wir uns tatsächlich in Richtung eines potentiellen Kipppunktes bewegen.“

„Der aktuelle Strömungszustand ist laut Studien der schwächste seit mindestens 1500 Jahren. Wir wollten nun herausfinden, ob es sich um ein rein lineares Abschwächen oder um eine Destabilisierung in Richtung eines kritischen Punktes handelt.“

Niklas Boers

Sollte dieser überschritten werden, hätte das weitreichende Auswirkungen auf das globale Klima. Ganz konkret würde es zu einer deutlichen Abkühlung und Austrocknung der nördlichen Hemisphäre führen, aber auch zu Veränderungen in den tropischen Monsunsystemen sowie zu einem regionalen Anstieg des Meeresspiegels. Wann dieser Punkt allerdings auftreten wird, ist noch ungewiss, und die Wissenschaft ist sich darüber uneinig. Manche glauben, es könnte schon in den nächsten Jahren passieren, Niklas Boers hingegen meint eher, dass die AMOC die nächsten Jahrzehnte noch stabil bleibt.

Ihm ist es wichtig, diese und andere Erkenntnisse in die aktuellen Diskussionen über die Klimakrise einzubringen. „Manchmal schreiben mir Menschen, die regelrecht verzweifelt sind, weil sie glauben, es gibt einen Domino-Effekt der Kippunkte und wir rasen unaufhaltsam in eine Klimakatastrophe“, sagt er. „Ich versuche sie dann zu beruhigen und ihnen zu erklären, dass wir durchaus noch die Chance haben, die gefährlichsten Folgen des anthropogenen Klimawandels zu vermeiden.“ Überhaupt versucht er, auch im Sinne der TUM Sustainable Futures Strategy 2030, seine Erkenntnisse unter die Leute zu bringen. Zugleich freut er sich auf die anstehenden wissenschaftlichen Herausforderungen. „Zum Beispiel müssen wir besser darin werden, zu berechnen, wie resilient ein reales System ist, also wie gut es in der Lage ist, Störungen auszuhalten. An dieser Frage forschen wir ebenfalls und erhoffen uns auch von Christian Kuehn dazu neue mathematische Erkenntnisse.“ ■ *Brigitte Röhlein*



Bildnachweis: Magdalena Jooss

Prof. Niklas Boers

1983 in Norddeutschland geboren, zog es ihn zum Studium der Physik und Mathematik nach München, auch der nahen Berge wegen. Danach folgten die Promotion in Berlin, Forschungsaufenthalte am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, an der Ecole Normale Supérieure in Paris und am Imperial College London. 2021 wurde Boers an die TUM berufen, was ihn wegen der Alpennähe besonders freute. Er ist politisch sehr engagiert, vor allem, wenn es um Klimafragen geht. Was ihn antreibt ist, dass er der nächsten Generation eine lebenswerte Erde hinterlassen will.



Mehr über Nachhaltigkeit an der TUM:

www.tum.de/en/about-tum/goals-and-values/sustainability



Bildnachweis: beeresfotografie

Voneinander lernen, miteinander wachsen.



Bei TUM Mentoring begleiten Alumni Studierende oder Promovierende und fördern sie in ihrer persönlichen Entwicklung. Ein herausragendes Beispiel hierfür ist TUM Alumna Tsvetana Marinova, die für ihre Mentee Samiddha Mukherjee eine inspirierende und wichtige Ratgeberin ist.

Lesen Sie ihre gemeinsame Tandem-Geschichte
www.community.tum.de/marinova-mukherjee

TUM. Ihr Netzwerk.
Ein Leben lang.

www.community.tum.de

Building with Hops

E

HopfON wants to make the construction industry more climate friendly and resource efficient by developing building materials made from agricultural waste and raw materials. □

Bauen mit Hopfen

Die Bauindustrie verbraucht enorme Ressourcen und ist für große Teile des weltweiten CO₂-Ausstoßes verantwortlich. Dagegen will das Gründungsteam von HopfON etwas tun. Die Vision: kreislauffähige und klimaschonende Baumaterialien aus landwirtschaftlichen Abfällen und Rohstoffen herzustellen.

Die Idee kommt ihnen bei einem gemeinsamen Bier im Studentenwohnheim. Thomas Rojas Sonderegger, zu der Zeit Student des Bauingenieurwesens, erzählt der damaligen Architekturstudentin Marlene Stechl von einem Vortrag, den er gehört hatte: von einem Kolumbianer, der Baumaterialien aus Bananenfasern herstellt. Sie entschlossen sich, aus lokalen Materialien einen Baustoff herzustellen – ohne lange Transportwege in der Produktion. „So könnte man Treibhausemissionen einsparen“, sagt Stechl. „Also haben wir uns überlegt, was sich in Bayern dazu eignen könnte. Eigentlich aus Spaß haben wir dann gesagt: Hopfen wäre doch cool.“ Am nächsten Tag beginnen die beiden zu recherchieren.

Ein vielversprechender Faserstoff

In Architekturprofessor Niklas Fanelisa finden sie einen Unterstützer, der nicht nur seine wissenschaftliche Expertise einbringt, sondern dem Team auch Zugang zum Bioregional Design Lab an der TUM und damit Materialtests ermöglicht. Da nur ein kleiner Teil der Hopfenernte für die Bierproduktion verwendet wird, kamen Stechl und Sonderegger auf die Idee, die Abfallprodukte aus der Hopfenernte zu nutzen. „Das bringt neben dem ökologischen auch einen Kostenvorteil“, sagt Stechl. Seine faserige Struktur verleiht dem Hopfen eine gute Zugfestigkeit, durch welche er sich besonders für Akustikplatten, Dämmstoffe und Baupaneele eignet. Der im Inneren des Hopfens befindliche hölzerne

Link

www.hopfion.com

Kern, die sogenannte Schäbe, gibt dem Material zusätzlich Druckfestigkeit. Wie auch der Hanf punktet der Hopfen zudem mit seinen guten Wärmedämmeigenschaften. Um sicherzugehen, auf die richtige Karte zu setzen, testete Marlene Stechl im Rahmen ihrer Masterarbeit auch die Entflammbarkeit des Hopfens, welche sich als unbedenklich herausstellte.

Ausgezeichnete Idee

Mit ihrer Idee nahmen Stechl und Sonderegger am Urban Prototyping Lab des TUM-Lehrstuhls für Architekturinformatik teil. Hier sollten die Teilnehmenden Probleme aus der Bauindustrie aufgreifen und Lösungen dafür suchen. Nachdem die beiden ihr Konzept konkretisiert und abgegeben hatten, wurden sie eingeladen, sich damit für den TUM IDEAward 2022 zu bewerben – bei dem sie dann schlussendlich den 1. Platz belegten und 15.000 Euro Startkapital gewannen.

Beim TUM IDEAward wurde der ehemalige BWL-Student Mauricio Fleischer Acuña auf HopfON aufmerksam und schloss sich dem Gründungsteam an. 2023 reihte sich auch Biochemiker Matthias Steiger ein, der am Lehrstuhl Chemie biogener Rohstoffe promoviert und nun weitere Prototypen für HopfON entwickelt. Außerdem erhielt HopfON den TUM Booster Grant, eine einjährige Förderung über 45.000 Euro, und zwei Prototyping Grants von UnternehmerTUM, dem Zentrum für Gründung und Innovation an der TUM. Die Un-



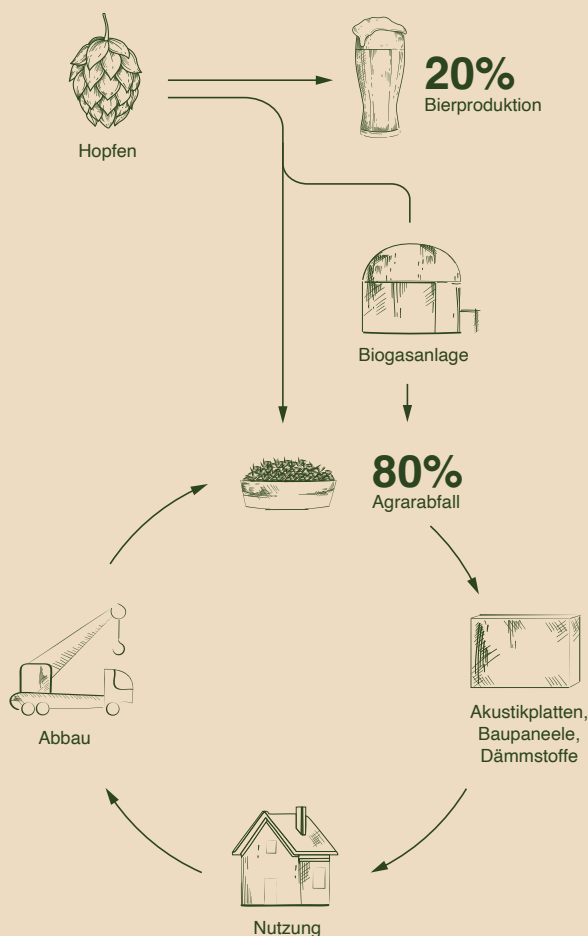


terstützung durch das Business Ecosystem an der TUM sei eine sehr wichtige Stütze bei der für 2024 geplanten Unternehmensgründung, sagt Mauricio Fleischer Acuña. Eine weitere Säule sei der Standortvorteil: Die Hallertau, das weltweit größte Hopfenanbaugebiet, befindet sich in unmittelbarer Nähe zu München.

Ein kreislauffähiges Produkt

Bei ihrer ersten Ernte erhielten die Gründenden viel Unterstützung von den Landwirten und Landwirtinnen, mit denen sie zusammenarbeiteten. Das Team konnte einen Prozess zur Rohstoffsicherung für das ganze Jahr etablieren. Ein besonders wichtiger Schritt, da die Hopfernte nur einmal pro Jahr stattfindet, sagt Mauricio Fleischer Acuña. Wichtig ist es den Gründenden von HopfON, ein kreislauffähiges Produkt anzubieten. Deshalb verzichten sie vollständig auf künstliche und schwer zu lösende Zusatzstoffe. Die Baumaterialien aus Hopfen können so nach ihrer Nutzungsdauer in ihre Bestandteile getrennt und in neue Produkte umgeformt werden. Das sei ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber anderen nachhaltigen Baustoffen, betont Mauricio Fleischer Acuña. Und eine wichtige Voraussetzung für den Markteintritt mit Akustikpaneelen im Bereich Schalldämmung, der für 2024 geplant ist. ■

Lisa Pietrzyk





Link

www.mec.ed.tum.de/fml
www.cec.cs.tum.de

Zu schade zum Wegwerfen

Kreislaufwirtschaft schont Ressourcen und schafft nachhaltige Werte, sagen Prof. Magnus Fröhling und Prof. Johannes Fottner. In gemeinsamen Projekten mit Kolleginnen und Kollegen der TUM erforschen sie, wie beispielsweise Lösungen für eine zirkuläre Wirtschaft in der Automobilindustrie aussehen können. Ihr Credo: Kreislaufwirtschaft funktioniert nur multidisziplinär und mit ganzheitlicher Betrachtungsweise.

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

Circular Economy: Too Good to Go

E

To reduce resource consumption, emissions and waste, and to protect the environment, TUM researchers are focusing on the circular economy. The concept aims to close material and product cycles and use regenerative energy sources. An internal exchange and action platform, CirculaTUM, has now been established to promote internal competencies and interdisciplinary research projects.

The initiative is coordinated by Professors Johannes Fottner (Logistics) and Magnus Fröhling (Circular Economy): “We have to ensure that the circular economy is implemented in a meaningful way and show that it is economically feasible.” In projects with industry, they are investigating which technical processes the logistics sector can develop for a circular economy, or how a combination of life cycle assessment and techno-economic analysis can look from a systems perspective in order to compare different technologies. □

„Im Grunde wissen wir seit 50 Jahren, dass wir etwas tun müssen“, meint Johannes Fottner und verweist auf die damals weltweit beachtete Club-of-Rome-Studie „Die Grenzen des Wachstums“. Trotzdem hat sich der weltweite Verbrauch natürlicher Ressourcen seit 1970 verdreifacht, stellte das UNEP International Resource Panel im Jahr 2019 fest. Ein nachhaltiger Umgang mit der Erde sei unumgänglich. Dazu gehöre auch, Abfälle nicht als Müll, sondern als Rohstoffquellen zu betrachten, sagt der Professor am Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik: „Wer Produkte wegwirft, verschwendet wertvolle Ressourcen. In Mobiltelefonen oder Altautos sind Rohstoffe, zum Beispiel Metalle oder seltene Erden, oft höher konzentriert als in natürlichen Lagerstätten.“

Neben hohen Förderkosten, der Endlichkeit natürlicher Ressourcen, Umweltverschmutzung, erhöhtem CO₂-Ausstoß und dem Verlust der Artenvielfalt sind volatile Rohstoffmärkte und fragile Lieferketten weitere Argumente, die gegen die bisherige lineare Wirtschaftsweise des „Take, Make, Waste“, also „Nehmen, Herstellen, Wegwerfen“ sprechen. Gerade für Deutschland, das arm an strategischen Rohstoffen ist, liegt es nahe, auf eine zirkuläre Wirtschaftsweise umzustellen. ▷

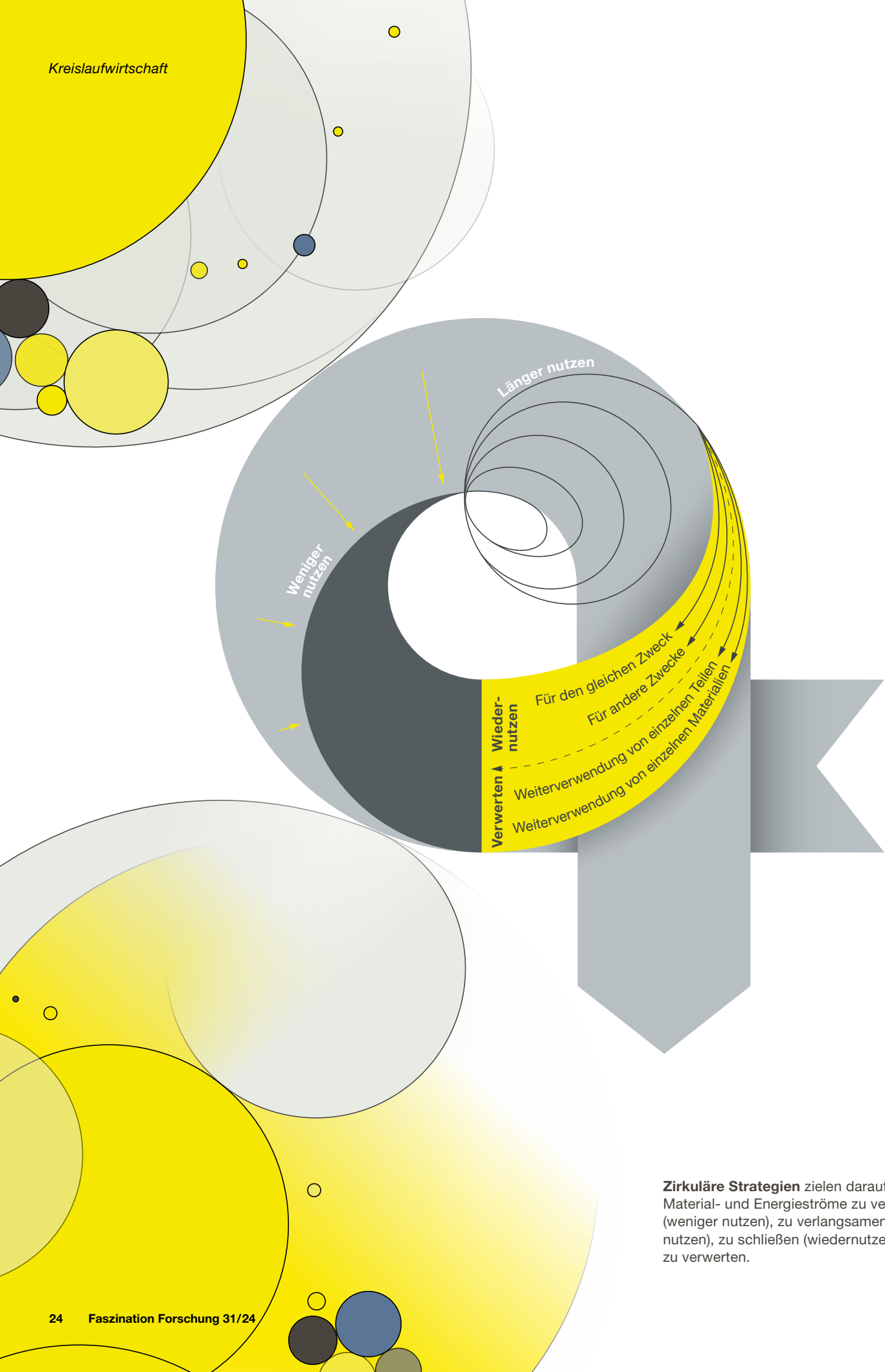


„Wenn wir ... ein langfristiges Auskommen auf diesem Planeten haben wollen, brauchen wir eine grundlegende und nachhaltige Transformation.“

Magnus Fröhling

Prof. Magnus Fröhling

studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Karlsruhe, promovierte und habilitierte dort mit einer Arbeit im Bereich Ressourcen- und Energieeffizienz in industriellen Wertschöpfungsketten. 2015 berief ihn die TU Bergakademie Freiberg zum Professor für Betriebswirtschaftslehre mit Schwerpunkt Ressourcenmanagement. Drei Jahre später berief ihn die TUM auf die Professur Circular Economy am Campus Straubing. Mit seinem Team erarbeitet er Konzepte und Methode, um Kreislaufwirtschaftssysteme zu analysieren, zu bewerten und zu optimieren. Dabei werden sowohl Technologien und Produkte als auch Netzwerke und Industrie-sektoren betrachtet. Arbeitsschwerpunkte sind die industrielle Wertschöpfung, die bebaute Umwelt und die Bioökonomie.



Zirkuläre Strategien zielen darauf ab, Material- und Energieströme zu verringern (weniger nutzen), zu verlangsamen (länger nutzen), zu schließen (wiedernutzen) und zu verwerten.

