

Faszination Forschung

Forschungshighlights der TUM

Technische Universität München

Das Wissenschaftsmagazin

März 2023 | Edition 29

Die Physik der Selbst- organisation in der Biologie

Medizinische Materialien – Wie im Körper der Patienten neue Herzklappen wachsen

Architektur – Digitale Transformation auf der Baustelle

6G-Netz – Visionäre Pläne für das Netz der Zukunft

ISSN 18653022



9 771865 302004

Schutzgebühr
EUR 9,00



As builders of the future, we work all day to make your daily life better. **By thinking beyond chemistry.**

Whether it's biotechnology, physics or materials science – we connect disciplines, areas of expertise and perspectives to create sustainable solutions that add value in partnership with our customers. That means we play a leading role in our markets as well as in driving our industry's development. We are passionate about giving our customers' products outstanding properties. And that answers the question of why we exist: to make people's lives better day in, day out. **Leading beyond chemistry to improve life, today and tomorrow.**

.....
www.evonik.com



Liebe Leserinnen und Leser,

Seien wir ehrlich – trotz geopolitischer Konflikte, Energie- und Klimakrise genießen wir in Deutschland einen hohen Lebensstandard und Wohlstand. Dass es uns besser geht als vielen anderen Menschen auf der Welt, darf aber nicht unsere Veränderungsbereitschaft zum Erlahmen bringen. Und schon gar nicht dürfen wir uns in der falschen Sicherheit wiegen, dass unser Wohlstand automatisch in die Zukunft vererbt wird und es immer so gut weiter geht. Im Gegenteil, gerade in Zeiten des Umbruchs ist und bleibt die Offenheit für neues Wissen und die Akzeptanz von innovativen Technologien in unserer Gesellschaft entscheidend für die Beantwortung der Frage, welche Rolle Deutschland und seine Wirtschaftskraft auch künftig in einer Welt spielen, in der niemand auf uns wartet.

Wir an der TUM wollen die Zukunftsgestaltung nicht anderen Reformmutigen in der Welt überlassen. Deshalb arbeiten unsere Studierenden, Mitarbeitenden, Alumni und Partner kräftig an wirksamen Lösungen zu den aktuellen Herausforderungen. Im Zentrum stehen dabei Mensch und Natur, denn Innovationen sollen verantwortungsvoll, vertrauenswürdig und nachhaltig sein.

„Was ist eine ‚gute‘ Innovation“ fragen wir in dieser Ausgabe der Faszination Forschung Prof. Sebastian Pfotenhauer. Für die Beantwortung dieser Frage reicht technologisches Wissen alleine nicht aus. Es braucht ein fundiertes Verständnis der sozialen, politischen und ethischen Aspekte von Innovationen.

Unabdingbar ist Innovation in der Biomedizin. Prof. Andreas Bausch erforscht kleinste Bausteine menschlicher Zellen, die für die Stabilität, aber auch für die Beweglichkeit von Zellen verantwortlich sind. Er will mehr über die Kräfte wissen, die Zellen bei biologischen Prozessen wie der Wundheilung und bei pathologischen Prozessen wie dem Krebs und der Metastasenbildung veranlassen, sich in Bewegung zu setzen.

Prof. Petra Mela entwickelt mit einer neuartigen 3D-Drucktechnik ein Trägergerüst, an dem eine Herzklappe aus körpereigenen Zellen einer Patientin oder eines Patienten wachsen kann. Mela geht davon aus, dass die neue Herzklappe aus körpereigenem Gewebe Nachteile herkömmlicher künstlicher Herzklappen wie Gerinnungsstörungen und Verkalkungen überwindet.

3D-Druck hält auch in der Baubranche Einzug, wo die Maßstäbe um Welten größer ausfallen. Prof. Christoph



Gehlen hat ein Verfahren zur Marktreife gebracht, bei dem Gesteinskörner Schicht für Schicht mit Zementleim verfestigt werden. So lassen sich Betonteile in bisher undenkbaren Strukturen erstellen. Prof. Kathrin Dörfler erforscht, wie sich Roboter auf Baustellen einsetzen lassen und im Team mit Menschen arbeiten. Bauen soll dadurch schneller, flexibler und vor allem ressourcenschonender werden. Der Mensch im Mittelpunkt – das ist auch beim künftigen Mobilfunkstandard 6G die Devise. Dieser verlagert den Schwerpunkt vom „Internet der Dinge“ auf den Menschen und seine Interaktion mit der ihn umgebenden Umwelt. Prof. Wolfgang Kellerer erforscht im 6G Zukunftslabor die wichtigsten Grundlagen des neuen Mobilfunkstandards.

Liebe Leserinnen und Leser, und jetzt stehen Sie im Mittelpunkt, denn für Sie haben wir diese Faszination Forschung geschrieben und gestaltet. Ich wünsche viel Vergnügen, neue Erkenntnisse und Inspiration beim Lesen!

Ihr

Thomas F. Hofmann

Thomas F. Hofmann
Präsident

Seite 34

Digitale Transformation auf der Baustelle



Inhalt

06 Bei Innovation geht es um gesellschaftlichen Wandel

Nachhaltige Innovation beinhaltet nicht nur, umweltfreundlichere Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln. Sie muss auch gewährleisten, dass wir als Gesellschaft mit den Folgen von Innovation langfristig und sozial gerecht leben können, sagt Sebastian Pfotenhauer.

12 Die Physik der Selbstorganisation in der Biologie

Andreas Bausch entdeckte, wie sich Moleküle zu koordinierten Bewegungen organisieren können. Aufbauend darauf untersucht er heute Organoide und initiiert Forschungskollaborationen über die Fächergrenzen hinweg, um ein neues Verständnis von Organwachstum zu entwickeln.

22 Mit RNA heilen

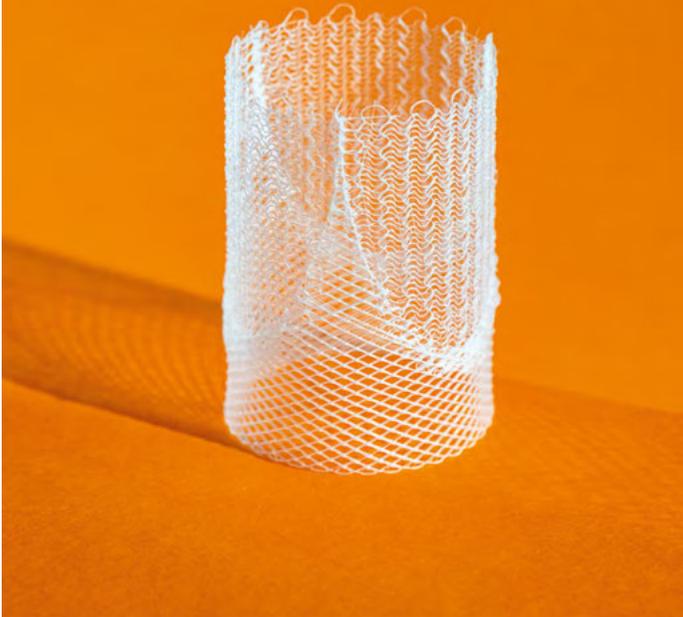
Das Start-up RNATICS GmbH entwickelt RNA-basierte Medikamente für die Therapie von COVID-19 und anderen Krankheiten. Es erhielt 7,5 Millionen Euro Fördergelder, um sein erstes RNA-Medikament in klinische Studien zu bringen.

24 Wie im Körper der Patienten neue Herzklappen wachsen

Petra Mela nutzt eine spezielle 3D-Drucktechnik, um Herzklappengerüste herzustellen. Entlang dieser Implantate könnten Menschen mit Herzklappenerkrankungen eines Tages gesunde Herzklappen aus eigenem Gewebe bilden. Das neue Gerüst könnte typische Probleme mit künstlichen Herzklappen, wie zum Beispiel Alterung, überwinden.

Seite 24

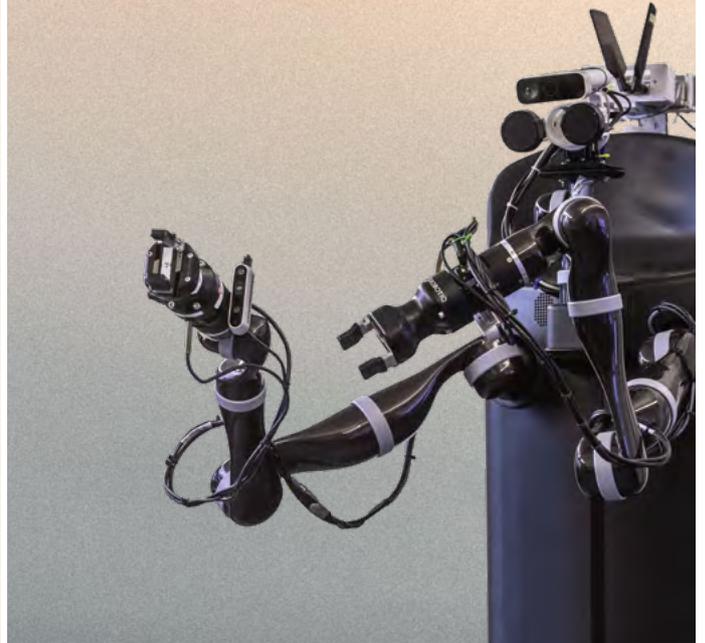
Wie im Körper der Patienten **neue Herzklappen wachsen**



Bildquellen: Juli Eberle, Astrid Eckert/TUM, Andreas Heddergott

Seite 46

Visionäre Pläne für das **Netz der Zukunft**



34 Digitale Transformation auf der Baustelle

Additive Fertigung verspricht schnelles, flexibles und umweltfreundliches Bauen. Kathrin Dörfler forscht an mobilen Robotern, die sich direkt auf Baustellen einsetzen lassen. Christoph Gehlen entwickelt 3D-Druck-techniken speziell für Betonbauteile.

42 Additive Fertigung im Flug

Flotten mit von Bienen inspirierten, fliegenden 3D-Druckern könnten eines Tages im Flug Strukturen bauen und reparieren.

44 Erstes Neutrino-Bild einer aktiven Galaxie

Ein internationales Forschungsteam unter der Leitung der TUM entdeckte eine Quelle hochenergetischer Neutrino-Strahlung in der aktiven Galaxie NGC 1068.

46 Visionäre Pläne für das Netz der Zukunft

Es ist wichtig, dass die Wissenschaft weiß, welche Anforderungen die künftigen Nutzerinnen und Nutzer an das 6G-Netz haben, sagt Wolfgang Kellerer. Er koordiniert das 6G Zukunftslabor Bayern, in dem zwölf Lehrstühle der TUM die Voraussetzungen und Möglichkeiten von 6G-Kommunikationsnetzen untersuchen.

56 Auf dem Weg zur Super-Batterie

Ein tiefer Blick in das Innere von Batterien während der Lade- und Entladevorgänge.

In jeder Ausgabe

03 Editorial

58 Autorinnen und Autoren

58 Impressum

Bei Innovation geht es um **gesellschaftlichen** Wandel

Nachhaltige Entwicklung geht häufig mit dem Ruf nach mehr Innovationen einher. Aber was genau ist die „richtige“ Art Innovation? Und in welcher Beziehung steht Innovation zu politischen Prioritäten und gesellschaftlichen Anliegen? Wir sprachen mit Sebastian Pfoth, Leiter des Departments Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft und Professor für Innovationsforschung an der TUM School of Social Sciences and Technology und der TUM School of Management.

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-29

Innovation is about social change



Innovations are always received differently in different societies, says Prof. Sebastian Pfoth. In democratic societies, they will encounter a diversity of political positions and social preferences, including resistance. Pfoth warns that these conflicts cannot be resolved by simply appealing to people's rationality. Sustainable innovation is not just about making products and services more environmentally friendly, but also about making sure that we as societies can live with the consequences of innovation over the long term and in a socially just manner. This means changing innovation processes to take account of inclusiveness and deliberation, public legitimacy for technology-driven change processes and the anticipation of unintended consequences. At TUM's new School of Social Sciences and Technology, Pfoth heads the Master's program in "Responsibility in Science, Engineering and Technology", which is one core example of how TUM puts social responsibility at the heart of its institutional mission. □



Link

www.mcts.tum.de/innovationsforschung/overview/



„Menschen können Innovationen auch aus Gründen ablehnen, die nichts mit Irrationalität oder Ignoranz zu tun haben.“

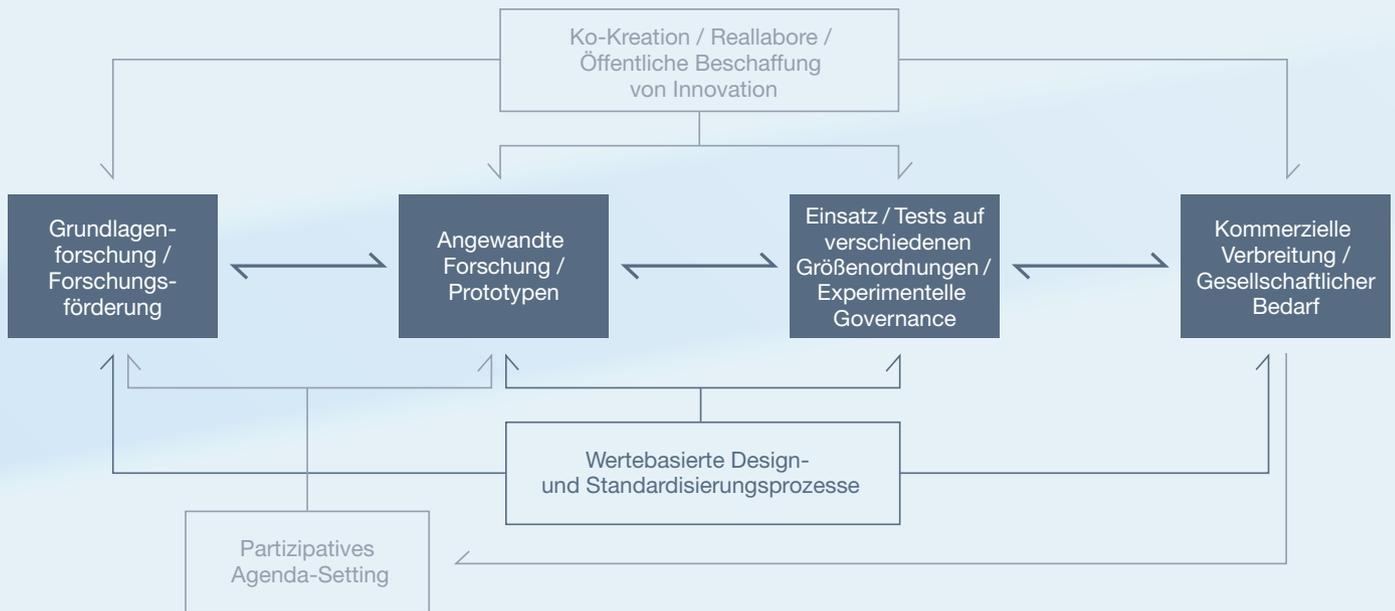
Sebastian Pfothenhauer

Herr Professor Pfothenhauer, was ist eine „gute“ Innovation?

Das ist die Frage, nicht wahr? Früher haben wir uns hauptsächlich damit beschäftigt, was Innovation ist und wie wir für mehr Innovation sorgen können. Heute ist Innovation allgegenwärtig, sowohl in Form neuer Produkte und Dienstleistungen als auch im Sinne eines weitreichenderen gesellschaftlichen Diskurses, der Unternehmen und den Staat antreibt. Doch die Zeiten ändern sich. In meiner Forschung beobachte ich einen zunehmenden Paradigmenwechsel vom einfachen „mehr Innovation“ – was ich manchmal als blinden, pauschalen „Innovationsimperativ“ bezeichne – hin zu einem differenzierteren Verständnis dafür, *welche Art* von Innovation wir als Gesellschaft tatsächlich wollen und brauchen.

Wie wird Innovation in verschiedenen Gesellschaften und Kulturen angegangen?

Jede Gesellschaft hat ihre eigene Herangehensweise an dieses Thema. In einer neuen Veröffentlichung analysieren wir die Innovationskultur in Bayern, die im Großen und Ganzen versucht, sozioökonomische Strukturen eher zu erhalten, als sie radikal zu verändern – im Gegensatz zur weniger restriktiven und disruptiven Kultur des Silicon



Innovation wird nach wie vor häufig als ein quasi-linearer Prozess gedacht, obwohl diese Vorstellung sehr reduktionistisch ist. Um mehr Komplexität Rechnung zu tragen, vermischen ko-kreative Prozesse oft vorsätzlich die vermeintlichen Stadien des Innovationsprozesses. Partizipatives Agenda-Setting, Reallabore sowie wertebasierte Design- und Standardisierungsprozesse sind politische Instrumente, mit denen gesellschaftliche Ziele, Anliegen und Werte in Innovation berücksichtigt werden können.

Valley. Auch mit neuen Technologien gehen verschiedene Gesellschaften unterschiedlich um. In den 90er Jahren wurden beispielsweise gentechnisch veränderte Kulturpflanzen in den USA als Weiterentwicklung der bereits existierenden Biotechnologien wahrgenommen, nicht als grundsätzlich anders oder risikoreicher. Sie war nach diesem Verständnis von den damals geltenden gesetzlichen Bestimmungen abgedeckt. Im Gegensatz dazu war Großbritannien gegenüber gentechnisch veränderten Organismen ungewöhnlich zurückhaltend. Das Land war kurz zuvor von der BSE-Krise heimgesucht worden und das Vertrauen der Bevölkerung in das Risikomanagement staatlicher Behörden und Fachleute hatte erheblich gelitten. Deutschland wiederum verfolgte – vor dem Hintergrund einer seit Jahrzehnten starken Umweltbewegung – eine extrem vorsichtige Politik der kleinen Schritte mit detaillierten Vorschriften und öffentlich überwachten, versuchsweisen Tests zu den Auswirkungen von gentechnisch veränderten Pflanzen. Ähnliche Muster lassen sich auch in den Bereichen KI, Robotik, Neurotechnologie, Quantentechnologie oder autonomes Fahren beobachten – all diese Technologien untersuchen wir aktuell in unserer Arbeitsgruppe.

Welche Schlussfolgerungen ziehen Sie daraus?

Im Zentrum steht eigentlich eine ganz einfache Einsicht: Bei Innovation geht es um gesellschaftlichen Wandel. In demokratischen Gesellschaften werden neue Technologien daher stets auf ganz verschiedene politische Standpunkte und gesellschaftliche Vorlieben stoßen, auch auf Widerstand. Versuche, diese Interessenskonflikte mit Appellen an allgemeine Vorteile von Innovation oder an universelle Vernunft zu lösen, verkennen, dass Menschen bestimmte Technologien oder wissenschaftliche Erkenntnisse auch aus Gründen ablehnen können, die nichts mit Irrationalität oder Ignoranz zu tun haben.

Das heißt, Menschen, oder vielmehr ihre Haltung zu Innovation, verändern sich?

Genau. Und genau so ändern sich die Fragen, die wir als Gesellschaft heute Innovatoren stellen. Bislang wurden Wissenschaft und Technik von einigen wenigen Hauptakteuren wie Ingenieuren, Wissenschaftlern, Politikern und Unternehmern geprägt – leider meistens tatsächlich nur Männer. In unserer heutigen Welt mit ihren umstrittenen Entwicklungen, die sehr große Herausforderungen

darstellen – Klimawandel, die Macht von „Big Tech“, autonomes Fahrzeuge –, scheint dieser Top-Down-Ansatz nicht mehr zu genügen. Nachhaltige Innovation in diesem Sinne beinhaltet deswegen nicht nur, umweltfreundlichere Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln, sondern sie muss auch gewährleisten, dass wir als Gesellschaft mit den Folgen von Innovation langfristig und sozial gerecht leben können. Hierfür müssen Innovationsprozesse verändert werden im Hinblick auf stärkere Inklusion und Deliberation, Legitimität für technologiegetriebene Wandlungsprozesse und die Antizipation von unbeabsichtigten Konsequenzen.

Was muss sich ändern, damit wir beim Thema nachhaltige Innovation alle ins Boot holen?

