Faszination **Forschung**

Forschungshighlights der TUM
Technische Universität München
Das Wissenschaftsmagazin
April 2021 | Ausgabe 26

Hubble-Konstante:
Auflösung eines kosmischen Widerspruchs

Historische Klebstoffe – Was lange hält, ist gut
Citizen Science – Klimawandel vor der Haustür
Green Carbon – Carbonfaserverbunde aus Algen

ISSN 18653022
9 771865 302004
Schutzgebühr
EUR **9.00**

Tauschplatz des Wissens

Kostenlos bestellen unter:
imagebroschuere@tum.de

Bilder: Astrid Eckert/TUM, Andreas Heddergott/TUM, Magdalena Jooss, Fabian Vogl/TUM

Liebe Leserinnen und Leser,

Wir erleben eine Zeitenwende – umso wichtiger ist es, dass wir den Wandel gestalten! Mit viel Zuversicht, Stolz und Freude blicke ich auf die vielen wissenschaftlich brillanten, kreativen und hartnäckigen Pioniergeister, die unserer TUM ihre Innovationskraft verleihen. Immer wieder setzen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler echte Glanzlichter, um durch ihre Forschung die Welt verständlicher zu machen und diese mit praxisorientierten Innovationen zu gestalten.

Nanomaterialien und Nanowerkzeuge sind wahre Hoffnungsträger. Sie ermöglichen innovative Anwendungen in den verschiedensten Anwendungsdomänen. Doch wie bringt man künftige Nanoroboter dazu, Moleküle zusammenzubauen oder Transportvorgänge auszuführen? Physiker der TUM sind auf der Suche nach den erfolgskritischen Schnittstellen zwischen der Nano- und der Makrowelt. Sie erproben elektrische Steuerungskonzepte für Nanomoleküle.
In einem anderen Projekt ist es gelungen, aus einem einzigen organischen Molekül einen elektrischen Schalter zu bauen – kleiner kann ein Schalter nun wirklich nicht sein!

Im großen Maßstab denkt hingegen unser Biotechnologe Thomas Brück. Sein Forschungsprojekt Green Carbon stellt nachhaltige Rohstoffe für Carbonfaser-Verbundstoffe aus Algen und Hefen her und verzichtet dabei gänzlich auf erdölbasierte Materialien.

Cordt Zollfrank erforscht historische Klebstoffe wie Birkenpech mit dem Ziel, umweltfreundliche Alternativen zu den auf Erdöl basierenden Epoxidharzen zu finden. Ein Hobbyarchäologe weckte sein Interesse, das verloren gegangene Wissen über alte Klebstoffe in die Zukunft zu bringen.

Die wunschgemäße Lenkung des Tageslichts, eine effektive Dämmung und Belüftung oder die akustische Streuung – all diese Funktionen in einer maßgeschneiderten Fassade aus dem 3D-Drucker zu vereinen, ist das Ziel einer Forschungsarbeit in der Architektur.

Wenn wir den Folgen der zunehmenden Erderwärmung entgegenwirken wollen, brauchen wir umweltverträgliche Technologieinnovationen ebenso wie deren gesellschaftliche Akzeptanz. Ganz im Sinne unseres Leitmotivs „Human-centered Engineering“ sitzen beim Forschungsverbund BAYSICS zur Erforschung des Klimawandels die Bürgerinnen und Bürger mit im Fahrersitz.

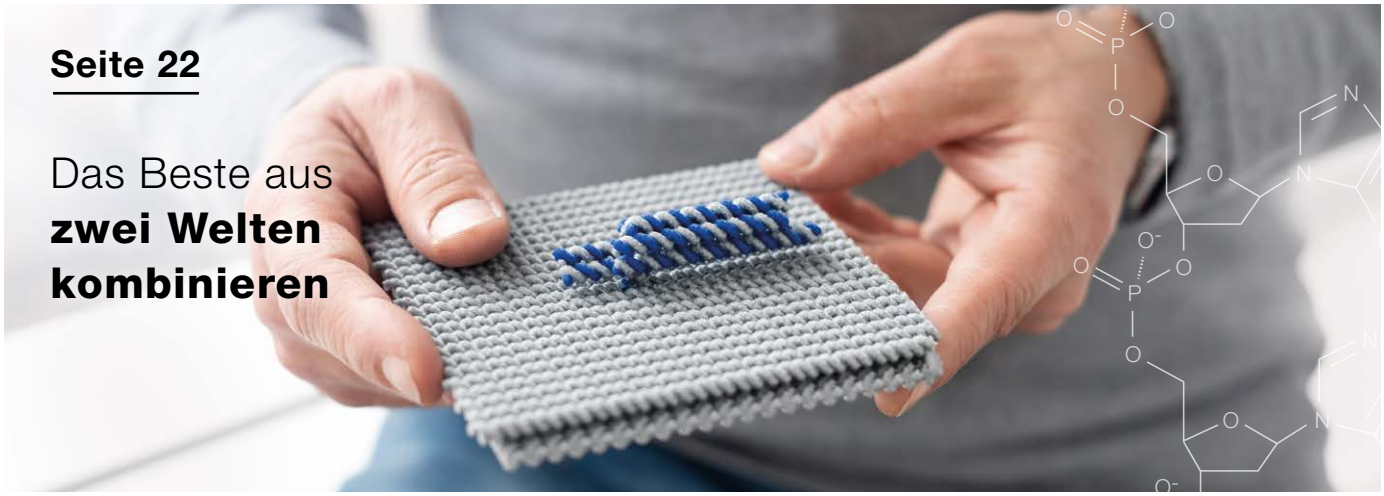
Konstanten geben Sicherheit – wer wünscht sich das nicht, in Zeiten wie diesen. Doch schwierig wird es, wenn Konstanten ins Wanken geraten. So wie die Hubble-Konstante, deren genauer Wert unter Astrophysikern seit Jahren heiß diskutiert wird. Verschiedene Herangehensweisen, sie zu berechnen oder zu messen, führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. TUM Physikerin Sherry Suyu konnte mit einer neuen Messmethode den Wert der Hubble-Konstante nun sehr genau bestimmen. Vielleicht gelingt es ihr mit wissenschaftlicher Exzellenz und verbindender Persönlichkeit sogar, den Disput in der Fachwelt zu beenden.

Eine echte Konstante an der TUM ist die herausragende Schaffenskraft unserer Wissenschaftstalente – nichts ist so spannend wie deren Entdeckungen, Erfindungen und Innovationen, die wirken. Liebe Leserinnen und Leser, ich wünsche Ihnen, dass der Funke der Begeisterung unserer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der Faszination Forschung auf Sie überspringt!

Ihr

Thomas F. Hofmann
Präsident

Bildquelle: Astrid Eckert

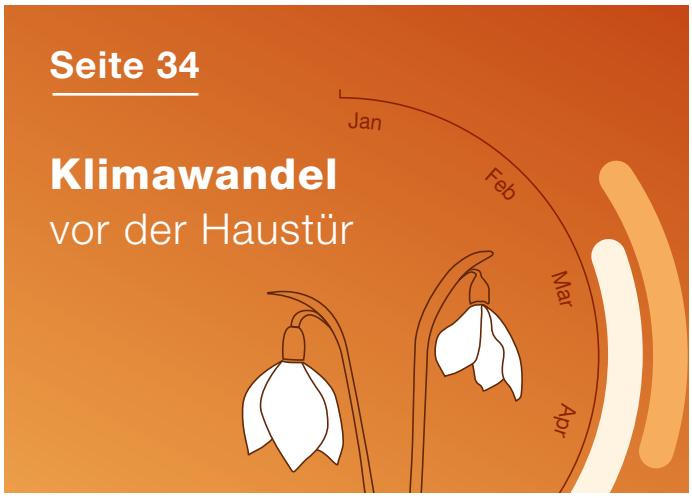


Seite 22

Das Beste aus
zwei Welten kombinieren

Seite 64

Die Molekül-Ingenieure



Seite 34

Klimawandel
vor der Haustür

Inhalt

06 **Linsen aus purer Schwerkraft zur Auflösung eines kosmischen Widerspruchs**
Sherry Suyu und ihr Team machten Schlagzeilen, als sie eine dritte, unabhängige Messmethode für die Hubble-Konstante vorstellten. Ihre Arbeit könnte eine der umstrittensten Fragen der Astrophysik lösen.

14 **Was lange hält, ist gut**
Historische Klebstoffe aus Naturmaterialien halten in Kathedralen seit Jahrhunderten. Cordt Zollfrank untersucht dieses lang vergessene Wissen mit dem Ziel, umweltfreundliche Klebstoffe zu entwickeln.

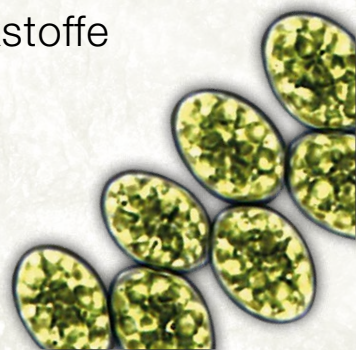
22 **Das Beste aus zwei Welten kombinieren**
Friedrich Simmel und sein Team erforschen, wie man Robotik auf der Grundlage von Molekülen oder Zellen realisieren kann. Zukunftsvisionen für die Anwendung solcher Systeme gibt es im Robotik- und im Medizinbereich.

34 **Klimawandel vor der Haustür**
Der interdisziplinäre Forschungsverbund BAYSICS will Bürgerinnen und Bürger an der Erforschung des Klimawandels teilhaben lassen. Annette Menzel initiierte und koordiniert das Projekt.

48 **Leichtbauwerkstoffe aus Algen**
Im Projekt Green Carbon entwickelt Thomas Brück einen Prozess, um carbonfaserverstärkte Kunststoffe aus Algen zu produzieren.

Seite 48

Leichtbauwerkstoffe
aus Algen



Seite 14

Was lange hält,
ist gut

Seite 56

Viele Funktionen,
ein Material,
ein Prozess

56 Viele Funktionen, ein Material, ein Prozess
Moritz Mungenast untersucht das Potenzial von 3D-gedruckten, multifunktionellen und komplett recyclebaren Fassaden. Er entwickelt Fassaden aus einem einzigen Material und realisiert verschiedene Funktionen in Form bestimmter Geometrien.

64 Die Molekül-Ingenieure
Johannes Barth, Willi Auwärter und Joachim Reichert gehen neue Wege, um funktionale Einheiten aus einzelnen Molekülen zusammenzusetzen. Dabei erkunden sie neuartige Routen hin zu künftigen Anwendungen in Nanoelektronik, Photonik oder Katalyse.

76 Wenn es einfach gut strömt
Mit Sonden aus 3D-Druckern hat Vectoflow den Nischenmarkt der druckbasierten Messtechnik aufgemischt.

In jeder Ausgabe

03 Editorial

78 Autoren

78 Impressum

E

Hier finden Sie die englische Ausgabe als PDF:

www.tum.de/faszination-forschung-26

Bildquellen: Stefan Woidig, Astrid Eckert/TUM, Magdalena Jooss, Peter Langenhahn; Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM)

Gravitationslinsen-Bild eines Quasars, aufgenommen mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Das Gravitationsfeld einer Galaxie im Vordergrund wirkt wie eine Linse auf die vom Quasar kommenden Lichtstrahlen und erzeugt vier fast gleichmäßig um die als Linse wirkende Galaxie verteilte Quasar-Abbilder.

Bildquelle: ESA/Hubble, NASA, Suyu et al.

Link
www.mpa.mpa-garching.mpg.de/~suyu

Linsen aus purer Schwerkraft zur **Auflösung eines kosmischen Widerspruchs**

Die gewaltige Masse von Galaxien krümmt den sie umgebenden Raum und erzeugt so Linsen, die Licht brechen. Das ermöglicht der Physikerin Sherry Suyu, mithilfe von Bildern des Hubble-Teleskops die genaue Geschwindigkeit zu messen, mit der sich das Universum ausdehnt. Ihre Methode könnte einen erbitterten wissenschaftlichen Streit beilegen.