„Das Potenzial der Kreislaufwirtschaft kann nur ausgeschöpft werden, wenn es adäquate Logistiklösungen gibt.“

Johannes Fottner

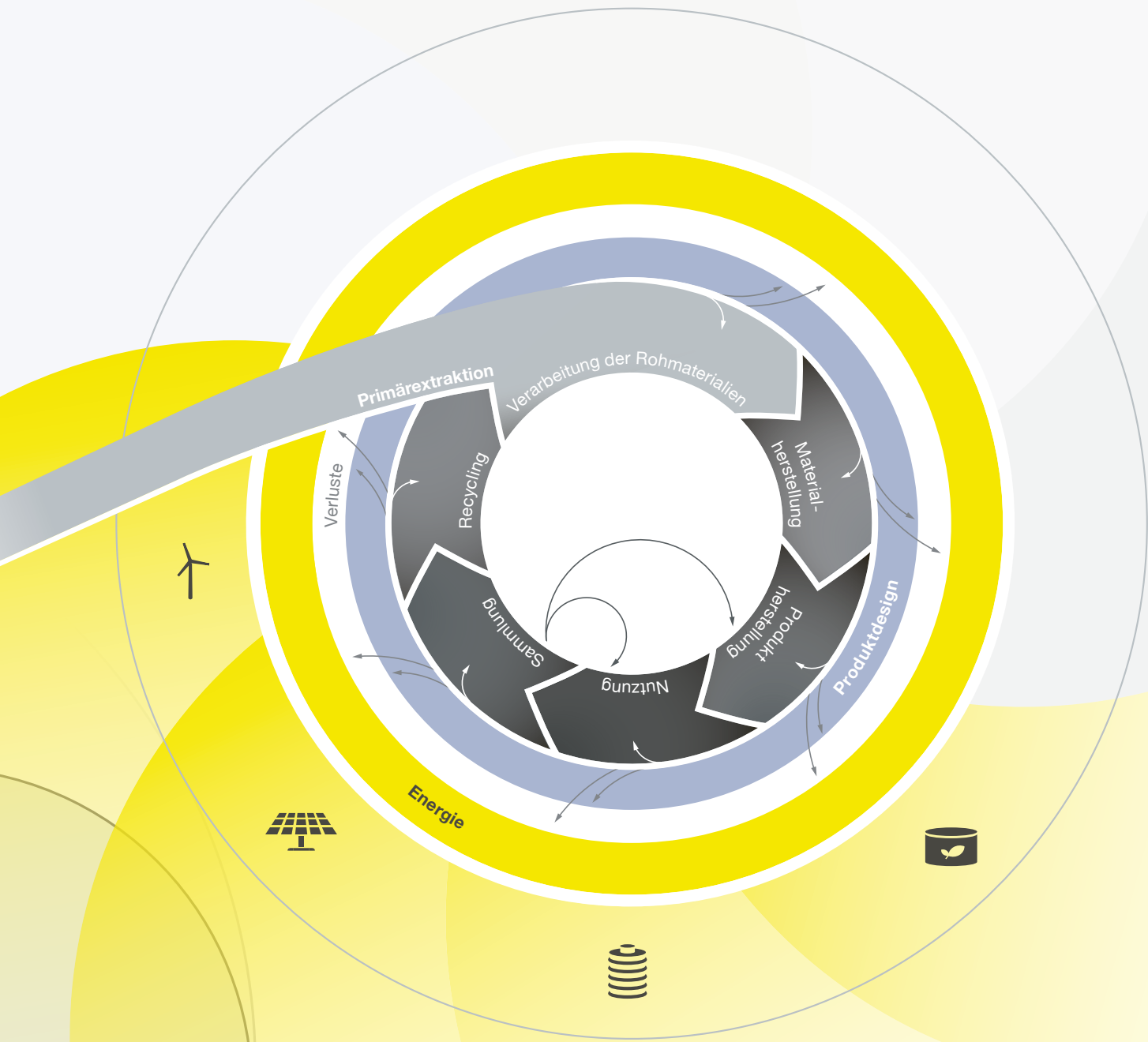
„Wenn wir vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung ein langfristiges Auskommen auf diesem Planeten haben wollen, brauchen wir eine grundlegende und nachhaltige Transformation“, stellt Magnus Fröhling, Professor für Circular Economy fest. In der Kreislaufwirtschaft oder Circular Economy sehen die beiden Professoren den Gegenentwurf zur linearen Wirtschaft: Das Konzept sieht nicht nur das Schließen von Stoff-, Material-, und Produktkreisläufen vor, um Abfälle zu vermeiden, Ressourcen zu schonen und den Umweltschutz voranzutreiben. Die beiden Forscher erwarten – ebenso wie die EU, die in ihrem Green Deal auf Kreislaufwirtschaft setzt – positive wirtschaftliche und soziale Effekte.

Zirkuläre Strategien sollen nachhaltige Material- und Produktkreisläufe schaffen: Es soll weniger Material verwendet, die Nutzungsdauer verlängert, Materialkreisläufe sollen durch Wiederverwendung oder -aufbereitung geschlossen und natürliche Systeme regeneriert werden, beispielsweise durch den Einsatz erneuerbarer Energien sowie abbaubarer, ungiftiger Materialien. ▶



Prof. Johannes Fottner

studierte Maschinenwesen an der TUM und promovierte dort 2002. Der gebürtige Münchner war von 2002 bis 2008 in verschiedenen Managementfunktionen bei einem Schweizer Unternehmen tätig. 2008 übernahm er die Geschäftsführung der Münchner Dependance. 2016 wurde er auf die Professur für Technische Logistik an die TUM berufen. Sein Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik befasst sich mit dem technisch-physikalischen Teil der Logistik. Dazu gehören u.a. die Steuerung und Optimierung von Materialflussprozessen durch innovative RFID-Technologien, die Weiterentwicklung der Logistikplanung auf Basis digitaler Werkzeuge und die Rolle des Menschen in der Logistik.



TUM Mission Network Circular Economy (CirculaTUM)

Die Austausch- und Aktionsplattform CirculaTUM bündelt über alle Fachrichtungen und Standorte hinweg die internen Kompetenzen der TUM zu Forschung, Lehre und Innovation im Bereich Kreislaufwirtschaft. Derzeit sind über 30 Lehrstühle und Professuren und mehr als 100 Forschende unterschiedlicher Schools und Standorte beteiligt. Das Netzwerk passt damit gut in die TUM Sustainable Futures Strategy 2030, die Nachhaltigkeit als integrales Leitmotiv der TUM festlegt.

www.mission-networks.tum.de/circular-economy

Produktkreislauf: Produktdesign, Energieverbrauch und Verluste sind in allen Produktstadien zu berücksichtigen.

Produktionsprozesse verändern

Dies erfordert allerdings eine Veränderung der Produktionsprozesse. Gleichzeitig müssen auch Geschäftsmodelle neu gedacht werden. Zum Beispiel in Form von Leihsystemen oder Mietmodellen, bei denen das Produkt Teil der Dienstleistung wird – man spricht von „Product-as-a-Service“. „So kann es gelingen, die wirtschaftliche Entwicklung vom Bedarf an natürlichen Rohstoffen weitgehend zu entkoppeln“, beschreiben die beiden Experten. Lösungsansätze sind vorhanden, das Problem liegt laut Fottner und Fröhling in der Umsetzung, da Kreislaufwirtschaft Ökonomie, Ökologie und Soziales umfasst und damit hochkomplex ist. „Derzeit werden die einzelnen Aspekte noch isoliert betrachtet. Wir müssen bei den Entscheidungsträgern in Wirtschaft und Politik ein ganzheitliches, systemisches Denken verankern. Das fängt beim langlebigen Design an und geht über die Herstellung und Nutzung bis zur Erfassung am Ende der Nutzung, der Sammlung und Rückführung der Materialien. Bei Konsumenten ist ein Umdenken erforderlich, dass auch gebrauchte, wiederaufbereitete Produkte einen Wert haben können“, führt Magnus Fröhling aus. Kann Deutschland hier eine Vorreiterrolle übernehmen, wo es sich bekanntermaßen um ein globales Problem handelt? „Man kann nicht immer auf andere zeigen. Einer muss anfangen. Langfristig wird sich das auch ökonomisch auszahlen“, sind die beiden Wissenschaftler überzeugt. Um die Transformation mit und aus ihrer Universität heraus aktiv zu gestalten, haben sie CirculaTUM gegründet, ein TUM-weites, transdisziplinäres Netzwerk zur Kreislaufwirtschaft. ▶

Logistik als Schlüssel zum Erfolg

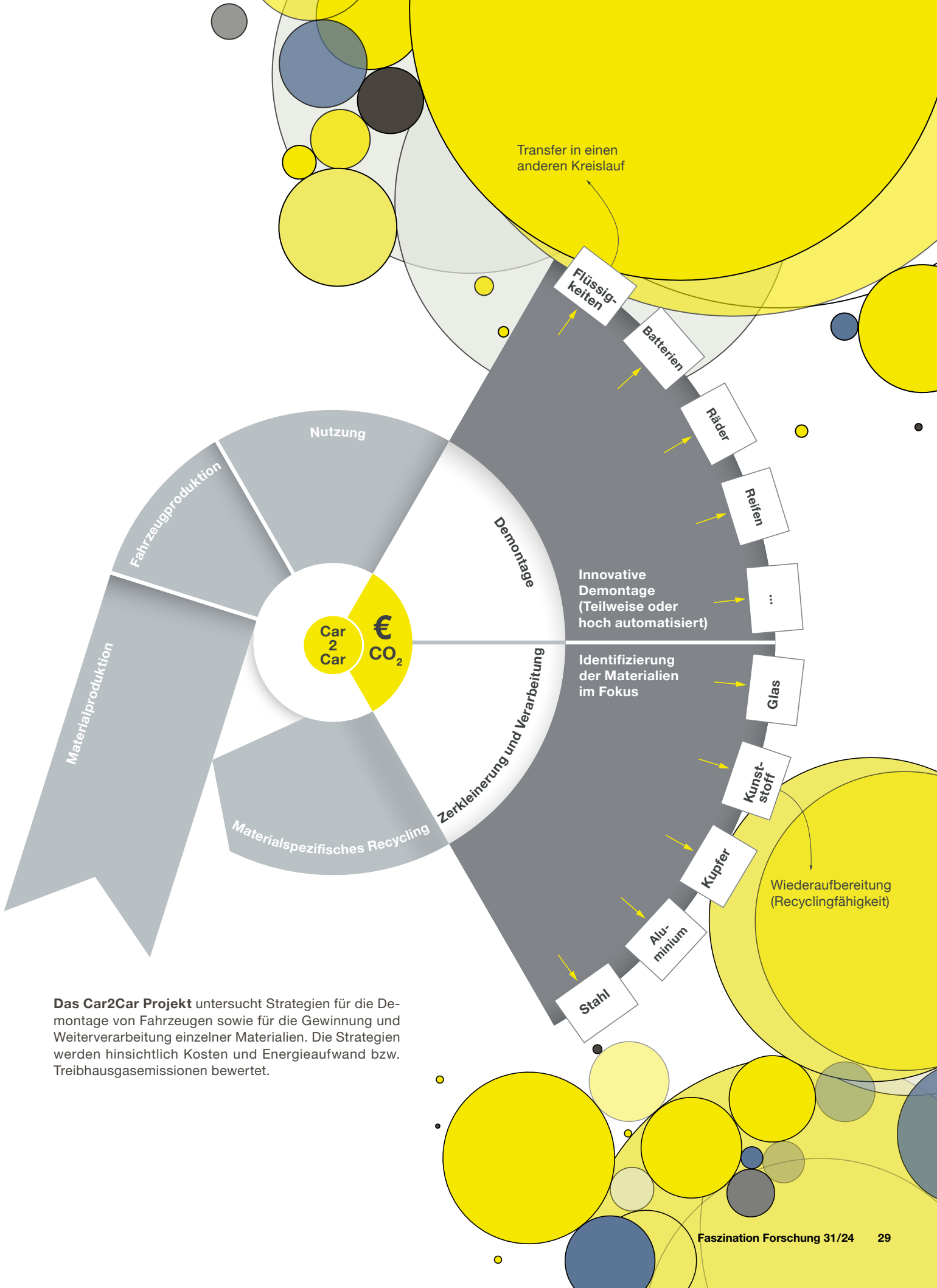
Eine Branche, in der die beiden Wissenschaftler aktiv sind, ist die Automobilindustrie. So geht es im gemeinsamen Projekt Car2Car darum, aus ausgedienten Fahrzeugkomponenten qualitativ hochwertige Werkstoffe zu gewinnen und diese wiederzuverwenden. „100 Jahre lang haben die Automobilhersteller die Montage optimiert. Jetzt geht es darum, die Demontage – also den gesamten Lebenszyklus – mitzudenken und die daraus resultierenden logistischen Prozesse zu erfassen und zu automatisieren“, kommentiert Johannes Fottner und weist darauf hin, dass seiner Disziplin bei der Transformation eine Schlüsselrolle zukommt: „Das Potenzial der Kreislaufwirtschaft kann nur ausgeschöpft werden, wenn es adäquate Logistiklösungen gibt.“

Überhaupt müssen die Liefer- und Wertschöpfungsketten und deren Prozesse ganzheitlich bewertet werden. „Hier kommt unsere Professur ins Spiel: Wir entwickeln Methoden, kreislaufwirtschaftliche Lösungen zu evaluieren“, erläutert Magnus Fröhling. „Dabei geht es auch darum, kritische Faktoren für die Umsetzung zu identifizieren und zu analysieren: Wie und unter welchen Bedingungen kann dies gelingen?“ ▶

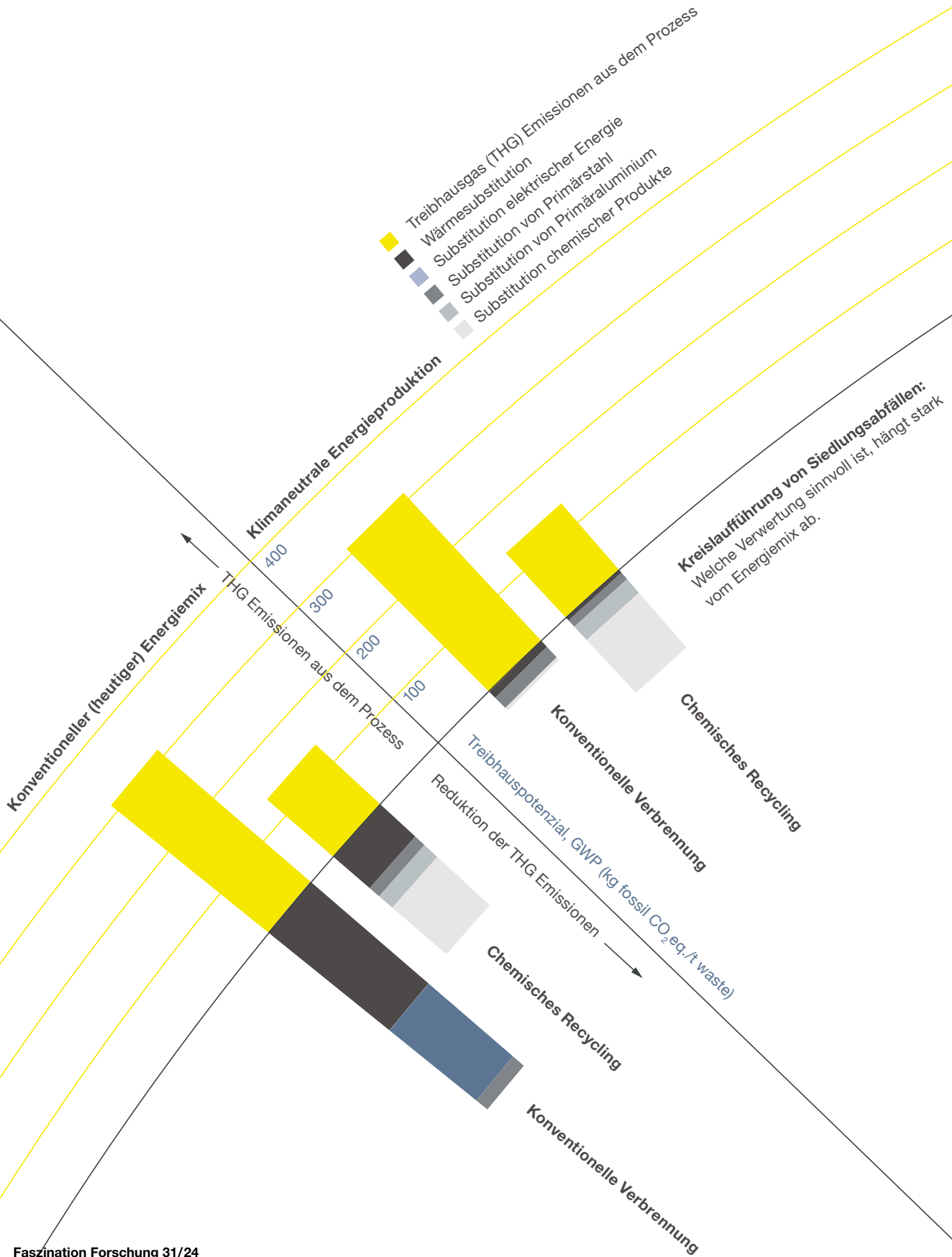
Car2Car: Innovative Demontagemethoden und automatisierte Sortierverfahren

Im Car2Car-Projekt arbeitet seit Frühjahr 2023 unter Leitung des Autobauers BMW ein Konsortium aus wissenschaftlichen Institutionen und industriellen Partnern daran, Materialkreisläufe für automobiler Werkstoffe zu schließen. Die Beteiligten werden 500 Altfahrzeuge untersuchen, um Fragen zur intelligenten Demontage, geeigneten Erkennung, effizienten Sortierung und Trennung von Sekundärmaterialien (z.B. Aluminium, Kupfer oder Glas) zu beantworten. Welche Bauteile für eine Demontage in Frage kommen, hängt unter anderem von regulatorischen Vorgaben, Materialstruktur oder Wertstoffgehalt ab. Nicht nur die Qualität der Sekundärrohstoffe soll steigen, sondern auch deren Anteil in Neuwagen. Dabei werden auch die ökologischen und wirtschaftlichen Auswirkungen der geschlossenen Materialströme ausgewählter Werkstoffgruppen bewertet.

Aufgabe von Johannes Fottners Lehrstuhl und dem seines Kollegen Michael Zäh vom Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften ist es, kreislauffähige Bauteile zu identifizieren und geeignete Technologien für Demontage und Sortierung einzusetzen. Hier kommt es neben der Entwicklung eines optimalen Demontageprozesses darauf an, nach Erfassung der logistischen Prozesse ein wirtschaftlich tragfähiges und ökologisch sinnvolles Konzept für die Rückführung qualitativ hochwertiger Sekundärrohstoffe auszuarbeiten. Magnus Fröhling und sein Team werden die einzelnen Prozesse und Lösungsansätze bewerten. Zudem untersuchen die Forscher, wie eine großskalige Umsetzung der gefundenen Lösungen aussehen kann und welche positiven und ökonomischen Effekte damit erreicht werden können. Das Bundesministerium für Wirtschaft fördert das Forschungsprojekt mit insgesamt 6,4 Mio. EUR.



Das Car2Car Projekt untersucht Strategien für die Demontage von Fahrzeugen sowie für die Gewinnung und Weiterverarbeitung einzelner Materialien. Die Strategien werden hinsichtlich Kosten und Energieaufwand bzw. Treibhausgasemissionen bewertet.



Chemisches Recycling als Baustein einer Kreislaufwirtschaft

Die Professur für Circular Economy untersucht die ökologischen und wirtschaftlichen Auswirkungen der rohstofflichen Nutzung von festen Abfällen in der deutschen und internationalen Chemieindustrie. Dabei kombiniert das Team Ansätze der Ökobilanzierung und der techno-ökonomischen Analyse, um das chemische Recycling mit Anlagen der konventionellen Verbrennung von Hausmüll hinsichtlich des Treibhauspotenzials und der ökonomischen Kenngrößen (Investitionen, Kapitalwert, dynamische Amortisationszeit und CO₂-Vermeidungskosten) zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigen, dass chemisches Recycling im Vergleich zur konventionellen Abfallbehandlung dazu beitragen kann, die Treibhausgasemissionen in emissionsarmen Energiesystemen zu reduzieren und natürliche Ressourcen zu schonen. Allerdings müssten geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, da die Einführung von chemischem Recycling anfangs mit hohen Systemkosten verbunden ist, denn Vergasungstechnologien sind kapitalintensiv. Dazu gehören auch Maßnahmen wie die Verpflichtung zum Handel mit CO₂-Zertifikaten für die energetische Verwertung sowie die Einführung einer Recyclingquote, um wirtschaftliche Nachteile auszugleichen.