Wir müssen uns stärker auf den *Prozess* konzentrieren: Wie können wir denjenigen, deren Leben beeinflusst werden wird, die Chance geben, schon im Frühstadium dieser Innovationen Einfluß zu nehmen und echte Änderungen in der Entwicklungsrichtung zu bewirken – sozusagen „stromaufwärts“ in der Innovationspipeline? Vielleicht kann ich das mit zwei Großprojekten illustrieren, bei denen wir genau das versuchen. Ich leite derzeit zusammen mit meinen Kollegen Gebhard Wulfhorst (Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung) und Markus Lienkamp (Fahrzeugtechnik) einen großen, vom Bund geförderten Forschungscluster – den „Münchener Cluster für die Zukunft der Mobilität in Metropolregionen“, kurz MCube. Hier war es uns wichtig, einen möglichst breiten, ko-kreativen Ansatz zu verfolgen. Deshalb müssen an allen Projekten neben Forschungsgruppen der TUM auch Unternehmen und Partner aus dem öffentlichen Sektor, inklusive der Zivilgesellschaft, beteiligt sein. Außerdem haben wir versucht, eine Balance zwischen technischen und sozialwissenschaftlichen Forschungsprojekten zu finden, letztere zum Beispiel zu Themen wie Mobilitätsgerechtigkeit, verantwortungsbewusste Innovation und lokale Street Experiments.

Bis vor kurzem habe ich ein großes europäisches Forschungsprojekt aus dem Horizon 2020-Programm namens SCALINGS koordiniert, das Möglichkeiten und Grenzen der gesellschaftlichen Mitgestaltung bei Wissenschaft und Innovation auslotet. Wir untersuchten hierbei zusammen mit Partnern aus zehn Ländern, wie sich sogenannte ko-kreative Ansätze für Innovation auf den Gebieten Robotik, Energie und autonome Fahrzeuge in größerem Maßstab umsetzen lassen. Unsere wichtigste



Prof. Sebastian Pfothenhauer

ist Carl-von-Linde-Professor für Innovationsforschung an der TUM School of Social Science and Technology, wo er dem Department Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft vorsteht, sowie Mitglied der TUM School of Management. Er ist Koordinator des vom Bund geförderten „Münchener Clusters für die Zukunft der Mobilität in Metropolregionen (MCube)“. Er kommentiert auf Twitter unter @smpfothenhauer verschiedenste Aspekte zum Thema Innovation und Gesellschaft.

Erkenntnis war, dass ko-kreative Ansätze nicht einfach skalierbar, also unverändert auf andere Situationen übertragbar, sind. Ein Pflegeroboter in einer Klinik in München wird daher nicht ohne weiteres in einer Klinik in Barcelona funktionieren. Das liegt daran, dass die genaue Art und Weise, wie Technologie, Nutzer und ökonomische und politische Bedingungen ineinandergreifen müssen, enorm variiert. Umso mehr Grund, frühzeitig die Sozialwissenschaften einzubinden, und zwar auf Augenhöhe.

Inwieweit berücksichtigen Sie diese Herausforderungen in Ihrer Lehre an der TUM?

Die TUM hat eine Reihe wichtiger Schritte unternommen,

„Fragen zur Beziehung zwischen Technologie und Gesellschaft werden nicht plötzlich verschwinden – im Gegenteil, sie werden immer zentraler für alles, was wir als Gesellschaft tun.“

Sebastian Pfotenhauer

um die gesellschaftliche Verantwortung in den Mittelpunkt ihrer institutionellen Mission zu stellen, insbesondere mit der Gründung der neuen School of Social Sciences and Technology (SOT) und der Stärkung der Sozialwissenschaften als gleichwertige Partnerin der technischen Disziplinen. An der SOT leite ich das Masterprogramm „Responsibility in Science, Engineering and Technology“, das aus dem Elitenetzwerk Bayern gefördert wird. Dort bringen wir sowohl Studierenden mit sozialwissenschaftlichem als auch technischem Hintergrund die Auseinandersetzung mit Fragestellungen zu dieser entscheidenden Schnittstelle nahe. In der TUM School of Management, wo ich Zweitmitglied bin, konzentrieren wir uns auf die verantwortungsvolle Technologieführerschaft als zentralen Wert und etablieren neue Anreizstrukturen, z. B. um die UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung in Forschung und Lehre zu unterstreichen.

Wie können wir verantwortungsvolle Innovationspraktiken sicherstellen, die unterschiedlichen Bedürfnissen gerecht werden?

Also was nicht funktioniert, ist, Fragen von Ethik und Verantwortung durch einen Checklisten-Ansatz einfach abzuhaken, wie es derzeit in vielen Förderprogrammen der Fall ist – auch bei der Europäischen Kommission. Wir müssen die Prozesse selbst reflektiver gestalten, also unsere organisatorische Kapazität zur Responsivität verbessern, und zulassen, dass Sozialwissenschaft und Zivilgesellschaft unbequeme Fragen stellen. Für mich persönlich hat der private Sektor einen der größten ungenutzten Hebel. Bei öffentlich finanzierter Forschung

gelingt es uns mittlerweile ganz gut, verantwortungsvolle Ansätze einzufordern. Aber die wenigsten Unternehmen haben heute einen sozial verantwortungsvollen Ansatz für Innovation. Das ist hochproblematisch, weil in vielen Branchen Unternehmen die treibende Kraft hinter Innovationen sind! Diese Spannung sieht man zum Beispiel an den offensichtlichen Fehlschlägen von, und der Kritik an Initiativen wie dem Google AI Ethics Board oder dem Facebook Oversight Board.

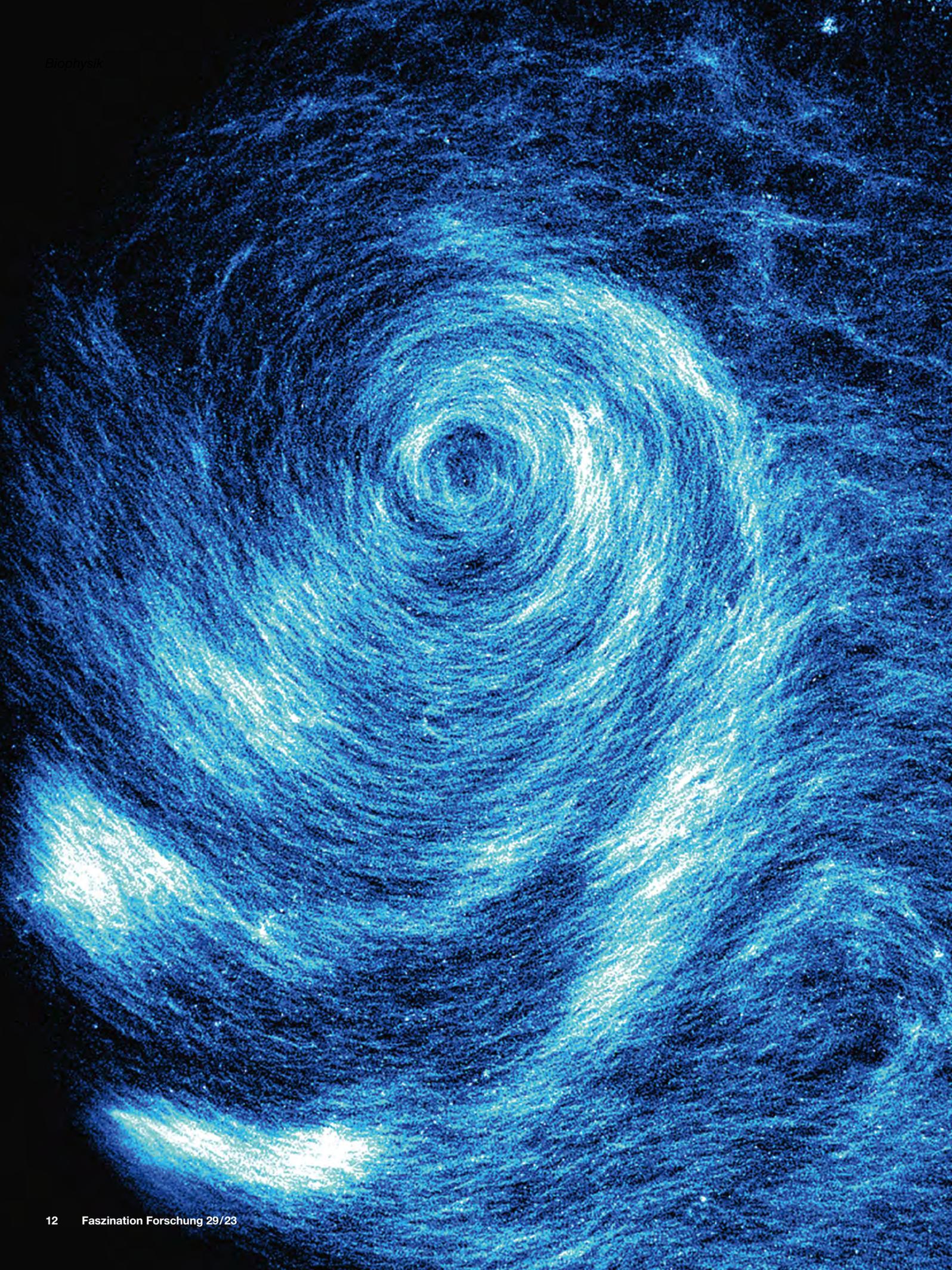
Ein abschließender Gedanke: Warum ist Ihr Forschungsschwerpunkt gerade jetzt so wichtig?

Fragen zur Beziehung zwischen Technologie und Gesellschaft werden nicht plötzlich verschwinden oder durch einen Geniestreich gelöst werden – im Gegenteil, sie werden immer zentraler für alles, was wir als Gesellschaft tun. Denken Sie nur daran, wie sich unser Verständnis von nachhaltiger Mobilität in den letzten drei Jahren zweimal verändert hat: Zunächst durch die Pandemie, mit massiven Auswirkungen auf den öffentlichen Verkehr und der verstärkten Nutzung von Telearbeit, und jetzt, als Folge des Ukraine-Kriegs, mit gebrochenen Lieferketten und steigenden Energiepreisen. Keine dieser Fragen sind rein technologisch. Sie verlangen vielmehr ein fundiertes Verständnis der sozialen, politischen und ethischen Aspekte.

■ *Eve Tsakiridou*

Anmerkung:

Bei diesem Interview handelt es sich um eine adaptierte Version eines längeren Textes, der ursprünglich für den PRME-Bericht 2021 der TUM School of Management vorgesehen war.



Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-29

The Physics of Self-Organization in Biology

E

How exactly does biological tissue find and maintain its shape? With a strongly interdisciplinary approach and a focus on development of powerful experimental model systems, biophysicist Prof. Andreas Bausch and his colleagues have made significant contributions to understanding this fundamental mystery of life. On the way, they have learnt a lot about the physics of biological matter in complex geometries.

Link

www.bauschlab.org/home

Die Physik der **Selbst-** **organisation** in der Biologie

Der Biophysiker Prof. Andreas Bausch erforscht kleinste Bausteine, die für verschiedene biologische Funktionen wie etwa die Bewegung von Zellen erforderlich sind. Seine Suche führte ihn von der Entdeckung der Art und Weise, wie sich Moleküle – ähnlich wie Vogelschwärme – zu koordinierten Bewegungen organisieren können, bis hin zur Strukturbildung in Organoiden.



Biologische Systeme experimentell zu beherrschen, erfordert gut kontrollierte Probenpräparate, die mithilfe biomolekularer Methoden rekonstituiert werden.

Den nördlichen Rand des TUM Campus in Garching ziert das nagelneue Gebäude des interdisziplinären Center for Functional Protein Assemblies (CPA). Aus dem Fenster seines Büros im dritten Stock blickt dessen Gründungsdirektor Andreas Bausch auf die Baustelle für das von ihm initiierte Center for Organoid Systems and Tissue Engineering, mit dem er eng zusammenarbeiten wird, wenn es im nächsten Jahr seinen Betrieb aufnimmt. Als Biophysiker ist Bausch davon überzeugt, dass sich das Verständnis für die Prozesse des Lebens nur durch eine Zusammenarbeit von Biologen und Physikerinnen verbessern kann.

Bausch hat sich schon immer zur Biologie der „weichen Materie“ (soft matter) hingezogen gefühlt, deren durch Unordnung und Zufälligkeit charakterisierte ‚Weichheit‘ offenbar entgegen allen Erwartungen die sehr präzisen und robusten Formen lebenden Gewebes hervorbringt.

Während seiner Promotion an der TUM untersuchte er die Viskoelastizität des Zytoplasmas der in den Zellen enthaltenen Flüssigkeit. Inspiriert von der Frage, wie sich Viruskapsiden zusammensetzen, beschäftigte er sich danach an der Harvard University damit, wie sich Kristalle

auf gekrümmten Oberflächen bilden. Zudem arbeitete er an der Entwicklung von Kolloidosomen, winzigen Kugeln, die bioaktive Moleküle einkapseln und abgeben können. Inzwischen haben die Arbeiten dazu den Weg bereitet für die Entwicklung von Produkten in der pharmazeutischen und in anderen Industrien. 2002 kehrte Bausch als Assistenzprofessor an die TUM zurück, um die mechanischen Eigenschaften des Zytoskeletts – des Gerüsts der Zelle – zu erforschen und sich mit rein physikalischen Fragen zu befassen, z. B. wie dessen mechanischen Kräfte übertragen werden.

Das Zytoskelett verleiht der Zelle ihre Struktur und Form. Zwei seiner Hauptbestandteile sind Mikrofilamente, also Polymere aus Aktinmolekülen, und Mikrotubuli, Polymere aus Tubulinmolekülen. Das Zytoskelett ist zwar in sich stabil, verformt sich aber, wenn sich die Zelle bewegen muss, zum Beispiel während der Zellteilung oder der Zellmigration in der Entwicklung oder während der Wundheilung. Dieser Prozess erfordert einen molekularen Motor – Myosin im Falle von Aktin, Kinesin für Tubulin – und ATP als Energiequelle.



Bausch begann seine Forschung auf diesem Gebiet mit einem sehr einfachen, zweidimensionalen In-vitro-Motilitätsassay, bei dem molekulare Aspekte der Zellbewegung experimentell nachgebaut werden. Myosin wird auf einem Zellulose-Gel fixiert, auf dem dann Aktinfilamente aufgebracht werden. Bei Zugabe von ATP beginnen sich die Filamente zu bewegen und können mittels konfokaler Mikroskopie untersucht werden, wobei Algorithmen die Bilder zusammenfügen. „Es handelt sich um ein minimales System, in das die Grundbestandteile eingegeben werden, und dann beobachtet man, was passiert. Sehr einfach und sehr schön“, beschreibt Bausch das Experiment.

Ein neues Phänomen

Eines Freitagnachmittags – es war im Herbst 2008 – stellten sich Bausch und sein Team mehr oder weniger beiläufig die Frage, was wohl passieren würde, wenn sie die Dichte der Aktinfilamente im Assay-Setup erhöhen würden. Sie probierten es aus und waren verblüfft, als sie sahen, wie sich die Filamente plötzlich in einer kollektiven Bewegung ausrichteten und in Clustern und kohärenten Mustern wie Tausende

„Es ist schön zu sehen, dass unsere einfachen Assays zum Verständnis des Wachstums von Organoid-Strukturen beitragen.“

Andreas Bausch

„Das sind die Momente, für die man in der Wissenschaft lebt.“

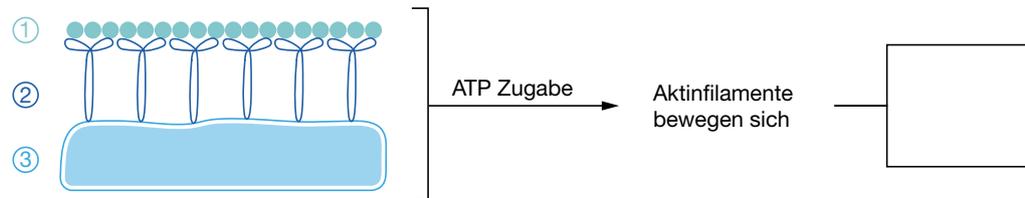
Andreas Bausch

von winzigen synchronisierten Schwimmern um ihr Deckglas schwirren. Für das Team war dies ein völlig neues Phänomen. „Wir beobachteten den Übergang von einem ungeordneten zu einem geordneten Zustand – eindeutig eine sehr große Sache“, erläutert Bausch. „Das sind die Momente, für die man in der Wissenschaft lebt.“

Sie wiederholten das Experiment mehrere Male und sahen, dass die Muster sowohl die Form von Bändern als auch von Wirbeln annehmen konnten. „Aber das hier ist eindeutig mein Favorit“, meint der Wissenschaftler und weist auf den Bildschirm seines Laptops, wobei seine Begeisterung so frisch zu sein scheint, als würde er das Phänomen zum ersten Mal sehen. „Die Wirbel sehen aus wie Galaxien, ist das nicht toll?“

Grundlegender Aufbau des Experiments:

Myosin (2) wird auf einem Zellulose-Gel (3) fixiert, auf dem Aktinfilamente (1) aufgebracht werden. Bei Zugabe von ATP beginnen sich die Filamente zu bewegen. Ab einer bestimmten Filamentdichte erscheint ein geordneter Zustand.



Mit diesem Assay konnte zum ersten Mal die Physik hinter diesem Phasenübergang experimentell beobachtet werden. In den nachfolgenden Jahren haben Bausch und sein Team dann die Mechanik und Dynamik dieser aktiven Materie untersucht. Sie nahmen auch Tubulin-Kinesin in das Repertoire auf. In Anlehnung an die Physik der Kristallisation auf gekrümmten Oberflächen und Kolloidosomen, die er während seiner Postdoc-Zeit untersucht hatte, entwickelte Bausch ein System, mit dem winzige Proben aktiver Materie in Tröpfchen, in diesem Fall in kugelförmige Vesikel aus Lipiddoppelschichten, induziert werden. Die Filamente ordnen sich auf den gekrümmten Innenflächen der Vesikel an, wo ihre dreidimensionale Bewegung untersucht werden kann.