Short version

Lenses made from pure gravity help to solve a cosmic contradiction

E

The speed at which the universe is expanding, as indicated by the Hubble constant, is currently one of the most hotly disputed questions in astrophysics. A collaboration called H0LiCOW, led by physicist Prof. Sherry Suyu, has now succeeded in measuring this constant using a completely new method. To do this, the team studied quasars – extremely luminous cosmic objects – located behind galaxies. The mass of these galaxies creates "gravitational lenses" that split the image of each quasar into multiple copies, the light from which spends different amounts of time traveling through space to reach us. Given a journey time of several billion years, this difference can amount to several days or even weeks. With the help of the Hubble Space Telescope, it is now possible to measure this phenomenon so accurately that Suyu and her team have used it to calculate the Hubble constant. This has shone a new light onto the contradictory measurements from other methods in cosmology. Prof. Suyu is awarded the American Astronomical Society's 2021 Berkeley Prize in recognition of this work. She is Professor of Observational Cosmology at TUM and leads a research group at the Max Planck Institute for Astrophysics. □

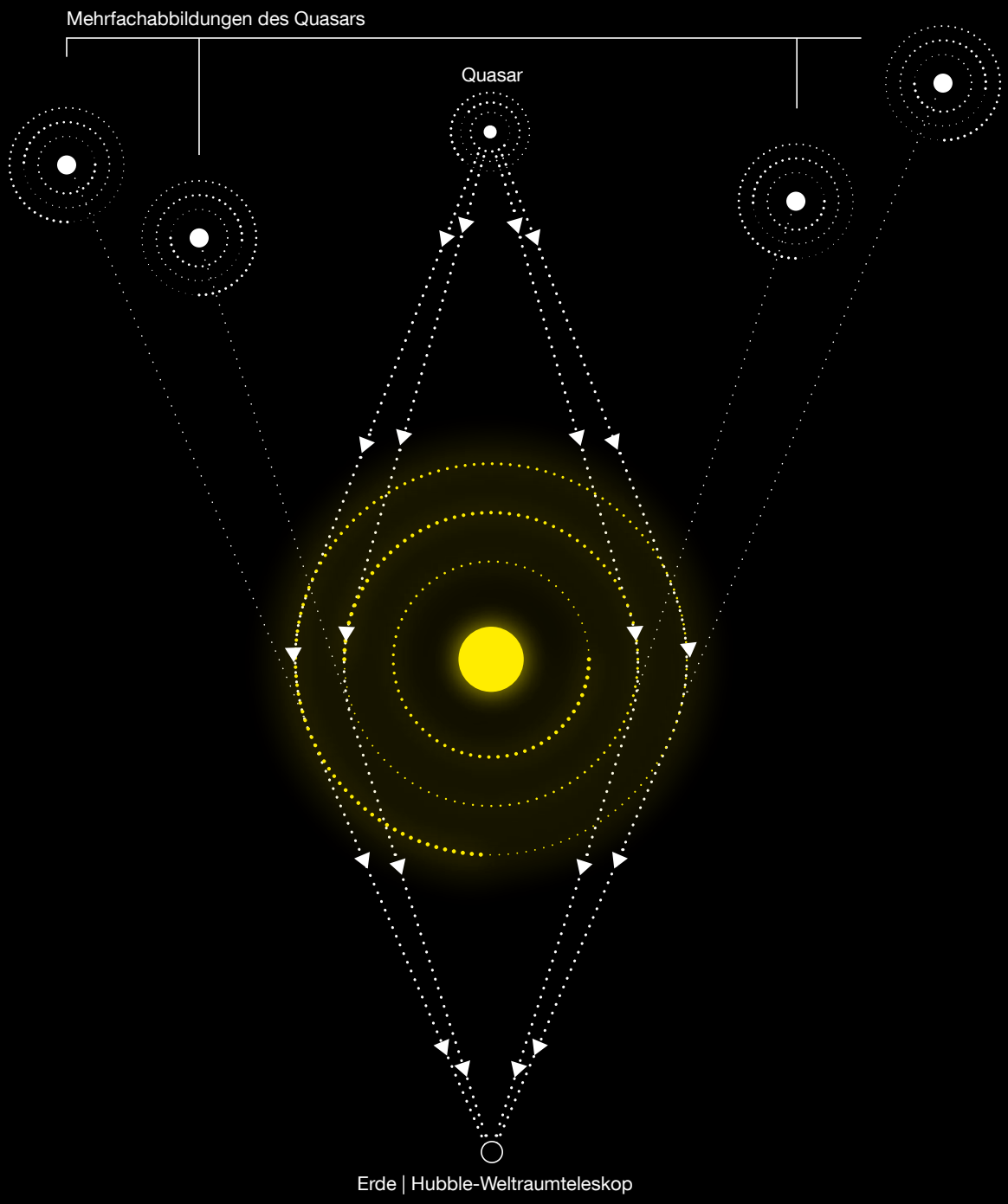
Gravitationslinsen-Bild von Quasaren, aufgenommen mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Große Galaxien im Vordergrund wirken als Gravitationslinsen und erzeugen Mehrfachabbildungen des Quasars. Für jedes Abbild hat das Licht eine andere Strecke zurückgelegt und deshalb unterschiedlich viel Zeit zur Erde gebraucht. Aus diesen Zeitverzögerungen lässt sich die Hubble-Konstante bestimmen. ▷

„Über Jahrzehnte konnte über die Größe der Hubble-Konstante nur spekuliert werden.“

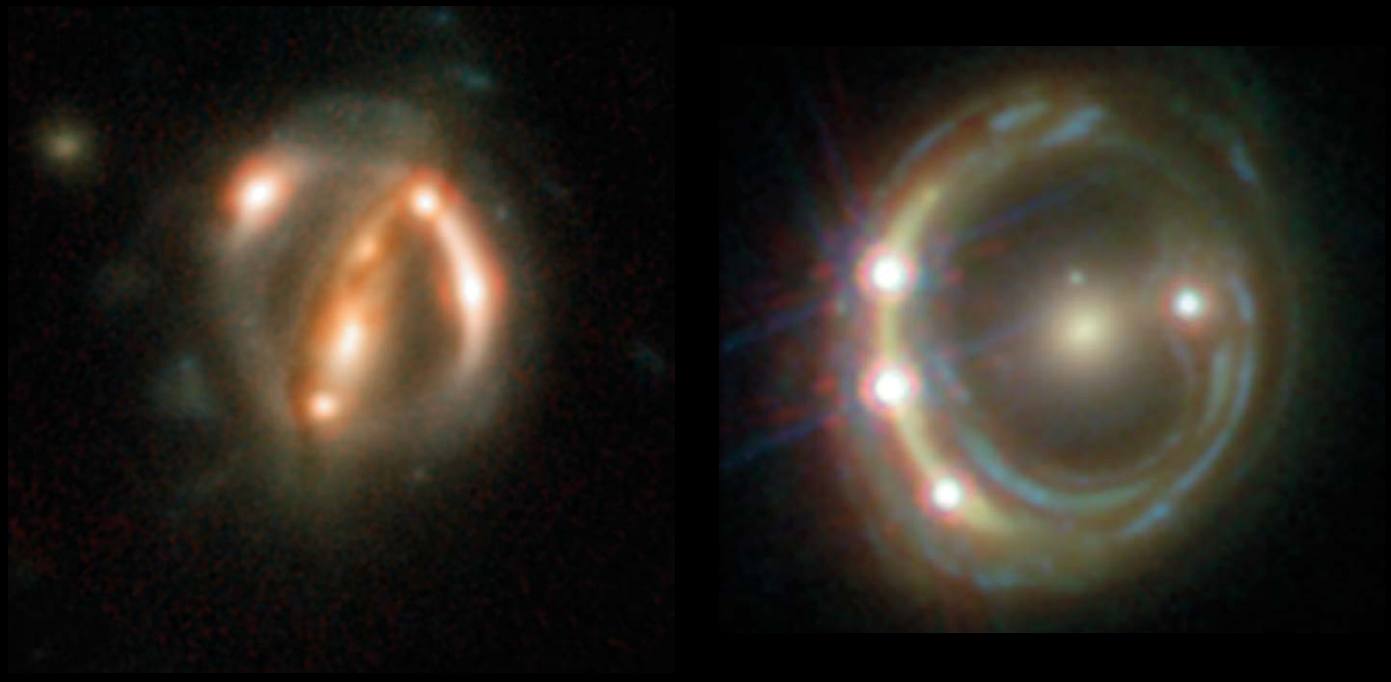
Sherry Suyu

Wenn Professorin Sherry Suyu ihr Team zu einem Online-Meeting zusammenruft, werden nicht nur Neuigkeiten ausgetauscht, sondern es wird auch viel gelacht. „Wir haben unseren Spaß“, gibt die Forscherin zu, deren Projekt auf den Namen H0LiCOW hört. Dass hinter der skurrilen Zeichenfolge nicht nur eine ziemlich technische Projektbezeichnung steckt, sondern auch eines der spektakulärsten Forschungsergebnisse in der Astrophysik der letzten Jahre, ist spätestens seit dem Berkeley-Preis der American Astronomical Society klar, den Suyu als Leiterin des Projekts demnächst erhalten wird. Suyu ist Professorin für Beobachtende Kosmologie an der TUM und leitet eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Astrophysik.

Dass sich das Team der Forscherin online trifft, liegt nicht nur an der Corona-Pandemie. Die Gruppe ist, abgesehen von Suyus Münchner Kolleginnen und Kollegen, so weit über den Globus verstreut, dass maximal einmal jährlich ein persönliches Treffen möglich ist, das dieses Jahr erstmals ausfallen musste. Angesichts der erfolgreichen Arbeit lässt sich das leichter verschmerzen. Suyus Team lässt sich von großen Distanzen nicht einschüchtern, solche sind schließlich auch Thema ihrer Forschungen.
Es geht um die Frage, wie unser Universum zu dem wurde, was es heute ist, und wie es sich künftig entwickeln wird. Eine zentrale Größe in diesem Forschungsfeld ist die Hubble-Konstante. Sie gibt an, wie schnell das Universum sich ausdehnt. Ihr genauer Wert hat weitreichende Konsequenzen über die Astrophysik hinaus, bis tief in die Grundlagen der Physik hinein, denn die Vorgänge auf astronomischen Skalen lassen sich mit aktuellen physikalischen Theorien nach wie vor nicht zufriedenstellend erklären. Vor allem in den letzten Jahren hat sich herauskristallisiert, dass es in unserem Verständnis der Ausbreitung des Universums eine verblüffende Lücke zu geben scheint. ▷



Grafiken: ediundsepp (Quelle: Suyu)

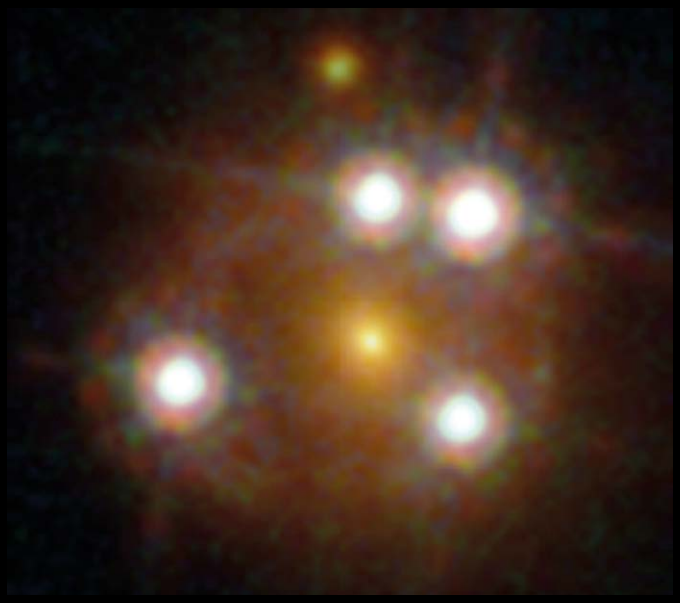


Hubble-Beobachtungen verschiedener Quasare mit Galaxien im Vordergrund. Das Gravitationsfeld der Galaxien wirkt als Gravitationslinse und erzeugt Mehrfachabbildungen (helle Punkte) der Quasare. Diese und andere Quasare wurden von dem Projekt H0LiCOW untersucht, um eine unabhängige Messung der Hubble-Konstante vorzunehmen.

Wie schnell expandiert das Universum?

„Über Jahrzehnte konnte über die Größe der Hubble-Konstante nur spekuliert werden“, erzählt Suyu. „In den 80ern und 90ern vermuteten manche einen Wert um 50, andere einen Wert um 100.“ Diese Debatte zu beenden war einer der Beweggründe zum Bau des Hubble-Teleskops, des ersten optischen Teleskops, das direkt im Weltall, ohne störende atmosphärische Einflüsse, Bilder von Galaxien und Sternen machen konnte. Es ermöglichte genaue Distanzmessungen ferner Objekte, mit deren Hilfe die Hubble-Konstante erstmals exakt bestimmt werden sollte. „2001 wurde das Ergebnis veröffentlicht: Prof. Wendy Freedman und ihr Team maßen einen Wert von 72 für die Hubble-Konstante, also in etwa in der Mitte“, so Suyu. Damit sei die Debatte fürs Erste beendet gewesen.