Zirkulär ist nicht per se nachhaltig

Seine Forschungsgruppe untersucht beispielsweise, welche Rolle chemisches Recycling in der Kreislaufwirtschaft spielen kann: Zum Beispiel vergleichen sie das Treibhauspotenzial bei der Vergasung von Hausmüll mit dem aus der konventionellen Müllverbrennung. Laut Magnus Fröhling ist es wichtig, alle anfallenden Kosten verursachergerecht zuzuweisen. Dazu gehören auch die externen Kosten, die bisher meist von der Allgemeinheit und nicht von den Verursachern getragen wurden. „Für das chemische Recycling zeigt sich zudem, dass festgelegte Recyclingquoten sogar noch wirksamer sein können als eine Verschärfung des Emissionshandels.“

Die Kreislaufwirtschaft ist ein wirkmächtiges Instrument, als Allheilmittel für alle Nachhaltigkeitsprobleme sollte sie allerdings nicht gesehen werden. Die Gründe dafür liegen unter anderem in physikalischen oder ökonomischen Beschränkungen oder im menschlichen Verhalten. Wenn beispielsweise Kosteneinsparungen bei den Verbrauchern zu erhöhtem Konsum an anderer Stelle führen, könnte das die Vorteile des zirkulären Wirtschaftens sehr schnell schmälern oder sogar ins Gegenteil verkehren. Dies ändert jedoch nichts an der Bedeutung der Kreislaufwirtschaft als wesentlicher Baustein für die nachhaltige Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft, sind Fottner und Fröhling überzeugt. ■ *Eve Tsakiridou*



Mehr über Nachhaltigkeit an der TUM:

www.tum.de/ueber-die-tum/ziele-und-werte/nachhaltigkeit

Link

www.ch.nat.tum.de/en/qsens/home

Quantensensoren für Kernspintomografie

Ein Forschungsteam unter Leitung der TUM hat Diamant-Quantensensoren entwickelt, die als hochauflösende Kernspintomografen eingesetzt werden könnten.

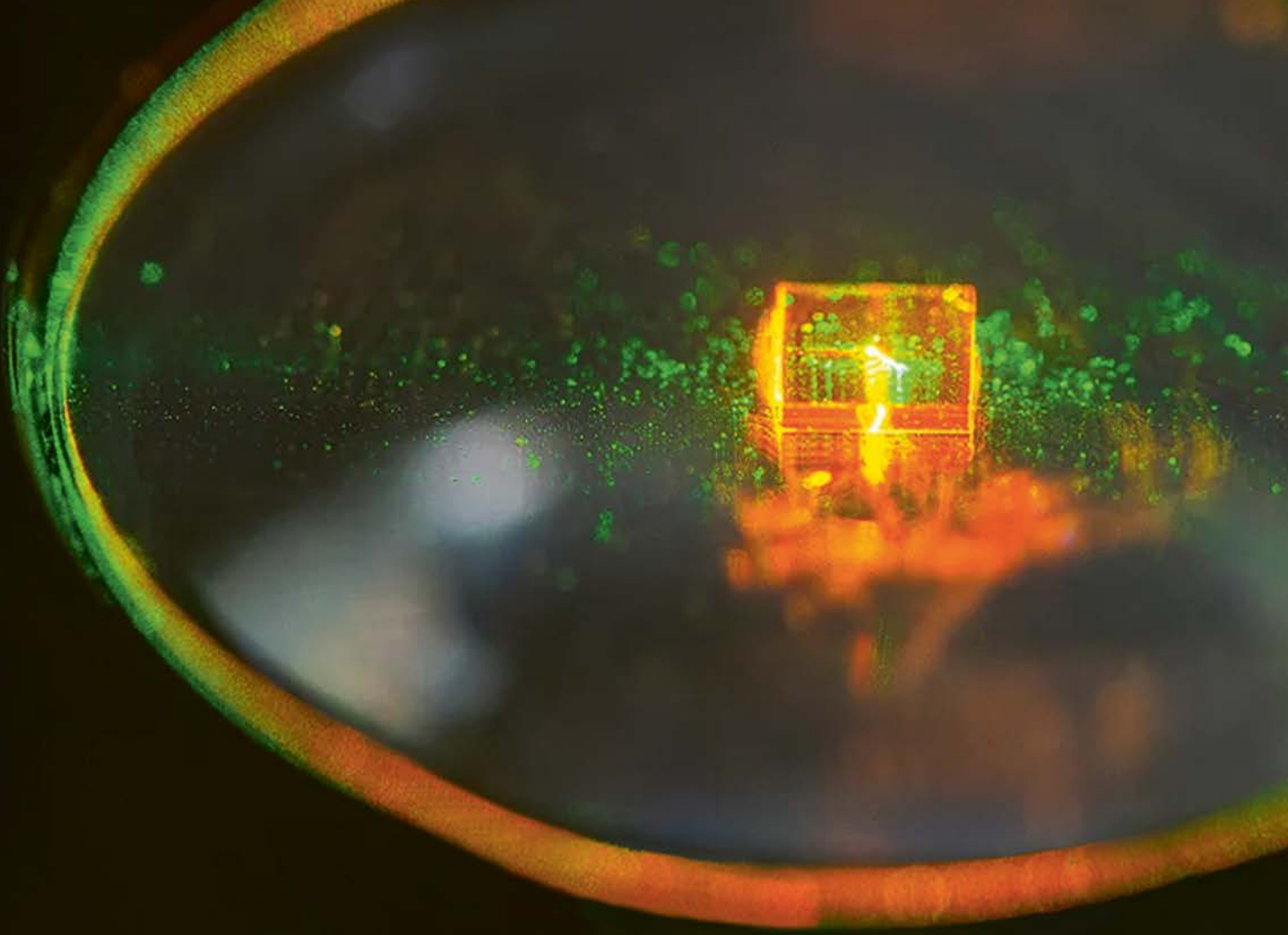
In der Forschung ist die Kernspinresonanz oder kurz NMR (vom englischen nuclear magnetic resonance) eine wichtige bildgebende Methode. Mit dem Verfahren können Gewebe und Strukturen visualisiert werden, ohne diese zu schädigen. Breiter bekannt ist das Verfahren in der Medizin als Magnetresonanztomografie (MRT), bei der ein Patient oder eine Patientin auf einer Liege in eine große Röhre gefahren werden. Das MRT-Gerät erzeugt ein sehr starkes Magnetfeld, das mit den winzig schwachen Magnetfeldern der Wasserstoff-Kerne im Körper interagiert. Da sich die Wasserstoffatome in unterschiedlichen Geweben jeweils auf eine bestimmte Art und Weise verteilen, können Organe, Gelenke, Muskeln oder Blutgefäße unterschieden werden.

Mit den NMR-Methoden kann auch die Beweglichkeit von Wasser und anderer Elemente sichtbar gemacht werden. Für die Forschung wird zum Beispiel das Verhalten von

Kohlenstoff oder auch Lithium beobachtet, um Strukturen von Enzymen oder Vorgänge in Batterien aufzuklären. „Die bisherigen NMR-Verfahren liefern gute Ergebnisse, um etwa auffällige Prozesse in Zellverbänden zu erkennen“, erklärt Dominik Bucher, Professor für Quantensensorik an der TUM. „Wenn wir aber zum Beispiel die Mikrostrukturen innerhalb der Zellen aufklären wollen, brauchen wir neue Ansätze.“

Sensoren aus Diamant

Das Forschungsteam stellte dafür einen Quantensensor aus synthetischem Diamant her. „Wir reichern die Diamantschicht, die wir für die neue NMR-Methode zur Verfügung stellen, schon beim Wachstum mit besonderen Stickstoff- und Kohlenstoffatomen an“, erklärt Dr. Peter Knittel vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF). Nach dem Wachstum löst eine Elektronenbestrahlung



Das Forschungsteam erzeugt Defekte in einem künstlichen Diamanten. Dadurch entstehen besondere quantenmechanische Eigenschaften, die für die Sensorik genutzt werden können.

einzelne Kohlenstoffatome aus dem perfekten Kristallgitter des Diamanten heraus. Die entstandenen Fehlstellen ordnen sich neben den Stickstoffatomen an – ein sogenanntes Stickstofffehlstellenzentrum ist entstanden. Dieses hat spezielle quantenmechanische Eigenschaften, welche für die Sensorik wichtig sind. „Unsere Bearbeitung des Materials optimiert die Dauer der Quantenzustände, wodurch die Sensoren länger messen können“, ergänzt Knittel.

Quantensensoren bestehen ersten Test

Der Quantenzustand des Stickstofffehlstellenzentrums interagiert mit Magnetfeldern. „Das MRT Signal der Probe wird dabei in ein optisches Signal umgewandelt, welches wir dann mit hoher räumlicher Auflösung detektieren“, erklärt Bucher.

Um das Verfahren zu testen, setzte das Team der TUM einen

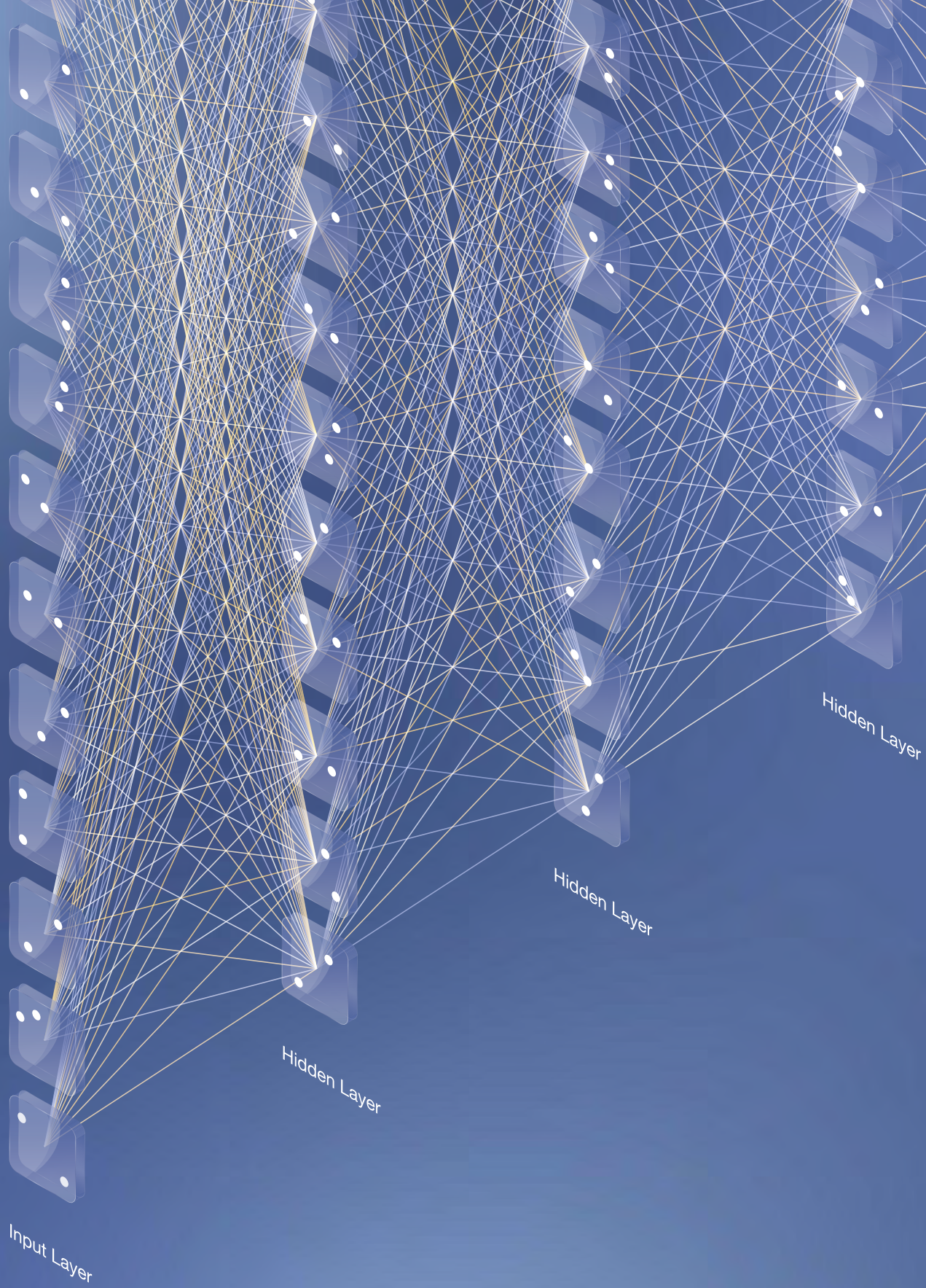
Mikrochip mit wassergefüllten feinen Kanälen auf den Diamantquantensensor. „Damit konnten wir die Mikrostruktur in einer Zelle nachbilden“, sagt Bucher. Die Forschenden konnten die Beweglichkeit von Wassermolekülen in der Mikrostruktur erfolgreich analysieren.

In einem nächsten Schritt wollen die Forschenden die Methode weiterentwickeln, um Mikrostrukturen in einzelnen lebenden Zellen, Gewebeschnitten oder die Ionendiffusion von Batteriematerialien in Dünnschichtfilmen zu untersuchen. „Die Fähigkeit der NMR und MRT, die Beweglichkeit der Atome und Moleküle direkt zu erfassen, macht sie absolut einzigartig im Vergleich zu anderen bildgebenden Methoden“, sagt Prof. Maxim Zaitsev von der Universität Freiburg. „Nun haben wir eine Möglichkeit gefunden, ihre Auflösung, die bisher unzureichend war, in Zukunft erheblich zu verbessern.“ ■

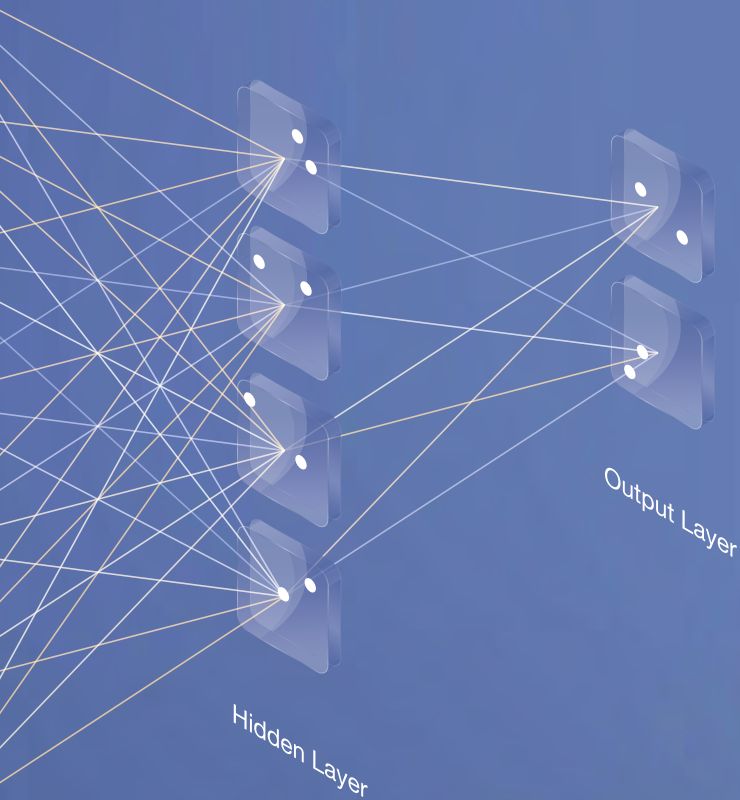
Stefanie Reiffert



Medizinische
Daten



Link
www.aim-lab.io



Wie medizinische KI vertrauenswürdig wird

KI-Systeme im Gesundheitswesen sollten ethisch einwandfrei und möglichst vertrauenswürdig sein. Eine Forschungsgruppe um den Informatiker Prof. Daniel Rückert entwickelt Verfahren, mit denen die Privatsphäre bei KI-Anwendungen gewahrt werden kann – mit mathematischer Garantie.

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

How Medical AI Can Become Trustworthy

E

AI systems in medicine have to be trustworthy. They should act reliably and fairly just like a human doctor and respect patients' privacy. The research team working with Prof. Daniel Rückert is examining how patients' training data can be safely protected and how "privacy-respect-

ing AI" can be achieved. The team has shown that differential privacy offers mathematical guarantees of privacy – that cannot be undermined by either current or future attacks. These guarantees are comprehensive and not dependent on technical progress. □



„Die Anforderungen an KI-Systeme sind hoch. Sie sollen mit den persönlichen Daten von Patienten sorgfältig umgehen und keine identifizierbaren Informationen abspeichern.“

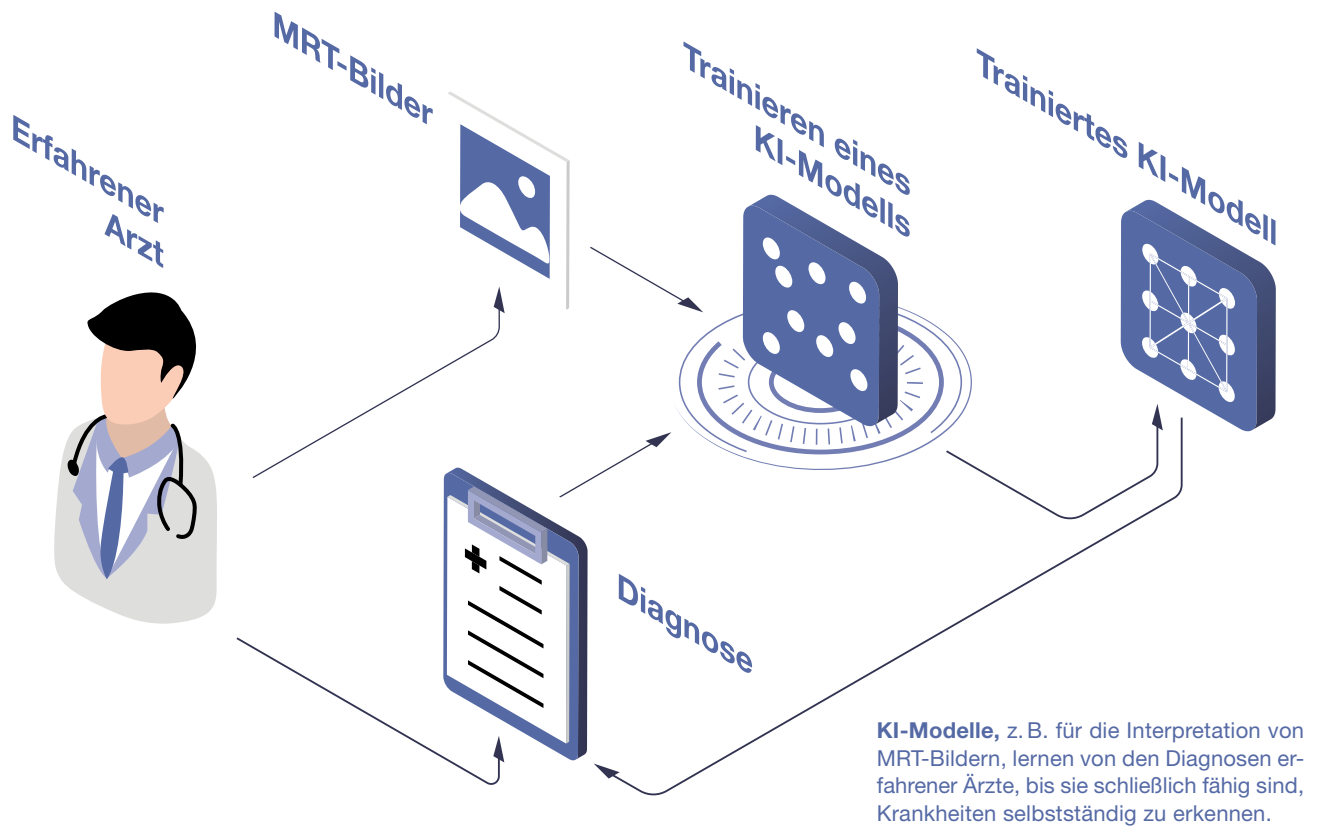
Daniel Rückert

Prof. Daniel Rückert

ist seit 2020 an der TUM Alexander von Humboldt-Professor für KI in der Medizin. Zusätzlich ist er Professor am Imperial College London. Er studierte Informatik an der TU Berlin (1993) und ging danach zur Promotion an das Imperial College, gefolgt von einem Post-Doc am King's College London. 1999 wurde er Assistant Professor am Imperial College. Seit 2005 hat er den Lehrstuhl für Visual Information Processing am Imperial College inne, wo er auch von 2016 bis 2020 als Dekan tätig war. An der TUM leitet Daniel Rückert zudem das Zentrum für Digitale Medizin und Gesundheit. Er arbeitet auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) und des Maschinellen Lernens und deren Anwendungen in der Medizin. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Entwicklung von innovativen Algorithmen zur Bilderakquisition, Bildanalyse und Bildinterpretation und im Bereich KI zur Extraktion klinischer Informationen aus medizinischen Bildern – insbesondere zur computergestützten Diagnose und Prognose.