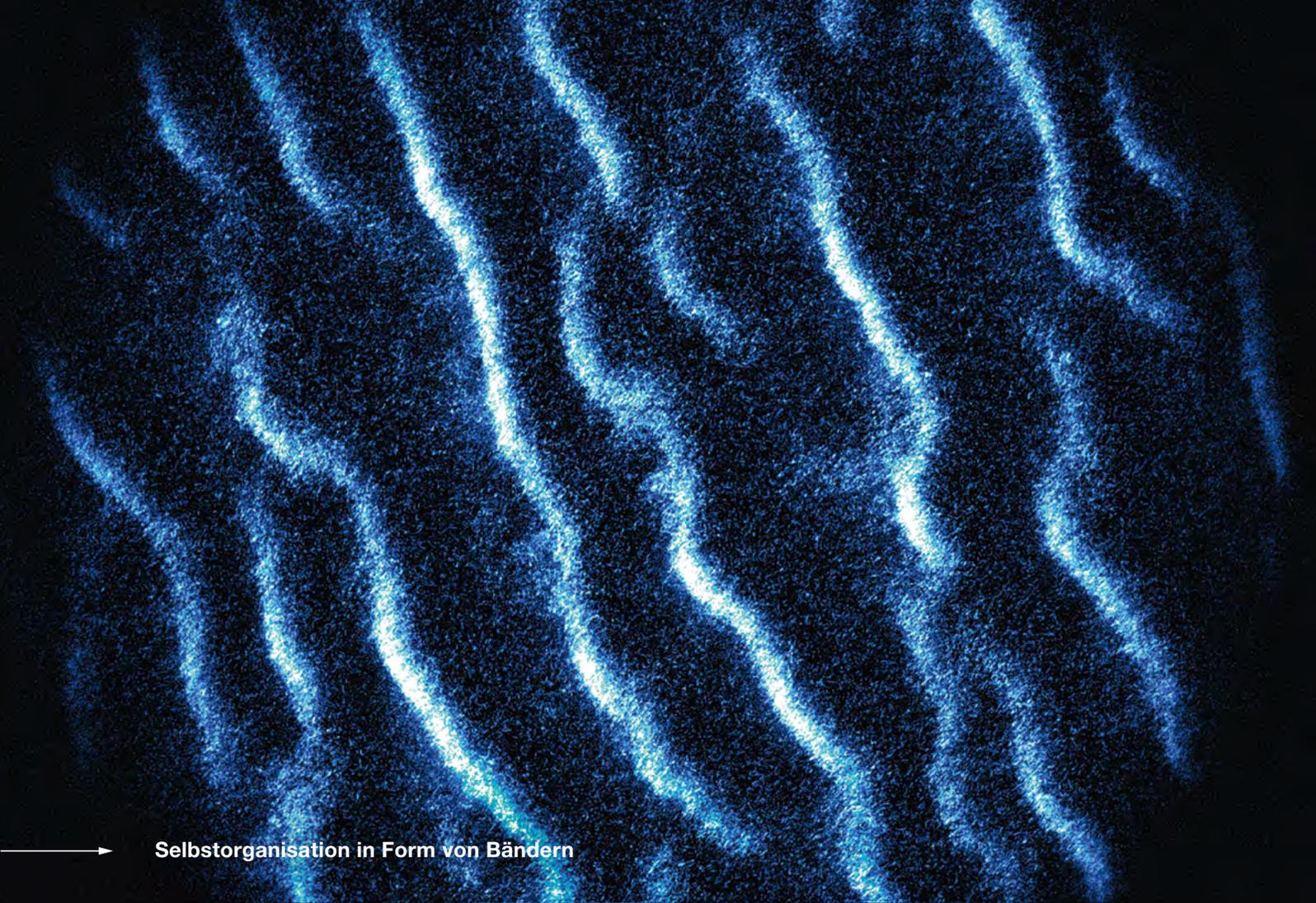
Ein großer Teil der Arbeit seines Labors konzentriert sich nun darauf, diese zwei- und dreidimensionalen Assays dazu zu nutzen, den Entwicklungsprozess bestimmter Zellfunktionen umzukehren (Reverse Engineering), indem Zellbestandteile zum Assay hinzugefügt und die Bedin-

Bausch kannte die in den 1990er Jahren entwickelte Theorie der „aktiven Materie“, die mathematisch nachbildet, wie sich Schwärme von Tausenden von Vögeln oder Fischen in kühnen Mustern gemeinsam bewegen. Was er aber nicht erwartet hatte, war, dass sich die Moleküle in dieser extrem einfachen Versuchsanordnung auf dieselbe Weise selbst organisieren würden wie aktive Materie. „Fische und Vögel sind komplexe Organismen mit Gehirnen und chemischen Wahrnehmungsmechanismen, die ihre koordinierten Bewegungen irgendwie beeinflussen können“, sagt er. „Aber unser System war denkbar einfach und dennoch konnten wir vergleichbare Bewegungsmuster erkennen.“

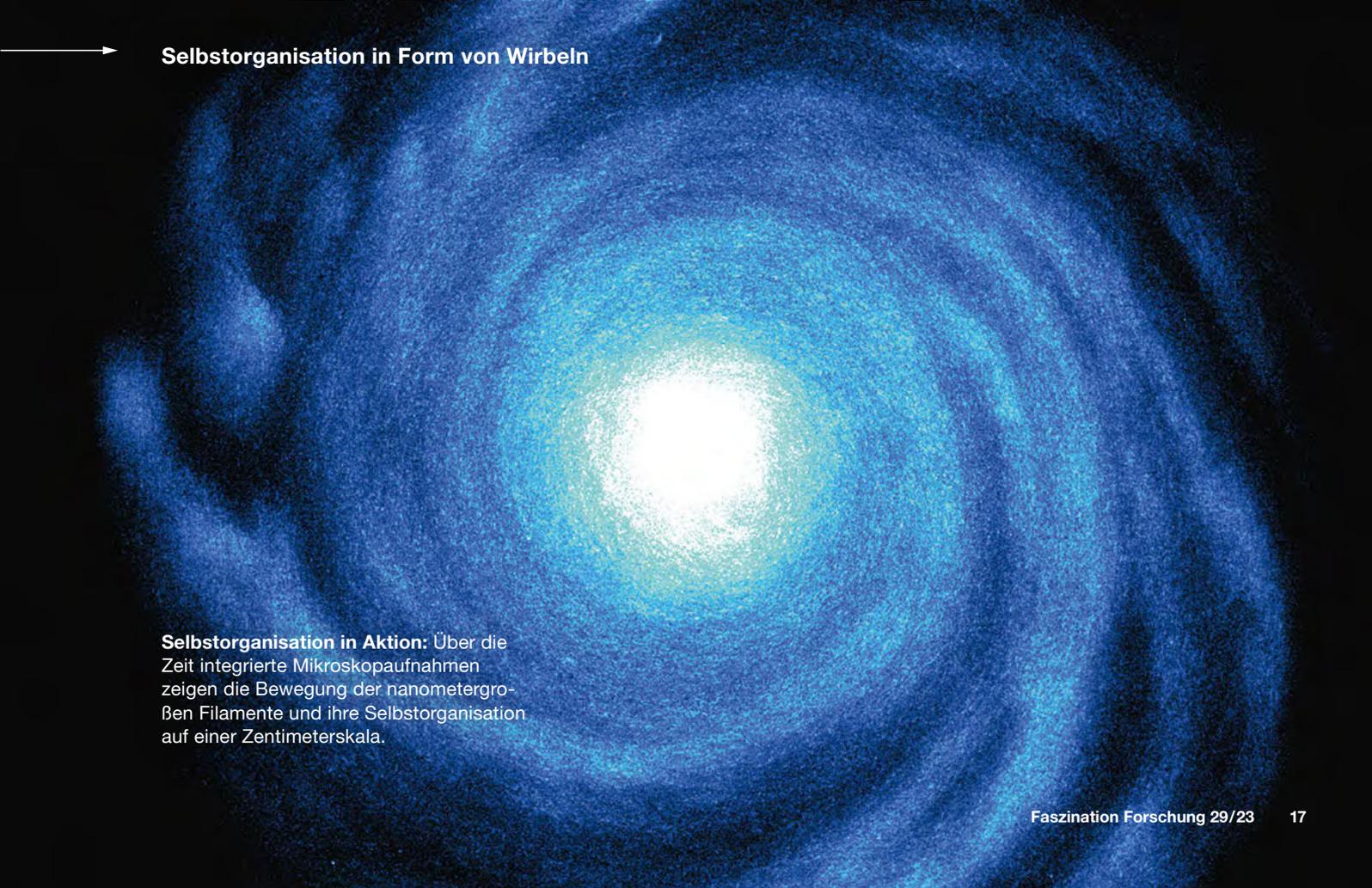
gungen angepasst werden, bis sich Funktionen replizieren lassen. Auf diese Weise hat das Forschungsteam zum Beispiel die Physik des zytoplasmatischen Strömens erforscht, ein biologisches Phänomen, das in Oozyten und anderen sehr großen Zellen auftritt und bei dem sich das Zytoskelett verformt, um Moleküle gleichmäßiger auf das Zellvolumen zu verteilen. Eines seiner ultimativen Ziele ist es, minimale Systeme zu bauen, die biologische Aufgaben erfüllen können – wie etwa ein minimales Migrations-system, das nur aus einer Handvoll notwendiger Proteine besteht und damit bereits in der Lage ist, Zellbewegung nachzuahmen.

Übergang zu Organoiden

Vor sechs Jahren beschloss Bausch, sich in seiner Forschung einem größeren Maßstab zuzuwenden und komplexere Systeme und Strukturen zu untersuchen. Schon immer hatte es ihn erstaunt, wie wenig man eigentlich über die Kräfte wusste, die Zellen bei



→ **Selbstorganisation in Form von Bändern**



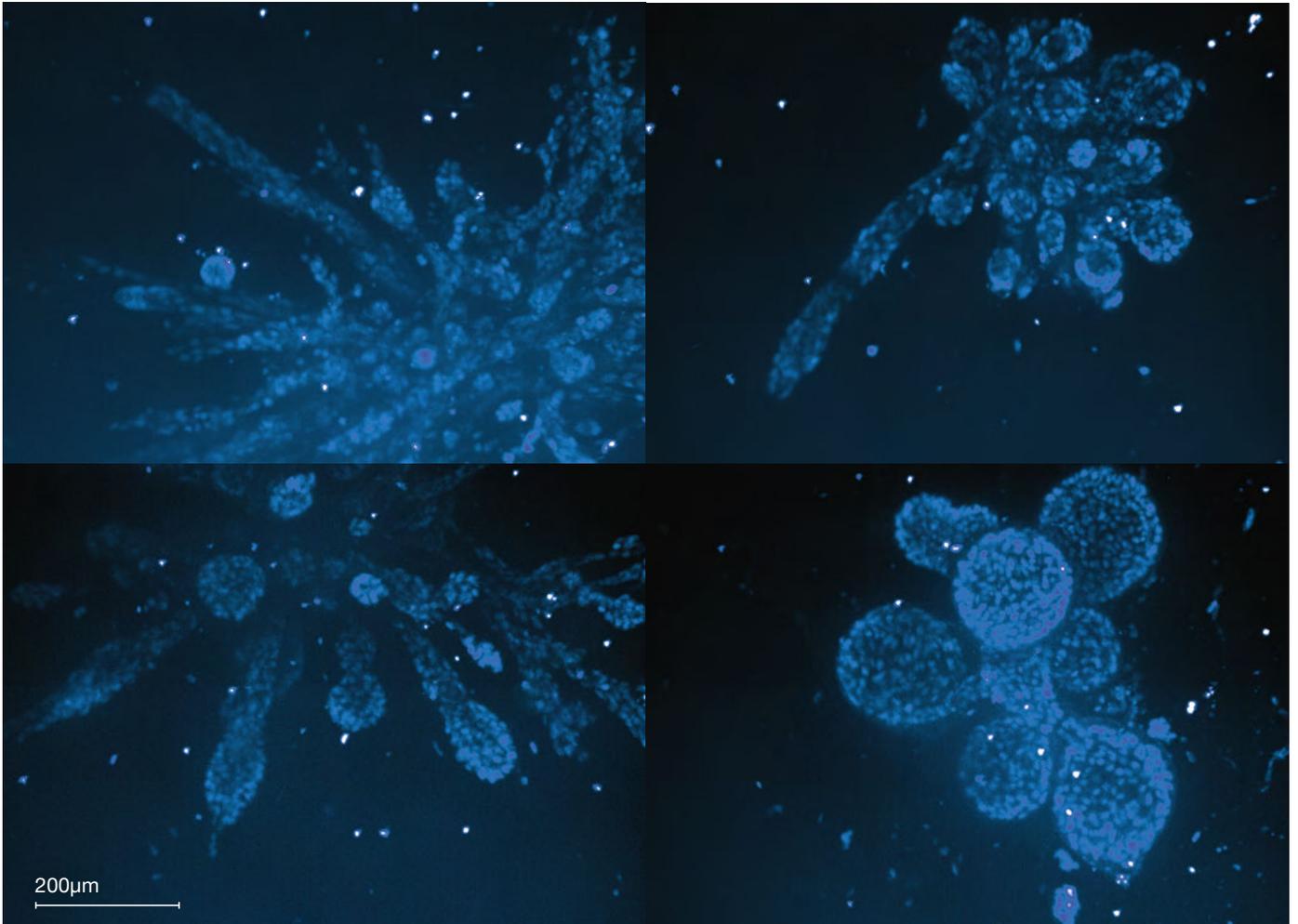
→ **Selbstorganisation in Form von Wirbeln**

Selbstorganisation in Aktion: Über die Zeit integrierte Mikroskopaufnahmen zeigen die Bewegung der nanometergroßen Filamente und ihre Selbstorganisation auf einer Zentimeterskala.



Prof. Andreas Bausch

entdeckte seine Leidenschaft für die Biophysik während seines Promotionsstudiums an der Fakultät für Physik der TUM. Nach seiner Promotion wechselte er 1999 als Postdoc an die Harvard University. Im Jahr 2002 kehrte Bausch als Assistenzprofessor an die TUM zurück und wurde 2008 zum ordentlichen Professor ernannt. Seit 2014 ist er Gründungsdirektor des Centre for Functional Protein Assemblies. Bausch entwickelte das Konzept für das Centre for Organoid Systems and Tissue Engineering, das 2024 an den Start gehen soll. Von 2015 bis 2016 war er Miller-Gastprofessor an der University of California, Berkeley, und seit 2021 ist er Visiting Scholar in Harvard. Er erhielt 2011 ein ERC Starting Grant, dem 2012 ein ERC Advanced Grant folgte, sowie 2017 ein ERC Proof of Concept Grant und 2019 ein ERC Synergy Grant.



Bildquellen: Stefan Woidig; A. Bausch (TUM)

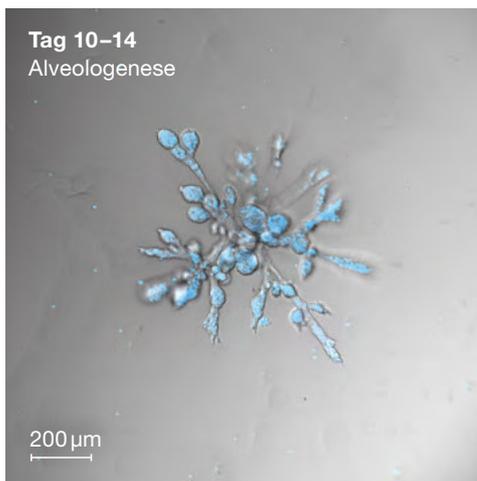
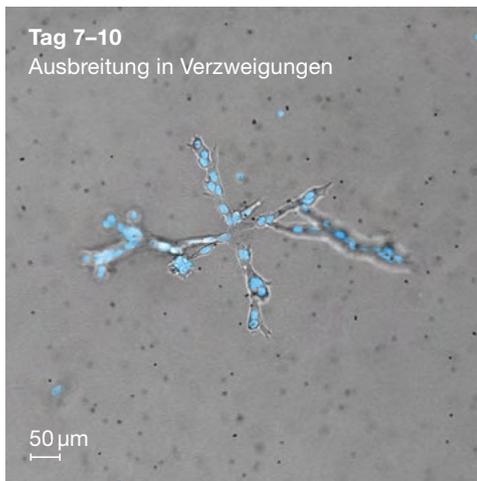
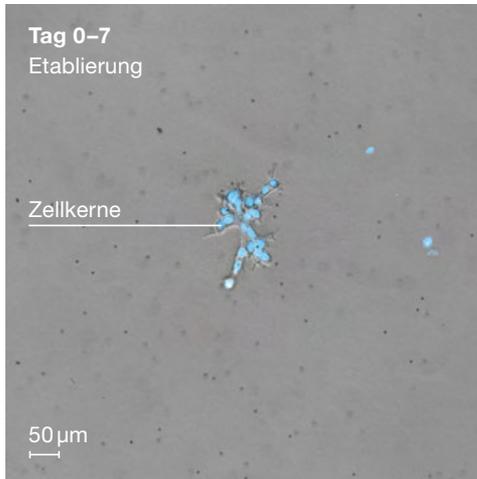
Aus einzelnen menschlichen Brustdrüsenzellen entwickeln sich komplexe Strukturen aus Tausenden von Zellen. Die kollektive Bewegung der Zellen führt zu einer Drehbewegung in den kugelförmigen Strukturen, die den Alveolen im Brustgewebe ähneln.

wichtigen biologischen Prozessen wie der Entwicklung oder der Wundheilung und bei pathologischen Prozessen wie dem Krebs und der Metastasenbildung veranlassen, sich in Bewegung zu setzen. Würden die Prinzipien, die sein Team in den stark vereinfachten Versuchsanordnungen identifiziert hatte, auch in vivo gelten? Und: Könnten sie helfen, diese Wissenslücken zu schließen? Er beschloss, diese Möglichkeit in Organoiden, in Zellkultur wachsenden Mini-Organen, zu prüfen.

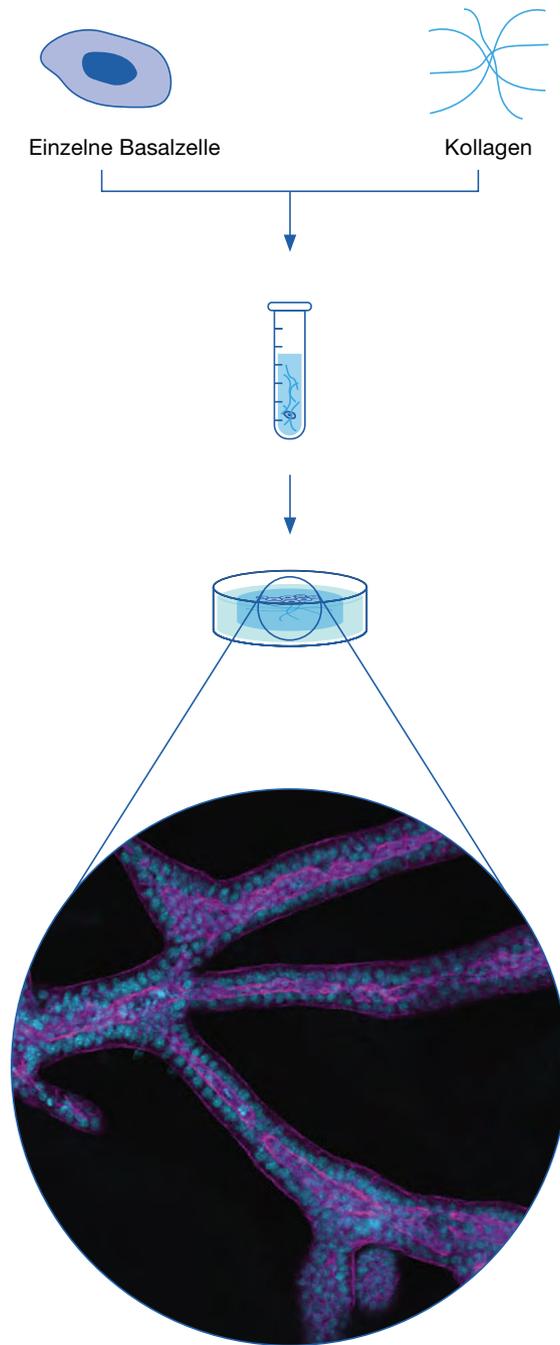
Bausch begann, mit der Stammzellforscherin Christina Scheel vom Helmholtz Zentrum München zusammenzuarbeiten. Sie hatte eine Methode zur Erzeugung von Organoiden aus einzelnen menschlichen Brustzellen entwickelt, die in schwimmende Kollagen-Gele eingebettet sind. In dieser Umgebung entwickeln sich die Zellen zu einem Netzwerk von Verzweigungen, das die Struktur der Brustdrüsen nachbildet. Das Team wollte die physikalischen Mechanismen untersuchen, die es den sich

entwickelnden Verzweigungen ermöglichten, sich einen Weg in die Kollagenmatrix zu bahnen, die die extrazelluläre Matrix in Geweben modelliert. Sie färbten die Zellkerne an, um die Bewegung der Zellen mit konfokaler Mikroskopie verfolgen zu können. Dabei entdeckten sie – wiederum zu ihrer freudigen Überraschung, so Bausch –, dass die Konzepte der aktiven Materie tatsächlich auch hier anwendbar sind. Sobald die Anzahl der Zellen groß genug war, bewegten sie sich in kohärenten Clustern gemeinsam – und diese kollektive Bewegung erzeugte eine Kraft, die stark genug war, die Kollagenmatrix zu einer Art mechanischem Käfig zu verformen, der die Zellbewegung und damit die Gesamtform der Kanäle sowohl lenkte als auch einschränkte.

Da die Arbeit mit menschlichen Zellen eine technisch schwierige Herausforderung darstellt, kooperierte Bausch fortan mit Maximilian Reichert, einem auf Bauchspeicheldrüsenkrebs spezialisierten Kliniker am



Ausgehend von einer einzigen Zelle des menschlichen Brustdrüsenorgans wächst innerhalb von etwa zwei Wochen ein Brustdrüsenorgans heran. Die Mikroskopaufnahmen zeigen verschiedene Wachstumsstadien. Die Zellkerne sind mithilfe von DNA-Farbstoffen sichtbar gemacht.



Das Wachstum von Organoiden durch Selbstorganisation beginnt mit einer einzigen Zelle, die auf einem Substrat aus Kollagen oder einem anderen Material kultiviert wird. Das Foto zeigt ein Organoid, welches aus einzelnen Zellen eines Bauchspeicheldrüsensumors gewachsen ist.



Die mikromechanischen Eigenschaften der Organoide während ihrer Wachstumsphase werden mit optischen Methoden bestimmt.