Etwa zehn Jahre später entbrannte die Diskussion aber aufs Neue: Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung – einer Art Nachhall des Urknalls – eröffneten eine neue Methode, die Hubble-Konstante zu bestimmen. Der Wert aus diesen Messungen war allerdings niedriger, bei etwa 67. Gleichzeitig konnte aber durch Arbeiten von Nobelpreisträger Prof. Adam Riess und seiner Gruppe auch die Messgenauigkeit der Distanzmessungen weiter gesteigert werden, und so wird eine einfache Auflösung des Widerspruchs immer unwahrscheinlicher. „Es gibt eine Diskrepanz zwischen den beiden Ergebnissen, und niemand weiß, warum“, sagt Suyu. Die Diskussion werde sehr intensiv geführt, doch die Fronten seien verhärtet. Forschungsgruppen in aller Welt machten sich also daran, neue, unabhängige Methoden zur Bestimmung der Hubble-Konstante zu ersinnen, unter ihnen Suyu. Sie sah eine Möglichkeit, mit Methoden aus ihrem Forschungsfeld den Streit vielleicht beizulegen.



Bildquelle: ESA/Hubble, NASA, Suyu et al.

Linsen im Weltall

Suyu beschäftigte sich mit sogenannten Gravitationslinsen. Damit ist ein Effekt gemeint, der um große Massenansammlungen im Universum wie Galaxien oder Galaxienhaufen beobachtet werden kann. Sie wirken wie Linsen, die buchstäblich die Abbildungen der dahinter liegenden Objekte verzerren.

Dass Masse den Raum krümmt und so selbst Licht ablenkt, ist seit langer Zeit bekannt. Nicht immer ist der Effekt so stark wie bei Schwarzen Löchern, die Licht buchstäblich verschlucken. Große, weniger dichte Massenansammlungen bewirken, dass Objekte, die sich dahinter befinden, verzerrt oder sogar mehrfach am Himmel erscheinen, wie Spiegelbilder. Solche starken Gravitationslinsen wurden 1979 erstmals beobachtet. Das Licht der verschiedenen Bilder des gleichen Objekts kann dabei unterschiedlich lang im Raum bis zur Erde unterwegs sein, wie Wellen im Meer, die eine Insel umrunden und an einem bestimmten Punkt dahinter ein Schiff zum Schaukeln bringen. Suyu wusste von einer Schweizer Kollaboration namens COSMOGRAIL, die speziell die Bilder von Quasaren unter dem Einfluss von Gravitationslinsen untersuchte. Das sind besonders leuchtstarke Objekte, deren Helligkeit wie das Licht einer Kerze flackert. Da das Licht der verschiedenen Abbilder eines Quasars unterschiedlich viel Zeit unterwegs ist, tritt das Muster des Flackerns manchmal um Tage oder Wochen verzögert auf – vergleichbar mit einem Echo, das durch die Laufzeit des Schalls verspätet zu hören ist. „Um das mit der nötigen Genauigkeit messen zu können, braucht man Beobachtungsdaten über mehrere Jahre. Zum Glück begannen Prof. Frédéric Courbin, Prof. Georges Meylan und ihre Forschungsgruppe unter dem Namen COSMOGRAIL ihre Beobachtungen bereits 2004“, erklärt Suyu. Die Forscherin wusste: Dieser Effekt könnte sich nutzen lassen, um die Hubble-Konstante zu messen, denn während der mehrere Milliarden Jahre dauernden Reise des Lichts durch den Raum dehnt sich das Universum stark aus. Diese Ausdehnung hat einen messbaren Einfluss auf die Laufzeitunterschiede im Licht der einzelnen Bilder des Quasars. Da die Ausdehnungsgeschwindigkeit mit der Hubble-Konstante verknüpft ist, sind so Rückschlüsse auf Letztere möglich. Suyu nahm Kontakt auf und ▷

Prof. Sherry Suyu

Die Astrophysikerin Sherry Suyu ist Professorin für Beobachtende Kosmologie an der TUM und über das MaxPlanck@TUM-Programm dort beschäftigt. Sie stammt aus Taiwan, hat in Kanada und Kalifornien Astrophysik studiert, absolvierte Forschungsaufenthalte in Bonn, Santa Barbara, Stanford und Taipei, bevor sie 2016 an die TUM kam. Sie ist Leiterin einer Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Astrophysik. Sie erhielt eine Reihe von Auszeichnungen, 2021 wird ihr der Lancelot M. Berkeley-Preis der American Astronomical Society für ihr Projekt H0LiCOW verliehen. Privat liebt sie Reisen und spielt wettkampfmäßig Badminton.

startete H0LiCOW, dessen „COW" für „COSMOGRAIL Wellspring" steht („Wellspring" bedeutet „Ursprung"), während H0 die Abkürzung für die Hubble-Konstante ist und das L „Linse" bedeutet.

„Beide Teams, meines und das von COSMOGRAIL, hatten dasselbe Ziel im Kopf, aber jedem von uns fehlte, was der andere hatte", so die Physikerin. Sie beschäftigte sich schon als junge Forscherin während ihrer Studienzeit in Kalifornien mit der Vermessung der Massenverteilung in Galaxien anhand von Teleskopaufnahmen. Seither hat sie ihre Methoden mit ihren Münchner Kollegen Dr. Stefan Taubenberger und Dr. Akin Yildirim weiter verfeinert. Das war entscheidend, denn die genaue Massenverteilung zu kennen ist essenziell, um die Stärke der Linse und somit die Zeitverzögerung der Bilder zu berechnen. Ist all das bekannt, lässt sich daraus die Hubble-Konstante berechnen.

Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop

Soweit die Theorie – doch um die dafür benötigten besonders genauen Bilder der Linsengalaxien zu bekommen, war nur ein Teleskop gut genug. Suyu beantragte die Nutzung des Hubble-Teleskops. „Es ist sehr schwer, dort Beobachtungszeit zu bekommen", sagt Suyu. Doch ihr Antrag wurde genehmigt. Suyu besorgte sich das Handbuch von Hubble und begann mit den Planungen. „Als die ersten Bilder von Hubble kamen, war das sehr aufregend", erzählt sie. Die Analyse der Bilder selbst war äußerst aufwendig. „Das lag auch daran, dass wir eine Blindanalyse machten. Wir hatten die Daten so bearbeitet, dass wir erst ganz am Ende sehen konnten, welches Ergebnis wir bekommen würden", erklärt die Forscherin. So wollte man jede Voreingenommenheit, die möglicherweise das Ergebnis verfälschen könnte, in dieser heiklen und intensiv geführten Diskussion vermeiden. „Wir vereinbarten, das Resultat auf jeden Fall zu publizieren, egal wie es ausfallen würde." Die Enthüllung des Endergebnisses war also ein besonderer Moment, der erforderte, dass alle Gruppenmitglieder übereinstimmend die Analyse als abgeschlossen betrachteten. Es geschah bei einem Gruppentreffen in Kopenhagen, wo das ganze internationale Team zusammenkam, um sich auszutauschen. Das Ergebnis war ein Paukenschlag: Der Wert der Hubble-Konstante stimmte perfekt mit jenem überein, der durch Entfernungsmessungen ferner Objekte ermittelt wurde und unterschied sich von jenem, der aus der Hintergrundstrahlung stammte.

Noch sei die Debatte damit nicht endgültig entschieden, so Suyu. Nach wie vor werde versucht, Fehler und Messungenauigkeiten aufzuspüren, die die Diskrepanz in den Messungen der Hubble-Konstante erklären könnten. Doch die Aussicht, dass nicht Fehler, sondern neue physikalische Effekte dafür verantwortlich sind, erscheint plausibler denn je. So könnte es in der Anfangszeit des Universums eine neue Form von Dunkler Energie gegeben haben – jenes mysteriösen Effekts, der die Ausdehnung des Universums immer weiter beschleunigt. Das würde die Unterschiede in den Messungen erklären und so den Weg für die Erforschung völlig neuer Physik ebnen.

Heiliger Rauch

Das Projekt war also ein großer Erfolg. In den aktuellen Onlinekonferenzen mit Kooperationspartnern arbeitet Suyu bereits daran, das nächste Projekt auf Schiene zu bringen. Es beschäftigt sich wieder mit Gravitationslinsen, doch nun sollen nicht Quasare, sondern Supernova-Explosionen untersucht werden. Der Name des Projekts: HOLISMOKES – eine Abkürzung, die zu den Begriffen „Linsen", „Supernova" und „Untersuchung" auch Wörter wie „Hochoptimiert" enthält. Neben spektakulärer Astrophysik ist also auch wieder für Humor gesorgt.

■ *Reinhard Kleindl*

Bildquelle: Astrid Eckert

Was lange hält, **ist gut**

Das Wissen über historische Klebstoffe ist zu einem Großteil verloren gegangen. Cordt Zollfrank und sein Team am TUM Campus Straubing holen es wieder ans Tageslicht. Sie durchforsten alte Bücher, analysieren Klebstoffproben aus Kathedralen und entwickeln Rezepte für gesundheitlich unbedenkliche Klebstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.

Short version

Unlocking the secrets of long-lasting success

E

Most of what we used to know about ancient adhesives has been lost in the mists of time. Prof. Cordt Zollfrank and his colleagues at TUM's Straubing campus are shining a light on this long-forgotten knowledge once more. They want to develop adhesives that are more environmentally friendly to make and use than the oil-based epoxy resins currently dominating the market. In one project, doctoral student Johann Lang has extracted the adhesive agent inside birch tar, which could be used as a "tackifier" in modern hot-melt adhesives. Some of its properties outperform those of commercially available products. In another project, stone restorer and doctoral student Sophie Hoepner is analyzing glues that were used to build cathedrals hundreds of years ago and that have endured wind, rain, and snow ever since without any noticeable signs of aging. She hopes to come up with a formula for a long-lasting adhesive of this kind based on natural materials. □

Link
bgp.cs.tum.de

Bildquelle: Magdalena Jooss, Unsplash/Dallas Reedy

Viele Grundstoffe für historische Klebstoffe wurden in der Natur, vor allem im Wald, gewonnen.

1 Kolophonium hellst
2 Gummi Mastix
3 Zuckerrohrwachs
4 Kolophonium
5 Gummi Sandarak
6 geklebte Granitprüfkörper
7 Kolophonium Pinus nigra
8 Dammar
9 Carnaubawachs
10 Marmormehl
11 geklebte Sandsteinprüfkörper
12 Ziegelmehl
13 Birkenpech

Als Prof. Cordt Zollfrank seinen guten Schulfreund Mario Pfreundner besuchte, wusste er noch nicht, dass an diesem Tag ein neues Kapitel in seiner Forschungsarbeit beginnen würde. Pfreundner ist Hobbyarchäologe und gibt sein Herzensthema auch an Schüler weiter. Darum liegen bei ihm zu Hause selbst hergestellte Pfeile herum, wie sie bereits in der Steinzeit zur Jagd benutzt worden sind. Steinerne Pfeilspitzen und hölzernen Pfeilschaft hatte er – wie damals üblich – mit selbstgemachtem Birkenpech zusammengeklebt. Als Zollfrank das sah, war sofort sein Interesse geweckt.

Er hatte noch nie von Birkenpech-Klebstoff gehört. Aber es klang vielversprechend. Denn Heißklebstoffe, also solche, die bei Raumtemperatur fest, bei höheren Temperaturen aber flüssig sind, sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Sie kommen in der Industrie überall vor, zum Beispiel in der Verpackungsbranche oder der Holzindustrie. Heutzutage werden dafür vor allem Polyamid, Polyurethan und andere Co-Polymere verwendet. Sie kleben recht gut, aber die Liste ihrer Nachteile ist lang: Sie werden unter hohem CO_2-Ausstoß aus fossilen Rohstoffen hergestellt, sind umwelt- und gesundheitsschädlich.

Das weltweit einzige Pechtropfenexperiment mit Birkenpech: Das ursprüngliche Pechtropfenexperiment wurde 1930 gestartet (Prof. Dr. Thomas Parnell, Universität von Queensland in Brisbane, Australien) und ist ein Langzeitversuch zur Beobachtung des Verhaltens von Pechen als Flüssigkeit. Zollfranks Team startete dieses Pechtropfenexperiment mit Birkenpech im Oktober 2016.

„[Birkenpech] ist genauso gut oder sogar besser als die derzeit am Markt verfügbaren Produkte."

Cordt Zollfrank

Birkenpech als Heißkleberkomponente

„Birkenrinde hingegen ist ein nachwachsender Rohstoff und noch dazu einer, der in Europa und Sibirien in großen Mengen zur Verfügung steht", sagt Zollfrank, der am TUM Campus Straubing das Fachgebiet Biogene Polymere leitet. Also stürzte er sich in die Literaturrecherche. Er las darüber, wie die Menschen in den Wald zogen, Birkenrinde sammelten und sie in einem geschlossenen Topf ans Feuer stellten. Wie es im Inneren zu schwelen begann, bis schließlich eine pech- oder teerartige Substanz heraustropfte – das Birkenpech. „Es ist aus der archäologischen Forschung wunderbar bekannt, wie man Birkenpech herstellt und was die Inhaltsstoffe sind, aber über die Materialeigenschaften dieses Werkstoffes wusste man so gut wie nichts", erzählt Zollfrank. Also machten sein Doktorand Johann Lang und er sich daran, es selbst herauszufinden. Sie ließen Birkenpech in einem Laborofen unter kontrollierten Bedingungen verschwelen und extrahierten den wirksamen Klebstoff heraus. „Reines Birkenpech stinkt wie ein voller Aschenbecher, das ist für jede Anwendung desaströs", erklärt Zollfrank. Der aufgearbeitete klebende Werkstoff ist jedoch nahezu geruchslos.