Künstliche Intelligenz (KI) verändert mit intelligenten Systemen gerade die Medizin. Die meisten KI-Anwendungen basieren auf Modellen für Maschinelles Lernen. Diese werden anhand von Patientendaten trainiert, um bestimmte Muster zu erkennen. Je mehr dieser Daten in das Training mit einfließen, umso genauer sind Diagnosen und Prognosen.

In der Medizin unterstützen solche KI-Systeme Ärztinnen und Ärzte inzwischen sehr erfolgreich bei der Diagnostik und Behandlung von Krankheiten, der Analyse von Röntgenbildern und in vielen anderen medizinischen Gebieten. Doch die rasante Entwicklung in diesem Bereich wirft auch Fragen grundsätzlicher Art auf: Sind die KI-Systeme ebenso verlässlich wie ein menschlicher Arzt? Können ihnen medizinische Anwender vertrauen? Und werden die für das Modelltraining genutzten Patientendaten sorgsam behandelt?



Der Informatiker Daniel Rückert von der TUM arbeitet daran, dass automatische Systeme ähnlich vertrauenswürdig sind wie ein menschlicher Arzt – für die Akzeptanz der Programme ein unerlässlicher Faktor: „Wir haben in der Medizin zwei Gruppen von Menschen, mit denen ein KI-System interagiert“, sagt Daniel Rückert. „Die eine Gruppe sind Ärzte und Kliniker und die andere die Patienten. Beide Gruppen haben sehr hohe Anforderungen an die Qualität der Entscheidungsprozesse.“

Diese Anforderungen sollten auch KI-Systeme erfüllen: Sie sollten beispielsweise mit den persönlichen Daten von Patienten sorgfältig umgehen und keine identifizierbaren Informationen abspeichern – also die Privatsphäre wahren. Sie sollten fair sein und beispielsweise Männer nicht anders als Frauen behandeln. Und sie sollten angeben, wie sicher ihre Entscheidungen sind. Denn wie ein menschlicher Arzt wird auch eine KI manche Diagnosen zwar mit 99 Prozent

Sicherheit stellen können, andere aber vielleicht nur mit 80 Prozent. Und das muss das System möglichst transparent kommunizieren.

„Generell gibt es viele Definitionen und Kategorisierungsansätze für vertrauenswürdige KI“, sagt Dr. Georgios Kaissis aus dem Team von Prof. Rückert. Der Konsens dabei ist, dass intelligente Systeme in der Medizin im weitesten Sinn ähnlich agieren sollten wie eine verantwortungsbewusste Ärztin oder ein verantwortungsbewusster Arzt. „Eine vertrauenswürdige KI muss mit menschlichen Werteinstellungen vereinbar sein“, sagt Kaissis. „Der Output solcher Systeme sollte menschlichen Grundwerten – wie etwa Fairness oder Schutz von Daten – nicht widersprechen.“



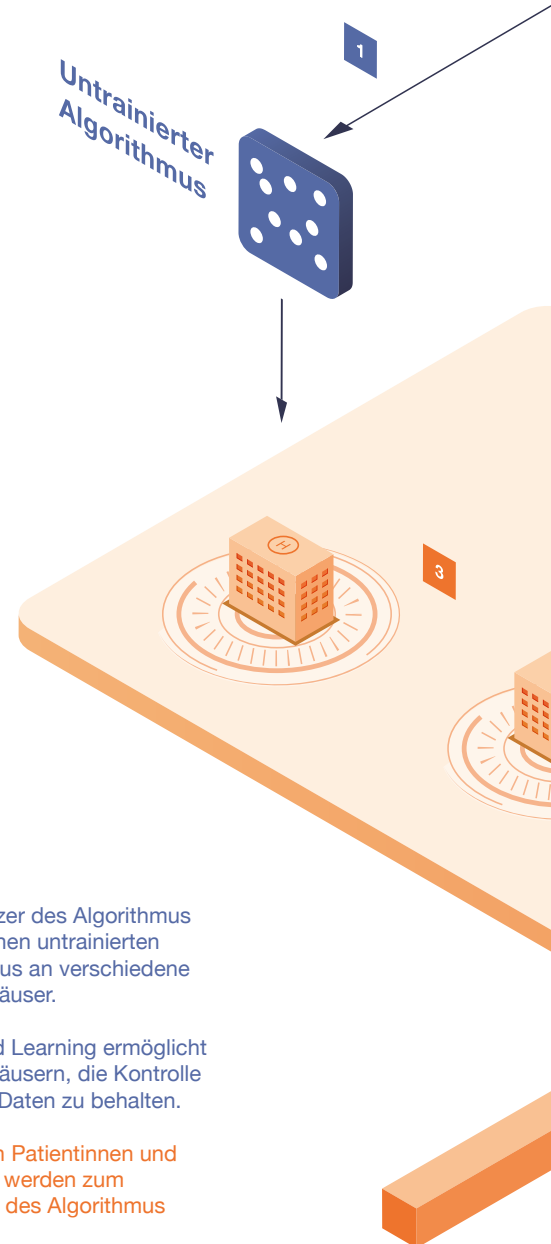
Dilemma Datenschutz

Daniel Rückert hat mit seinen Forschungsgruppen unter anderem die Themen Fairness und Transparenz im Fokus – und als aktuellen Schwerpunkt die privatsphärewahrende KI. Privatdozent Georgios Kaissis leitet die Forschungsgruppe zu dem Thema. Den Radiologen und Informatiker beschäftigt die Frage: Wie kann man KI-Modelle mit den Daten von Patientinnen und Patienten trainieren, ohne dass diese Daten wieder aus den Modellen rekonstruiert werden können?

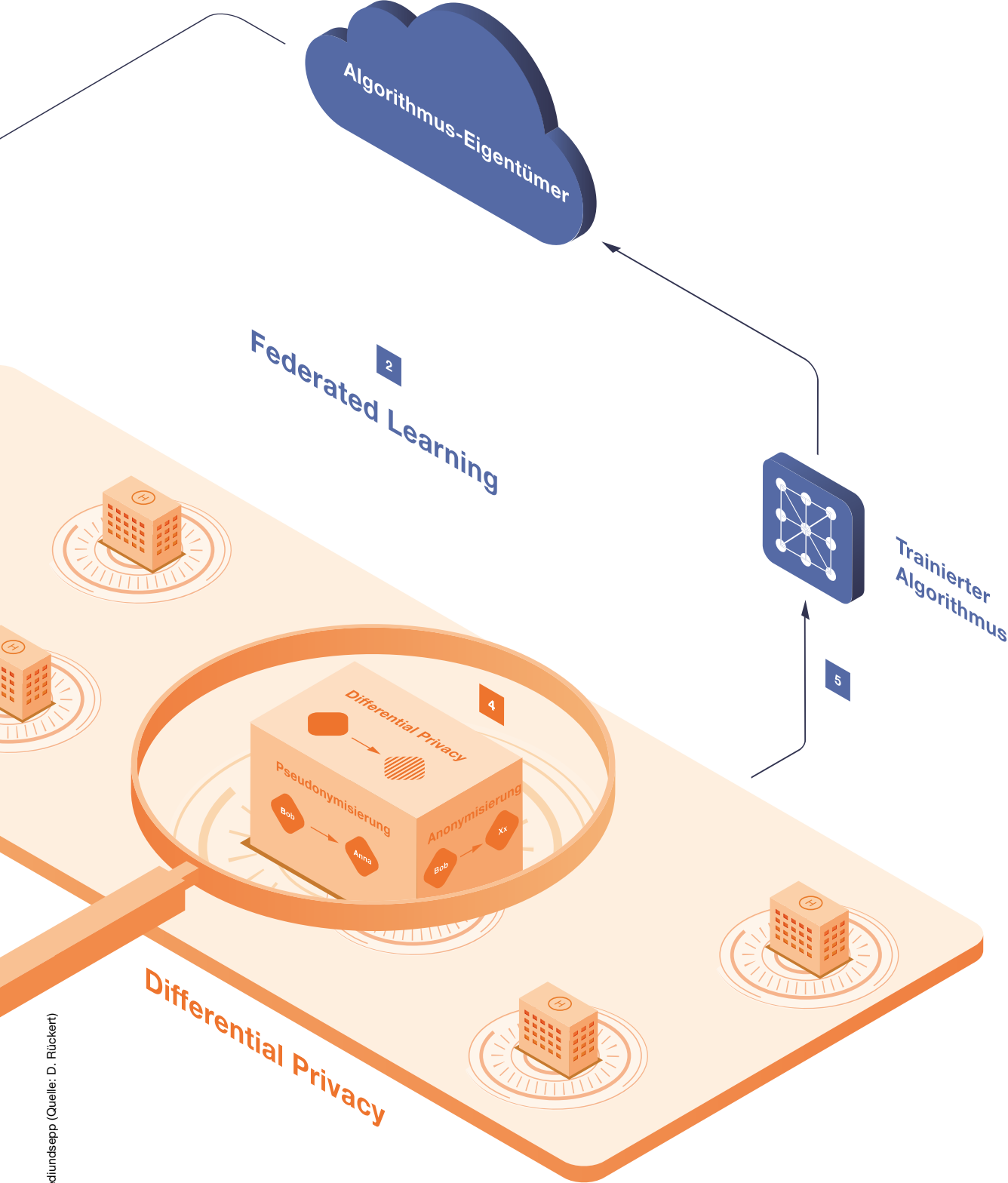
Die Relevanz dieser Frage darf nicht unterschätzt werden. Grundsätzlich sind Patientendaten, wie beispielsweise MRT-Bilder, unerlässlich für das Training der KI-Modelle. Diese Patientendaten sind aber aus zwei Gründen problematisch: Zum einen stehen diese Daten in der Medizin nicht in der Häufigkeit zur Verfügung wie bei nichtmedizinischen KI-Anwendungen – wo oft Millionen oder gar Milliarden von Trainings-Datensätzen genutzt werden. Man muss sich hier mit weniger begnügen – was die Verlässlichkeit der Modelle und Diagnosen einschränken kann. Zum anderen sind die für das Training verwendeten Gesundheitsdaten hochsensibel und äußerst schützenswert. Krankheit ist schließlich Privatsache – Mediziner dürfen solche Daten prinzipiell nicht ohne Zustimmung der Betroffenen aus der Hand geben, auch nicht, um damit ein Computersystem zu trainieren, das künftig Leben retten kann. Beide Herausforderungen – zu wenig Daten und sehr sensible Daten – lassen sich durch zuverlässigen Privatsphärenschutz lösen. Weitgehend etabliert als Verfahren, solche Daten hinreichend zu schützen, haben sich Anonymisierung und Pseudonymisierung. Bei der Anonymisierung werden die Namen oder identifizierenden Informationen komplett aus dem Datensatz entfernt. Die CD „Bob Dylan“ „Greatest Hits“ kann durch Löschung des Namens anonymisiert werden, so dass der Datensatz nur mehr den Eintrag „Greatest Hits“ enthält. Bei der Pseudonymisierung wird der Name „Bob Dylan“ durch einen anderen Namen ersetzt wie „Bob Marley“.

Der Haken an der Sache: Anonymisierung und Pseudonymisierung sind inzwischen nicht mehr sicher. Die Angriffsmöglichkeiten gegen die KI-Modelle sind so mächtig ▶

Rückert und sein Team setzen auf Differential Privacy und Federated Learning, um Gesundheitsdaten, die zum Training von KI-Modellen verwendet werden, sicher zu schützen. Bei der Differential Privacy wird ein kalibriertes statistisches Rauschen hinzugefügt, um sensible Daten zu schützen. Beim Federated Learning wird das KI-Modell sukzessive an einzelne Krankenhäuser geschickt, anstatt sensible Daten an einen zentralen Server zu senden. Dadurch bleibt die Kontrolle über die Daten in der jeweiligen Klinik.



- 1 Der Besitzer des Algorithmus sendet einen untrainierten Algorithmus an verschiedene Krankenhäuser.
- 2 Federated Learning ermöglicht Krankenhäusern, die Kontrolle über ihre Daten zu behalten.
- 3 Daten von Patientinnen und Patienten werden zum Trainieren des Algorithmus genutzt.
- 4 Differential Privacy garantiert die Datensicherheit jetzt und in Zukunft unabhängig vom Stand der Technik.
- 5 Der trainierte Algorithmus wird dann zum Algorithmus-Eigentümer zurück geschickt.



Grafiken: edlundsepp (Quelle: D. Rückert)



Rückert und sein Team haben kürzlich gezeigt, dass Daten, die in KI-Modelle einfließen, durch Differential Privacy effektiv geschützt sind

geworden, dass selbst sehr gut anonymisierte Daten relativ einfach zu re-identifizieren sind. „Die bloße Entfernung des Namens ist für neuartige Angriffsmethoden völlig belanglos“, erklärt Georgios Kaissis. „Wir konnten in unseren Arbeiten mehrfach zeigen, dass Patientendaten wieder aus den Modellen heraus rekonstruiert werden können, wenn man diese ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen trainiert.“ So ist es Kaissis mit seinen Mitarbeitern beispielsweise gelungen, Röntgenbilder von Patientinnen und Patienten wieder aus den Modellen komplett zu rekonstruieren – ein Desaster für den Datenschutz.

Dennoch werden in der Praxis Anonymisierung und Pseudonymisierung weiter genutzt. „Das liegt an der Diskrepanz zwischen dem Stand der Forschungsergebnisse und dem rechtlichen Rahmen“, sagt Kaissis. „Juristisch gelten anonymisierte Daten nach wie vor als nicht personenbezogen und sind deshalb rechtlich zulässig. Die Forschung zeigt allerdings, dass Anonymisierung nicht sicher ist.“ Erforderlich wäre deshalb eine Novelle des rechtlichen Rahmens.

Neben dem Schutz der sensiblen Daten kann eine KI, die die Privatsphäre wahrt, auch das Problem der zu geringen Datenmengen lösen – wenn auch nur indirekt: Eine KI, die die Privatsphäre wahrt, ist nämlich für Anwender und Datengeber vertrauenswürdig und wirkt damit stark motivierend auf Patienten, dass sie ihre Daten zur Nutzung freigeben. Es stehen dann mehr Trainingsdaten zur Verfügung, was die Modelle zuverlässiger und robuster macht.

Interdisziplinäre Forschung: Zentrum für Digitale Medizin und Gesundheit (ZDMG)

Prof. Daniel Rückert leitet das Zentrum für Digitale Medizin und Gesundheit (ZDMG), für das die TUM 43 Millionen Euro vom Bund und vom Freistaat Bayern erhielt. Forschende der Medizin, Informatik und Mathematik sollen dort gemeinsam neue Ansätze in den Bereichen Data Science und Künstliche Intelligenz entwickeln und deren klinische Anwendung vorantreiben. Durch die gezielte Einbindung natur- und ingenieurwissenschaftlicher Kompetenzen soll am neuen interdisziplinären Forschungszentrum die Entwicklung innovativer Methoden und Technologien in den Bereichen KI und Data Science für verschiedene medizinische Anwendungsbereiche nutzbar gemacht werden.



Mathematische Garantien

Daniel Rückert und sein Team um Georgios Kaissis nutzen mit Differential Privacy ein Verfahren, das die Limitierungen und Unsicherheiten von Anonymisierung und Pseudonymisierung hinter sich lässt. Im Wesentlichen beruht Differential Privacy darauf, dass beim Training der KI-Systeme den Daten „kalibriertes statistisches Rauschen“ – also zufälliges Rauschen – hinzugefügt wird. Das Ganze ist mathematisch komplex, führt aber dazu, dass die Privatsphäre von einzelnen Patientinnen und Patienten gewährleistet ist.

Der große Pluspunkt von Differential Privacy: Die Methode gibt – anders als herkömmliche Verfahren – mathematische Garantien, dass sie weder durch aktuelle noch durch zukünftige Angriffe unterminiert werden kann. Während eine empirische Garantie nur sicherstellt, dass ein aktueller Angriff abgewehrt wird, ist es nicht ausgeschlossen, dass ein zukünftiger Angriff diese Garantie umgeht.

Eine mathematische oder formale Garantie ist hingegen eine Garantie, die weder jetzt noch in der Zukunft jemals umgangen werden kann. Diese formale Garantie ist deutlich stärker als eine bloße empirische – sie ist umfassend und unabhängig vom Stand der Technik. „Wenn ich den Datenschützer vom Klinikum rechts der Isar davon überzeugen will, dass er mir erlaubt, solche Verfahren einzusetzen, dann ist es natürlich für diesen sehr viel attraktiver, wenn ich ihm sagen kann: Ich kann mathematisch garantieren, dass man daraus den Patienten nie re-identifizieren kann,“ sagt Rückert. ▷

PD Dr. med. Georgios Kaissis, MHBA

ist Arbeitsgruppenleiter am Institut für Künstliche Intelligenz und Informatik in der Medizin und Oberarzt am Institut für Radiologie der TUM sowie Arbeitsgruppenleiter am Helmholtz-Zentrum München. Er forscht im Bereich der privatsphärewahrenden und vertrauenswürdigen Künstlichen Intelligenz, insbesondere zum Thema „Differential Privacy“ sowie zu Anwendungen im Bereich der Medizin und der biomedizinischen Bildgebung.