Klinikum rechts der Isar, um das Phänomen genauer zu untersuchen. Reichert, der ebenfalls ein CPA-Labor leitet, hatte Organoide aus Bauchspeicheldrüsentumorzellen der Maus hergestellt. Seine Teams nutzen die verschiedenen Instrumente, die für die Manipulation von Mäusegenen und -proteinen zur Verfügung stehen, sowie hochauflösende Mikroskopiemethoden. So wollen sie herauszufinden, wie die mechanischen Kräfte innerhalb und außerhalb der Zellen erzeugt werden und wie sie die Genexpression im Feedback- und Feedforward-Modus beeinflussen. Die große Frage, so beschreibt es Bausch, ist, wie das Zusammenspiel all dieser Effekte die Zellen so steuert, dass sie während der Entwicklung von Organstrukturen die richtigen Strukturen und Funktionen ganz von selbst ausbilden. Sobald das entstehende Gebäude fertiggestellt ist, wollen Bausch und Reichert im neuen Centre for Organoid Systems and Tissue Engineering Forschungsgruppen einrichten. Sieben weitere interdisziplinäre Forschungsgruppen werden sich ihnen anschließen und ihr Fachwissen über andere Gewebeorganoide und Technologien wie die CRISPR/Cas-Methode einbringen. Bausch hofft, dass dort das Zusammenarbeiten über Fächergrenzen hinweg zur Entwicklung eines neuen Verständnisses von Organwachstum sowie zur Entwicklung von innovativen hochdurchsatztauglichen Assays führt, die in der Arzneimittelforschung eingesetzt werden können.

Bei allen Erkenntnissen, die sein Ansatz der Biologie liefert, liegt für Bausch der spannendste Teil seiner Forschung in der Physik der Selbstorganisation. „Es ist großartig, wenn unsere einfachen Assays helfen, Strukturbildungs-

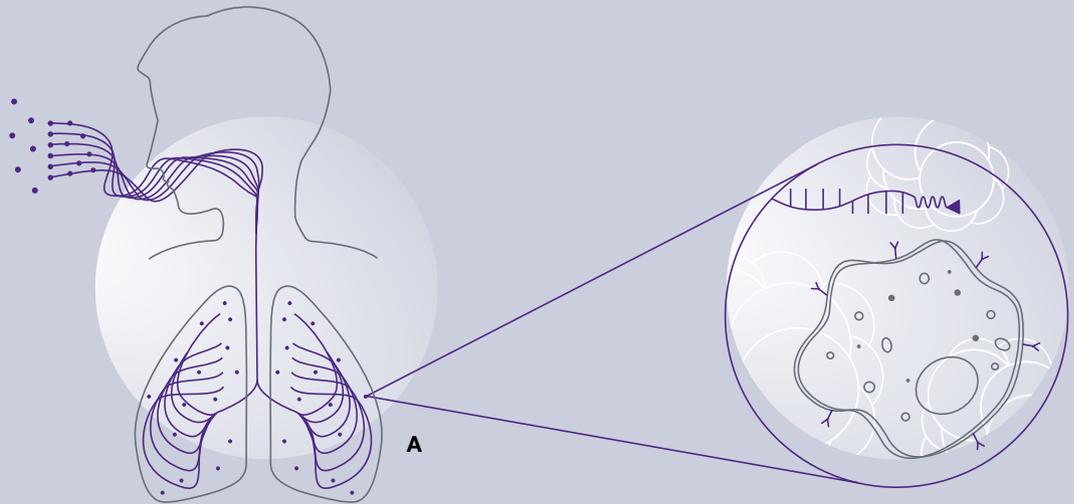
prozesse in Organoiden zu verstehen“, sagt er. „Wir versuchen, diese Prozesse grundlegend zu verstehen, um die generischen Prinzipien der biologischen Systeme begreifen zu können.“ ■ *Alison Abbott*

Center for Functional Protein Assemblies (CPA)

Das Center for Functional Protein Assemblies der TUM ist ein interdisziplinäres Forschungszentrum, das sich mit dem Verständnis von Konzepten der Selbstorganisation in biologischen Geweben beschäftigt und der Frage nachgeht, wie funktionelle Eigenschaften von Proteinverbänden aus der Interaktion mit ihrer zellulären und extrazellulären Umgebung entstehen. Zwölf Forschungsgruppen untersuchen Aspekte dieser Funktionen, die von der Proteinfaltung, zellulären Transportmechanismen bis hin zu Zellmigration über die Zellteilung reichen. Im Zentrum arbeiten 150 Biophysiker, Biochemikerinnen, organische Chemiker, Ingenieurinnen und Biomediziner über Fächergrenzen hinweg zusammen. Gemeinsam sind sie im Frühjahr 2022 in das 4.000m² große Gebäude gezogen.

Center for Organoid Systems (COS)

Organoid Systeme entwickeln sich rasch zu einer neuartigen Technologie, welche die Zukunft der biomedizinischen Forschung grundlegend verändern kann. Das Center for Organoid Systems widmet sich der Erzeugung und Erforschung von Organoidmodellen aus verschiedenen, relevanten menschlichen Geweben. Das Center nutzt modernste Technologien aus den Bereichen Bioengineering, Biophysik, Nanotechnologie und Künstliche Intelligenz. Insgesamt ist das Ziel, durch die Integration dieser Technologieplattform neue Erkenntnisse über die menschliche Biologie zu gewinnen und neue, personalisierte Therapien zur Verbesserung der menschlichen Gesundheit zu entwickeln. Die Eröffnung ist für das Jahr 2024 geplant.



Mit RNA heilen

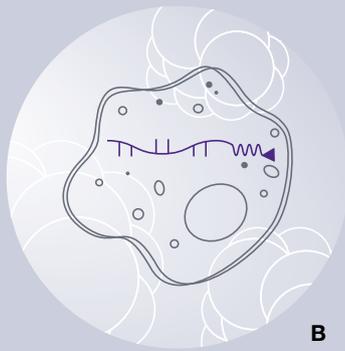
Link

www.rnatics.com

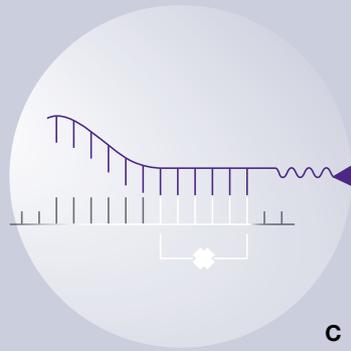
RNA-basierte Impfstoffe kennt seit der COVID-19-Pandemie jeder. Doch RNA-Moleküle haben auch großes Potenzial als Arzneimittel. Eine der größten Herausforderungen dabei ist es, die Wirkstoffe an ihren Zielort zu bringen. Für die Lunge hat die RNATICS GmbH eine elegante Lösung gefunden. Diese soll nun die Therapie von COVID-19 und weiteren Krankheiten revolutionieren.

Die Frage, warum er RNATICS gegründet hat, wird Prof. Stefan Engelhardt oft gestellt. Für ihn ist die Antwort einfach. Es sei ein großartiges Ziel, Menschen zu helfen, indem man ein Medikament entwickelt und in die Anwendung bringt. Dass Engelhardt nun die Möglichkeit dazu hat, verdankt er vielen Jahren akademischer Forschung, einem außergewöhnlichen Forschungsgebiet und einigen günstigen Umständen. Eigentlich war sein Berufswunsch die klinische Kardiologie. Es ist jedoch anders gekommen und Engelhardt ist „früh in der Forschung hängen geblieben“: Nach Stationen u. a. am Rudolf-Virchow-Forschungszentrum der DFG in Würzburg hat er 2008 den Lehrstuhl für Pharmakologie und Toxikologie an der TUM übernommen. Kurz zuvor war er da bereits auf eine neue Klasse von Molekülen gestoßen, die ihn bis heute begeistert: nicht-kodierende RNAs, also solche, die keine

Information für ein Protein tragen, sondern meistens regulatorische Aufgaben für das Zellverhalten wahrnehmen. Vor etwa drei Jahren tauchte erstmals der Gedanke an eine Gründung auf, wie Engelhardt erzählt: „Wir hatten eine Methode entwickelt, um RNA-Moleküle zielgerichtet in Makrophagen einzubringen. Damit war plötzlich die realistische Möglichkeit da, ein Medikament zu entwickeln.“ Denn Makrophagen sind als Teil des Immunsystems an der Pathophysiologie vieler Krankheiten beteiligt – so auch an COVID-19, wo sie hauptsächlich verantwortlich für die überaktivierte Entzündungsreaktion sind, die schwere Krankheitsverläufe kennzeichnet. Engelhardt und seine Arbeitsgruppe hatten das Glück, früh in der Pandemie Zugang zu Lungengewebe von an COVID-19 verstorbenen Patientinnen und Patienten zu bekommen. „Wir fanden, dass in diesem Gewebe, insbesondere in den enthaltenen Makrophagen, eine nicht-kodierende RNA, an der wir seit 15 Jahren forschen, besonders stark produziert wurde“, so der Mediziner. Damit war klar, dass diese sogenannte microRNA-21 möglicherweise am Krankheitsgeschehen beteiligt war. Für Engelhardt und sein Team fügte sich nun alles zusammen. „Die Idee war, die microRNA-21 durch ein passendes RNA-Molekül, genannt Antisense-RNA, zu hemmen. Dieses musste so gestaltet werden, dass



B



C

- A Das RNA-Medikament wird inhaliert
- B Die Antisense-RNA ist so gestaltet, dass die Makrophagen es aufnehmen
- C Die Antisense-RNA hemmt die micro-RNA, die vermutlich am Krankheitsgeschehen beteiligt ist

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-29

Healing with RNA

E

The start-up RNATICS GmbH develops RNA-based drugs for treating COVID-19 and other diseases. It was spun off from the research being done by Prof. Stefan Engelhardt and team at his Chair of Pharmacology and Toxicology at TUM. He works on non-coding RNAs and had developed a method for getting RNA molecules into cells in a targeted way. RNATICS has secured EUR 7.5 million in funding from the German Federal Ministry of Education and Research to bring their first RNA therapeutic to clinical testing. □

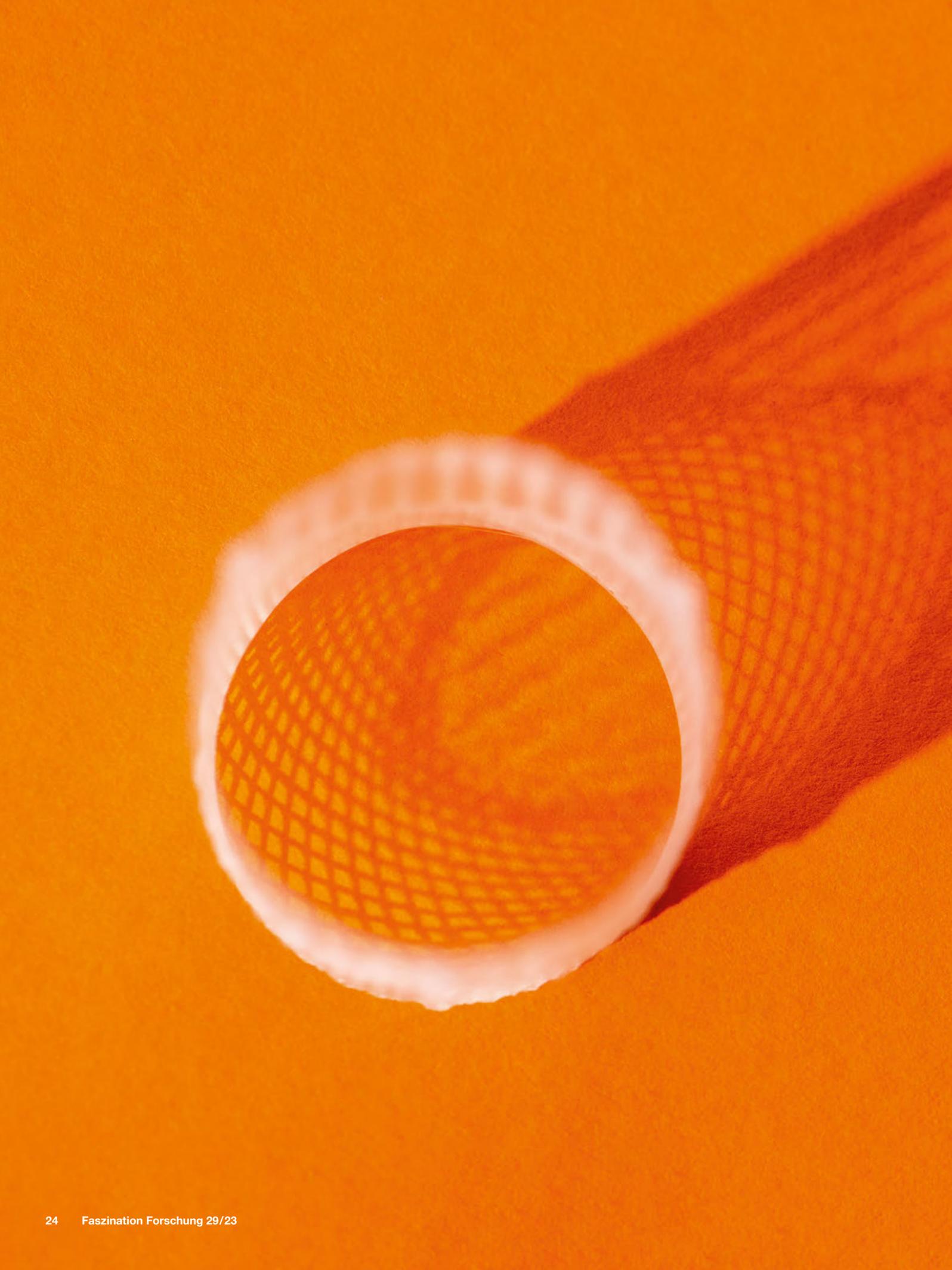
Makrophagen es bereitwillig aufnehmen. Und genau diese Methode hatten wir ja entwickelt“, so der RNATICS-Gründer. An die Antisense-RNA wurden Zuckerreste angehängt, an denen Makrophagen normalerweise Krankheitserreger erkennen. Diese nimmt er dann bereitwillig auf – und so nun auch die Antisense-RNA. Ein Vorteil der Behandlung der Lunge ist, dass der Wirkstoff über Inhalation gezielt verabreicht werden kann. „Eine solche Lokalthherapie ist in der Regel sehr nebenwirkungsarm“, freut sich Engelhardt.

Den Startschuss für die Ausgründung gab eine Ausschreibung des Bundesforschungsministeriums (BMBF), das Geld für die Entwicklung von neuen COVID-19-Therapien bereitstellte. Engelhardt machte sich auf die Suche nach geeigneten Mitgründern und freut sich noch heute über die schnelle und begeisterte Zusage seiner beiden Wunschkandidaten: Dr. Thomas Frischmuth, Experte für Nukleinsäuren und Zuckerkopplung mit vielfältiger Gründungserfahrung, und Prof. Klaus Rabe, Direktor der LungenClinic Grosshansdorf GmbH und angesehener Experte für klinische Studien zu Lungenkrankheiten. RNATICS wurde gegründet und konnte mit 7,5 Millionen Euro aus dem BMBF-Fördertopf die abschließenden toxikologischen Studien und die Produktion des neuen RNA-Medikaments in Auftrag geben. Erste klinische

Studien am Menschen sind für 2023 geplant. Mit einer Kollaborationsvereinbarung ist die ISAR Bioscience GmbH als weiterer Geldgeber an Bord. Für die junge Firma die perfekte Lösung, denn „so können wir uns unsere Unabhängigkeit bewahren“, ist Engelhardt überzeugt.

Fehlte nur noch Jemand, der sich um das Tagesgeschäft der RNATICS kümmert, denn Engelhardt entschied sich dafür, seinen Lehrstuhl an der TUM zu behalten und nicht Vollzeit im Unternehmen mitzuarbeiten. Diesen fand man in Dr. Johannes Schmidt, der als Leiter des TUM Venture Lab Healthcare die Ausgründung unterstützt hatte. „Durch die Vermittlung des TUM Venture Lab Healthcare hatten wir in Rekordgeschwindigkeit einen exklusiven Lizenzvertrag für die benötigten Patente auf dem Tisch“, so Engelhardt. Und Schmidt fügt hinzu: „Die Venture Labs haben wichtige Kontakte hergestellt, ohne die die Gründung nicht in dieser Geschwindigkeit hätte erfolgen können.“ Mit seinem Wechsel zur RNATICS sei die TUM ausgesprochen professionell umgegangen. Einen vielversprechenden Weg bescheinigen der Firma in diesem Jahr bereits der Gewinn des Innovationspreises der Bio-Regionen Deutschlands und des Pharma Trend Image & Innovation Awards Top 2 „Das Innovativste Produkt®“ in der Kategorie Sprunginnovation. ■

Larissa Tetsch



Link

www.mec.ed.tum.de/en/mmi

Wie im Körper der Patienten **neue Herzklappen wachsen**

Menschen mit Herzklappenerkrankungen könnten eines Tages in der Lage sein, neue, gesunde Herzklappen aus eigenem Gewebe entlang eines implantierten Trägergerüsts zu bilden – dank Petra Mela, Professorin für Medizinische Materialien und Implantate. Sie leitet die Entwicklung dieses bahnbrechenden Ansatzes, der auf einer neuartigen 3D-Drucktechnik, dem sogenannten Melt Electrowriting, beruht.

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-29

Enabling Patients to Grow a New Heart Valve

E

For a patient with heart valve disease, a heart valve implant can be life-saving. However, many prosthetic heart valves can cause problems with coagulation or can degenerate. In the case of growing children they need to be replaced every few years. Enter the melt-electrowritten heart valve scaffold, an implant created with a technique used by Petra Mela, Chair of Medical Materials and Implants, and her collaborators. The technique involves a process akin to 3D printing, with a crucial added feature: an electric field. The charge makes it possible to create

scaffolds composed of intricate patterns of fine fibers. When implanted in a patient's body, the scaffold should function as a support structure on which the body reconstructs a new valve from its own tissue. The scaffold then absorbs into the body, leaving only the patient's new valve behind. Mela is optimistic that by developing more knowledge on how to drive the body's immune response, when these scaffolds are someday implanted into real patients, they just might be unbeatable. □

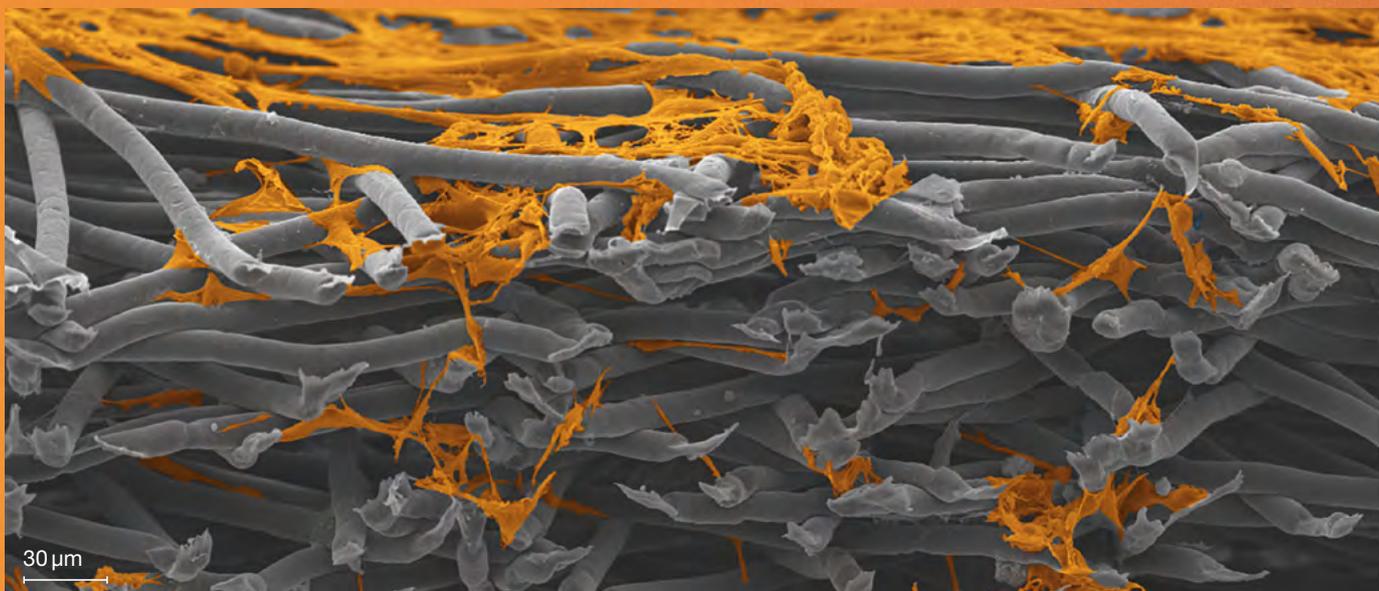


Künstliche Herzklappen im klinischen Gebrauch, wie mechanische (links) und biologische (Mitte) Varianten haben inhärente Nachteile. Mela will diese überwinden. Sie setzt auf eine durch Tissue Engineering entstandene Herzklappe auf der Grundlage eines mit Melt Electro-writing hergestellten, bioabsorbierbaren Gerüsts (rechts).