Bildquellen: Magdalena Jooss

Prof. Cordt Zollfrank

Prof. Cordt Zollfrank studierte Chemie an der TUM. Anschließend wechselte er an das Institut für Holzforschung der TUM, wo er über ein holzchemisches Thema zum Doktor der Forstwissenschaften promovierte. Von 2000 bis 2002 forschte er zunächst als Postdoktorand an der Universität Erlangen-Nürnberg am Lehrstuhl für Glas und Keramik im Bereich der „Biomimetischen Materialsynthese“. Ab 2002 baute er als wissenschaftlicher Assistent die Arbeitsgruppe „Biotechnische Keramik und Biomaterialien“ auf. 2009 habilitierte er sich für das Fach Werkstoffwissenschaften. Zum 1. Oktober 2011 wurde er zum Professor für das Fachgebiet „Biogene Polymere“ am TUM Campus Straubing berufen. Ende 2020 wurde seine Professur im Rahmen des TUM-internen Leuchtturmverfahrens in einen Lehrstuhl umgewandelt.

„Solche Klebungen […] müssen Wind und Wetter trotzen und immer wieder Frost-Tau-Zyklen aushalten – oft über viele hundert Jahre lang.“

Sophie Hoepner

Granitprüfkörper für Zugversuche an Stumpfklebungen mit verschiedenen Schmelzklebstoffformulierungen.

Moderne Heißklebstoffe bestehen aus drei Komponenten. Da wäre zum einen ein Polymer, also ein Makromolekül, das hauptsächlich für die mechanische Festigkeit verantwortlich ist. Dann ein sogenannter Tackifier, auf Deutsch etwa „Klebrigmacher“, der den Kontakt zwischen Kleber und Substrat verbessert. Schließlich noch ein Modifizierer, der die Eigenschaften verändern kann, wie z. B. die Viskosität (Zähigkeit), den Schmelzbereich, den Geruch oder die Farbe. Aus Birkenpech lässt sich vor allem ein exzellenter Tackifier herstellen. „Der ist genauso gut oder sogar besser als die derzeit am Markt verfügbaren Produkte“, sagt Zollfrank.

Seit er sich intensiv mit Birkenpech beschäftigt hat, lässt ihn das Thema historische Klebstoffe nicht mehr los. In einem zweiten Projekt an seiner Professur untersucht die Steinrestauratorin und Doktorandin Sophie Hoepner, wie früher beim Bau von Kirchen und Kathedralen Steine geklebt wurden. „Solche Klebungen, gerade die im Außenbereich, müssen Wind und Wetter trotzen und immer wieder Frost-Tau-Zyklen aushalten – oft über viele hundert Jahre lang“, sagt Hoepner. Wenn man bedenkt, dass Epoxidharze oft schon nach 50 Jahren zu bröckeln anfangen, sind die damals – vor 600 Jahren! – eingesetzten Kleber unseren heutigen Produkten weit überlegen.

Bildquellen: Magdalena Jooss

Universalprüfmaschine zur Messung von Zugscherversuchen und Zugversuchen an Klebungen.

1

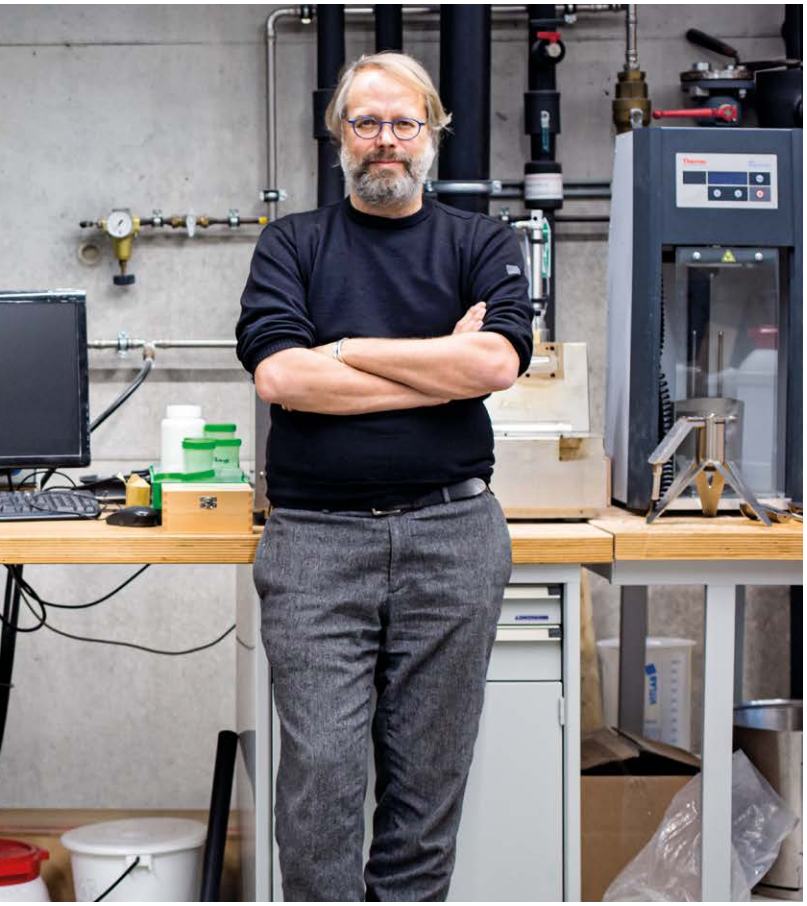
Nach der Applikation des heißen Klebstoffes auf die erwärmten Granitprüfkörper werden Glaskügelchen in 400 µm Größe auf die Klebfläche gestreut, um eine konstante reproduzierbare Fugenstärke zu erreichen.

2

Die mit Klebstoff beschichteten Klebeflächen werden vor dem Zusammenfügen mittels Heißluftpistole erwärmt.

3

Nach dem Zusammenfügen der Granitprüfkörper werden sie mit 2 kg Gewicht belastet, bis der Schmelzklebstoff erkaltet ist.



Cordt Zollfrank und seine Doktorandin Sophie Hoepner teilen die Leidenschaft für historische Klebstoffe.

„Dass dieses Wissen verloren gegangen ist, finde ich unerträglich.“

Cordt Zollfrank über die Rezepte historischer Klebstoffe

Bildquellen: Magdalena Jooss

Steinkleber in Kathedralen halten seit Jahrhunderten

Doch auch ihre Literaturrecherche war nicht besonders ergiebig. Vieles wurde früher gar nicht aufgeschrieben, sondern nur mündlich vom Meister an den Lehrling weitergegeben. Die wenigen Rezepte, die sie fand, waren voll abenteuerlicher Mengenangaben. „Zwei Hände“ voll hiervon, „ein Quentchen“ davon. Prädikat: Unterhaltsam, aber unbrauchbar. „Dass dieses Wissen verloren gegangen ist, finde ich unerträglich“, sagt Zollfrank.

Nun muss Hoepner die Sache rückwärts angehen. Anstatt ein Rezept nachzukochen, entwickelt sie selbst eins. Dafür kratzt sie mit dem Skalpell linsengroße Proben aus den Klebstofffugen von Kathedralen und analysiert deren Zusammensetzung. Die Grundstoffe der meisten historischen Klebstoffe kennt sie inzwischen.

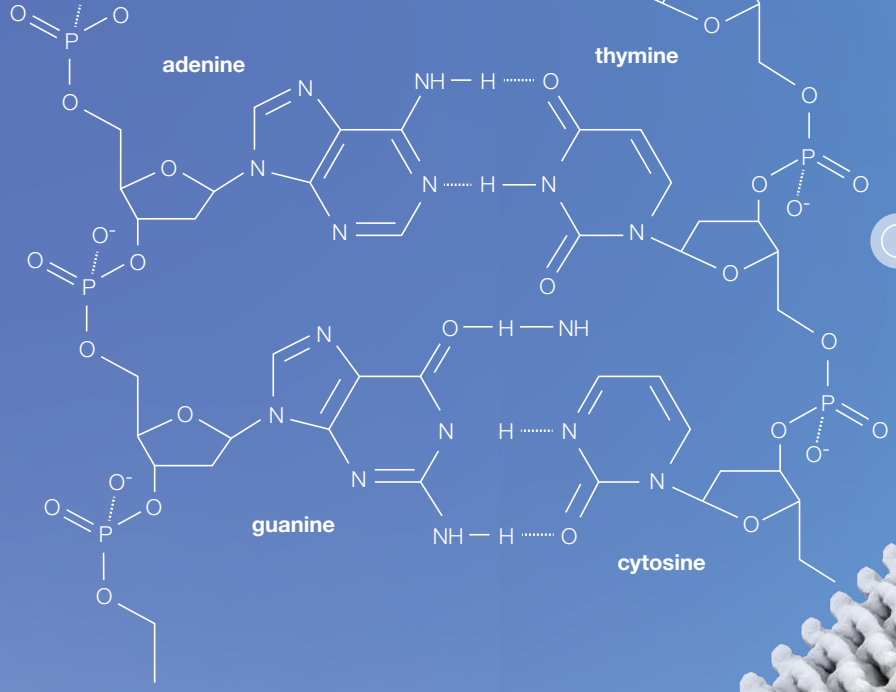
Als Basis diente reiner Nadelholzteer von Fichten oder Kiefern, der destilliert und mit mineralischen Zuschlägen gemischt wurde. Auch Kolophonium, also ein Destillationsrückstand von Nadelholzharzen, kam oft zum Einsatz. Da es sehr spröde ist, wurde es mit Bienenwachs elastifiziert. Hier kommt es vor allem auf die richtige Menge an. „Zu viel Bienenwachs macht den Klebstoff zu weich, bei zu wenig Wachs wird er spröde“, sagt Hoepner. Um dem Klebstoff eine gute Standfestigkeit, Viskosität und gewisse Färbung zu verleihen, wurden auch Steinmehle beigemengt, die bei der Steinverarbeitung sowieso anfallen.

Der Klebstoff ist fester als viele Steine

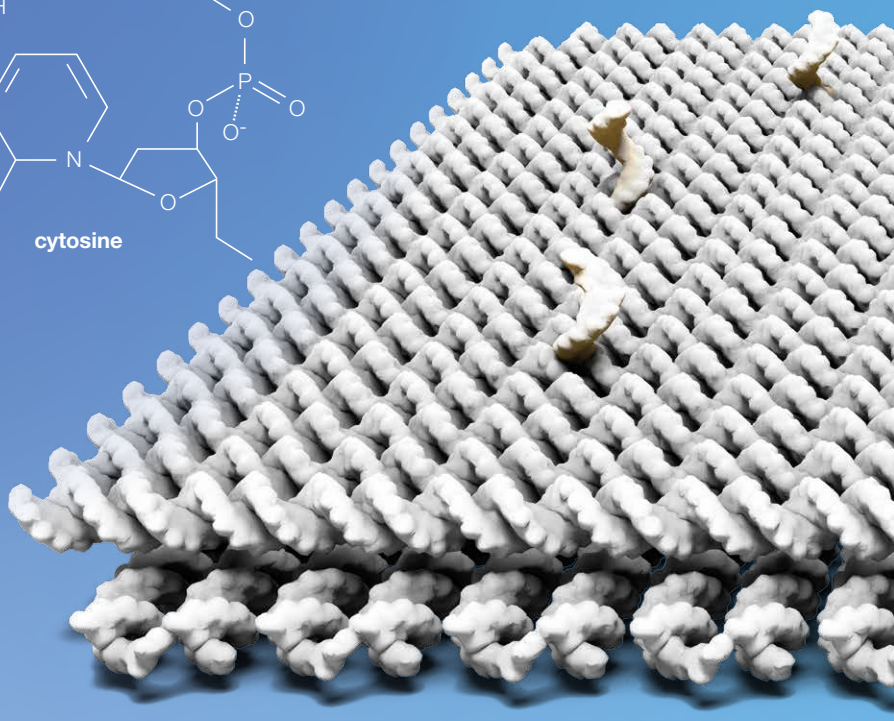
Nach vielen Analyserunden mischt Hoepner erste eigene Klebstoffe an, deren Eigenschaften sie dann im Labor testet. Vor allem die Zugscherfestigkeit ist eine wichtige Kenngröße. Sie sagt aus, wie viel Kraft man braucht, um zwei überlappend geklebte Körper auseinanderzubringen. „Bei meinen Tests an Sandstein sind die Steine zerbrochen, bevor der Klebstoff nachgegeben hat“, berichtet Hoepner. Um herauszufinden, wie belastbar ihre Klebstoffe wirklich sind, musste sie deshalb an stabilem Granit testen.