Die „heilige Dreifaltigkeit“ – Algorithmic Privacy

Zum Schutz sensibler Daten haben sich – unter der Rubrik „Algorithmic Privacy“ (algorithmische Privatsphärenwahrung) – drei Verfahren etabliert

Verteiltes Lernen (Federated Learning)

Beim verteilten Lernen werden die Daten nicht zu den Algorithmen gebracht, sondern die Algorithmen zu den Daten. Das zu trainierende Modell wird in die Klinik verlegt, mit den dortigen Daten in der Klinik trainiert, das Modell wird dann zurückgeschickt und weiter mit Daten an einer anderen Klinik trainiert. Der Vorteil ist, dass die Daten nie aus der Obhut der Klinik herausgegeben werden müssen. Der Nachteil ist, dass Hacker mit dem trainierenden Algorithmus Patientendaten einfach kopieren und diese nach außen schmuggeln könnten.

Kryptographische Verfahren

Kryptographische Verfahren verschlüsseln Systeme und schützen vor allem die Algorithmen – also zum Beispiel die Modellgewichte. Modellgewichte sind die lernbaren Parameter in einem maschinellen Lernmodell, die dessen Verhalten und Fähigkeiten steuern. Kryptographische Verfahren sind nützlich beim Versenden von Modellen. So können sie, wenn sie in falsche Hände gelangen, nicht genutzt werden.

Differential Privacy

Differential Privacy gilt als Goldstandard des Datenschutzes und wurde Anfang der 2000er Jahre entwickelt. Bei Differential Privacy wird den Daten mathematisches Rauschen – das sind falsche Daten – hinzugefügt. Dabei werden aufgrund eines Algorithmus die Merkmalsausprägungen einzelner Datensätze verändert oder „unechte“ Datensätze hinzugefügt, welche in die Auswertung miteinbezogen werden.

Die drei Verfahren werden in der KI genutzt. Das Team von Prof. Rückert setzt vor allem auf Differential Privacy, kombiniert es aber mit verteiltem Lernen.

Differential Privacy hat aber noch weitere Vorteile. So erlaubt es die Methode, Modelle mit einem „Privatsphären-Budget“ zu trainieren. Dieses Privatsphären-Budget funktioniert analog wie ein Einkauf, bei dem ein bestimmter Betrag Geld ausgegeben werden kann. Übertragen auf den Datenschutz heißt das: Wenn man durch mehrere Iterationen (Rechendurchgänge) mit privaten Daten das Privatsphären-Budget aufgebraucht hat, dann verbietet das System, dass man weiter mit diesem Datensatz interagiert – er wird einfach gesperrt. „Mit dem Privatsphären-Budget kann zum Beispiel (jeder Patient oder) jede teilnehmende Institution eine quantitative Menge an Privatsphäre festlegen, die sie gerne für das Training dieses Modells aufwenden möchte“, erklärt Rückert. „Dieses Budget korreliert mit dem Risiko einer Re-Identifikation von Datensätzen. Je höher das Budget wird, desto höher wird das Risiko, dass meine Daten wieder heraus rekonstruiert werden können.“ Ob das auch in der Praxis umsetzbar ist, hat Rückerts Team kürzlich untersucht. Dazu wurde ein Datensatz mit Röntgenbildern von Patientinnen und Patienten verwendet, um Algorithmen damit zu trainieren. Der Test war erfolgreich: Es gelang mit den im Krankenhaus trainierten Algorithmen, Röntgenbilder verlässlich zu analysieren und zu zeigen, dass sie vor Angriffen von außen geschützt sind. „Wir haben das im Journal „Nature Machine Intelligence“ in einer Veröffentlichung gezeigt, dass es ganz konkret in einer Fallstudie funktionieren kann“, so der Forscher. ■ *Klaus Manhart*

Bildnachweis: Juli Eberle



Proteine für Singapur

Der südostasiatische Stadtstaat Singapur will bis 2030 ein Drittel der benötigten Lebensmittel vor Ort erzeugen. Klingt ambitioniert? Forschende der TUM helfen mit, dieses Ziel zu erreichen.

Link

www.tum-create.edu.sg/research/proteins4singapore

www.lse.ls.tum.de/en/bgt/home

Dr. Oliver Watkins öffnet die Tür der Growth Chamber, eines geschlossenen Pflanzkastens, so hoch wie ein Familienkühlschrank. Darin wachsen Sojapflänzchen ordentlich in Reihen, auf vier übereinanderliegenden Etagen. „Meine Kollegen können hier die Zufuhr von Licht, Wasser und Dünger genau steuern und so das Wachstum der Pflanzen exakt kontrollieren. Pestizide sind nicht notwendig“, sagt der Chemiker bei seiner Tour durch das Labor im CREATE Tower, einem Forschungshochhaus im Südwesten von Singapur. „Der entscheidende Vorteil ist, dass Vertical Farming so wenig Platz benötigt.“

Hightech-Metropole mit knappen Ressourcen

In Singapur leben rund 5,7 Millionen Menschen auf einer Fläche der Größe Hamburgs. Die südostasiatische Metropole verfügt kaum über Ackerland: Aufgrund von Wohnungsbau und Infrastrukturprojekten ist die landwirtschaftliche Fläche auf zuletzt ein Prozent gesunken. Als Antwort darauf hat sich die Regierung Singapurs zum Ziel gesetzt, dass bis 2030 ein Drittel der hier konsumierten Nahrungsmittel auch vor Ort erzeugt werden soll, 2019 waren es noch weniger als 10 Prozent. Damit soll die Abhängigkeit von Importen, Lieferengpässen und Preisschwankungen auf dem internationalen Lebensmittelmarkt verringert werden. Das Land investiert hohe Fördersummen in Forschungsprojekte zu nachhaltiger Aquakultur, urbaner Landwirtschaft und neuen Lebensmitteltechnologien.

Lebensmittel vom Ergebnis her gedacht

Eines der Projekte: Proteins4Singapore. In diesem arbeiten rund 40 Forschende von TUMCREATE, der Nanyang Technological University und weiteren Partnerinstitutionen an proteinreichen Lebensmitteln. „Wir versuchen nicht, bekannte Lebensmittel zu optimieren, sondern gehen vom Ziel aus und fragen uns: Was wollen wir herstellen und mit welchen Rohstoffen und Verfahren lässt sich das am besten erreichen?“, sagt Thomas Becker, Projektleiter und Professor für Brau- und Getränketechnologie. Reverse Food Engineering heißt diese Herangehensweise. „Unser Ziel ist ein gesundes, proteinreiches Lebensmittel, das den Menschen hier in Singapur gut schmeckt und sich möglichst nachhaltig vor Ort herstellen lässt. Es soll wie Huhn schmecken und auch beim Hineinbeißen in Textur und Konsistenz daran erinnern“, sagt Becker. Die Forschenden rollen den Prozess der Lebensmittelherstellung von hinten auf, suchen nach geeigneten Rohstoffen und Anbaumethoden und experimentieren mit verschiedenen Verarbeitungsprozessen – von der Hydrolyse über die Fermentation bis zum 3D-Druck. Das Besondere an diesem Projekt ist die breite Herangehensweise: Das Team deckt den gesamten Herstellungsprozess ab und bringt ganz unterschiedliche Perspektiven mit.



Algen, die nach Huhn schmecken

Für den Geschmack des gesuchten Proteinprodukts ist auch Nadyssa Willanda zuständig. Sie promoviert bei Prof. Corinna Dawid an der TUM School of Life Sciences und forscht an Algen, eine der wichtigsten Ausgangsressourcen für alternative Proteinprodukte. Sie benötigen als Nährsubstanz lediglich eine Stickstoff- und Phosphorquelle sowie Spurenelemente. „Dafür identifizieren und quantifizieren wir in einem ersten Schritt die geschmacks- und geruchsaktiven Komponenten der Mikroalgenmasse“, erklärt Nadyssa Willanda.

In einem zweiten Schritt werden die Wachstums- und Extraktionsbedingungen derart beeinflusst, dass die aus den Algen gewonnenen Proteine in der sinnlichen Wahrnehmung des Produktes, also der Sensorik, Hühnerfleisch ähneln. „Nur wenn man weiß, wie Geschmack auf molekularer Ebene entsteht, kann man ihn auch gezielt beeinflussen“, sagt Willanda. „Beispielsweise indem man die Produktionsbedingungen anpasst oder Enzyme zugibt.“ Dass das fertige Proteinprodukt in Singapur später auch angenommen wird, kann sich die Forscherin gut vorstellen: „Soja- und Algenprodukte gehören seit jeher zur südostasiatischen Küche.“ Aber die Menschen Singapurs stehen auch Einflüssen anderer Esskulturen offen gegenüber. Bestes Beispiel dafür sind die Hawker Centres: In den zum UNESCO-Weltkulturerbe gehörenden Food Courts treffen Einflüsse aus der chinesischen, malaiischen und indischen Küche zusammen.

Kleines Land, große Ideen

Vielfalt auf engstem Raum – das gilt in Singapur laut Michael Rychlik auch für die Forschung. „Singapur ist ein akademischer Hub. Zahlreiche internationale Top-Universitäten haben hier ein Standbein. Das Land versteht es, Forschende auf Spitzenniveau aus der ganzen Welt anzuziehen“, sagt der Professor für Analytische Lebensmittelchemie, der bei Proteins4Singapore für Aspekte der Lebensmittelsicherheit zuständig ist. Neben seiner Forschung unterrichtet er seit mehreren Jahren auch bei TUM Asia, dem Lehrcampus der TUM in Singapur. Moderne Unterrichtsräume, ein hoher Grad an Digitalisierung und das begeisterte Engagement der Lernenden haben ihn immer wieder beeindruckt. „Singapur ist ein äußerst wettbewerbsorientiertes Pflaster, aber die Tatsache, dass sich alles auf so engem Raum abspielt, führt auch fast automatisch zur Kooperation und Interdisziplinarität.“

„Singapur ist so klein. Man kommt leicht mit anderen Forschungsthemen in Berührung und wird wahrhaft zum Allrounder“, sagt auch Oliver Watkins, der gemeinsam mit Forschenden von TUMCREATE für die analytischen Messinstrumente, wie hochauflösende Massenspektrometer, zuständig ist. Er schätzt den breiten Ansatz des Projekts Proteins4Singapore: „Hier arbeiten Menschen aus aller Welt und aus ganz unterschiedlichen Disziplinen zusammen – das finde ich unglaublich inspirierend.“ ■

Christian Schnurr, Undine Ziller

Warm anziehen

Wie schaffen wir die Wärmewende?

Bis 2045 will Deutschland klimaneutral sein. Das bedeutet, dass die Treibhausgasemissionen um über 88 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 reduziert werden und die verbleibenden Emissionen vollständig durch natürliche Senken, wie Wälder, Böden und Meere, aufgenommen werden. Ab dem Jahr 2050 sollen die Treibhausgasemissionen negativ sein, das heißt dass die Summe der emittierten Treibhausgase geringer ist als die Aufnahme dieser Emissionen durch natürliche Senken. Das hat die Bundesregierung im Klimaschutzgesetz festgelegt.

Wie lässt sich das in Gebäuden und Städten realisieren? Wir sprechen mit Wissenschaftlern der TUM, die an Strategien und Technologien für die Wärmewende forschen. Dieser Beitrag beleuchtet die Situation hierzulande, aber die Fragen betreffen alle Nationen, die eine klimaneutrale Wärme- beziehungsweise Energieversorgung anstreben.

Alle Texte von Gitta Rohling

1

Prof. Hamacher | S. 50

Gemeinsam aufheizen
Wärmewende
in Kommunen

2

Dr. Zosseder | S. 53

Wärme aus der Tiefe
Geothermie

3

Herr Hepf, Prof. Auer | S. 56

Let the Sunshine In
Digitalisierung nutzen

4

Prof. Lang | S. 58

Das geht aufs Haus
Klimaneutrale
Gebäudeheizung

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

Wrap Up Warm

E

A warm home is a basic human need. However, in light of rising global temperatures and the need to reduce our CO₂ emissions, we must change how we generate and use heat. Many countries have therefore ushered in the age of the heat transition. This complex process requires extensive technical expertise and a complete transformation of systems and energy grids. Renewable energy sources, such as solar and geothermal energy, have an important role to play and must account

for a far greater proportion of the power and heat we generate. We also need to adopt a holistic approach when considering buildings, districts and cities, focusing on the criteria we use to select appropriate technology. TUM scientists are researching strategies and technology that can make the heat transition a success – from individual buildings to cooperations with local authorities, and from the expansion of geothermal energy to the introduction of digital solutions. □

Ein behaglich warmes Zuhause gehört zu den Grundbedürfnissen des Menschen. Doch die Art, wie wir bisher Wärme erzeugt und genutzt haben, muss sich ändern. Die steigenden globalen Temperaturen und die Notwendigkeit, den CO₂-Ausstoß zu reduzieren, haben eine neue Ära der Energieversorgung eingeläutet – die Ära der Wärmewende. In Anlehnung an die bereits etablierte Energiewende, die sich auf den Umbau der Stromerzeugung konzentriert, widmet sich die Wärmewende der dringenden Aufgabe, unsere Heizsysteme und Wärmeerzeugungsprozesse nachhaltiger und umweltfreundlicher zu gestalten.

Die Herausforderungen, vor denen wir stehen, sind immens. Ein Großteil der heutigen Wärmeerzeugung beruht noch auf fossilen Brennstoffen wie Öl und Gas, die nicht nur endlich sind, sondern auch erhebliche Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre abgeben. Dies trägt maßgeblich zum Klimawandel bei und gefährdet die Lebensgrundlagen künftiger Generationen.

So weit, so herausfordernd. Es gibt allerdings eine gute Nachricht: „Die technischen Möglichkeiten, Gebäude klimaneutral zu gestalten, sind da“, sagt Prof. Dr. Werner Lang, Inhaber des Lehrstuhls für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen und Vizepräsident für Nachhaltige Transformation an der TUM. „Wir müssen sie nur nutzen“, bestätigt sein Kollege Thomas Hamacher, Professor für erneuerbare und nachhaltige Energiesysteme.

Viele Wege führen ins Warme

Vor allem gibt es für die Wärmewende zwei wesentliche Stellschrauben. Erstens sollten wir den Wärmeverlust sowie den Energiebedarf durch Sanierungsmaßnahmen verringern. Zweitens sollten wir die Strom- und Wärmeversorgung verstärkt auf erneuerbare Energiequellen stützen.

Auch die Digitalisierung spielt eine wichtige Rolle. „Durch lässt sich der Energieverbrauch erheblich optimieren und besser an den tatsächlichen Bedarf anpassen“, sagt Christian Hepf, der derzeit am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TUM seine Dissertation verfasst.

Wärme mit Weitblick

Und vor allem sollten wir einen ganzheitlichen Blick auf Gebäude, Quartiere und Städte werfen, anstatt punktuell einzelne Technologien zu diskutieren. „Es ist außerordentlich wichtig, dass wir den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes betrachten“, betont Lang. Lediglich die Sanierungskosten anzuschauen, greift zu kurz. „Die entscheidende Frage ist: Wie hoch sind die Kosten für den Betrieb in den nächsten Jahrzehnten, wenn wir weiterhin auf fossile Brennstoffe statt auf erneuerbare Energien setzen? Diese Betriebskosten sind im Vergleich mit der Investition deutlich höher.“ Auf städtischer bzw. kommunaler Ebene ergänzt Hamacher: „Man muss die gesamte Region im Hinblick auf Potenziale für die Wärmeversorgung betrachten. Wir sollten weniger einzelne Technologien diskutieren, sondern uns auf die Kriterien fokussieren, nach denen wir Technologien sinnvoll auswählen.“ Schaffen wir also die Wärmewende? „Zunächst scheint die Antwort auf diese Frage recht einfach, denn man könnte sagen, dass es sich vor allem um eine Frage der Einstellung handelt“, sagt Hepf. Frei nach dem Motto, wo ein Wille da auch ein Weg. Die Technologien für unterschiedliche erneuerbare Energiequellen sind vorhanden, und je größer die Nachfrage ist, desto effizienter und effektiver werden sich diese weiterentwickeln. „Auf der anderen, der praktischen Seite, handelt es sich aber um einen sehr komplexen Prozess, der viel technisches Wissen und eine komplette Transformation der Systeme und Energienetze erfordert“, gibt Hepf gleichzeitig zu bedenken. Dabei müssen neben dem Ausbau der erneuerbaren Energiequellen viele weitere Aspekte wie Energiespeicherung und Netzerweiterung, aber auch politische und soziale Aspekte wie Förderprogramme und Bürgerbeteiligungen mitbedacht werden. Alle vier TUM-Experten sehen hier weniger ein Problem in der Machbarkeit, sondern es geht vielmehr um die Bereitschaft, diesen komplexen Prozess ganzheitlich umsetzen zu wollen. Bis diese weit verbreitet ist, heißt es: warm anziehen. ■

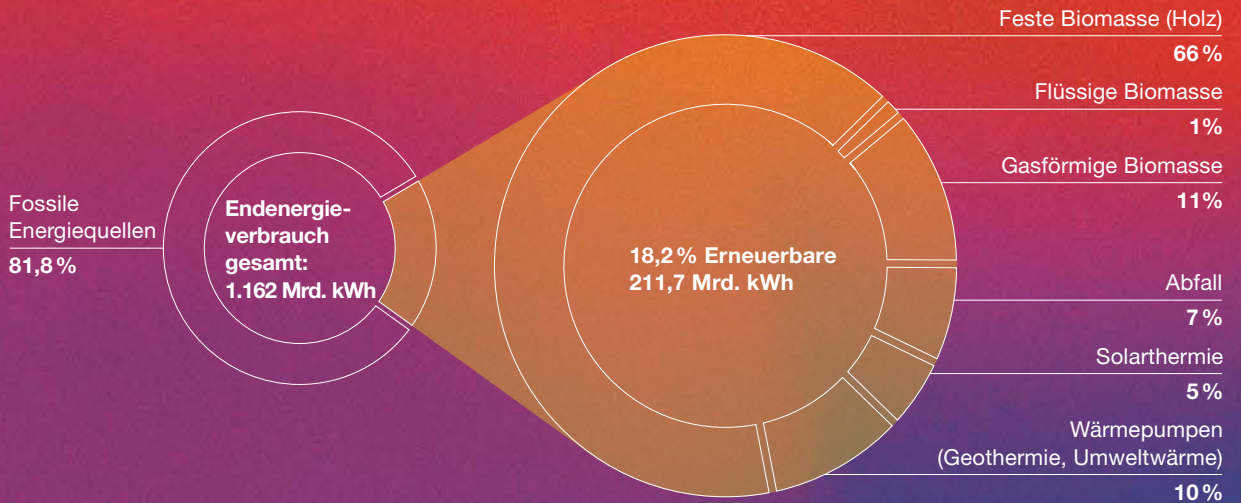


Mehr über Nachhaltigkeit an der TUM:

www.tum.de/ueber-die-tum/ziele-und-werte/nachhaltigkeit



Anteile erneuerbarer Energiequellen im Wärmesektor (Deutschland, 2022)

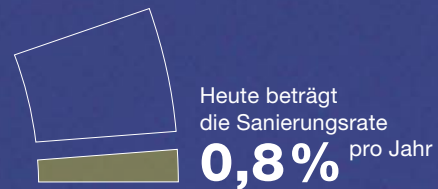


Tiefe Geothermie kann über **25%** des Wärmebedarfs in Deutschland abdecken



Um die Ziele aus dem European Green Deal zu erreichen, müssten pro Jahr

4% aller Gebäude saniert werden



1

Gemeinsam aufheizen

Wie Kommunen die Wärmewende anführen können.