Als Prof. Petra Mela noch an der RWTH Aachen forschte, versuchte sie, ihre erste Herzklappe mittels Gewebezüchtung – engl. Tissue Engineering – herzustellen. Damals, im Jahr 2010, scheiterten zahlreiche Forschungsteams auf der ganzen Welt bei ihren Bemühungen, neue, voll funktionsfähige Herzklappen zu züchten. Mela, ein Neuling auf dem Gebiet, wollte den Grund hierfür herausfinden. Ihr fiel auf, dass die meisten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dieselbe Herangehensweise wählten: Die von ihnen entwickelten Herzklappenimplantate hatten die gleiche Form wie die Herzklappen, mit denen die Patientinnen und Patienten auf die Welt gekommen waren. Fachleute sprechen von nativen Herzklappen. Also schlug Mela eine andere Richtung ein. Um eine bessere Herzklappe zu schaffen, orientierte sie sich an einem ursprünglich vom Herzchirurgen Dr. Wolfgang Goetz entwickelten Konstruktionsprinzip. Dabei wird das Implantat nicht entlang der Anatomie der nativen Herzklappe modelliert, sondern stattdessen eine textilverstärkte, röhrenförmige Gestalt entwickelt. Mela vermutete, dass diese nach der Implantation genauso funktionieren würde wie eine native Herzklappe, dass sie

also unter anderem robust genug sein würde, um dem hohen Druck standzuhalten, den das Blut beim Durchfließen des Herzens ausübt.

„Ich weiß noch, dass es damals hieß: ‘Das funktioniert nie und nimmer’. Doch wie man sieht, funktioniert es sehr gut. Und wenn man sich anschaut, auf welche Weise viele Herzklappen heute mittels Tissue Engineering erzeugt werden, stellt man fest, dass sie ziemlich genau gemäß einer röhrenförmigen Gestalt konzipiert sind“, sagt Mela. Jetzt verschiebt sie die Grenzen des Tissue Engineering erneut. Zusammen mit Kolleginnen und Kollegen arbeitet sie derzeit an der digitalen Fertigung eines röhrenförmigen Herzklappengerüsts, das nach der Implantation von körpereigenen Zellen der Patientin besiedelt werden kann. Dieses Modell wird als In-situ-Tissue-Engineering bezeichnet. Ziel ist es, dass der Körper des Patienten das Gerüst als Stützstruktur nutzt, auf der sich eine neue Herzklappe aus körpereigenem, lebendem Gewebe bilden kann. „Wenn uns das gelingt, wäre das beispiellos. Denn körpereigenes lebendes Gewebe ist das beste Biomaterial, das es gibt“, meint Mela.



Das Rasterelektronenmikroskopbild zeigt, wie Zellen (orange) ein mit Melt Electrowriting hergestelltes Gerüst (grau) besiedeln.

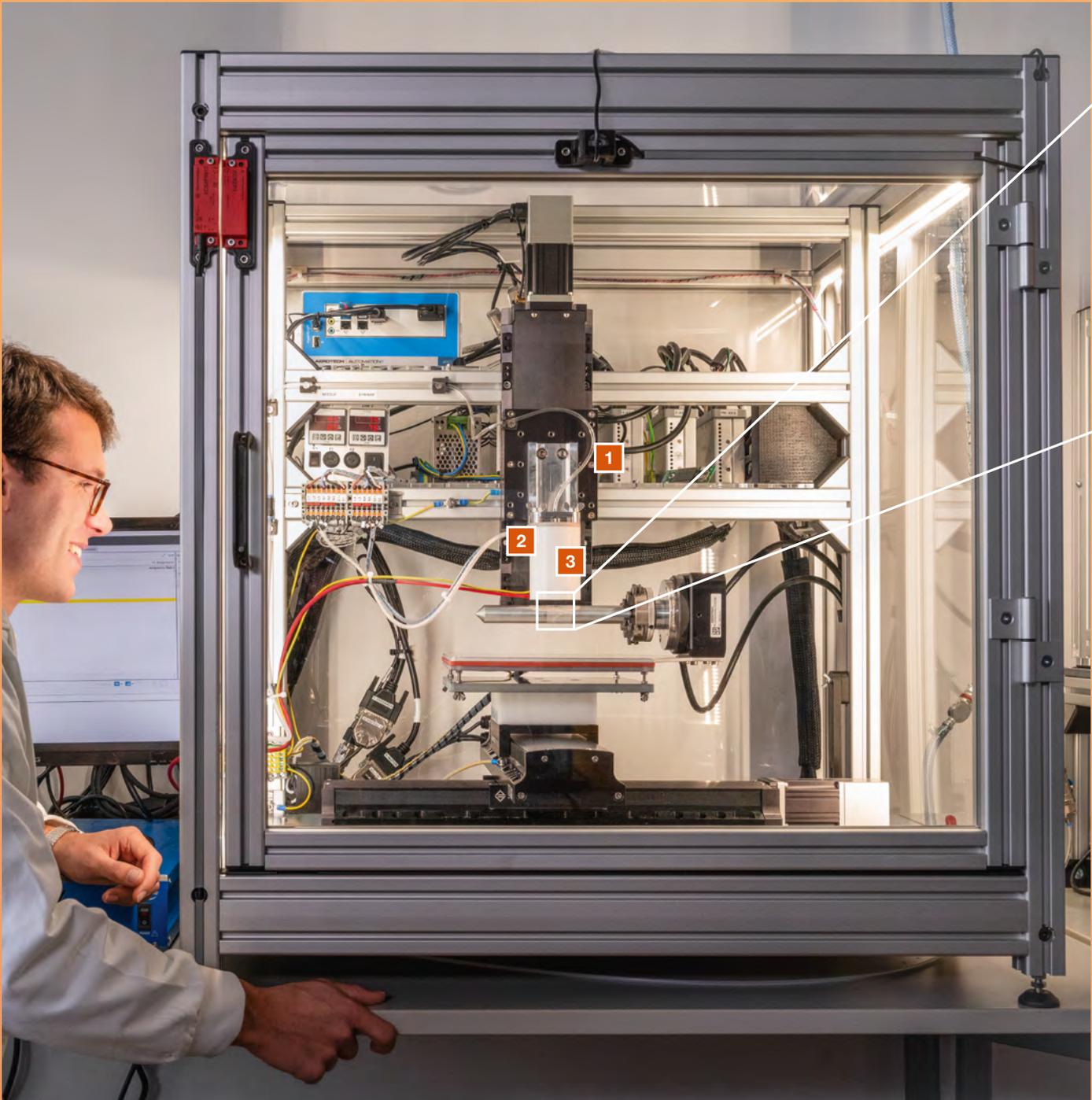
Das Herz – ein faszinierendes Organ

Das Herz, so formuliert es Mela, ist ein funktionales Wunderwerk, das uns die Natur geschenkt hat. In unserem Herz ist jede Klappe unverzichtbar, um sicherzustellen, dass das Blut in die richtige Richtung fließt und so beim Stoffwechsel entstehende Abfallprodukte entsorgt und Sauerstoff sowie Nährstoffe durch den Körper transportiert. Das Gewebe, das die Herzklappe bildet, ist so geschichtet, dass die Klappe optimale Leistung erbringt. Die Mengen einzelner Gewebebestandteile wie Elastin oder Kollagen variieren genauso wie die Ausrichtung der Fasern. Sie funktionieren unterschiedlich, je nachdem ob sich das Herz gerade in der Mitte eines Schlags oder zwischen zwei Schlägen befindet.

Wenn sich eine Herzklappe nicht so öffnet oder schließt, wie sie sollte, muss das Herz besonders hart arbeiten, um diese Fehlfunktion zu kompensieren. Für Menschen mit einer Herzklappenerkrankung können Klappenprothesen daher lebensrettend sein. 2005 erschien im Fachmagazin „Nature Clinical Practice Cardiovascular Medicine“ ein wegweisender Artikel, in dem die Zahl der Menschen, die im Jahr 2050 ein Herzklappenimplantat benötigen werden, auf über 850.000 geschätzt wird. Zwar ist deren Nutzen unbestritten, aber es gibt auch Nachteile. Beispielsweise können empfindliche Blutzellen beschädigt werden, Gerinnungsprobleme auftreten oder Verkalkungen verhindern, dass sich die Herzklappen korrekt öffnen. ▷

„Das biologisch abbaubare Gerüst wird nach und nach absorbiert, sodass das vom Körper des Patienten gebildete Gewebe übrigbleibt.“

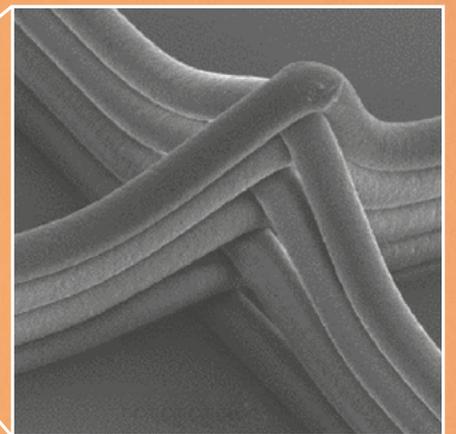
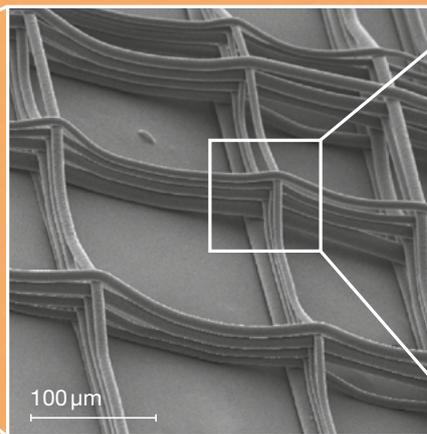
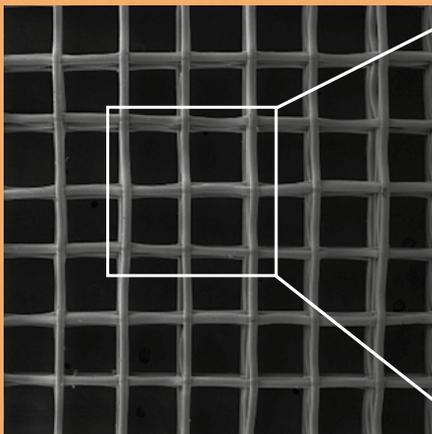
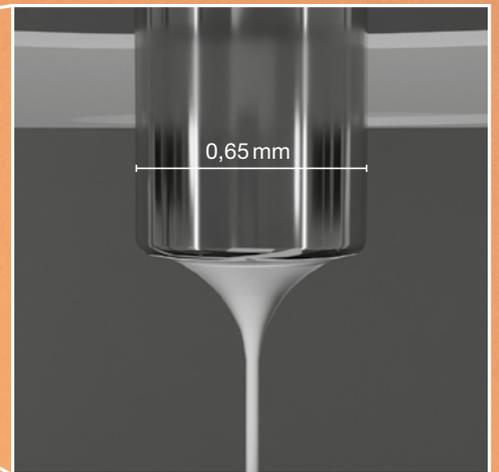
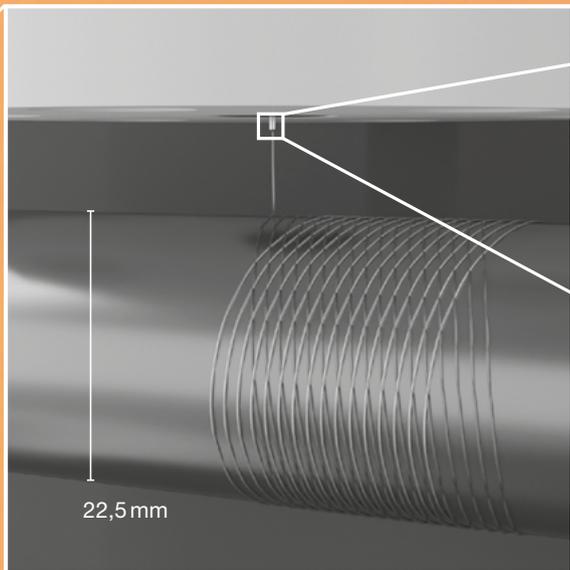
Petra Mela



Grafiken: edlundsepp, Bildquellen: Astrid Eckert, P. Meia (TUM)

Das Melt Electrowriting-Gerät in Melas Labor.

1 Angetrieben durch Druckluft 2 wird eine Polymerschmelze aus einem erwärmten Druckkopf durch eine Düse gepresst. 3 Ein elektrisches Feld bewirkt, dass das geschmolzene Polymer einen Faserstrahl bildet, dessen Durchmesser auf seinem Weg zum geerdeten Kollektor abnimmt.



△ **Obere Reihe:** Die **3D-Renderings** zeigen, wie eine Polymerfaser in einem definierten Muster auf einen zylindrischen Kollektor aufgebracht wird.

Untere Reihe: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen zeigen das für additive Fertigung typische, lagenweise Aufeinanderstapeln der Fasern.

Typischer Durchmesser der Fasern:
etwa 10 μm

Typischer Durchmesser eines menschlichen Haars:
60–80 μm

„Aktuell ist Melt Electrowriting meiner Ansicht nach die einzige Technologie, mit der wir derart komplexe Gebilde herstellen können.“

Petra Mela



Außerdem muss eine künstliche Herzklappe bei Erwachsenen alle zehn bis zwanzig Jahre ersetzt werden. Bei Kindern ist dies sogar noch weitaus häufiger erforderlich, weil sie im Vergleich zu Erwachsenen stärkere Immunreaktionen und einen höheren Kalziumstoffwechsel aufweisen. Und genau wie Kinder im Laufe der Zeit aus ihren Kleidern herauswachsen, werden auch ihre Implantate irgendwann zu klein, sodass immer wieder Operationen nötig sind, um sie auszutauschen.

„Was mich wirklich motiviert, ist, unseren kleinen Patienten zu helfen“, sagt Mela. „Dafür schlägt mein Herz.“

„Geschriebenes“ Gerüst

Um dieses Ziel zu erreichen, nutzen Mela und ihr Team eine neue Technik, mit der sie bessere Herzklappengerüste herstellen können.

Der Ansatz setzt auf das sogenannte Melt Electrowriting. Diese extrusionsbasierte Technik funktioniert nach dem gleichen Grundprinzip wie ein 3D-Drucker, allerdings mit

einem zusätzlichen entscheidenden Feature: einem unterstützenden elektrischen Feld. Dank dieses elektrischen Feldes lässt sich ein Gerüst aus extrem dünnen Fasern erzeugen. Mit einem typischen Durchmesser von nur zehn Mikrometern sind sie etwa sieben Mal dünner als ein menschliches Haar. Dank digitaler Steuerung der Faseranordnung lassen sich so Trägergerüste mit optimaler Faserarchitektur und einstellbaren mechanischen Eigenschaften herstellen.

Um mithilfe dieser neuen Technik ein Gerüst herzustellen, wird ein Polymer in einer Kartusche geschmolzen, mit Druck beaufschlagt und durch eine Düse gepresst, sodass ein Filament entsteht. Anschließend bewirkt die elektrische Ladung des Polymers, dass das Filament auf seinem Weg zum entgegengesetzt geladenen Kollektor immer dünner wird. Die resultierende Faser wird dann in einem bestimmten Muster abgeschieden, sodass ein Gerüst entsteht, das in entscheidenden Punkten der nativen Herzklappe gleicht. Dazu gehört die Art und



Weise, wie die Kollagenfasern in den Herzklappensegeln auseinandergezogen werden, was dem Gerüst wiederum die Dynamik der sich öffnenden und schließenden nativen Herzklappe verleiht.

„Weil die Herzklappe mit der Aortenwand verbunden ist, die andere Eigenschaften aufweist als die Klappensegel, entwickelten wir zudem eine Plattform, mit deren Hilfe wir unterschiedlichen Regionen unterschiedliche Muster zuordnen konnten. Jedes dieser Muster steht für spezifische mechanische Eigenschaften oder Ansprechverhalten. Wird das Gerüst so gestaltet, dass alle Bestandteile die passenden Eigenschaften aufweisen, entsteht eine Gesamtstruktur mit optimierter physiologischer Funktion“, erklärt Mela.

„Solche Muster zu erzeugen und verschiedene Muster in einer 3D-Konstruktion zu kombinieren – genau das schaffen wir mit Melt Electrowriting. Aktuell ist dies meiner Ansicht nach die einzige Technologie, mit der wir derart komplexe Gebilde herstellen können“, so Mela.

△ **Petra Mela und ihr Doktorand Kilian Müller inspizieren ein 3D-gedrucktes Gerüst.** Müller arbeitet daran, ultrakleine superparamagnetische Nanopartikel in das Gerüst einzutragen, die es in MRT-Aufnahmen detektierbar machen.

Perfektioniertes Design

Doch damit ist die Entwicklung noch nicht zu Ende. Mela entwickelte eine Lösung für ein bei Herzklappenimplantaten mit Faserstruktur immer wieder auftretendes Problem – dass nämlich das Gerüst so dicht ist, dass Zellen es nicht richtig durchdringen können. Sie stellte fest, dass die Kombination eines mit Melt Electrowriting hergestellten Gerüsts mit einem elastinähnlichen Biomaterial die erforderliche Porosität liefert. Kilian Müller, einer von Melas Doktoranden, entwickelte auf dieser Grundlage ein weiteres System, das per se mikroporös ist und deshalb keine weiteren Materialien oder Techniken benötigt. ▷

Prof. Petra Mela

studierte Maschinenbau am Politecnico di Torino (IT) und promovierte in Biomechanik an der Universität Twente (NL). Sie leitete die Gruppe für kardiovaskuläres Tissue Engineering an der RWTH Aachen, wo sie sich auch in Medizintechnik habilitierte. Mela war Gastwissenschaftlerin bei der British Heart Foundation, der University of Liverpool (UK) und bei den Sandia National Laboratories (CA, USA). 2019 wurde sie auf die Professur und den Lehrstuhl für Medizinische Materialien und Implantate an der TUM berufen. Sie ist Mitglied des Munich Institute of Biomedical Engineering (MIBE), des „Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP)“ und des Clusters TUM.Additive.



„Was mich wirklich motiviert, ist, unseren kleinen Patienten zu helfen. Dafür schlägt mein Herz.“

Petra Mela

Müller leitete auch Versuche zur Eintragung eines anderen Materials, nämlich ultrakleiner superparamagnetischer Eisenoxid-Nanopartikel. Sie sorgen dafür, dass ein mit Melt Electrowriting hergestelltes Gerüst in MRT-Aufnahmen detektierbar ist. Auf diese Weise könnten Ärztinnen und Ärzte in Zukunft bei Patienten, denen solche Trägergerüste implantiert wurden, deren Funktionsfähigkeit überwachen, während sich körpereigenes Gewebe im Gerüst bildet. Bislang erfolgten alle Versuche *in vitro*, es wurde also noch keinem Menschen ein mit Melt Electrowriting hergestelltes Gerüst implantiert. Andere auf dem Konzept der In-situ-Gewebezüchtung basierende Herzklappen haben bereits kleine klinische Pilotstudien durchlaufen. Mela ist sich aber durchaus darüber im Klaren, dass sich die Leistungsfähigkeit der von ihrer Arbeitsgruppe entwickelten Gerüste erst nach *In-vivo*-Studien – zunächst bei Tieren und irgendwann beim Menschen – bestätigen lässt. Sie freut sich darauf, das von ihrem Team gebaute Trägergerüst mit eingebettetem Elastin zu testen, denn sie hält es für besonders vielversprechend.