Am Ende ihres Projekts sollen ausgefeilte Rezepturen für Klebstoffe stehen, die zum einen auf nachwachsenden Rohstoffen basieren und zum anderen länger halten als die heute dominanten, auf Erdöl basierenden Epoxidharze. Im besten Fall werden bald bei der Restaurierung von Steinen verschiedener Baudenkmale wieder die gleichen bewährten Klebstoffe eingesetzt, die bereits seit vielen hundert Jahren einen Stein auf dem anderen halten. Darüber hinaus kann für das Baugewerbe ein weniger giftiger und umweltfreundlicher Steinkleber erhalten werden.

■ *Claudia Doyle*

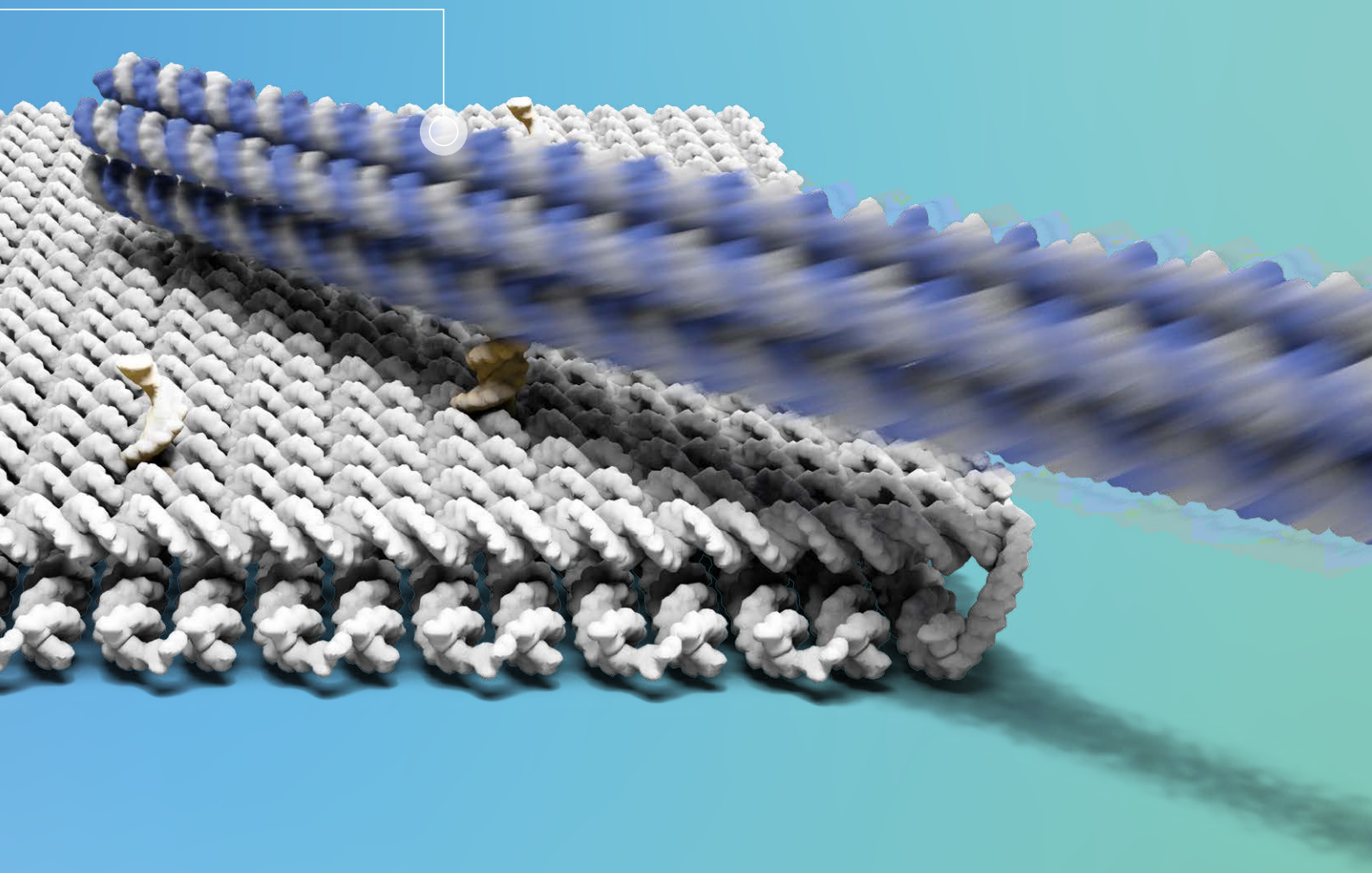


Besteht aus DNA-Strängen



Das Beste aus **zwei Welten kombinieren**

Friedrich Simmel versucht den Spagat zwischen makroskopischer Welt und Nanowelt. Wie kann man – so fragt er – die Vorzüge von molekularen Maschinen mit Systemen kombinieren, die an die Dimensionen unserer Alltagswelt angepasst sind? Und wie kann man Schnittstellen zwischen den beiden konstruieren? Ein wichtiger Schritt auf diesem Weg ist ihm und seinem Team vor drei Jahren gelungen: die Steuerung von Nanostrukturen durch elektrische Felder. Die Optionen, die in diesem Konzept stecken, loten die Forscherinnen und Forscher nun auch für die Praxis aus.



Grafiken: ediundsepp/E. Kopperger (TUM)

Link
www.groups.ph.tum.de/en/e14/home/

Short version

Nanoscale robots

E

At the TUM chair of Synthetic Biosystems, Prof. Friedrich Simmel and his team study how robotic systems can be created from molecules or cells. Future visions expect such systems to enter into applications in robotics and medicine. Possible uses for nanorobots range from assembling molecules, to operating as tiny measuring instruments, to performing transport processes. These new technologies might one day enable the creation of nanofactories. Another example is microsystems that move around the body autonomously and investigate their surroundings. These might be able to detect disease or release specific drugs.

Because these robotic nanosystems would need to both possess a degree of intrinsic intelligence and be able to be controlled from outside, researchers are looking at options including electrical control to act as the interface between the nano and macroscopic worlds. Other projects are in-vestigating ways of programming biological systems and of enabling cell-like objects to react autonomously. □

„Eine brutale Lösung“ sei es gewesen, und eigentlich nur „aus Verzweiflung geboren“, so beschreibt Prof. Friedrich Simmel, Inhaber des Lehrstuhls Physik synthetischer Biosysteme der TUM, den Ansatz, den er und sein Team 2017 wählten: Sie legten ein elektrisches Feld an, um einen winzigen molekularen Arm auf einer Unterlage aus DNA in eine bestimmte Richtung zu schwenken. Am Ende war das Verfahren überaus erfolgreich. Es wurde patentiert, und es entstand daraus eine neue Forschungsrichtung im Bereich Nanomaschinen, in der die Münchner nun weltweit führend sind.

„Grundsätzlich geht es uns um die Frage, wie man Robotik auf der Grundlage von Molekülen oder Zellen realisieren kann.“

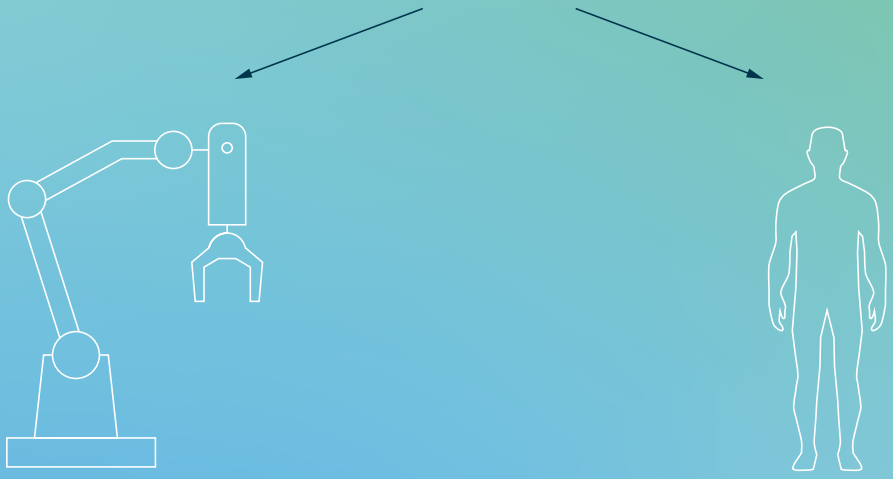
Friedrich Simmel

Visionen für Nanoroboter

„Grundsätzlich geht es uns um die Frage, wie man Robotik auf der Grundlage von Molekülen oder Zellen realisieren kann“, sagt der Physiker. Seit Jahren gibt es verschiedene Visionen für die Anwendung solcher Systeme. Man fragt sich beispielsweise, wie man Nanoroboter dazu bringen kann, dass sie Moleküle zusammensetzen oder als kleine Messgeräte arbeiten oder Transportvorgänge durchführen. Diese neuen Technologien wären Grundlage für Nanofabriken der Zukunft. Sie sollen eines Tages wie am Fließband biochemische Proben analysieren oder komplizierte medizinische Wirkstoffe herstellen. Die dafür notwendigen Teile lassen sich bereits heute kostengünstig mithilfe der DNA-Origami-Technik – ein Forschungsgebiet, das von Simmels Kollegen an der TUM, Prof. Hendrik Dietz, maßgeblich mitgeprägt wurde – herstellen. Sie ermöglicht es, aus Desoxyribonukleinsäure (meist nach ihrem englischen Namen als DNA abgekürzt), aus der auch das Erbgut von Lebewesen besteht, mit einer Art Programmiertechnik Nanoobjekte in großer Menge zu erzeugen. (siehe auch Faszination Forschung Nr. 21)

Simmel selbst gehört zu den Pionieren auf diesem Gebiet: Er war schon vor rund 20 Jahren als Postdoc an der Konstruktion der ersten DNA-Nanomaschinen beteiligt. „Wir nutzten damals den Umstand, dass Einzelstränge aus DNA flexibel sind, Doppelstränge aber relativ steif. Deshalb kann man daraus Maschinenelemente bauen, die entweder flexible Verbindungen darstellen oder steife Elemente“, berichtet er. Wie aber bringt man die Nanomaschinen dazu, sich auf eine bestimmte Weise zu bewegen? „Dazu haben sich einige Techniken etabliert. Die DNA hat ja über ihre Basensequenz an jeder Stelle eine genaue Adresse. Man kann sie gezielt mit DNA-Kontrollsträngen ansprechen und beispielsweise eine Stelle sich bewegen lassen und eine andere nicht. Alternativ lenkt man solche Vorgänge etwa durch die Änderung des pH-Werts in der Lösung oder durch eine Änderung der Salzkonzentration.“ ▷

Zwei Verwendungen für Nanoroboter



Nanofabriken

Beispiel: Fertigungslinien-artige Produktion von Molekülen für die Herstellung komplexer medizinischer Wirkstoffe.

Nanomedizin

Intelligente Nanoteilchen navigieren autonom durch den Körper, erkunden ihre Umgebung und erkennen Krankheiten oder setzen Wirkstoffe frei.