Fragen an Thomas Hamacher, Professor für erneuerbare und nachhaltige Energiesysteme

Link

www.epe.ed.tum.de/ens



Wärmepumpen
PV-Systeme



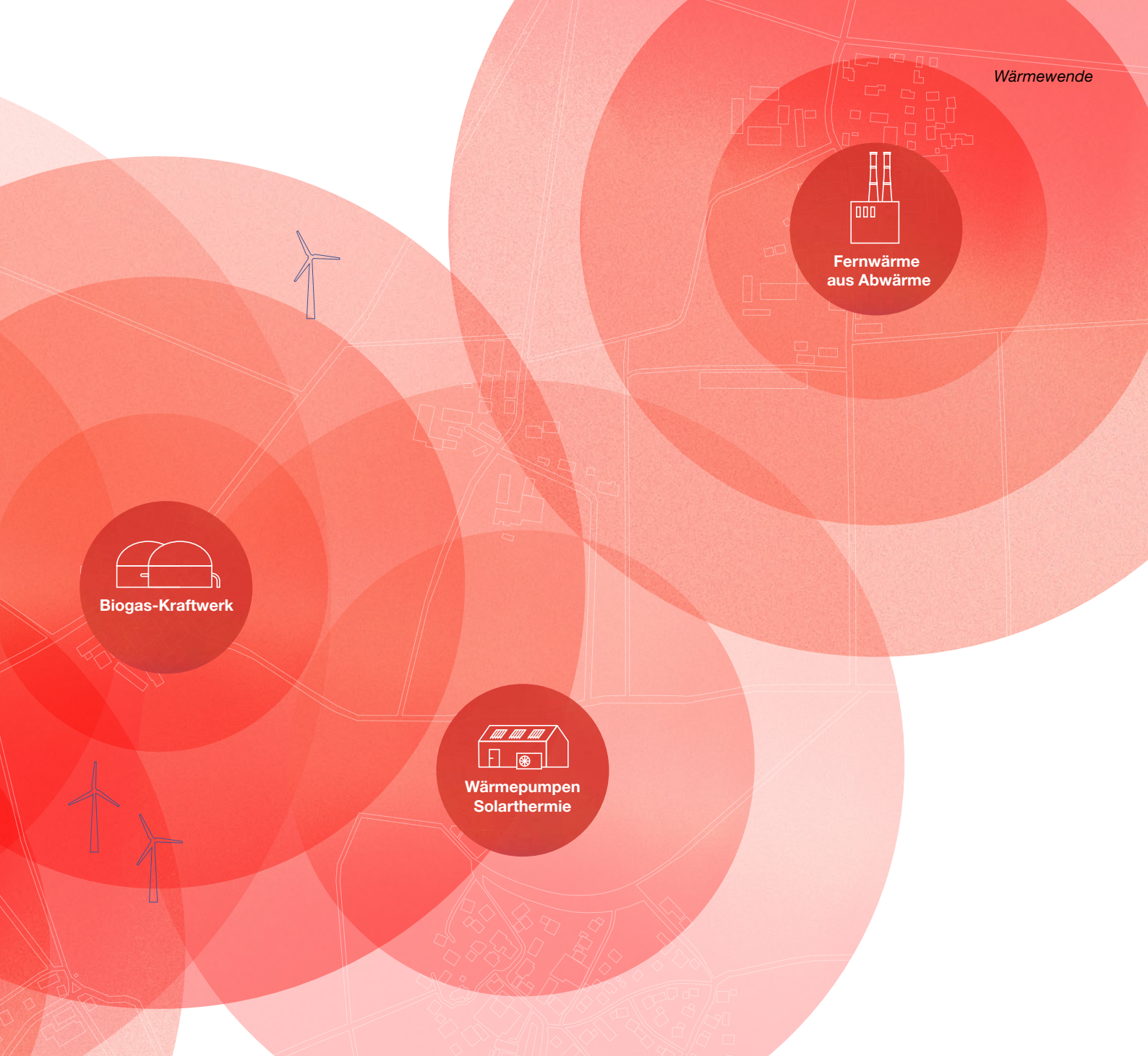
PV-Systeme
Biogasanlage



Holzkraftwerk



Fernwärme
mit Geothermie



Wärmewende

Fernwärme
aus Abwärme

Biogas-Kraftwerk

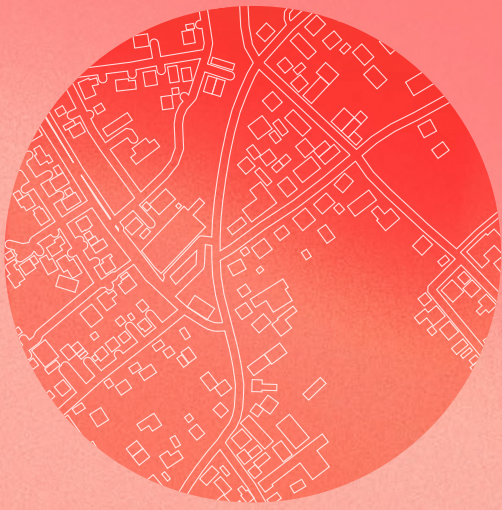
Wärmepumpen
Solarthermie

Herr Prof. Hamacher, wie können Kommunen die Wärmewende meistern?

Es gibt diverse Technologien, über die seit vielen Jahren diskutiert wird, die aber oft nicht strategisch gedacht werden. Eine Zeit lang hat man die Solarthermie fokussiert, dann das Passiv- bzw. Null-Energie-Haus, jetzt die Wärmepumpe. Zudem gibt es eine Kakophonie an teilweise auch staatlich geförderten Maßnahmen, immer wieder mit einem unterschiedlichen Fokus. Was aber fehlt, ist der ganzheitliche Blick auf Energie und Wärme und das sinnvolle Abwägen von Maßnahmen. Wir sollten weniger einzelne Technologien diskutieren, sondern uns auf die Kriterien fokussieren, nach denen wir Technologien sinnvoll

auswählen. Entscheidend sind folgende Fragen: Wie sieht die Wärmeversorgung in einer Region aus? Welche Potenziale für den Einsatz erneuerbarer Energien sind vorhanden? Eignet sich die Region etwa für Geothermie oder für Biomasse? Wo lohnt sich Fernwärme?

Diese Fragen haben wir uns zum Beispiel beim Forschungsprojekt STROM gestellt, bei dem wir Wärmeversorgungsgebiete für Bayern sowie ausgewählte Städte identifiziert haben. Dabei geht es um die integrierte Planung der Versorgung mit Wärme und Energie und um die Frage, wie der für Wärme benötigte zusätzliche Strom zu den Verbrauchern kommt. Können unsere Stromnetze das leisten, oder müssen wir sie ausbauen? ▶



Beispielhafte Entscheidungskriterien für die Technologiewahl:

- ⓪ Welche Wärmequellen wären verfügbar?
- ⓪ Ließe sich ein Fernwärmenetz realisieren?
- ⓪ Wo sind Wärmepumpen eine sinnvolle Lösung?
Falls auf Wärmepumpen gesetzt wird:
- ⓪ Wie wird sich der Stromverbrauch (inkl. Elektromobilität) entwickeln?
- ⓪ Welchen Beitrag können PV-Dachanlagen leisten?
- ⓪ Muss das Stromnetz ausgebaut werden?

Welche Erkenntnisse gab es?

Wir müssen die Ortsnetze ebenso ausbauen wie die übergeordneten Verteilnetze. Das ist aber immer ortsabhängig. Sind viele Wärmepumpen vorhanden, benötige ich mehr Strom als bei Fernwärme und die Verteilnetze müssen entsprechend ausgebaut werden. Zudem können Energiemanagementsysteme in Gebäuden viel bewirken, um die maximale bezogene Leistung im Stromnetz zu begrenzen. Diese Systeme optimieren zum Beispiel das Zusammenspiel der Photovoltaik-Anlage, des Elektro-Autos und der Wärmepumpe und wählen die optimale Zeit, wann Strom ins Netz gespeist wird. Wir brauchen keine ausgefeilten Smart Grids, wir müssen nicht warten, wir können jetzt mit dem Ausbau der Stromnetze loslegen.

Bevor ich als Haus- oder Wohnungsbesitzer eine Entscheidung treffe, müssen zunächst aber doch die Kommunen ihre Hausaufgaben machen?

Ja. Wie weit ich mein Haus sanieren sollte, ist immer abhängig von der Versorgungsseite. Einfach gesagt: Wenn es eine gute erneuerbare Wärmequelle gibt, ist der Sanierungsbedarf geringer. Andernfalls muss erst auf

wändig saniert und der verbleibende Wärmebedarf teuer gedeckt werden. Ein gutes Zusammenspiel zwischen Versorgung und Sanierung sicherzustellen, ist Aufgabe der kommunalen Wärmeplanung. Wir können heute aber bereits sehr schnell abschätzen, für welche Gemeinden sich Fernwärme lohnt. Wir können also ohne großen Aufwand die Grundlagen für die Wärmewende schaffen.

Wie unterstützen Sie als Forschende?

Unsere Aufgabe sehe ich darin, Daten und Werkzeuge bereitzustellen, auf denen die kommunale Wärmeplanung aufsetzen kann. Da sind wir beim Thema Digitalisierung. Viele Daten zu Gebäuden sind vorhanden, sie müssen nun in Formate gebracht werden, dass sie jederzeit aktualisiert zur Verfügung stehen. Dazu haben wir gerade das Forschungsprojekt NEED gestartet. Es entwickelt eine Plattform, die alle nötigen Daten in der passenden Form bereitstellt. Wir an der TUM entwickeln etwa gemeinsam mit der Stadt Garching Modelle für eine langfristige Wärmeplanung, von denen die Kommune und unser Campus profitieren. ■

2 | Wärme aus der Tiefe

Wie wir Geothermie nutzen können

Bayern hat es gut. Bayern hat das süddeutsche Molassebecken. Zwischen der Donau und den Alpen gelegen, bietet diese geologische Formation günstige Voraussetzungen für Geothermieprojekte. In bis zu 3.000 Metern Tiefe ist gibt es Wasser, das mit mindestens 100 bis 120 Grad Temperatur heiß genug ist, um wirtschaftlich Strom zu erzeugen und Wärme bereitzustellen. Aber nicht nur Bayern hat es gut. Solche natürlichen Reservoirs mit ausreichender Wassermenge sind in Deutschland verbreitet. „Über Tiefengeothermie könnten wir ein Viertel des Wärmeanteils in Deutschland abdecken“, so Dr. Kai Zosseder, der am Lehrstuhl für Hydrogeologie der TUM forscht. Wenn oberflächennahe Geothermie und weitere neue Technologien dazukommen,

sogar noch mehr. Derzeit liegt der Anteil bei weniger als fünf Prozent. Dass sich dieser Anteil erhöht, daran arbeitet Zosseder.

Plattform für Wissens- und Datentransfer zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik

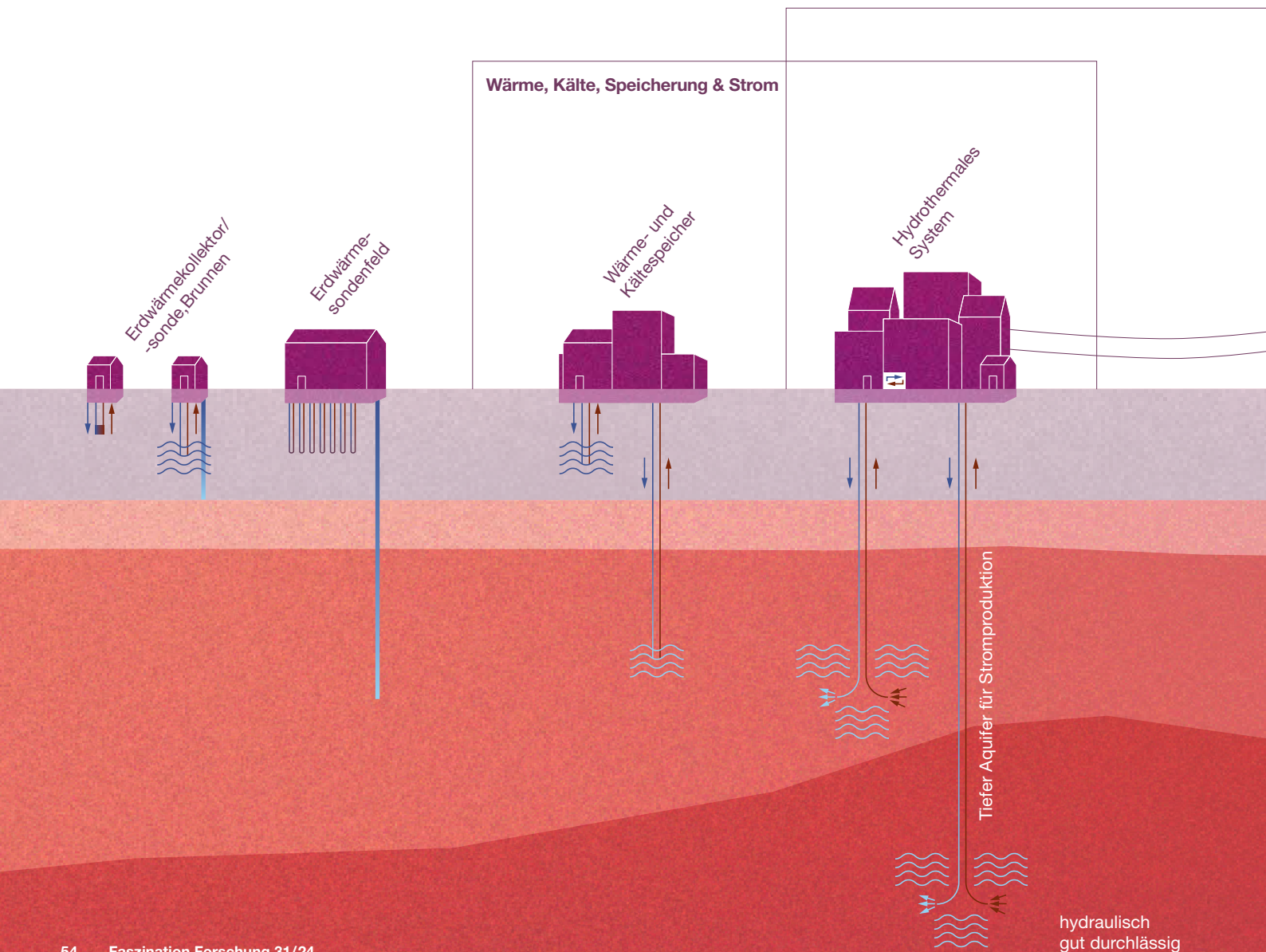
Etwa im Forschungsprojekt Geothermie-Allianz Bayern, an dem neben der TUM vier weitere bayerische Universitäten beteiligt sind. Ziel ist es, die Geothermie voranzubringen, eine langlebige Wärme-Infrastruktur zu entwickeln und dabei eine Brücke zwischen Forschung und Betrieb zu schlagen. Zosseder unterstützt vor allem Kommunen dabei, ihre Potenziale für Geothermie zu analysieren und zu quantifizieren.

Link

www.cee.ed.tum.de/hydro/projects/geothermal-energy-group

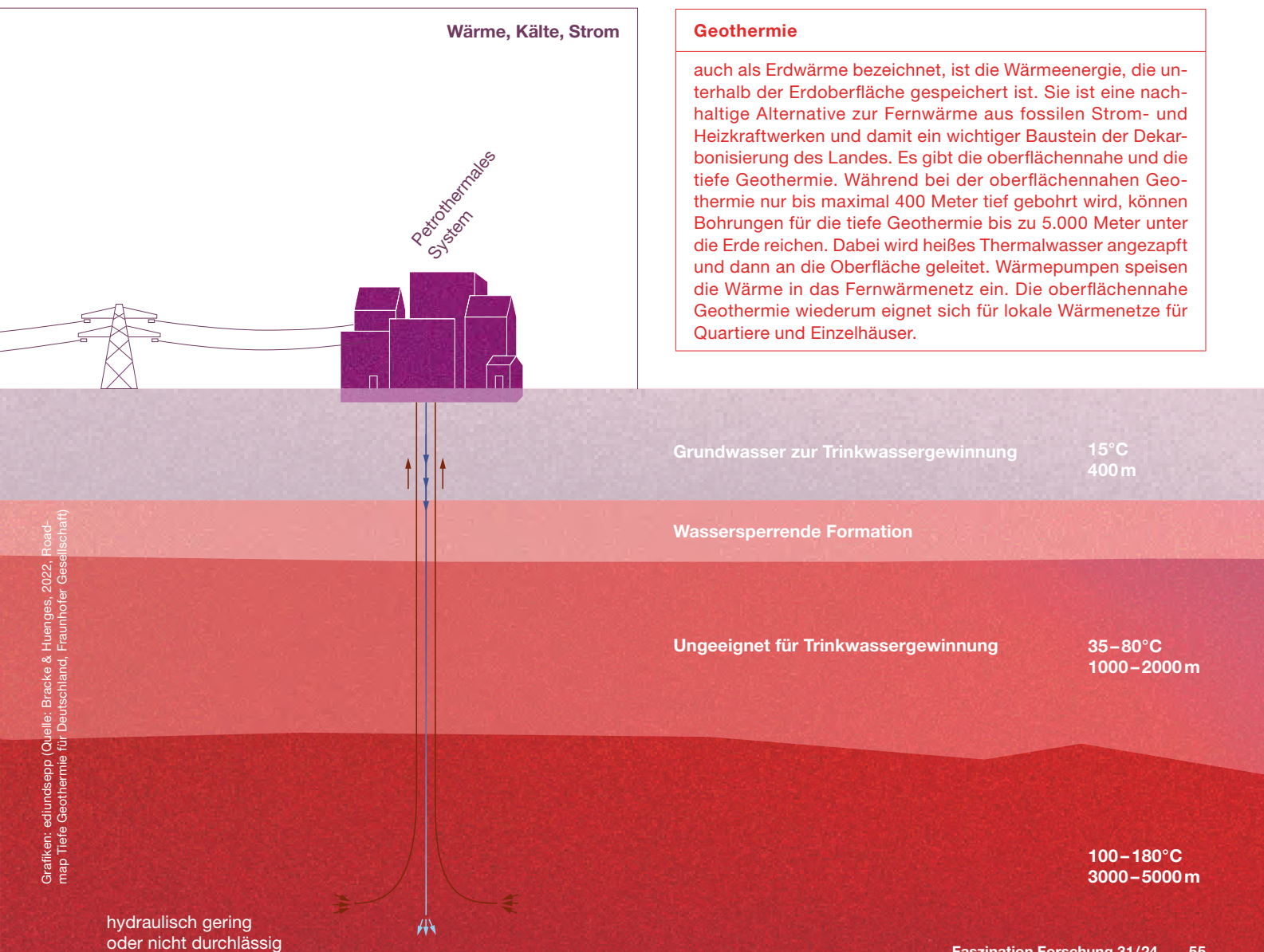
Hierfür analysieren er und sein Team Daten über den Untergrund aus vorhandenen Bohrungen, Messungen und bestehenden Geothermie-Anlagen. Anschließend entwickeln sie Methoden und Modelle zur räumlichen Bestimmung des Potenzials sowie neue Monitoringmethoden, um diese erneuerbaren Ressourcen nachhaltig zu nutzen. Vor allem seit den Diskussionen um das Gebäudeenergiegesetz (GEG) bekommen er und sein Team viele Anfragen

von Kommunen. „Die Fragen, die uns umtreiben sind: Welche Gebiete eignen sich für Geothermie? Wie sollten die Anlagen ausgelegt sein? Aber auch: Wie lässt sich die Laufzeit der Pumpen unter den harschen Bedingungen mit hohem Druck und hohen Temperaturen verbessern? Denn in der Regel kommen die Pumpen aus dem Öl- und Gasbereich und müssen auf Geothermie angepasst werden“, erklärt Zosseder.