„Die körpereigenen Zellen der Patientin sollen das Gerüst durchdringen und mit der Herstellung der richtigen Proteine und anderer Bestandteile des Herzklappengewebes beginnen. Das Gerüst dient dabei als Orientierung für die Gewebebildung, die ansonsten bei einer Herzklappe nicht spontan erfolgen würde. Das biologisch abbaubare Gerüst wird dabei nach und nach absorbiert, sodass am Ende nur das vom Körper des Patienten gebildete Gewebe übrigbleibt.“

Zusammenarbeit ist der Schlüssel

Der Schlüssel für den Erfolg dieser Herzklappengerüste liegt in der interdisziplinären Kooperation. Als Inhaberin des Lehrstuhls für Medizintechnische Materialien und Implantate weiß Mela, wie wichtig die Zusammenarbeit mit Fachleuten aus Chemie, Immunologie, Ingenieurwissenschaften und Medizin ist – nicht nur für die Entwicklung von Herzklappenimplantaten, sondern auch für andere kardiovaskuläre Projekte. Neben ihren Projekten zu Stents, Implantaten und leitfähigen Geweben entwickelt sie ein verbessertes *In-vitro*-Modell für Krebspatienten, mit dessen Hilfe Forscher Krebsmedikamente am körpereigenen Gewebe der Patientinnen im Labor testen können.

Mela freut sich außerdem, am neuen TUM-Innovationsnetzwerk ARTEMIS (Artificial Intelligence powered Multifunctional Material Design) beteiligt zu sein. Die Unterstützung und fächerübergreifende Zusammenarbeit in diesem Netzwerk ermöglichen ihr eine Reihe von Projekten zur Entwicklung neuer Materialien für die Anwendung im Herzkreislaufsystem.

„Ich glaube, die größte Herausforderung bei meiner Arbeit liegt darin, diese unterschiedlichen Disziplinen und wissenschaftlichen Erkenntnisse zu vereinen. Ein echter Vorteil ist, dass man in der Arbeit mit so vielen Menschen aus unterschiedlichen Fachbereichen lernt, deren jeweilige, ganz eigene Sprache zu sprechen. Ich stoße ständig auf neue Dinge, neues Wissen, neue Leute. Für mich gibt es nichts Spannenderes als die Forschung an der Universität“, so Mela. ■

Sarah Puschmann

Ich bau' dir ein Schloss mit Sand: **Digitale Transformation auf der Baustelle**

Häuser, Brücken oder Bahnhöfe aus dem 3D-Drucker? In der Baubranche hält die additive Fertigung gerade Einzug. Der digital gesteuerte, schichtweise Werkstoffauftrag verspricht schnelles, flexibles und umweltfreundliches Bauen. Es gibt aber noch viel zu tun. Prof. Christoph Gehlen und Prof. Kathrin Dörfler von der TUM packen mit ihren Forschungen kräftig an.

Links

www.amc-trr277.de

www.arc.ed.tum.de/df

www.mae.ed.tum.de/cbm

Printing a House out of Sand: How the Digital Transformation is Changing Construction Sites

Could the houses, bridges and train stations of the future be produced in 3D printers? Additive manufacturing is currently making inroads into the construction sector. Prof. Christoph Gehlen and Prof. Kathrin Dörfler at TUM have set about tackling this topic in their research. Gehlen's team has developed selective paste intrusion – the selective binding of cement paste – to the point of market maturity. This technique involves binding tiny sediment particles, layer by layer, in the precise locations specified by the data model. This makes it possible to produce fine concrete components that were previously not possible to manufacture. For her part, Dörfler's research interests center around robots that can be deployed on construction sites to perform additive manufacturing. These robots should dart flexibly between different areas on the site and operate wherever they are needed at any given moment. The aim is to enable them to build walls, weld, assemble different components and provide additive manufacturing services. In the future, such robots and new additive manufacturing processes will make it possible to build houses, bridges and train stations faster and more flexibly – and, above all, present a far more environmentally friendly and resource-conserving alternative. □

2020 sorgte es weltweit für Schlagzeilen: das Einfamilienhaus im nordrhein-westfälischen Beckum, das in gerade einmal hundert Stunden per additiver Fertigung hergestellt wurde. Das aber ist bisher mehr Prestigeobjekt als Realität in der Baubranche. Zwar hat der Computer das Zeichenbrett längst abgelöst und Gebäude digital zu planen, ist in der Baubranche mittlerweile Standard. Geht es aber an die konkrete Umsetzung, hört es mit der Digitalisierung schnell auf. Auf der Baustelle wird nach wie vor überwiegend mit Papierplänen gearbeitet – mit allen Schwierigkeiten, die das mit sich bringt. Dazu gehört etwa, dass Pläne bei Änderungen nicht in Echtzeit aktualisiert werden, was Zeit kostet und zu Fehlern führen kann. Auch das Beckumer Einfamilienhaus zeigt Herausforderungen: Die Wände erstellte der 3D-Drucker zwar in Rekordzeit, Fenster, Türen, Decken und der Innenausbau ließen sich aber noch nicht additiv fertigen.

„Diese digitale Lücke zwischen Planung und Umsetzung zu schließen und die additive Fertigung auf der Baustelle für eine nachhaltige und ressourcenschonende Baukultur zu etablieren – das ist unser Ziel“, sagt Prof. Kathrin Dörfler. Uns – das sind die rund 80 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der TUM und TU Braunschweig im DFG-Sonderforschungsbereich Transregio 277 „Additive Manufacturing in Construction (AMC)“, der 2020 für maximal zwölf Jahre ins Leben gerufen wurde. „Von der Architektur über das Bauingenieurwesen bis zur Robotik sind hier alle Ingenieurdisziplinen beteiligt – was die Forschungen besonders spannend macht“, freut sich Prof. Christoph Gehlen. Er und Dörfler sind beide Mitglieder im Vorstand des Sonderforschungsbereichs.



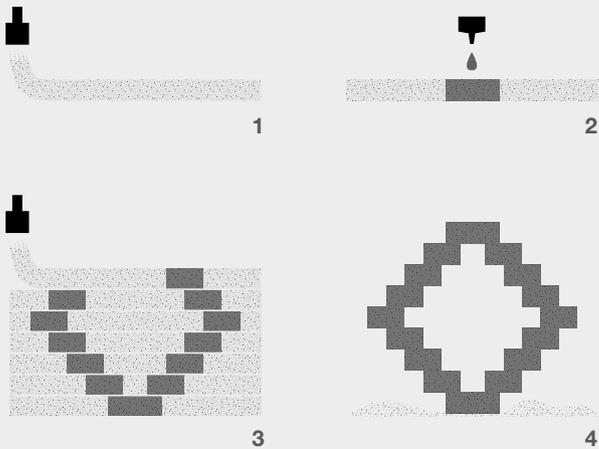
Deutschlands erstes 3D-gedrucktes Wohnhaus
(Design: Mense-Korte ingenieure+architekten)

Neue geometrische Freiheit

Additiv gefertigte Produkte begegnen uns heute bereits oft im Alltag – etwa als Bürsten von Wimperntusche, Triebwerkskomponenten für Flugzeuge oder Knochenimplantate. Die Besonderheit: Sie werden auf der Grundlage eines digitalen Datenmodells schichtweise aufgebaut, also komplett ohne Werkzeuge und Schalung. „Dieses Verfahren ermöglicht ganz neue Gestaltungsmöglichkeiten und geometrische Freiheiten“, schwärmt Dörfler. Was früher unmöglich zu fertigen war, lässt sich nun herstellen. Und nicht nur das: Weil das Material nur dort platziert wird, wo es eine Funktion hat, lässt sich im Vergleich mit herkömmlichen Verfahren Material sparen beziehungsweise sogar komplett abfallfrei produzieren. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, Bauteile direkt vor Ort zu fertigen. Damit entfallen Transportwege, die die Umwelt belasten. Wirtschaftlich wird die Methode außerdem dadurch, dass ein großer Anteil manueller Arbeitsprozesse entfällt.

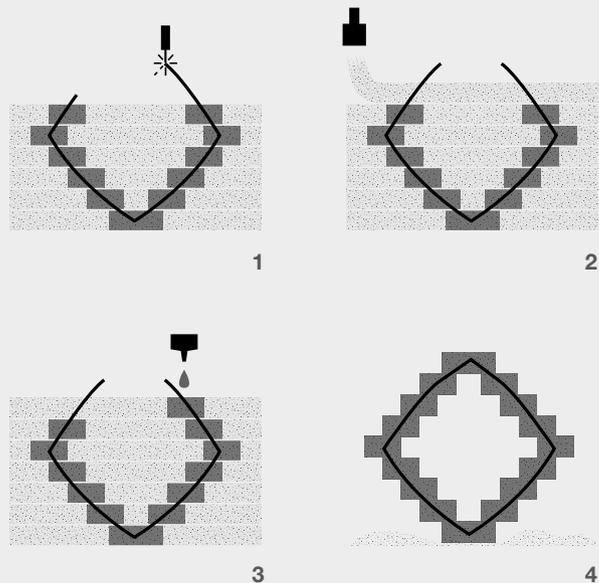
Viele Industriezweige setzen daher bereits auf additive Fertigung, wenn es um filigrane Formen geht. Noch nicht so auf der Baustelle. Das hat mehrere Gründe. Erstens ist die Umgebung auf der Baustelle deutlich ungeschützter und damit unkontrollierbarer als in einer Fertigungshalle. Zweitens sind die Standards in punkto Qualität und Sicherheit bei einem Gebäude enorm hoch, bislang allerdings fehlen allgemeingültige Regelwerke für die neuen 3D-Druckverfahren und die eingesetzten Materialien. Und drittens ist im Bauwesen 3D-Druck in besonders großem Maßstab gefragt – ein Gebäude zu drucken ist eben eine weitaus größere Herausforderung als eine Zahnbürste. ▸

3D-Druck von Betonkomponenten mit Selective Paste Intrusion:



1 | Eine Lage Sand wird aufgebracht 2 | Zementleim bindet die Partikel an präzise bestimmten Stellen 3 | Lage für Lage entsteht die gewünschte Form aus Beton 4 | Das Partikelbett wird entfernt

3D-Druck von stahlbewehrten Objekten:



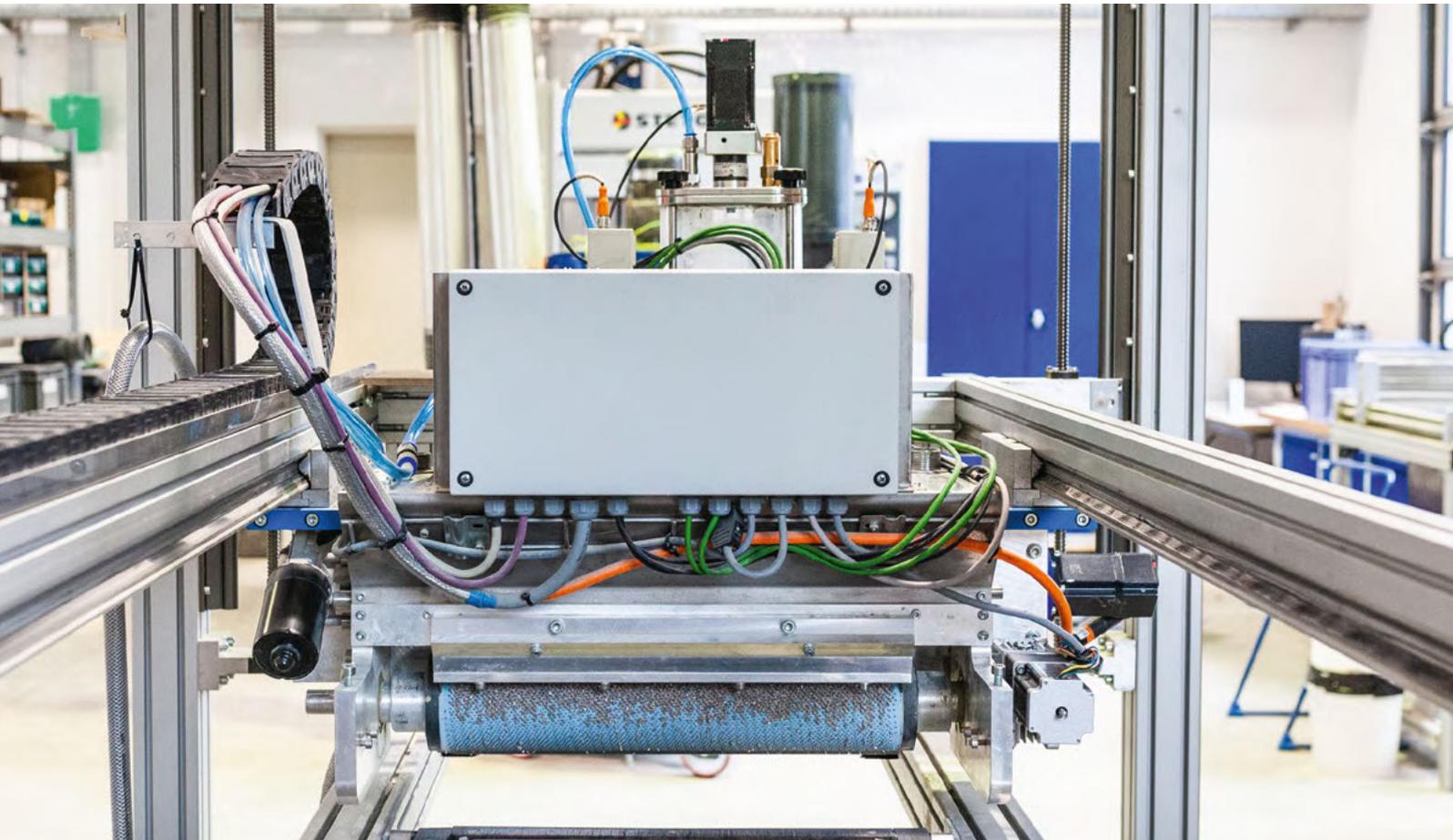
1 | Die Stahlbewehrung wird gedruckt 2 | Eine Lage Sand wird aufgebracht 3 | Zementleim bindet die Partikel 4 | Das Partikelbett wird entfernt

Im Partikelbett gefertigt

Mittlerweile gibt es aber auch eine ganze Reihe an Verfahren, um technisch höchst anspruchsvolle Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen herzustellen. Das Selective Paste Intrusion – also das selektive Verbinden mit Zementleim – ist eines davon. Entwickelt haben es Gehlen und sein Team speziell für das Bauwesen.

Das funktioniert folgendermaßen: Kleine Gesteinskörner wie beispielsweise Sand werden in einer circa zwei Millimeter dünnen Schicht lose auf einer Plattform ausgelegt und genau an den Stellen mit Zementleim verfestigt, die das Datenmodell vorgibt. Neue Partikelschichten werden immer wieder aufgetragen. So entsteht nach und nach aus den Partikeln das gewünschte Bauteil, das Partikelbett dient dabei als Stützstruktur. „So lassen sich Feinbeton-Bauteile in Strukturen fertigen, die bisher nicht herstellbar waren“, erklärt Gehlen.

Zusammen mit seinem Team hat er dieses Verfahren zur Marktreife entwickelt, in Kürze wird es im Forschungsprojekt in größerem Maßstab erprobt. Nun forscht Gehlens Team daran, wie sich damit auch stahlbewehrte Betonbauteile additiv fertigen lassen. Im Drucker sollen dann Beton und Stahl gleichzeitig gedruckt werden. Die Herausforderung: Beide Materialien werden ganz unterschiedlich hergestellt. „Beim Schweißen von Stahl entsteht Hitze, die sich nicht mit dem selektiven Verbinden von Sand mit Zementleim verträgt“, erklärt Gehlen. „Das im Zementleim steckende Wasser würde unmittelbar verdunsten. So kann kein Leim erhärten.“ Er und sein Team suchen nun nach Wegen, beide Herstellprozesse dennoch miteinander zu verbinden.



Selective Paste Intrusion-Maschine in Gehlens Labor. Die blaue Rolle bringt Lage für Lage das Partikelbett auf. Der Behälter für den Zementleim sitzt hinter der grauen Metallplatte.



Grafiken: edlundsepp (Quelle: TUM); Bildquellen: Juli Eberle

Prof. Christoph Gehlen

ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen an der TUM. Nach Studien der Chemie und Mineralogie in Bonn schloss er an der RWTH Aachen das Bauingenieurstudium ab, wo er anschließend promovierte. Danach gründete er in München zusammen mit zwei Partnern ein international tätiges Ingenieurbüro. Nach einer Lehrstuhlberufung an die Universität Stuttgart wechselte er 2008 an die TUM. Von 2012 bis 2016 war er Studiendekan, von 2016 bis 2021 Dekan der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt (BGU). Seit 2021 ist er Gründungsdekan der neuen TUM School of Engineering and Design (TUM SoED).



Prof. Kathrin Dörfler

ist Architektin und erforscht die Computergestaltung und Roboterfertigung auf diesem Gebiet. Sie hat einen Master in Architektur von der TU Wien und einen Ph.D. in Digitaler Fabrikation von der ETH Zürich. Seit 2019 ist sie als Tenure-Track-Professorin an der TUM School of Engineering and Design (TUM SoED) tätig und baut dort eine Forschungsgruppe für digitale Fabrikation am Department für Architektur auf. In dieser Rolle ist sie auch Co-Sprecherin des DFG-Sonderforschungsbereichs Transregio 277 „Additive Manufacturing in Construction (AMC)“.

Mobile Roboter auf der Baustelle

Dörflers Forschungsinteresse liegt vor allem auf additiven Fertigungsprozessen mittels mobiler Roboter, die sich direkt auf der Baustelle einsetzen lassen. Sie sollen sich flexibel von Einsatzgebiet zu Einsatzgebiet bewegen können und direkt dort tätig sein, wo sie in dem Moment gebraucht werden. Ein weiterer Vorteil ist natürlich, dass Roboter rund um die Uhr arbeiten können.

Die Herausforderung ist auch hier, dass die Roboter nicht in einer Produktionshalle tätig sind, sondern auf einer Baustelle, die aufgrund ihrer Komplexität deutlich weniger geschützt und kontrollierbar ist. Schließlich werden Roboter bisher am erfolgreichsten in Massenfertigungslinien eingesetzt, wo sie an Ort und Stelle die immer gleichen Aufgaben ausführen. Im Gegensatz dazu ist jede Baustelle einzigartig. Die Roboter müssen also mittels Sensorik und Kontrollmethoden auf Unvorhergesehenes reagieren können.

Zwei Roboter-Prototypen haben Dörfler und ihr Team als Forschungsplattformen entwickelt. Es sind wendige Gesellen, die in jede Richtung fahren und dank ausgeklügelter Sensorik ihre Umgebung erkennen und interpretieren können. Für das Wissenschaftlerteam ist hier allerdings die Navigation weniger herausfordernd als die präzise, millimetergenaue Führung des Druckkopfes, der sich frei im Raum bewegen und je nach Anwendung anpassen lässt. Stand heute können die Roboter beispielsweise Mauern bauen, schweißen und verschiedene Bauteile zusammensetzen. Das Team arbeitet nun daran, auch Bauteile additiv fertigen zu können. Dafür ist es notwendig, dass die Roboter den Druckpfad, den das digitale Datenmodell vorgibt, millimetergenau legen können.

Eine weitere Forschungsfrage, die Dörfler umtreibt, ist die Kollaboration der Roboter untereinander und mit Menschen. „In meinem Team erforschen wir, wie sich starke Mensch-Maschine-Teams bilden lassen, die das Beste aus ihren sich ergänzenden Stärken kombinieren: die Geschwindigkeit und Genauigkeit von Maschinen und ihre Fähigkeit, große Datenmengen zu verarbeiten, kombiniert mit unseren Fähigkeiten als Mensch, Probleme kreativ, flexibel und gemeinsam zu lösen“, so Dörfler.