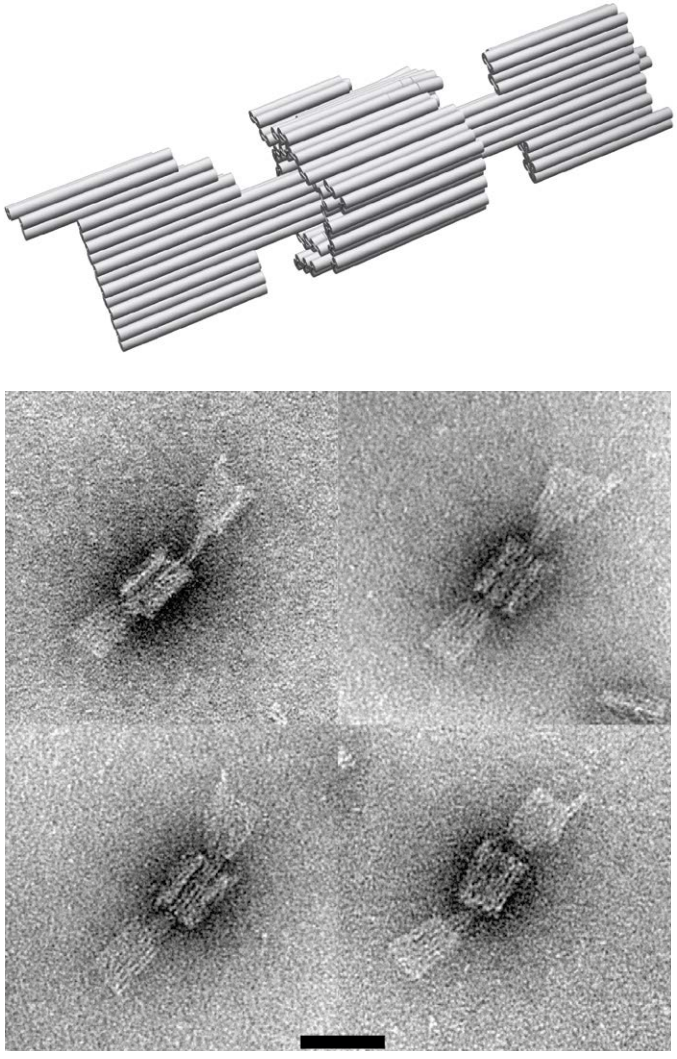
Prof. Friedrich Simmel

begann als Festkörperphysiker und schloss sich gleich bei dessen Gründung dem Center for Nanoscience an der LMU München an. Als Postdoc arbeitete er an dem Projekt, im Rahmen dessen im Jahr 2000 die allerersten Nanomaschinen aus DNA überhaupt gebaut wurden, damals noch ganz ohne Origami. Anschließend ging Simmel in die USA an die Bell Labs in Murray Hill, NJ, wo er sich mit biophysikalischen Systemen befasste. Im Jahr 2002 kehrte er an die LMU München zurück, leitete eine Emmy Noether-Gruppe und habilitierte sich. Im Jahr 2007 dann der Wechsel an die TUM, wo er seither als Professor arbeitet und lehrt. Bis zu ihrem Ende im Oktober 2019 war er auch Co-Koordinator des Exzellenzclusters Nanosystems Initiative Munich.

Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM); Bildquelle: Stefan Woidig

Das grundsätzliche Problem bei dieser Art von „chemischer“ Steuerung ist jedoch, dass solche Vorgänge in der Praxis recht langsam sind. Für die Ausführung der Aktionen benötigen herkömmliche DNA-Nanomaschinen Minuten, manchmal auch Stunden. „Man kann sich nicht vorstellen, wie man auf dieser Basis jemals Systeme herstellen kann, die auf einer für Anwendungen nützlichen Zeitskala arbeiten“, bedauert Simmel. „Deshalb entschieden wir uns, eine elektrische Steuerung zu erproben. Sie hat den Vorteil, dass man eine schnelle Kontrolle von außen hat; damit kann man im Prinzip mit Computern die Bewegung dieser Maschinen steuern.“ Gleichzeitig hat die Methode wiederum den Nachteil, dass man mit ihr keine einzelnen DNA-Adressen ansprechen kann, sondern alle Objekte in der Probe gleichzeitig bewegt. „Es ist immer eine Art Trade-off zwischen Geschwindigkeit und Adressierbarkeit, und das hat natürlich Auswirkungen auf die möglichen Anwendungen“, so Simmel.

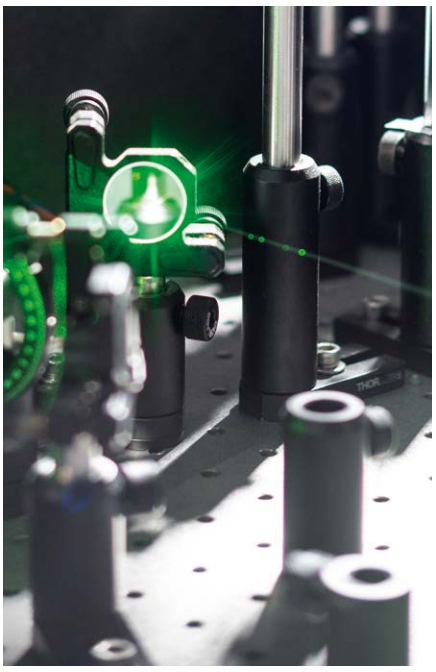
Den Ansatz zu verfeinern und passende Anwendungen zu finden ist nun das Gebiet, dem sich seither eine Gruppe an seinem Lehrstuhl widmet. Inzwischen arbeiten die Forscher Dr. Enzo Kopperger, Dr. Martin Langecker und Dr. Jonathan List an der Gründung eines Start-ups mit dem Namen roboticDNA, das aufgrund dieser Technologie relativ kostengünstige Sensoren bauen will. „Wir wollen uns zunutze machen, dass man an dem beweglichen Arm, den wir entwickelt haben, Biomoleküle befestigen kann“, sagt Kopperger. „Beobachtet man nun unter dem Fluoreszenzmikroskop eine große Anzahl davon auf einmal, kann man bei Zugabe bestimmter Wirkstoffe sehen, dass sich das Bewegungsmuster der Arme verändert. Wertet man die Bilder automatisch aus, kann man sogar genaue quantitative Aussagen über das Bindungsverhalten der einzelnen Nanoroboter machen. Man hat damit bei jeder Messung große Datenmengen zur Verfügung, die man auswerten und nutzen kann.“ Das wäre eine der ersten Anwendungen dieser elektrischen Nano-Antriebstechnik. ▷

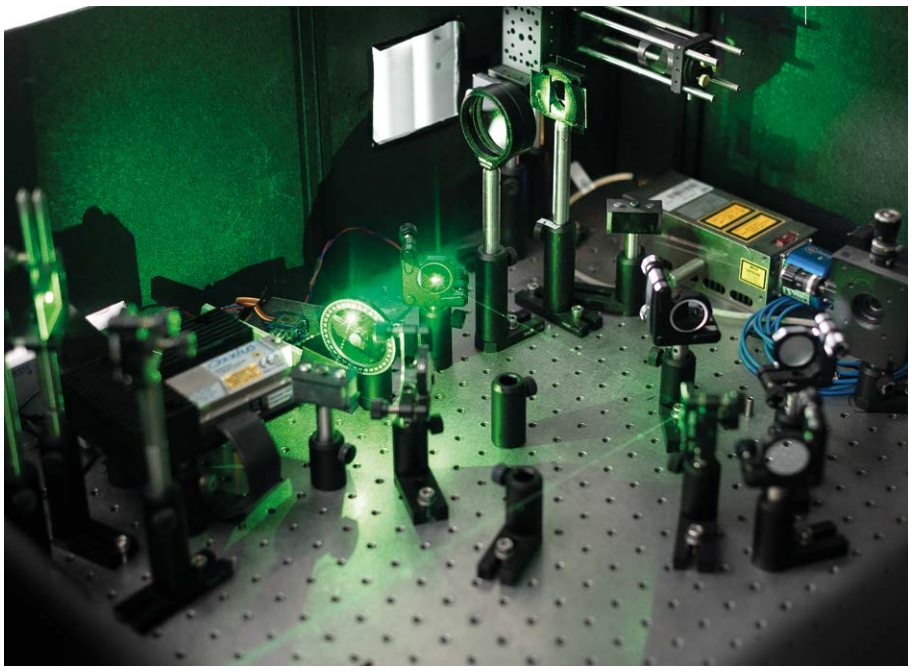


Dieser molekulare Mechanismus wurde mit DNA-Origami hergestellt. Die „Rotaxan“ genannte Struktur besteht aus zwei Untereinheiten, einer Achse und einem Ring, der auf der Achse gleiten und rotieren kann. Oben: 3D-Modell, unten: Elektronenmikroskopische (TEM) Aufnahme.

„Unser Ziel ist die Realisierung selbstorganisierender molekularer und zellulärer Systeme, die auf ihre Umgebung reagieren, Information verarbeiten, sich bewegen und handeln können.“

Friedrich Simmel



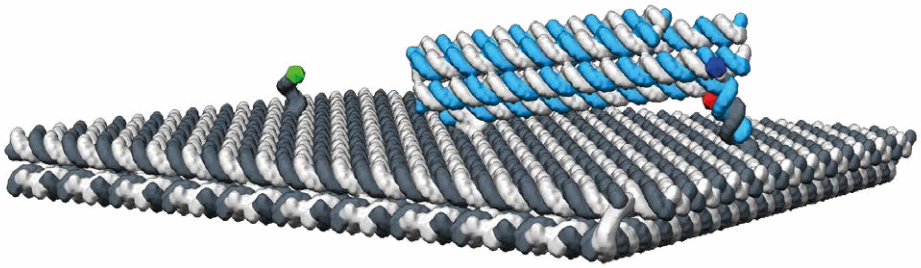


Laseroptischer Aufbau zur Bestimmung der Position und Bewegung von DNA-Nanomaschinen mit Superauflösungsmikroskopie und anderen Einzelmolekülfluoreszenzmethoden.

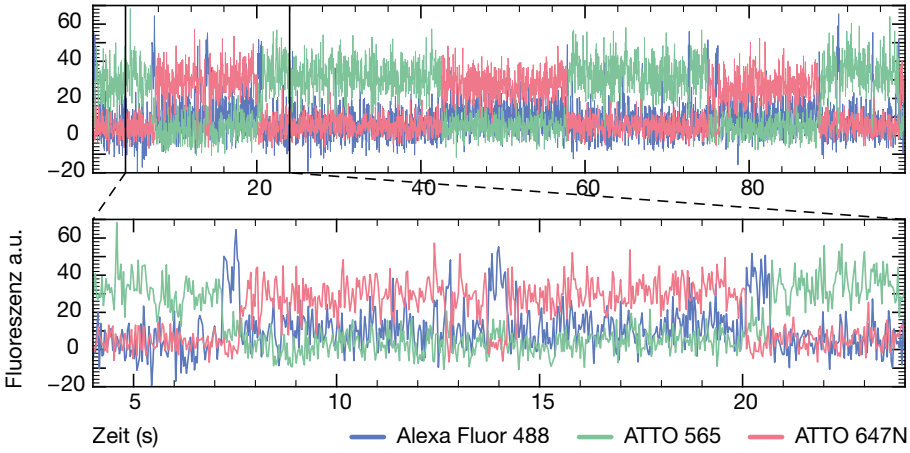
Bildquelle links: F. Simmel (TUM); rechts: Stefan Woidig

„Wie betreibt man Robotik in Gegenwart von Brownscher Molekularbewegung?“

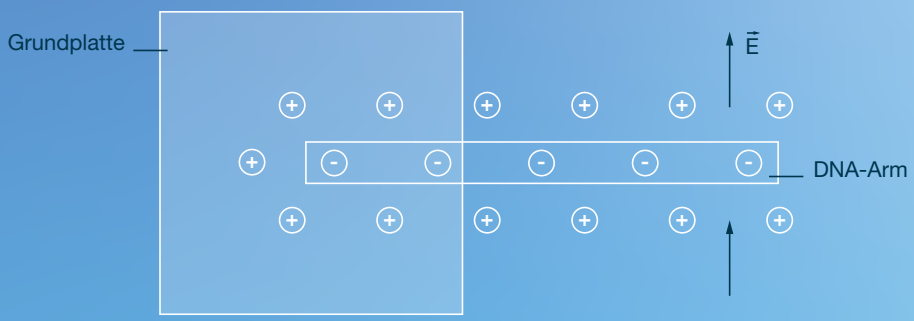
Friedrich Simmel



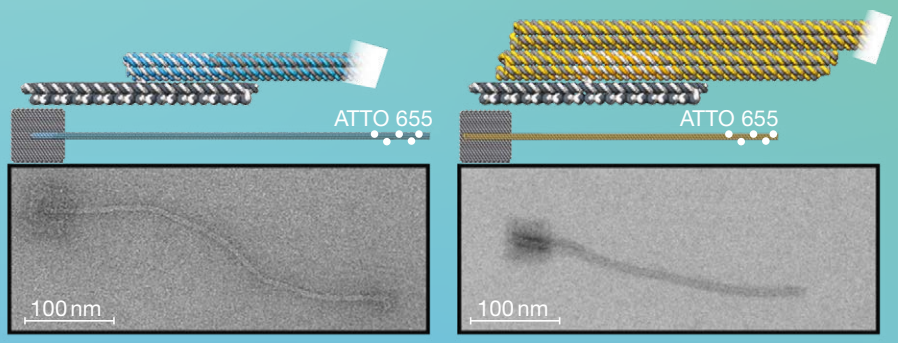
Der DNA-Arm auf der Grundplatte kann rotieren und sich zwischen den Andockstellen (rot und grün) hin- und her bewegen. An der Spitze des Arms ist ein fluoreszierender Marker angebracht. Wie jede molekulare Struktur bewegt sich der Arm aufgrund der thermischen Bewegung ständig alleine.



Die thermische Bewegung des Arms zwischen den Andockstellen (grün und rot) kann im Fluoreszenzsignal nachvollzogen werden.