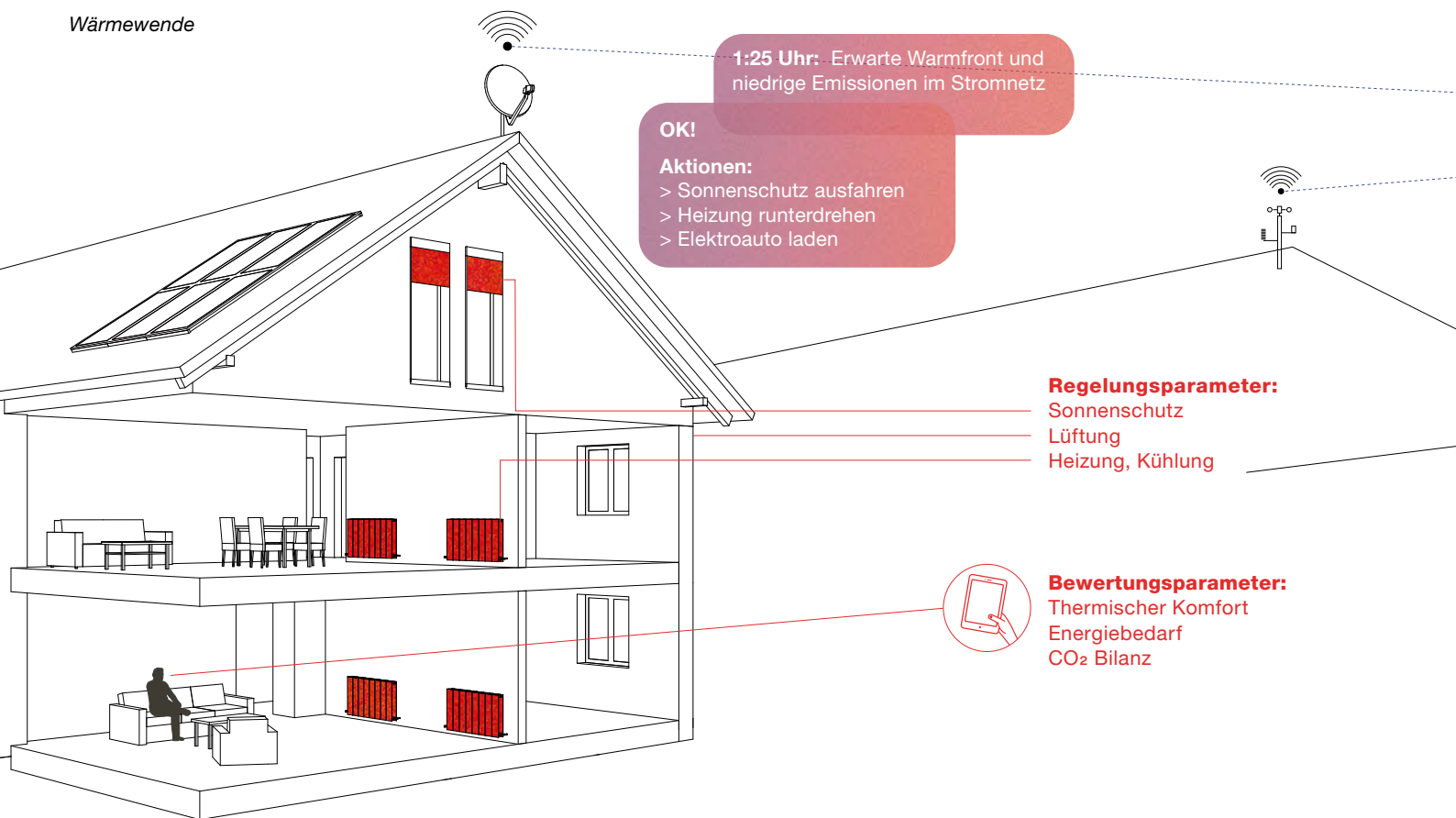
Zosseder unterstützt mit seinem Fachwissen einzelne Kommunen und will vor allem auch Verbünde zwischen den Kommunen schaffen, um große Geothermie-Anlagen einzusetzen. Über Verbundleitungen lässt sich dann die Wärme dahin schicken, wo sie gebraucht wird. Zudem forscht er an neuen technologischen Entwicklungen, wie der petrothermalen Geothermie, wenn zwar kein Wasser, aber heißes Gestein in ca. 2.000 bis 6.000 Meter Tiefe

vorhanden ist und genutzt werden kann. Aber nicht nur Bayern und Deutschland haben es gut, sondern ganz Europa. „Viele Länder haben Potenziale, zum Beispiel Italien, wo es Gebiete mit einem aktiven Vulkanismus gibt“, weiß Zosseder. Neben der Geothermie-Allianz Bayern ist Zosseder daher an diversen EU-Forschungsprojekten beteiligt, um die Potenziale der Geothermie europaweit voll auszuschöpfen. ■



Geothermie

auch als Erdwärme bezeichnet, ist die Wärmeenergie, die unterhalb der Erdoberfläche gespeichert ist. Sie ist eine nachhaltige Alternative zur Fernwärme aus fossilen Strom- und Heizkraftwerken und damit ein wichtiger Baustein der Dekarbonisierung des Landes. Es gibt die oberflächennahe und die tiefe Geothermie. Während bei der oberflächennahen Geothermie nur bis maximal 400 Meter tief gebohrt wird, können Bohrungen für die tiefe Geothermie bis zu 5.000 Meter unter die Erde reichen. Dabei wird heißes Thermalwasser angezapft und dann an die Oberfläche geleitet. Wärmepumpen speisen die Wärme in das Fernwärmenetz ein. Die oberflächennahe Geothermie wiederum eignet sich für lokale Wärmenetze für Quartiere und Einzelhäuser.



3

Let the **Sunshine in**

Wie wir **Wettervorhersagen sinnvoll nutzen**

Drei Fragen an Christian Hefp, Doktorand am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen.

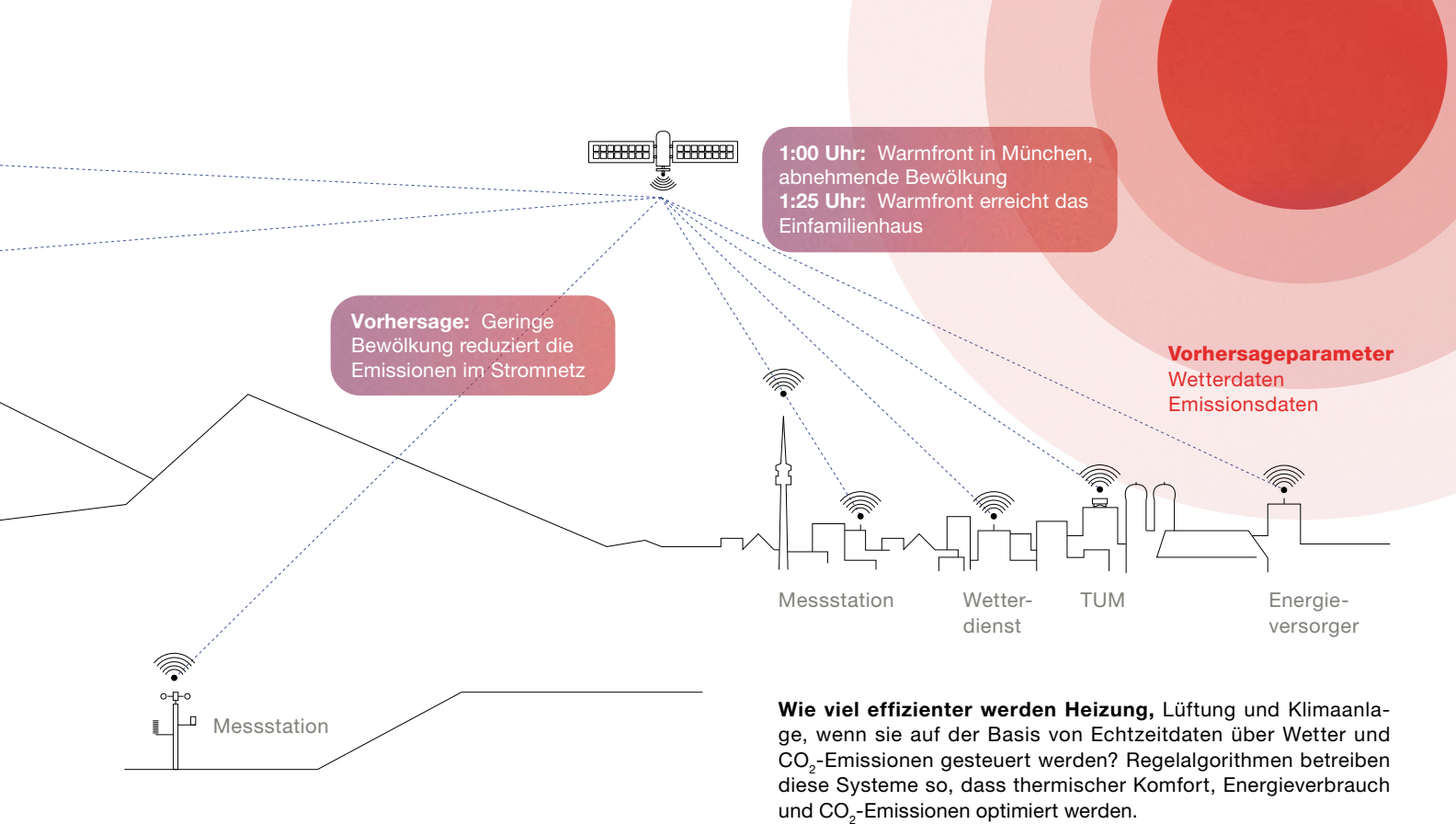
Herr Hefp, welche Rolle spielt die Digitalisierung bei der Wärmewende?

Durch die Digitalisierung lässt sich in Gebäuden und Städten der Energieverbrauch besser an den tatsächlichen Bedarf anpassen, und im besten Fall ist die Reduzierung der Treibhausemissionen und nicht die finanzielle Einsparung der maßgebende Regelungsparameter. Mess- und Sensordaten über den Energie- und Wärmeverbrauch in Echtzeit und deren Prognose eröffnen ein enormes Potenzial, um die Effizienz des Wärme- und Stromnetzes zu optimieren. Dies kann langfristig zu einer

größeren Energieflexibilität und somit zu einer gesteigerten Netzstabilität führen. Auch die Verbraucher können ein intelligentes Energiemanagement nutzen, um den Energieverbrauch zu senken und somit Kosten und CO₂ einzusparen.

Link

www.arc.ed.tum.de/en/klima/start



Wie viel effizienter werden Heizung, Lüftung und Klimaanlage, wenn sie auf der Basis von Echtzeitdaten über Wetter und CO₂-Emissionen gesteuert werden? Regelalgorithmen betreiben diese Systeme so, dass thermischer Komfort, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen optimiert werden.

Sie verfassen eine Dissertation, die analysiert, wie sich Wetter- und CO₂-Daten sinnvoll für die Wärmewende nutzen lassen. Können Sie das beschreiben?

Ganz konkret geht es in meiner Dissertation darum, den Betrieb von Gebäudetechnik effizienter zu gestalten. Ziel ist es, mit Regelalgorithmen den Betrieb so zu optimieren, dass möglichst wenig Energie verbraucht und CO₂-Emissionen verursacht werden und gleichzeitig der thermische Komfort nicht beeinträchtigt wird. Dabei mache ich mir aktuelle und zukünftige Wetter- und CO₂-Emissionsdaten des Stromnetzes von Deutschland zu Nutze. Das Ganze habe ich zu Beginn in der Solarstation getestet, einem Messraum auf dem Dach des Hauptgebäudes der TUM in knapp 30 Meter Höhe. Anhand dieser Daten teste ich verschiedene Szenarien in einer thermodynamischen Simulation. So fährt sich beispielsweise das Heizsystem bereits dann herunter, wenn es dank der Prognosedaten weiß, dass bald die Sonne herauskommt. Oder ich kann elektrische Geräte wie eine Wärmepumpe in Phasen betreiben, in denen die Emissionen des elektrischen Stromnetzes aufgrund von einem hohen Anteil erneuerbarer Energien gerade niedrig sind.

Der Regelalgorithmus lässt sich in der Simulation unter unterschiedlichen Bedingungen testen. So kann man beispielsweise den Standort eines geplanten Gebäudes verändern und evaluieren, wie sich eine solche Regelung in einem anderen Klima oder in Kombination mit einem anderen elektrischen Stromnetz verhalten würde.

Welche Erkenntnisse konnten Sie ableiten?

Da ich noch in den letzten Zügen meiner Dissertation stecke, kann ich das noch nicht zu hundert Prozent verifizieren, aber es lassen sich natürlich schon einige Tendenzen erkennen. Was sich auf jeden Fall zeigt: Die thermische Masse eines Gebäudes hat einen großen Einfluss auf den Erfolg einer solchen intelligenten Regelung. Das bedeutet: Je mehr Masse ein Gebäude hat, desto länger ist seine Reaktionszeit auf Temperaturunterschiede, und dies führt zu mehr Energie- und CO₂-Einsparungen. Es lässt sich erkennen, dass das besser für den Energiebedarf bei der Kühlung als bei der Erwärmung funktioniert. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass viel CO₂ eingespart werden kann, wenn Energie dezentral zum Beispiel durch Photovoltaik oder Solarthermie hergestellt wird, weil der Energieverlust durch den Transport wegfällt. ■

Grafiken: edlundsepp (Quelle: TUM)

4

Das geht aufs Haus

Wie wir Gebäude klimaneutral wärmen

Forschung am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Bauen und Planen

Link

www.cee.ed.tum.de/enpb

Träumen Sie von einem Haus, das mehr Energie produziert als Sie verbrauchen? Prof. Werner Lang und sein Team haben das Energiekonzept für ein solches Haus in der bayerischen Gemeinde Hallbergmoos bereits vor knapp zehn Jahren konzipiert und gemeinsam mit einem engagierten Bauträger gebaut. Die Böden, die Wände und das Dach des Gebäudes entsprechen ambitionierten Effizienzhaus-Standards. Eine Photovoltaik-Anlage liefert die Energie für Strom und heißes Wasser – und zwar mehr, als tatsächlich benötigt wird. Die überschüssige Energie wird für die Ladestation des Elektroautos genutzt bzw. wird ins Stromnetz eingespeist. „Die für uns wichtige Erkenntnis war damals: Es ist möglich, ein solches Plusenergiehaus zu realisieren. Und zwar relativ einfach. Der Bau war weder extrem aufwändig noch teuer“, so Lang. Die Pionierleistung lag damals darin, diesen Beweis anzutreten und den Energie- und Wärmeverbrauch zwei Jahre lang zu messen und zu analysieren.

Das Effizienzhaus

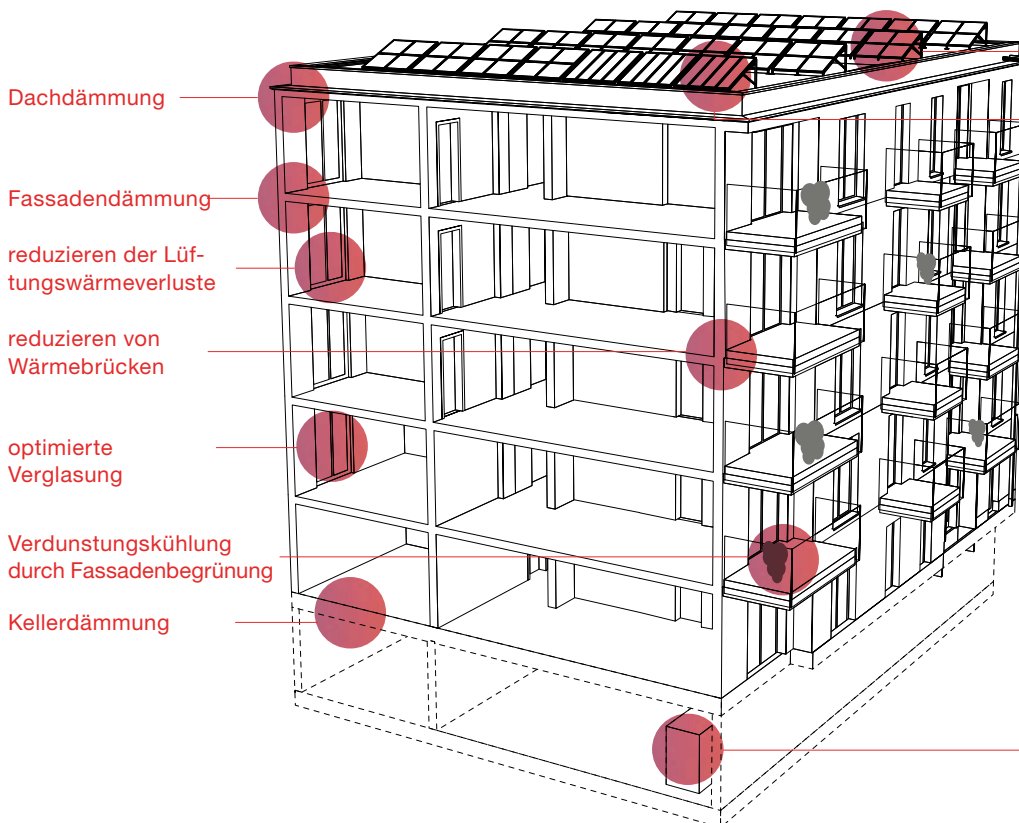
Für energiesparende Gebäude gibt es in Deutschland einen Orientierungsmaßstab: das Effizienzhaus. Die Kennzahl gibt an, wie energieeffizient ein Gebäude im Vergleich zu einem Referenzgebäude ist. Die Kennzahl 40 bedeutet, dass das Effizienzhaus nur 40 Prozent der Primärenergie benötigt, verglichen mit einem Referenzgebäude (nach Gebäudeenergiegesetz).