Stein auf Stein

Mit solchen Robotern und neuen additiven Fertigungsprozessen lassen sich in Zukunft Häuser, Brücken und Bahnhöfe schneller, flexibler und vor allem viel umweltfreundlicher als bisher bauen. Für Bauunternehmen ist beides aber noch mit hohen Vorlaufkosten einschließlich Forschung und Entwicklung verbunden. Vor allem Start-ups treiben die technologische Entwicklung voran, haben Dörfler und Gehlen beobachtet. Diese tun sich scheinbar leichter als etablierte Unternehmen, vor allem weil Herstellung, Zulieferung und Umsetzung nicht mehr voneinander getrennt werden können, was ganz neue Prozesse erfordert. Daher wollen Dörfler und Gehlen Expertinnen und Experten motivieren, Start-ups zu gründen. Schritt für Schritt, Stein auf Stein wird sich die Baustelle digitalisieren. ■

Gitta Rohling

Materialpatrone

Kollaborativer
Roboterarm

Sensoren für präzise
Verortung des End-
Effektors

Materialspritze

Benutzeroberfläche

Mobile
Roboter-
plattform

Sensoren für die
genaue Verortung
der Basis

Gido Dielemann ist Doktor-
rand in Dörflers Gruppe und
präsentiert einen Prototyp
eines mobilen Roboters.



*„Additive Fertigung ermöglicht
ganz neue Gestaltungsmöglichkeiten
und geometrische Freiheiten.“*

Kathrin Dörfler

Additive Fertigung im Flug

Link

www.mlr.in.tum.de/home

Ein internationales Forschungsteam hat fliegende 3D-Drucker entwickelt, die kooperativ Strukturen bauen und reparieren können. Die Inspiration für das Projekt liefern Bienen und Wespen. Die Technologie könnte in Zukunft für Konstruktionsmaßnahmen an schwer zugänglichen oder gefährlichen Orten, etwa an hohen Gebäuden, zum Einsatz kommen.

3D-Druck gewinnt in der Bauindustrie zunehmend an Bedeutung. Sowohl auf Baustellen als auch in Fabriken drucken stationäre und mobile Roboter Strukturen für den Einsatz in Bauprojekten, beispielsweise aus Stahl oder Beton. Im Fachmagazin „Nature“ beschreibt ein internationales Forschungsteam das Projekt „Aerial Additive Manufacturing (Aerial-AM)“. Dieser neue Ansatz für den 3D-Druck mit fliegenden Robotern, die kooperativ arbeiten, ist von Baumeistern aus der Natur wie Bienen und Wespen inspiriert.

Die Drohnen arbeiten anhand eines einzigen Bauplans und passen ihre Arbeitsweise laufend an. Während des Fluges sind sie autonom, werden aber von einem Menschen überwacht, der den Fortschritt kontrolliert und bei Bedarf auf der Grundlage der von den Drohnen gelieferten Informationen eingreifen kann.

Drohnen müssen sehr präzise navigieren

Die Leitung des Forschungsteams lag am Imperial College London und bei der Empa, der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt. Stefan Leutenegger, seit 2021 Professor für Machine Learning for Robotics an der TUM und Reader am Imperial College London, war einer der Hauptverantwortlichen des Projekts. „Die größte Herausforderung für mein Team und mich war es, die Drohnen in die Lage zu versetzen, sehr präzise zu navigieren. Dafür mussten sie auch ihre Sensoren, beispielsweise Kameras, nutzen, um die Struktur, die sie gedruckt haben, genau zu erfassen und ihre Arbeitsweise an die gesammelten Daten anzupassen“, sagt Leutenegger. Hauptautor Prof. Mirko Kovac vom Department of Aeronautics des Imperial College London und dem Materials and Technology Center of Robotics der Empa sagt: „Wir haben bewiesen, dass Drohnen autonom und im Tandem arbeiten können, um Gebäude zu bauen und zu reparieren, zumindest im Labor. Unsere Lösung ist skalierbar und könnte uns in Zukunft helfen, Gebäude in schwer zugänglichen Gebieten zu bauen und zu reparieren.“

BuilDrones tragen während des Flugs Material auf

ScanDrones messen die Leistung der BuilDrones und geben ihnen die nächsten Schritte vor



Zwei Typen von Drohnen

Die Aerial-AM-Flotte besteht zum einen aus den „BuilDrones“, die während des Flugs Materialien auftragen. Den zweiten Baustein bilden die „ScanDrones“, die kontinuierlich die Leistung der BuilDrones messen und die nächsten Schritte vorgeben. Um das Konzept zu testen, entwickelten die Forscherinnen und Forscher vier maßgeschneiderte Zementmischungen, mit denen die Drohnen bauen sollten. Während des Bauprozesses bewerteten die Drohnen die gedruckte Geometrie in Echtzeit und passten ihr Verhalten an, um sicherzustellen, dass sie die Vorgaben mit einer Genauigkeit von fünf Millimetern erfüllten.

Um das Potenzial des Verfahrens zu demonstrieren, druckte das Team einen 2,05 Meter hohen Zylinder, der in 72 Schichten mit einem Schaumstoff auf Polyurethanbasis gedruckt wurde, und einen kleineren Zylinder (18 cm), der mit einem speziell entwickelten zementartigen Material gedruckt wurde.

Digitale Fabrikation mit Robotern auf Baustellen

Leutenegger setzt seine Robotikforschung an der TUM fort. Für ein aktuelles Projekt kooperiert er mit Kathrin Dörfler, Professorin für Digitale Fabrikation an der TUM. Im Oktober startet ihr gemeinsames Projekt „Spatial AI for Cooperative Construction Robotics“, das durch das TUM Georg Nemetschek Institute Artificial Intelligence for the Built World gefördert wird. Eines der Ziele ist es, Robotern beizubringen, sich auf realen Baustellen zu bewegen – inmitten von Menschen und Maschinen, die ständig in Bewegung sind, und zwischen Strukturen, die sich täglich ändern können. „Wir wollen Robotern helfen, sicher zu kooperieren“, sagt Leutenegger, „untereinander und mit Menschen.“ Künftige Projekte werden diese neuen Ansätze mit additiven Fertigungstechnologien, wie sie im aktuellen Artikel beschrieben werden, kombinieren.

■ *Paul Hellmich (TUM)*

Erstes Neutrino-Bild einer aktiven Galaxie

Seit mehr als zehn Jahren detektiert das IceCube-Observatorium in der Antarktis Leuchts Spuren extragalaktischer Neutrinos. Ein internationales Forschungsteam unter der Leitung der TUM hat bei der Auswertung der Daten in der aktiven Galaxie NGC 1068, auch bekannt als Messier 77, eine Quelle hochenergetischer Neutrino-Strahlung entdeckt.

Hubble-Aufnahme der Spiralgalaxie Messier 77, auch NGC 1068 genannt

Das Universum ist voller Geheimnisse. Eines davon sind aktive Galaxien, in deren Zentrum sich gigantische Schwarze Löcher befinden. „Wir wissen bis heute nicht genau, welche Prozesse sich dort abspielen“, erklärt Elisa Resconi, Professorin für Experimental Physics with Cosmic Particles an der TUM. Ihr Team ist der Auflösung dieses Rätsels jetzt einen großen Schritt nähergekommen: In der Spiralgalaxie NGC 1068 haben die Astrophysikerinnen und Astrophysiker eine Quelle hochenergetischer Neutrinos aufgespürt.

Mit Teleskopen, die Licht, Gamma- oder Röntgenstrahlen aus dem All auffangen, ist es sehr schwierig, die aktiven Zentren von Galaxien zu erforschen, weil Wolken aus kosmischem Staub und heißem Plasma die Strahlung absorbieren. Dem Inferno am Rande Schwarzer Löcher entkommen nur Neutrinos, die so gut wie keine Masse und auch keine elektrische Ladung haben. Sie durchdringen den Raum, ohne durch elektromagnetische Felder abgelenkt oder absorbiert zu werden. Deshalb sind sie auch so schwer zu detektieren.

Die größte Hürde bei der Neutrino-Astronomie war bisher die Trennung des sehr schwachen Signals von dem starken Hintergrundrauschen durch Teilcheneinschläge aus der Erdatmosphäre. Erst die langjährigen Messungen des IceCube Neutrino Observatory und neue statistische Methoden ermöglichten Resconi und ihrem Team genügend Neutrino-Ereignisse für ihre Entdeckung.

Detektivarbeit im ewigen Eis

Das IceCube-Teleskop, das sich im Eis der Antarktis befindet, detektiert seit 2011 Leuchtspuren einfallender Neutrinos. „Aus ihrer Energie und ihrem Einfallswinkel können wir rekonstruieren, woher sie kommen“, erklärt TUM Wissenschaftler Dr. Theo Glauch. „Die statistische Auswertung zeigt eine hochsignifikante Häufung von Neutrino-Einschlägen aus der Richtung, in der sich die aktive Galaxie NGC 1068 befindet. Damit können wir mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass die hochenergetische Neutrino-Strahlung aus dieser Galaxie kommt.“

Die Spiralgalaxie, 47 Millionen Lichtjahre entfernt, wurde bereits im 18. Jahrhundert entdeckt. NGC 1068 – auch

bekannt unter dem Namen Messier 77 – ist in Form und Größe unserer Galaxie ähnlich, hat aber ein leuchtend helles Zentrum, das heller strahlt als die gesamte Milchstraße, obwohl es nur in etwa so groß ist wie unser Sonnensystem. In diesem Zentrum befindet sich ein „aktiver Kern“: ein gigantisches Schwarzes Loch von etwa 100 Millionen Sonnenmassen, das große Mengen von Materie aufsaugt.

Doch wo und wie entstehen dort Neutrinos? „Wir haben ein klares Szenario“, antwortet Resconi. „Wir denken, dass die hochenergetischen Neutrinos das Ergebnis einer extremen Beschleunigung sind, die Materie in der Umgebung des Schwarzen Lochs erfährt und dadurch auf sehr hohe Energien beschleunigt wird. Aus Experimenten in Teilchenbeschleunigern wissen wir, dass hochenergetische Protonen Neutrinos erzeugen, wenn sie mit anderen Teilchen zusammenstoßen. Mit anderen Worten: Wir haben einen kosmischen Beschleuniger gefunden.“

Neutrino-Observatorien für eine neue Astronomie

NGC 1068 ist die statistisch signifikanteste Quelle hochenergetischer Neutrinos, die bisher entdeckt wurde. Um auch schwächere und weiter entfernte Neutrino-Quellen lokalisieren und erforschen zu können, seien mehr Daten erforderlich, betont Resconi. Die Forscherin hat unlängst eine internationale Initiative für den Bau eines mehrere Kubikkilometer großen Neutrino-Teleskops im nordöstlichen Pazifik gestartet, das Pacific Ocean Neutrino Experiment, P-ONE. Es soll zusammen mit dem geplanten IceCube-Observatorium der zweiten Generation – IceCube-Gen2 – die Daten für eine künftige Neutrino-Astronomie liefern. ■

Monika Weiner

Links

www.ph.nat.tum.de/cosmic-particles

www.icecube.wisc.edu

Video über die Galaxie NGC 1068 und die IceCube Neutrinos:
youtu.be/uV0eumyRIww

Links

www.6g-future-lab.de/

www.ce.cit.tum.de/en/lkn/

Visionäre Pläne für das **Netz der Zukunft**

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung-29

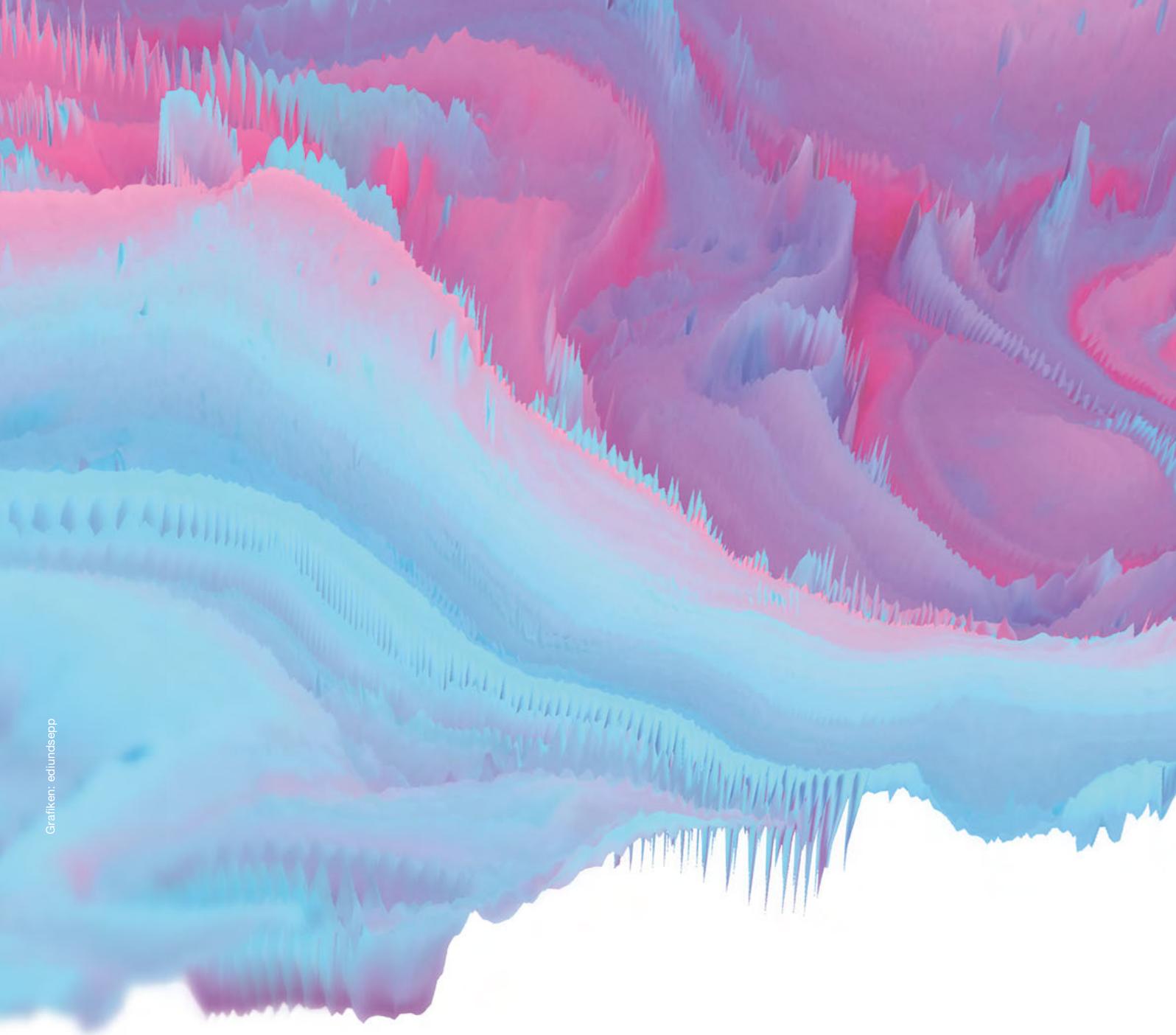
Visions of Next-Generation Communication

E

The 6G Future Lab Bavaria brings together 12 TUM Chairs in an effort to research and define the requirements and possibilities of the next generation of mobile communication. Project coordinator Wolfgang Kellerer, holder of the Chair of Communication Networks: “The current generation, 5G, has a decisive role to play in Industry 4.0 and opens up a new dimension of communication between machines.

By contrast, we aim to put people and their surroundings at the front and center of 6G.”

In this three-year project, which has been awarded €4 million of funding by the Bavarian State Ministry of Economic Affairs, Kellerer and his internationally renowned colleagues are developing ideas, proposals and scientific foundations that will later be incorporated into practical developments. □



Grafiken: edlundsepp

Im 6G Zukunftslabor Bayern arbeiten zwölf Lehrstühle der TUM zusammen, um schon heute die Voraussetzungen und Möglichkeiten der nächsten Mobilfunkgeneration zu erforschen und zu definieren. Prof. Wolfgang Kellerer, Inhaber des Lehrstuhls für Kommunikationsnetze, leitet das Projekt. Er und seine international renommierten Kolleginnen und Kollegen entwickeln Strategien und Szenarien, die derzeit noch wie Science Fiction anmuten. Sie könnten aber im kommenden Jahrzehnt schon Wirklichkeit werden.

1G

1980

Sprachanrufe

Max. Datenrate:
2,4 Kbit/s

2G

1990

SMS, E-mail

Max. Datenrate: 0,2 Mbit/s
Latenz: 600 ms

3G

2000

Internet, Apps

40 Mbit/s
120 ms

Analoge Mobilfunkgeneration

Digitale Mobilfunkgenerationen

„**V**isionen brauchen Fahrpläne“. Diese Erkenntnis des großen deutschen Philosophen Ernst Bloch hat sich das Bayerische Wirtschaftsministerium offenbar zu eigen gemacht, um in einer 6G-Initiative die mobile Kommunikation der Zukunft auf den Weg zu bringen. Einer der wichtigsten Bausteine ist das 6G Zukunftslabor Bayern an der TUM, das mit vier Millionen Euro für drei Jahre finanziert wird. Es umfasst ein Team aus 13 Professorinnen und Professoren von zwölf Lehrstühlen, die nun Ideen, Vorschläge und wissenschaftliche Grundlagen entwickeln, die später in die konkrete Entwicklung einfließen sollen. „Für die Wissenschaft ist es von großer Bedeutung, zu erfahren, welche Anforderungen die künftigen Nutzerinnen und Nutzer an das 6G-Netz haben“, sagt Wolfgang Kellerer, der Projektleiter des Teams. „Dann können wir die entscheidenden Forschungsfragen so formulieren, dass die neue Mobilfunkgeneration ein großer Wurf wird.“

Es begann im Jahr 1992

Mobilfunk ist heute aus unserem Leben kaum mehr wegzudenken. 1992, als die ersten Mobiltelefone auf den Markt kamen, fremdelte mancher noch ein wenig mit der neuen Technik. In großen Auktionen wurden dann im Jahr 2000 Frequenzen an interessierte Anbieter versteigert, und bald erlaubten es die D1- und D2-Netze der großen Telekomfirmen, immer und fast überall mobil zu telefonieren.

Als 2004 die dritte Generation – UMTS genannt – auf den Markt kam, waren bereits wesentlich höhere Übertragungsraten möglich, und die Nutzerinnen und Nutzer gewöhnten sich daran, mit ihren Handys nicht nur zu telefonieren, sondern auch viele andere Dienstleistungen zu nutzen. Einen großen Schritt nach vorn brachte schließlich die vierte Generation, heute 4G genannt, mit der es mit weiteren Frequenzen erstmals möglich wurde, Online-spiele und ganze Filme drahtlos zu übertragen. Damals handelte es sich noch um eine kontinuierliche Weiterentwicklung, deshalb hieß 4G zunächst auch noch LTE für Long Term Evolution. Seither steigen die Ansprüche, aber auch die Möglichkeiten, immer weiter.

4G

2010
Internet der Anwendungen
1.000 Mbit/s
45 ms

5G

2020
Internet der Dinge
Künstliche Intelligenz
10.000 Mbit/s
≈1 ms

6G

2030
Hochgenaue Fernsteuerung
Automatisierte Fahrzeuge
Mensch-Maschine-Kollaboration
1.000 Gbit/s
0,1 ms

Eine wirklich disruptive Steigerung der technischen Optionen brachte und bringt die fünfte Generation 5G, die seit 2019 an Verbreitung gewinnt. Bei ihr stehen vor allem industrielle Bedürfnisse im Vordergrund. So etwa die Möglichkeit, mit mobilen Breitbandverbindungen sehr hohe Datenraten zu übertragen. Damit lässt sich nun das „Internet der Dinge“ voranbringen, also die drahtlose Kommunikation zwischen Robotern und Maschinen, aber auch normalen Gegenständen untereinander. Mithilfe hoher Zuverlässigkeit und kurzer Übertragungszeiten werden derzeit auch die Grundlagen für autonomes Fahren gelegt. Die technischen Neuerungen gingen dabei in erster Linie von asiatischen Firmen aus, Deutschland hatte oft das Nachsehen.

Der Mobilfunkstandard 5G ermöglicht eine Leistungssteigerung in der drahtlosen Datenübertragung bis zu zehn Gigabit pro Sekunde. Doch das Ende der Fahnenstange ist noch längst nicht erreicht.

München als idealer Standort

Diesmal will Bayern alles richtig machen. Nachdem bei der Entwicklung von 5G zu lange gezögert wurde, will man nun selbst Maßstäbe setzen, auch in der Forschung. „Bei 5G war das andersherum: Da gab es die großen Industriekonsortien, bei denen wir halt auch dabei waren, aber diesmal geben wir die Richtung vor“, freut sich Kellerer. Und man fängt bereits jetzt damit an, denn die Spanne bis zur Einführung eines neuen Mobilfunkstandards beträgt in der Regel rund zehn Jahre. 2030 dürfte es also für 6G so weit sein.