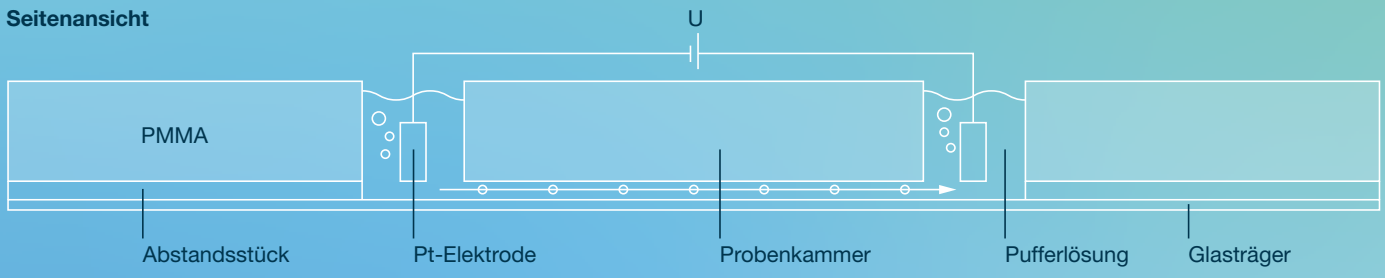


Mithilfe eines elektrischen Felds bewegen die Forscher den geladenen Nanoarm in eine bestimmte Richtung.

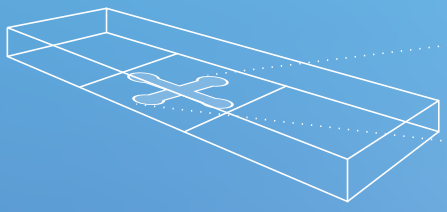


Zwei verschiedene Nanoarme und die dazugehörigen elektronenmikroskopischen Aufnahmen. Mit der Probenkammer verbundene Elektroden ermöglichen den Forschern, den Arm kontrolliert in bestimmte Richtungen zu bewegen.

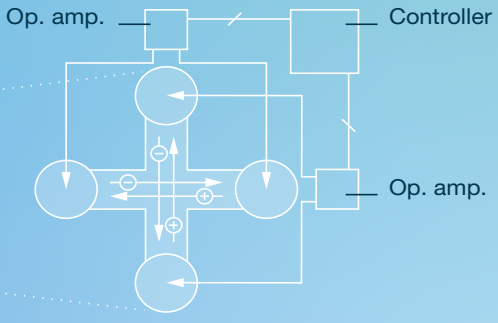
Seitenansicht

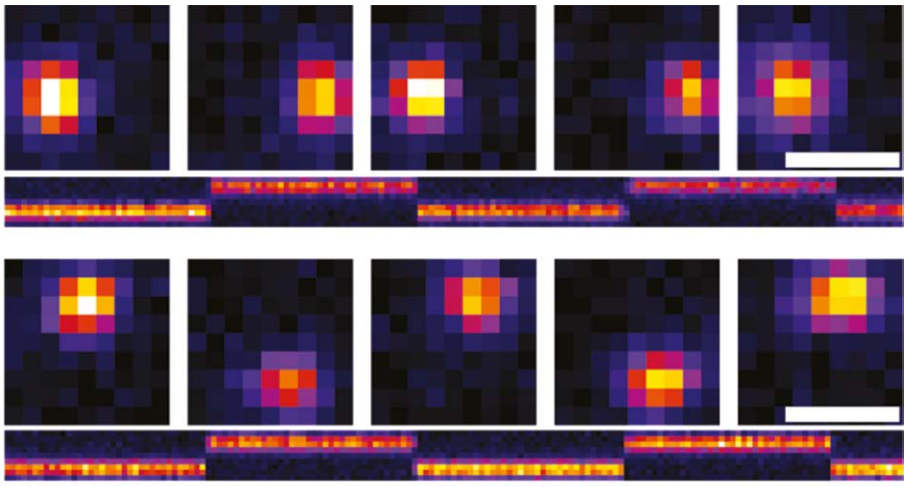


Isometrische Ansicht

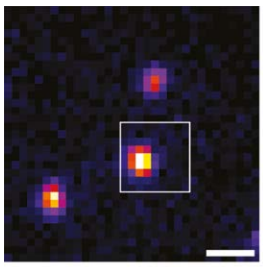


Versuchsaufbau mit vier Elektroden

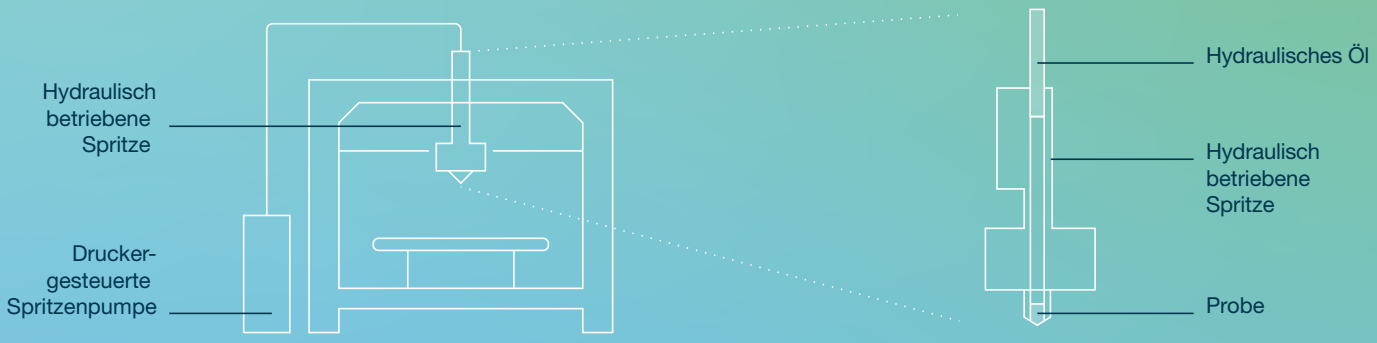




Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen von drei Strukturen, die in einem elektrischen Feld bewegt werden. Links sieht man die Bewegung des hervorgehobenen Teilchens. Reihe oben: Das Feld schaltet zwischen links und rechts (Reihe oben) und oben und unten (Reihe unten) um.

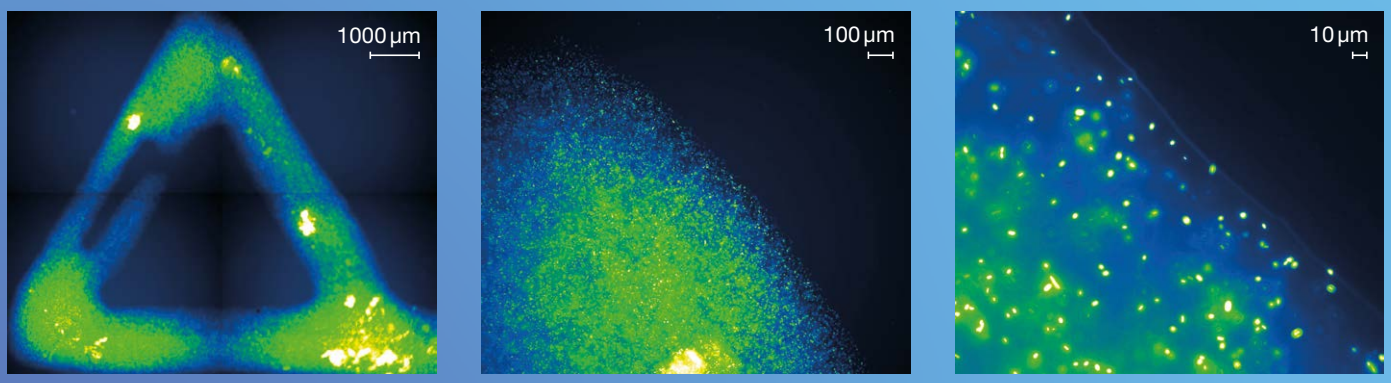


Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM); Bildquellen: F. Simmel (TUM); linke Seite, Mitte: F. Simmel (TUM), D. Lamb (LMU)

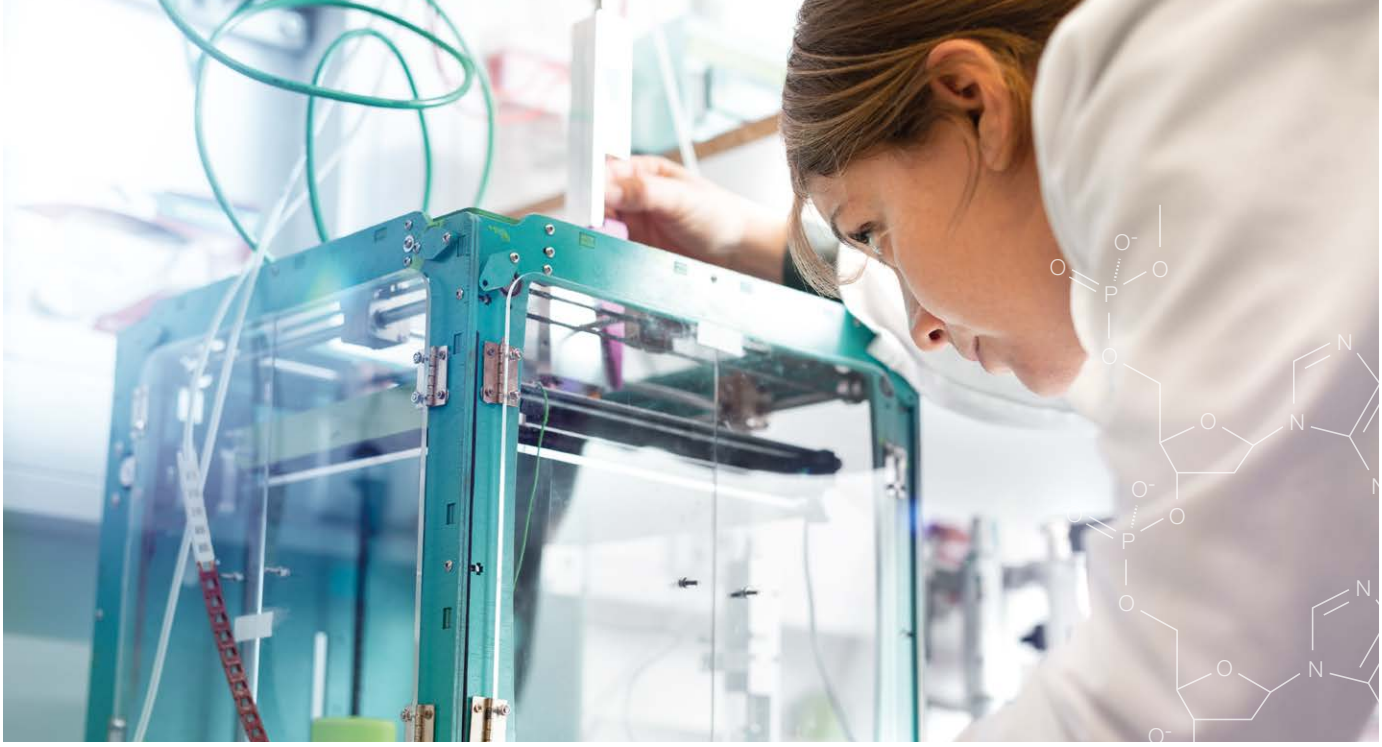


Julia Müller (rechts) produziert mithilfe eines 3D-Druckers winzige DNA-modifizierte Geltröpfchen mit genau definierten Eigenschaften. Eine hydraulische Spritze gibt, gesteuert durch den Drucker, die kleinen Proben ab.

Die DNA-Biotinte besteht aus drei Hauptkomponenten: Gelatine für die strukturelle Stabilität, Alginat zur Erhöhung der Viskosität und Agarose als DNA-funktionalisierbarer Anteil.



Winzige Geltröpfchen mit lebenden Bakterien werden in einer vordefinierten Struktur gedruckt. Die eingekapselten Bakterien produzieren fluoreszierende Proteine und machen damit die Dreiecksstruktur im Laufe der Zeit sichtbar.