Ein paar Schritte weiter als beim Plusenergiehaus in Hallbergmoos ging es bei dem internationalen studentischen Wettbewerb „Solar Decathlon“. Die Studentinnen und Studenten realisierten ein Plusenergiehaus mit einem hervorragenden Energiekonzept, das zudem fast vollständig aus nachhaltigen Materialien besteht und sogar Wasser effizient aufbereitet. Sie meisterten eine weitere Herausforderung: Da das Haus seit dem Abschluss des Wettbewerbs im heißen Texas steht, sollte es nicht nur wärmen, sondern vor allem kühlen. Diese Aufgabe übernimmt eine Wärmepumpe, die sozusagen umgekehrt funktioniert. Anstatt der Umgebung warme Luft zu entziehen und damit die Räume zu heizen, gibt sie die Wärme aus den Räumen an die Umgebung ab.

Wie geht's, altes Haus?

Rund 37 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs gehen auf das Konto der Gebäude – 32 Prozent für die Raumwärme und fünf Prozent für Warmwasser. Davon entfallen drei Viertel auf den Betrieb und der Rest auf die graue Energie. Das ist die Energie, die beim Gebäudebau sowie bei der Herstellung, dem Transport, dem Einbau und der Entsorgung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen, Sanitär- und Elektroinstallationen, Beleuchtungssysteme und Sicherheitstechnik verbraucht wird. Die Herausforderung sind vor allem Bestandsgebäude. „65 Prozent der Gebäude wurden vor 1977 gebaut, also

Stellschrauben an der Gebäudehülle



Stellschrauben der regenerativen Gebäudetechnik

Strom aus Photovoltaik

Warmwasser über Solarthermie

Umweltwärme durch Wärmepumpen (z. B. aus der Luft, Grundwasser, Geothermie)

bevor die erste Wärmeschutzverordnung in Kraft trat“, so Lang. Bis dahin hatte Deutschland keine öffentlich-rechtlichen Vorschriften für den energiesparenden Wärmeschutz von Gebäuden. Ein typisches unsaniertes Einfamilienhaus aus den 1970er Jahren benötigt circa 250 kWh pro Quadratmeter und Jahr Heizenergie. Laut Niedrigenergiestandard sollten es 25 kWh pro qm und Jahr sein.

Los geht's!

Wie lässt sich das ändern? Laut Lang gibt es zwei wesentliche Stellschrauben, die ineinandergreifen: „Erstens können wir durch Sanierungsmaßnahmen wie Fassaden- und Dachdämmung sowie Einbau dreifach verglasteter Fenster den Wärmeverlust und damit den Energiebedarf drastisch reduzieren. Zweitens sollten wir deutlich mehr Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien wie etwa Photovoltaik und Geothermie beziehen.“ Die positiven Auswirkungen solcher Maßnahmen zeigten Lang und

sein Team beispielhaft für Neubauten im Forschungsprojekt „BEWOOpt“. Hier untersuchten sie, wie sich ökologisch und ökonomisch optimierte Häuser realisieren lassen. Durch eine umweltgerechte Gebäudehülle und den Einsatz von Photovoltaik lassen sich die Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus von 50 Jahren hinweg um mehr als 70 Prozent im Vergleich zu einem Referenzgebäude senken.

Laut dem European Green Deal will Europa bis 2050 die CO₂-Emissionen auf null reduzieren und damit der erste klimaneutrale Kontinent werden. Um das Ziel zu erreichen, ist allein in Deutschland eine Sanierungsquote von vier Prozent pro Jahr notwendig. Derzeit liegt die Quote bei gerade mal 0,8 Prozent pro Jahr.

„Wir können jetzt loslegen“, sagt Lang. „Im Neubau ist etwa KfW 40 Standard, das ist zukunftsfähig, das können wir auch bei Bestandsgebäuden erreichen.“ ■



Prof. Thomas Hamacher

ist Professor für erneuerbare und nachhaltige Energiesysteme. Davor arbeitete Hamacher am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, zuletzt als Leiter der Gruppe für Energie- und Systemstudien.



Dr. Kai Zosseder

forscht am Lehrstuhl für Hydrogeologie. Davor war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Risikoanalyst am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) und am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU).



Christian Hefp

Seit seinem Abschluss als Master of Science ist Christian Hefp Doktorand und stellvertretender Leiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, den Prof. Thomas Auer inne hat.



Prof. Werner Lang

ist Inhaber des Lehrstuhls für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) und Vizepräsident für Nachhaltige Transformation an der TUM. Davor war er Professor für nachhaltiges Bauen und Leiter des Zentrums für Nachhaltige Entwicklung an der University of Texas School of Architecture in Austin, Texas.

Wie kann Forschung die Transformation zur Nachhaltigkeit voranbringen?

Prof. Werner Lang ist TUM Vizepräsident für Sustainable Transformation. Für den vorherigen Beitrag sprachen wir mit ihm und anderen Kollegen zu Strategien für die Wärmewende. Mehrmals klang an, dass die Technologien vorhanden wären, es aber an der Umsetzung hapere. Deshalb stellen wir hier die Frage, was die TUM tun kann, um die erarbeiteten Lösungen für mehr Nachhaltigkeit in die Anwendung zu bringen.

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

How Can Research Advance Sustainable Transformation? E

We asked Prof. Werner Lang, TUM Vice President for Sustainable Transformation, what TUM can do to apply the results of its research in support of greater sustainability. His answer? Interdisciplinary research integrating the social sciences to ensure that developed solutions take account of people's needs, and translating this research into market-ready products through UnternehmerTUM. □



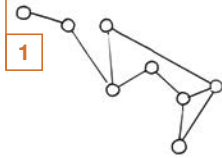
Mehr über Nachhaltigkeit an der TUM:

www.tum.de/en/about-tum/goals-and-values/sustainability

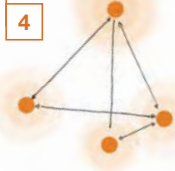
Grüne und blaue Infrastruktur
Wälder im Klimawandel



Nutzung und soziale Praktiken
Bezahlbarer Strom für
entlegene Dorfgemeinschaften



Ressourcenströme und Energie
CO₂ als Rohstoff für Plastik



Professor Lang, die TUM hat sich 2022 eine Nachhaltigkeitsstrategie gegeben. Wie bringt ihre Forschung die Transformation zur Nachhaltigkeit voran?

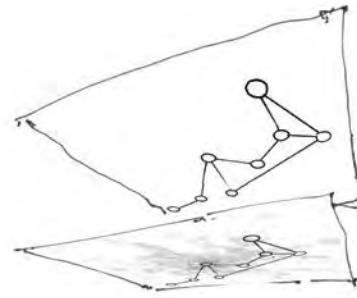
Die 2015 von den Vereinten Nationen verabschiedete Agenda 2030 hat mit ihren 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung ein globales Zeichen für die wirtschaftliche, soziale und ökologische Transformation aller Mitgliedsstaaten gesetzt. Die Ziele der Agenda 2030 finden sich zu einem großen Teil in unserer eigenen TUM Sustainable Futures Strategy 2030 wieder, die insgesamt sechs Handlungsfelder ausweist. Hier spielt das Themenfeld Forschung eine zentrale Rolle – sowohl im Grundlagen- als auch im angewandten Bereich. Vor dem Hintergrund der erwähnten 17 Ziele bringt die Forschung an der TUM die Nachhaltigkeitstransformation mit großen Schritten voran, was einen Großteil dieser Ziele angeht. Beispiele sind 'Gesundheit und Wohlergehen', 'sauberes Wasser', 'saubere Energie', 'Industrie, Innovation und Infrastruktur', 'Nachhaltige Städte und Gemeinden', 'Nachhaltiger Konsum und Produktion', 'Maßnahmen zum Klimaschutz', um nur einige zu nennen. Viele unserer Forschungsbereiche befassen sich teilweise seit Jahrzehnten mit Nachhaltigkeit, und auf dieser Basis setzen wir unsere eigene Transformation auf. ▷



Mobilität
Ein digitaler Zwilling des
Verkehrsgeschehens in Echtzeit



2 Gebäude und Außenanlagen
Digitale Transformation auf der Baustelle



1 Nutzung und soziale Praktiken

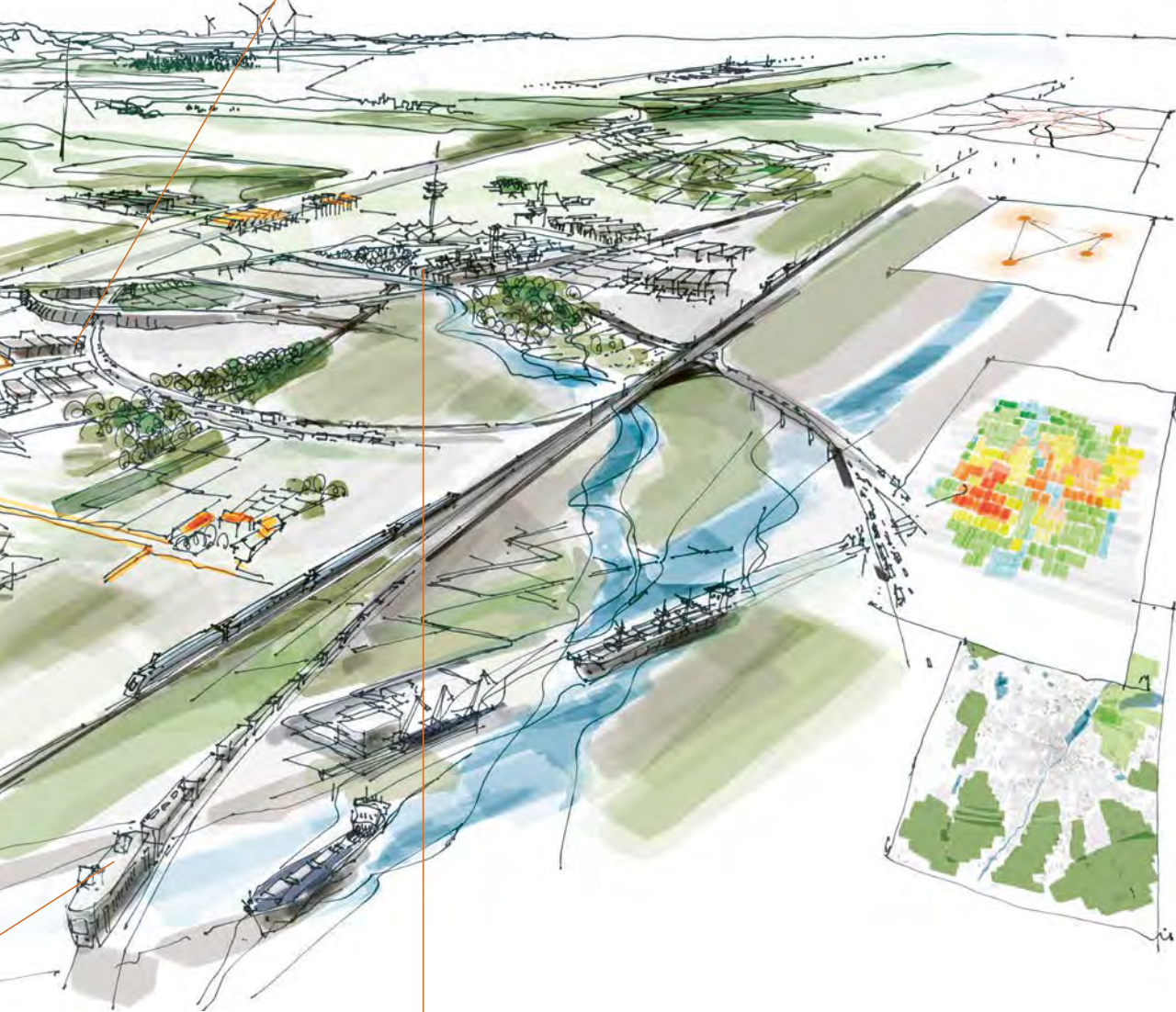
2 Gebäude und Außenanlagen

3 Mobilität

4 Ressourcenströme und Energie

5 Klima und Mikroklima

6 Grüne und blaue Infrastruktur



5 Klima und Mikroklima
Bereitstellung von Satellitendaten, um Veränderungen in der Landnutzung und durch den Klimawandel sichtbar zu machen

Unsere gebaute Umwelt lässt sich in komprimierter Form als ein vernetztes System dieser, miteinander verflochtenen, Themen darstellen: Nutzung und soziale Praktiken, Gebäude und Außenanlagen, Mobilität, Ressourcenströme und Energie, Klima und Mikroklima sowie grüne und blaue Infrastruktur.

Die Transformation zur Nachhaltigkeit muss diese Bereiche analytisch angehen, damit sie als System funktionieren. Die TUM forscht in all diesen Bereichen, wie hier mit je einem Beispielprojekt dargestellt.

Ausgründungen bringen an der TUM generiertes Wissen in die Wirtschaft. An den Schnittpunkten zwischen Forschungsthemen und gesellschaftlichen Anforderungen entdecken Start-ups neue, sinngebende Anwendungsfelder – insbesondere für die Transformation zur Nachhaltigkeit.

Energie & Versorgung

Gebaute Umwelt

Mobilität & Raumfahrt

Landwirtschaft, Ernährung, Forstwirtschaft und andere Landnutzung

Industrie & Kreislaufwirtschaft

Klimaschutzmaßnahmen

Resilienz

Verantwortungsvolles Ressourcen-Management

Plan4better

Planen für die 15-Minuten-Stadt

HopfON

Bauen mit Hopfen

air up

Geschmack ins Wasser bringen, ohne ihm wirklich etwas beizumischen

TUM Venture Labs

Als gemeinsame Initiative der TUM und der UnternehmerTUM unterstützen die TUM Venture Labs Talente und Start-ups, ihre Deep-Tech- oder Life-Science-Ideen erfolgreich zu etablieren. Spezifisches Domain-Wissen und eine durchgehende Unterstützung ermöglichen skalierbaren, nachhaltigen und globalen Impact.

In der Gesellschaft beobachten wir einerseits eine starke Fixierung auf Fortschritt und Technik, beispielsweise auf die neuesten Gadgets. Andererseits werden nötige Veränderungen, für die die Technik vorhanden ist, nur zögerlich umgesetzt. Wie gehen wir, wie geht die TUM damit um?

Vor allem muss man erkennen, dass die Transformation zur Nachhaltigkeit nur interdisziplinär unter Einbindung der Gesellschaft gelingen wird. Die TUM hat sich deshalb in den vergangenen Jahren strukturell enorm verändert. Die bisher disziplinär ausgerichteten Fakultäten wurden im Rahmen von sieben Schools neu gefasst, die die großen Wissenschaftsdomänen umspannen und deren Forschung auf nachhaltige Innovation für Mensch, Natur und Gesellschaft ausgerichtet ist. Damit sind wir ideal aufgestellt, um die großen Fragen von heute fachübergreifend anzugehen. Unsere Agenda 2030 stellt explizit den Mensch in den Mittelpunkt. Und ein menschliches Bedürfnis ist eben auch der Erhalt der Biosphäre. Wenn wir Lösungen erarbeiten, die die Menschen nicht möchten, laufen wir ins Leere. Aber wenn unsere Lösungen die planetaren Grenzen sprengen, sind sie auch wertlos.

Nehmen wir ein Beispiel aus unserem Arbeitsbereich: Das Verbundprojekt grüne Stadt der Zukunft erforscht in München übertragbare Konzepte für klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt. Von Anfang an war die Soziologie mit an Bord. Die Ergebnisse der Umfragen und Bürgerbeteiligungen flossen in die Wettbewerbsausschreibungen mit ein. In einem der sechs Reallabore, in Moosach, werden nun die ersten Projekte umgesetzt. Hier geht es konkret darum, zusätzlichen Wohnraum so zu schaffen, dass der Stadtteil sich nicht stärker aufheizt – beispielsweise durch begrünte Fassaden.

UnternehmerTUM

Die UnternehmerTUM GmbH ist ein An-Institut der TUM und mit über 50 jährlichen Technologie-Gründungen das führende Zentrum für Gründung und Innovation in Europa. Start-ups bietet UnternehmerTUM einen Rundum-Service von der ersten Idee bis zum Börsengang. Etablierten Unternehmen bietet UnternehmerTUM Zugang zu seinem Ökosystem.

Was ist mit Forschungsergebnissen, die nicht schon im Rahmen von Reallaboren umgesetzt werden? Wie kann die TUM fördern, dass sie in die Anwendung kommen?

Hier spielen das Gründerzentrum UnternehmerTUM und unsere unternehmerischen Innovationszentren, die Venture Labs, wichtige Rollen. Sie transferieren an der TUM generiertes Wissen in die Wirtschaft. Die UnternehmerTUM hat die Aufgabe Ideen zu fördern, bis sie als produktreife Lösungen in den Markt gehen. Der Green Deal der Europäischen Kommission eröffnet wachsende Geschäftsfelder für die Themen Bekämpfung des Klimawandels, Klimaanpassung sowie zirkuläre Konzepte im Sinne von Ressourcenschonung. Die UnternehmerTUM richtet ihr Handeln auch danach aus und schöpft dafür aus Forschungsaktivitäten an der TUM, beispielsweise zu den Bereichen Bauwesen, Energie, Mobilität, Landwirtschaft und Ernährung oder Kreislaufwirtschaft. Ein relativ junges Beispiel für eine solche Ausgründung ist das Start-up HopfON, das zirkuläre Baumaterialien aus Abfällen bei der Hopfenernte entwickelt. ■

Christine Rüth

Autoren

Dr. Klaus Manhart arbeitet seit 1999 als freier Autor für IT und Wissenschaft in München. 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.

www.klaus-manhart.de

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

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



©2024 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), Tina Heun-Rattei,
Dr. Christine Rüth, Dr. Karoline Stürmer

Bildredakteurin

Andrea Klee

Übersetzung und Lektorat

Baker & Company, München

Design und Layout

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Autorinnen und Autoren in dieser Ausgabe

Dr. Klaus Manhart, Lisa Pietrzyk, Stefanie Reiffert, Gitta Rohling,
Dr. Brigitte Röthlein, Dr. Christine Rüth, Christian Schnurr,
Dr. Eve Tsakiridou, Undine Ziller

Fotografen

Uli Benz, Juli Eberle, Astrid Eckert, Andreas Heddergott,
Magdalena Jooss, Israel Tan Si Lie

Redaktionsanschrift

Technische Universität München
Corporate Communications Center
D-80290 München

Website

www.tum.de/faszination-forschung

Email

faszination-forschung@tum.de

Druck

Mayr Miesbach GmbH, Miesbach

Auflage

70.000

ISSN: 1865-3022

Erscheinungsweise

Zweimal jährlich

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe

März 2024

Titelfoto

ediundsepp/midjourney

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.

Gefördert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



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.



**Talente fördern.
Zukunft gestalten.**



**Hinweis zur
Umschlaggestaltung:**

Das Titelbild dieser Ausgabe ist eine KI-generierte, abstrakte Darstellung der Kreislaufwirtschaft. Es zeigt fiktive Komponenten aus industriellen Prozessen, die fotorealistisch umgesetzt wurden.

Werkzeug zur Erstellung: midjourney
Prompt: Moderne Makrofotografie der Kreislaufwirtschaft, die die Verwendung von recycelten Materialien für neue Produkte als kategorisiertes Diagramm zeigt.

Tool für die Weiterentwicklung:
Adobe Photoshop