Die Voraussetzungen dafür sind in München in fast idealer Weise vorhanden, denn dort haben die wichtigsten IT-Firmen wie Nokia, Google oder Apple große Forschungs- und Entwicklungszentren, dazu kommt die Expertise an der TUM. So etablierten sich in Bayerns Hauptstadt mehrere Initiativen: unter dem Dach der bayerischen 6G-Initiative das Thinknet 6G, das die Akteure aus Forschung und Industrie miteinander in Kontakt bringen will, und das 6G Zukunftslabor Bayern an der TUM. Parallel dazu gelang es der TUM zusammen mit der TU Dresden, vom Bund insgesamt 70 Millionen Euro für vier Jahre für das Projekt 6G-life zu erhalten. ▶

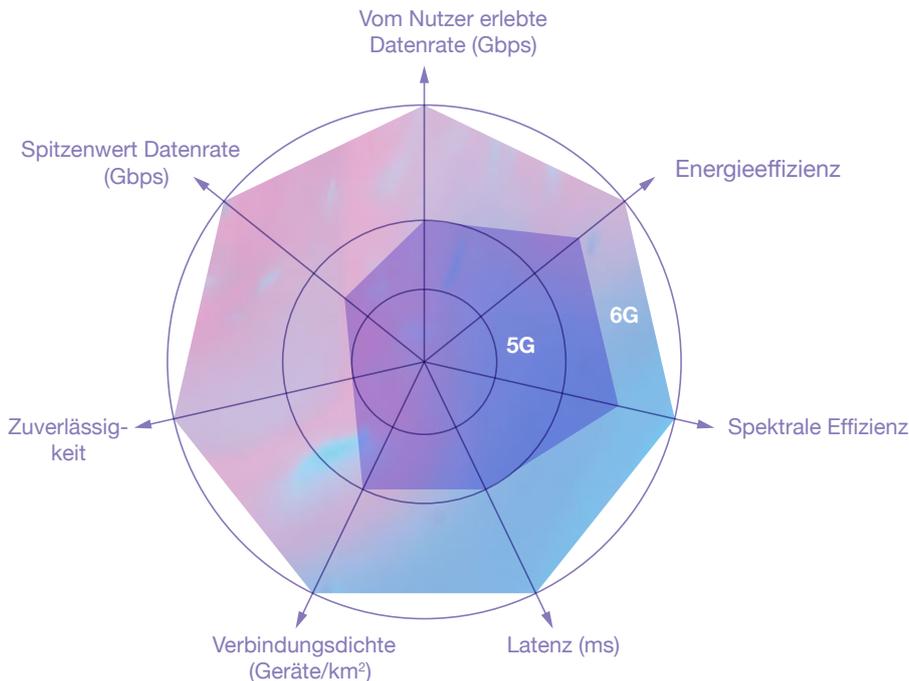
„Für die Wissenschaft ist es von großer Bedeutung, zu erfahren, welche Anforderungen die künftigen Nutzerinnen und Nutzer an das 6G-Netz haben.“

Wolfgang Kellerer

Prof. Wolfgang Kellerer

Sein Leben ist auf allen Ebenen den Netzwerken gewidmet: Seit 2012 ist er an der TUM Professor für Kommunikationsnetze, gleichzeitig gilt er selbst als begnadeter Netzwerker. Kellerer ist Mitglied in vielen wissenschaftlichen Organisationen und als Gutachter für die Europäische Kommission und verschiedene andere Forschungsprogramme tätig. Sein fachliches Rüstzeug holte er sich in den 90er Jahren an der TUM, bevor er nach der Promotion als Gastforscher an die Stanford University ging. Ab 2002 arbeitete Kellerer bei der japanischen Firma DOCOMO Communications Laboratories Europe GmbH, dem europäischen Forschungsinstitut von NTT DOCOMO in München. Kellerer hält mehr als 40 einschlägige Patente und Patentanmeldungen.





Die Weiterentwicklung von 5G zu 6G hat viel mehr Aspekte als nur eine höhere Datenrate. Für präzise Robotik-Steuerungen ist zum Beispiel die Latenzzeit wesentlich.

Kellerer hat sich von Anfang an dafür eingesetzt, diesmal selbst die Initiative zu ergreifen. Er überzeugte das Bayerische Wirtschaftsministerium und begeisterte seine Kolleginnen und Kollegen an der TUM. Vielleicht war es gerade ihm vorbestimmt, dass sein Berufsleben mit der Entwicklung des Mobilfunks aufs Engste verknüpft ist: Seine Lebensdaten laufen ziemlich genau parallel zur Entstehung der Mobilfunkgenerationen. Als er 50 wurde, kam gerade 5G auf den Markt, wenn er 60 wird, passiert voraussichtlich das Gleiche mit 6G.

Der Mensch im Mittelpunkt

Während bei 5G in erster Linie die Kommunikation zwischen Maschinen im Vordergrund steht, soll nun bei 6G der Mensch in den Mittelpunkt rücken. Dabei gibt es drei Ziele:

- Die Schnelligkeit der Übertragung muss erhöht werden. Angestrebt wird, dass Daten drahtlos mit einer Geschwindigkeit von bis zu 400 Gigabit pro Sekunde transportiert werden können. Dafür sind höhere Frequenzen bis hin zum Terahertz-Bereich nötig. Erst mit solch hohen Übertragungsraten ist es möglich, in Echtzeit in virtuelle Realitäten einzutauchen, sei es für medizinische Anwendungen, für Katastropheneinsätze oder für Unterhaltung und Spiele.

- Die Zuverlässigkeit und damit die Genauigkeit der Kommunikation soll auf 99,999999999 Prozent verbessert werden. Das ist nötig bei Anwendungen, an denen Menschen mit Maschinen in Kontakt treten, etwa bei ferngesteuerten Operationen, beim Einsatz von Betreuungsrobotern oder beim autonomen Fahren. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es nötig, alle verfügbaren Kommunikationsmittel intelligent miteinander zu kombinieren, vom Satelliten über Glasfaser bis hin zum Mobilfunk.
- Die Sicherheit muss weiter verbessert werden. Dazu dienen unter anderem neue, absolut sichere Methoden der Verschlüsselung, etwa durch Quantenkryptographie.

Digitale Zwillinge

Es sind ambitionierte Ziele, die man sich da gesteckt hat. Und seit Beginn des Projekts im Mai 2021 gibt es schon erste Ergebnisse. Darunter ist beispielsweise die Entwicklung eines „digitalen Zwillings“, der die Umgebung des Kommunikationsgeräts jederzeit in Echtzeit im virtuellen Raum abbilden soll. Er soll die Zuverlässigkeit der Kommunikation erhöhen, und das geht so:

Um höhere Datenraten zu übertragen, wird man bei 6G höhere Frequenzen benutzen. Je höher aber die Frequenz ist, desto schlechter können die Wellen Hindernisse wie Wände, Türen oder Menschen durchdringen. Man braucht also idealerweise immer Sichtkontakt zur Basisstation. ▷



△ An diesem Roboter entwickelt und testet das Forschungsteam die präzise Steuerung und die Interaktion mit Menschen.

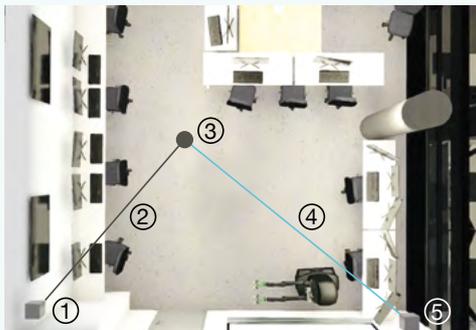


△ Die drei Kernziele der Entwicklung von 6G stellen die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ins Zentrum.

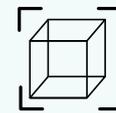
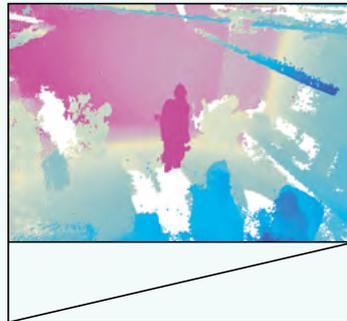
Physikalischer Raum / Reale Welt



Virtueller Raum / Digitaler Zwilling



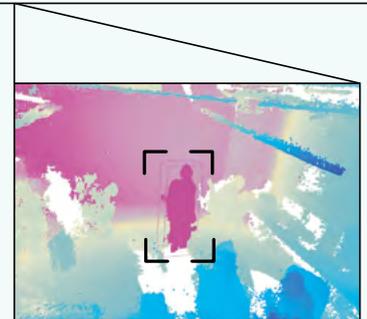
- ①+⑤ Basisstationen
- ② Alternative Übertragung
- ③ Sich bewegender Roboter
- ④ Aktive Übertragung



Erfassung



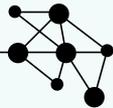
LiDAR-Scan



Bildquellen: Andreas Heddergott; Grafiken: edlundsepp (Quelle: TUM)



▽ Im Labor wird demonstriert, wie digitale Zwillinge die Kommunikation robuster machen. Der digitale Zwilling des Labors wird durch kontinuierliche LiDAR-Scans in Echtzeit aktualisiert. Alle Objekte oder Bewegungen, die LiDAR erfasst, werden im digitalen Raum nachgebildet. Die Netzwerksimulation analysiert, wie sich die Veränderung auf die Übertragungswege auswirkt, und befiehlt bei Bedarf die Übergabe an die andere Basisstation.



Netzwerksimulation



Aktualisierung digitaler Zwilling





**Prof. Eckehard
Steinbach**
Lehrstuhl für
Medientechnik

**Prof. Andreas
Herkersdorf**
Lehrstuhl für
Integrierte
Systeme

**Prof. Reinhard
Heckel**
Professur für
Maschinelles Lernen

**Prof. Wolfgang
Kellerer**
Lehrstuhl für Kom-
munikationsnetze
(Projektkoordinator)

**Prof. Antonia
Wachter-Zeh**
Professur für
Codierung für
Kommunikation
und Daten-
speicherung

Weitere Teilnehmerinnen und Teilnehmer (nicht im Bild):

Prof. Gerhard Kramer
Lehrstuhl für Nachrichten-
technik

Prof. Holger Boche
Lehrstuhl für Theoretische
Informationstechnik

Prof. Wolfgang Utschick
Professur für Methoden der
Signalverarbeitung

Prof. Georg Carle
Lehrstuhl für Netzarchi-
turen und Netzdienste

Teilnehmerinnen und Teilnehmer im Zukunftslabor Bayern

Prof. Klaus Diepold
Lehrstuhl für
Datenverarbeitung

PD Carmen Mas Machuca
Lehrstuhl für
Datenverarbeitung



Prof. Georg Sigl
Lehrstuhl für Sicherheit in
der Informationstechnik

Prof. Jörg Ott
Lehrstuhl für vernetzte
Mobilität

Damit die Verbindung von der Basisstation zum Endgerät (zum Beispiel einem Handy) bei einem Hindernis nicht abreißt, muss die Kommunikation dann sofort an eine andere Basisstation übergeben werden. Heute geschieht ein solcher Handover immer dann, wenn das Handy feststellt, dass sein Funksignal zu schwach wird. Dessen Stärke muss also laufend gemessen werden.

Einfacher wäre es doch – so überlegte sich ein Team um die Professoren Wolfgang Kellerer und Eckehard Steinbach –, wenn das Handy jederzeit wüsste, wie seine Umgebung aussieht und wo ein Hindernis droht. Das gilt insbesondere für Innenräume wie Fabrikanlagen, Lager oder Ähnliches. Dann könnte das Handy rechtzeitig auf eine andere Basisstation umschalten, die Ausfallzeiten würden verkürzt. Um das zu erreichen, benötigt man Sensoren wie Kameras oder Lidar, die den Raum abtasten und ein elektronisches Abbild – einen digitalen Zwilling – davon erstellen. Mittels Bildverarbeitung und Künstlicher Intelligenz kann der Rechner darin Hindernisse identifizieren und fast in Echtzeit entsprechende Befehle weiterleiten.

Bisher ist es an einem Prototyp bereits gelungen, die Handover-Rate um 45 Prozent und die Ausfallzeit um zehn Prozent zu senken. Im nächsten Schritt soll der digitale Zwilling noch schneller und genauer erzeugt werden und auch bewegte Objekte mit einschließen.

Ein eigenes TUM Netz

Momentan geht es in erster Linie darum, neue und raffiniertere Algorithmen zu definieren und zu entwickeln, die das 6G-Netz zu einem Erfolg machen können. Aber auch auf die Hardwareseite kommen neue Anforderungen zu. Die höheren Frequenzen verlangen kleinere Funkzellen, deshalb benötigt man mehr – allerdings kleinere – Antennen. Dazu Sensoren für die ständige Überwachung und Verknüpfung aller Signale, und die Schnittstellen müssen angepasst werden. Nicht zuletzt braucht man auch Batterien mit jahrzehntelanger Laufzeit, die Energie aus ihrer Umgebung saugen können, etwa durch die Nutzung von Temperaturunterschieden, Licht oder des Funknetzes selbst.

Grundsätzlich beschäftigt sich das 6G Zukunftslabor nicht mit der Entwicklung von Hardware, aber Kellerer plant trotzdem ein eigenes Campusnetz auf dem Stammgelände der TUM. „Wir wollen damit nicht ein Mobilfunkanbieter werden“, sagt er, „aber wir wollen die Möglichkeit haben, alle Komponenten, ihre Auswirkungen und ihr Zusammenspiel genau zu vermessen und zu testen.“



Brigitte Röthlein

Auf dem Weg zur Super-Batterie

Link

www.frm2.tum.de

Mit Neutronen hat ein Forschungsteam unter Leitung der TUM tief in das Innere von Batterien geblickt, während diese geladen und entladen wurden. Die aus den Beobachtungen gewonnenen Erkenntnisse könnten dabei helfen, Ladevorgänge zu optimieren.

Wird ein Elektroauto aufgeladen, steigt die Ladeanzeige anfangs schnell, zum Schluss aber deutlich langsamer. „Das ist wie beim Einräumen eines Schrankes: Am Anfang ist es einfach, Gegenstände in den Schrank zu stellen, aber je voller er wird, desto mehr muss man sich anstrengen, um noch einen freien Platz zu finden“, erklärt Dr. Anatoliy Senyshyn von der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) der TUM.

Wie die innere Struktur einer Batterie vor und nach dem Laden aussieht, ist bereits bekannt. Ein Forschungsteam unter der Leitung des Heinz Maier-Leibnitz Zentrums an der TUM beobachtete nun erstmals auch die Lithium-Verteilung einer Batterie während des kompletten Lade- und Entladevorganges am Materialforschungsdiffraktometer STRESS-SPEC. Die Messungen überprüften sie am hochauflösenden Pulverdiffraktometer SPODI.

Verteilung der Lithium-Ionen entscheidend

Beim Laden wandern die Lithium-Ionen dabei von der positiv geladenen Anode zur negativ geladenen Kathode, beim Entladen in die andere Richtung. In den nun durchgeführten Untersuchungen konnten die Forschenden beobachten, dass sich die Verteilung des Lithiums beim Laden und Entladen ständig verändert. „Ist das Lithium ungleich verteilt, funktioniert in Bereichen der Batterie, in denen zu viel oder zu wenig Lithium vorhanden ist, der Austausch von Lithium zwischen Anode und Kathode nicht zu hundert Prozent. Eine gleichmäßige Verteilung steigert dagegen die Leistungsfähigkeit“, erklärt Senyshyn.

Genauer, kleiner, besser

Den Forschenden gelang es, die ungleiche Verteilung von Lithium in einer Batterie mit sehr hoher Auflösung festzuhalten: Um die gesamte Batterie zu erfassen, untersuchten sie ein winziges Teilvolumen nach dem anderen und setzten diese Einzelmessungen dann zu einem großen Bild zusammen.

Mithilfe des Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY der Helmholtz-Gemeinschaft und der European Synchrotron Radiation Facility ESRF war es möglich, Teilvolumina mit Abmessungen im Mikrometerbereich zu wählen. Dadurch erkannten die Forschenden, dass nicht nur entlang der Elektroden-schichten, sondern auch senkrecht zu den Schichten das Lithium ungleich verteilt ist.

Schnell laden vs. Reichweite

Die beobachteten Effekte könnten langfristig dabei helfen, Akkus, zum Beispiel für Elektroautos, weiterzuentwickeln, so Senyshyn: „Viele Eigenschaften von Batterien lassen sich durch die Verteilung des Lithiums beeinflussen. Wenn wir diese besser unter Kontrolle haben, können wir die Performance von Batterien in Zukunft deutlich verbessern.“ ■

Elene Mamaladze (TUM)



Autorinnen und Autoren

Dr. Alison Abbott ist freiberufliche Wissenschaftsjournalistin. Ihre Spezialgebiete umfassen Biologie, besonders Neurowissenschaften, Wissenschaft und Kunst sowie die Verbindung von Wissenschaft und Kunst oder Gesellschaft. Ihre Artikel erscheinen überwiegend in Nature, aber auch in Science, Sapiens und anderen Publikationen. abbott.alison@gmail.com

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

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

Dr. Brigitte Röthlein ist seit vielen Jahren als wissenschaftliche Autorin für Zeitschriften, Fernseh- und Radiosender sowie für Zeitungen tätig. Sie hat ein Diplom in Physik und einen Dokortitel in Sozialwissenschaften. Ihr Hauptinteresse liegt in der Grundlagenforschung. www.roethlein-muenchen.de

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

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



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

Impressum

Faszination Forschung

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

Herausgeber

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

Redakteurinnen

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

Bildredakteurin

Andrea Klee

Übersetzung und Lektorat

Baker & Company, München

Gestaltung und Layout

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Autorinnen und Autoren in dieser Ausgabe

Dr. Alison Abbott, Paul Hellmich, Elene Mamaladze, Sarah Puschmann, Gitta Rohling, Dr. Brigitte Röthlein, Dr. Larissa Tetsch, Dr. Eve Tsakiridou, Monika Weiner

Fotografen

Juli Eberle, Astrid Eckert, Andreas Heddergott, Magdalena Jooss, Stefan Woidig

Redaktionsanschrift

Technische Universität München
Corporate Communications Center
80290 München

Webseite

www.tum.de/faszination-forschung

E-Mail

faszination-forschung@zv.tum.de

Druck

Druckerei Joh. Walch GmbH & Co. KG, Augsburg

Auflage

70.500

ISSN: 1865-3022

Erscheinungsweise

Zweimal jährlich

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe

März 2023

Titelfoto

Prof. Andreas Bausch (TUM)

Sprachgebrauch

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

Fotos

Einige der in dieser Ausgabe abgedruckten Fotos wurden während der Covid-19-Pandemie aufgenommen. Bei allen Fotoshootings wurden die damals geltenden Schutz- und Hygieneregeln eingehalten.

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.**



Forschen, wo sonst niemand forscht. Präzision neu definieren.



Seeing beyond



Hunderte
offene
Stellen

Forschung & Entwicklung in der Halbleiterfertigungstechnik

Es hat nicht viel gefehlt – beinahe wäre Kathrin Kamerafrau geworden. „Nach dem Abi musste ich mich entscheiden: Dokumentarfilm oder Physikstudium? Wissen vermitteln oder Wissen schaffen?“ Sie entschied sich für den Einstieg in die Wissenschaft – und forscht heute an der Halbleiterfertigungstechnologie von morgen. Mit ihrer Arbeit gehen sie und ihr Team immer wieder neue Wege. „Da wo wir hinwollen, geht kein anderer hin. Ich mag diese Herausforderung!“ Kathrin ist Gruppenleiterin für Optiktechnologie in der Halbleiterfertigungssparte von ZEISS. Gemeinsam mit ihrem Team forscht sie an der Optimierung von Politurprozessen und leitet Entwicklungsteams. „Ich manage kluge Köpfe. Gemeinsam treiben wir die Präzision der Halbleiter-Lithographie voran – auf Sub-Nanometer-Ebene.“

Erfahre mehr über Jobs in der Halbleiterfertigungstechnik bei ZEISS: zeiss.de/arbeitenbeizeiss