Roboter im Nanomaßstab

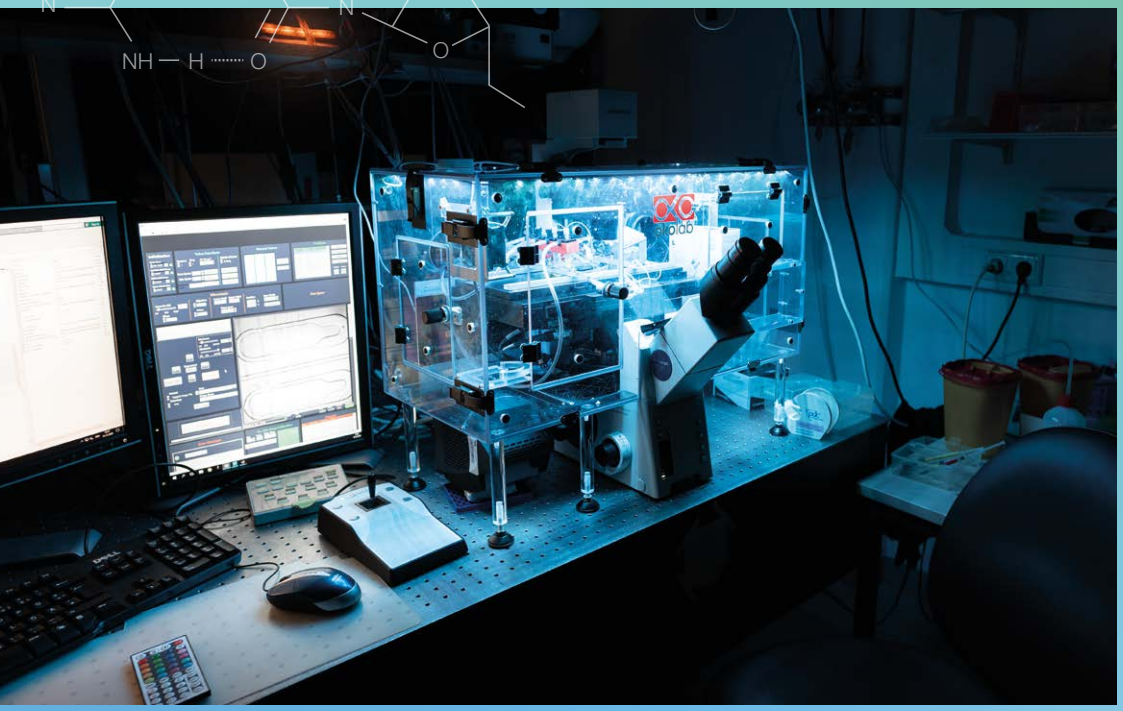
Von Haus aus betreiben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Simmels Lehrstuhl – die eine bunte Mischung aus Abschlüssen in Physik, Chemie, Biologie, manchmal auch Elektrotechnik aufweisen – allerdings eher Grundlagenforschung. Sie fragen sich etwa, wie man winzige Strukturen als Roboter arbeiten lassen kann. Der elektrisch gesteuerte Arm wäre dazu ein erster Schritt. „Was wir hier gemacht haben, würde wohl auch ein klassischer Robotiker als Roboter bezeichnen“, meint der Professor. „Für ihn ist es ja in der makroskopischen Welt ganz natürlich, dass man steife Elemente mithilfe von Gelenken verbindet und diese elektrisch steuert. Aus Robotiksicht ist ein einzelner beweglicher DNA-Arm aber erst einmal nur ein Aktuator. Erst zusammen mit den Elektroden und dem Computer, der diese steuert, wird das Gesamtsystem so etwas wie ein Roboter. Ich hoffe, dass man eines Tages makroskopische Roboter bauen kann, die auch biomolekulare Nano-Elemente enthalten.“

Die Schnittstellen dafür werden gerade entwickelt, sie könnten elektrisch sein, aber auch mit Licht arbeiten oder mit magnetischen Feldern. Simmel ist dabei immer auf der Suche nach eleganten Lösungen, die seiner Freude an ästhetischen Phänomenen in der Physik, aber auch der Biologie entgegenkommen. Als ehemaliger Festkörperphysiker lernte er im Lauf seines Wandels zum interdisziplinären Biophysiker, dass es zwischen Physikern und Biologen unterschiedliche kulturelle Ansätze gibt: „Der Physiker ist manchmal eher verspielt und macht etwas, weil er einen Effekt interessant oder schön findet. Dann entsteht vielleicht eine eigenartige Struktur, ein besonderes Muster oder Ähnliches. In der Biologie heißt es hingegen eher: Was ist die biologische Fragestellung oder auch die biomedizinische Relevanz? Das spielerische Umgehen mit den Dingen ist unter Biologen vermutlich nicht so verbreitet wie in der Physik und in der Chemie.“ Er betreibt es trotzdem, und so arbeitet er auch auf dem Gebiet des „Biomolecular Computing“, also der Frage, wie man mit biologischen Strukturen und Prozessen rechnen und sie programmieren kann. Im Jahr 2016 wurde er dafür mit dem Rozenberg Tulip Award für DNA Computing ausgezeichnet.

Julia Müller, eine Mitarbeiterin von Simmel, hat vor Kurzem zusammen mit ihrem Team als Grundlage für solche Experimente ein Verfahren entwickelt, wie man mithilfe eines 3D-Druckers winzige Geltröpfchen mit genau definierten Eigenschaften herstellen kann. Das Material besteht aus einer Biotinte, die unter anderem DNA-Stränge enthält. Diese lassen sich programmieren und zur Musterbildung anregen.

Für Simmel ist das Feld der Bio-Nanotechnologie vor allem deshalb interessant, weil es dort darum geht, völlig neue Dinge zu generieren. Das liegt ihm näher, als einen biologischen Prozess im Detail zu untersuchen. „Aus Sicht der traditionellen Lebenswissenschaftlerinnen und Lebenswissenschaftler wirken DNA-Nanomaschinen möglicherweise noch als nutzlose Spielerei.“ Trotzdem veröffentlichte das angesehene Wissenschaftsmagazin „Science“ den Beitrag über die elektrische Steuerung eines Nanoroboters im Januar 2018 als Titelstory. ▷

Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM); Bildquelle links: J. Müller; rechts: Stefan Woidig



Fluoreszenzmikroskop mit Mikrofluidikaufbau für die Untersuchung von synthetischen biochemischen „Schaltkreisen“.

„Auf lange Sicht stellen wir uns autonome Systeme vor, die sich auch weiterentwickeln können.“

Friedrich Simmel

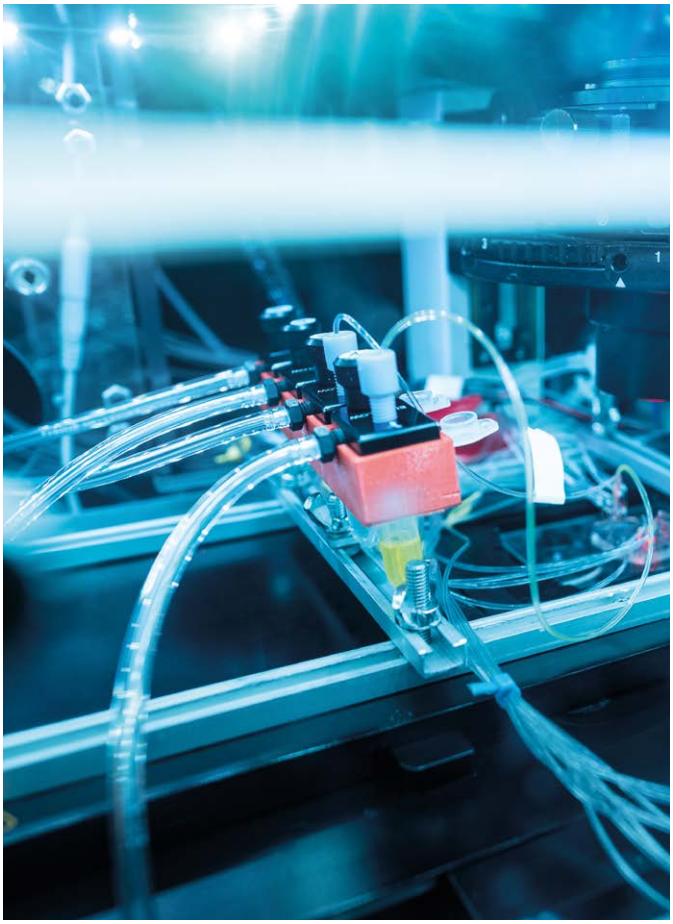
Intelligente Nanopartikel

Ein weiteres wichtiges Standbein an Simmels Lehrstuhl geht in Richtung synthetische Biologie, und obwohl vieles davon nach Science-Fiction klingt, werden hier reale Experimente durchgeführt. Eine medizinisch motivierte Aufgabenstellung lautet etwa: Man benötigt ein System, das bestimmte Aufgaben selbständig erledigt, etwa im Körper herumschwimmt, seine Umgebung erkundet und Krankheiten erkennt oder Wirkstoffe freisetzt. „Das können wahrscheinlich am besten multifunktionale Nano- oder Mikropartikel“, glaubt Simmel, „oder auch zellähnliche Gebilde, die chemisch angetrieben werden. Unser Ziel ist in diesem Zusammenhang die Realisierung selbstorganisierender molekularer und zellulärer Systeme, die in der Lage sind, auf ihre Umgebung zu reagieren, Information zu verarbeiten, sich zu bewegen, zu handeln. Auf lange Sicht stellen wir uns autonome Systeme vor, die sich auch weiterentwickeln können.“

In den letzten Jahren hat sich neben der zellbasierten synthetischen Biologie die sogenannte „zellfreie synthetische Biologie“ entwickelt. Hier hat man es mit Zellextrakten zu tun, in denen genetische Prozesse stattfinden. „Die zellfreie synthetische Biologie beschäftigt sich mit Systemen, die wesentlich komplizierter sind als die Systeme der DNA-Nanotechnologie – aber sie sind keine lebenden Systeme, deshalb kann man sie besser engineeren.“ Das Projekt Invitris seines Studenten Kilian Vogele befindet sich gerade in der Gründungsphase. Invitris will solche Zellextrakte nutzen, um Bakteriophagen für die Phagentherapie, eine alternative Behandlungsmethode bei Antibiotika-Resistenzen, herzustellen.

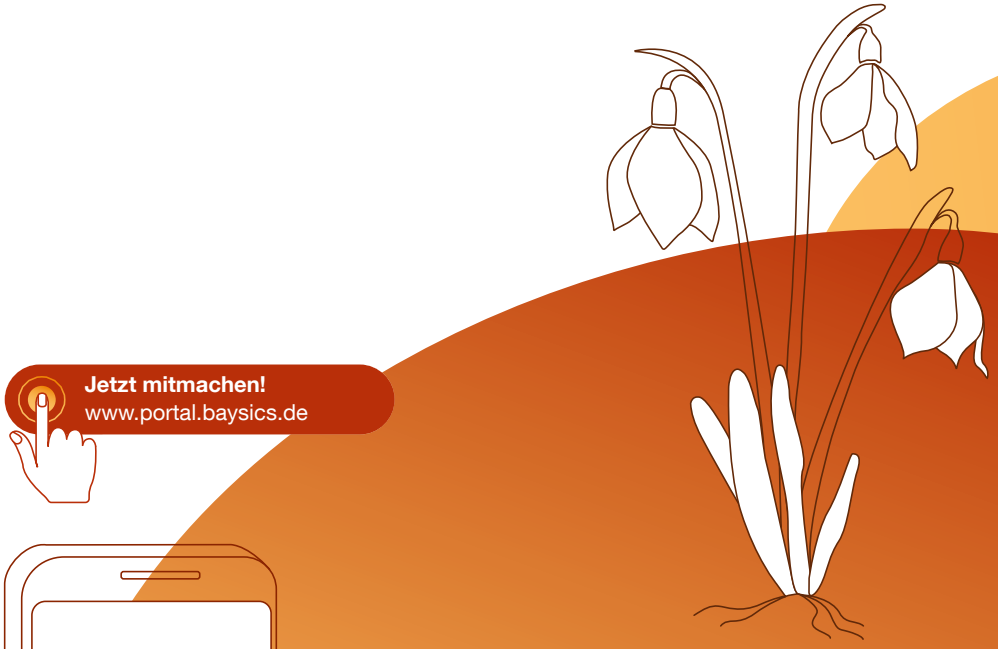
Die Ideen zu neuen Projekten gehen Simmel und seinen Leuten jedenfalls nicht aus. Einerseits lässt er sich von der Biologie inspirieren, andererseits kommen neue Ideen oft spontan, zum Beispiel wenn etwas im Labor besonders gut geklappt hat, woran man vorher gar nicht gedacht hatte. „So entwickeln sich manche Projekte ganz zufällig“, sagt er. „Manchmal ist aber auch etwas festgefahren, und man denkt dann darüber nach, ob man nicht einen großen Schritt machen kann, ob man etwas Neues umsetzen kann. Da gibt es dann mitunter, selten, auch große Eingebungen.“

Brigitte Röthlein



Mit den Schläuchen (vorne) werden zellfreie Reaktionen in einer Mikrofluidikkammer (im Hintergrund rechts) mit Nährstoffen und chemischen Signalen versorgt.

Grafiken: ediundsepp; Bildquelle: Stefan Woidig



Klimawandel vor der Haustür

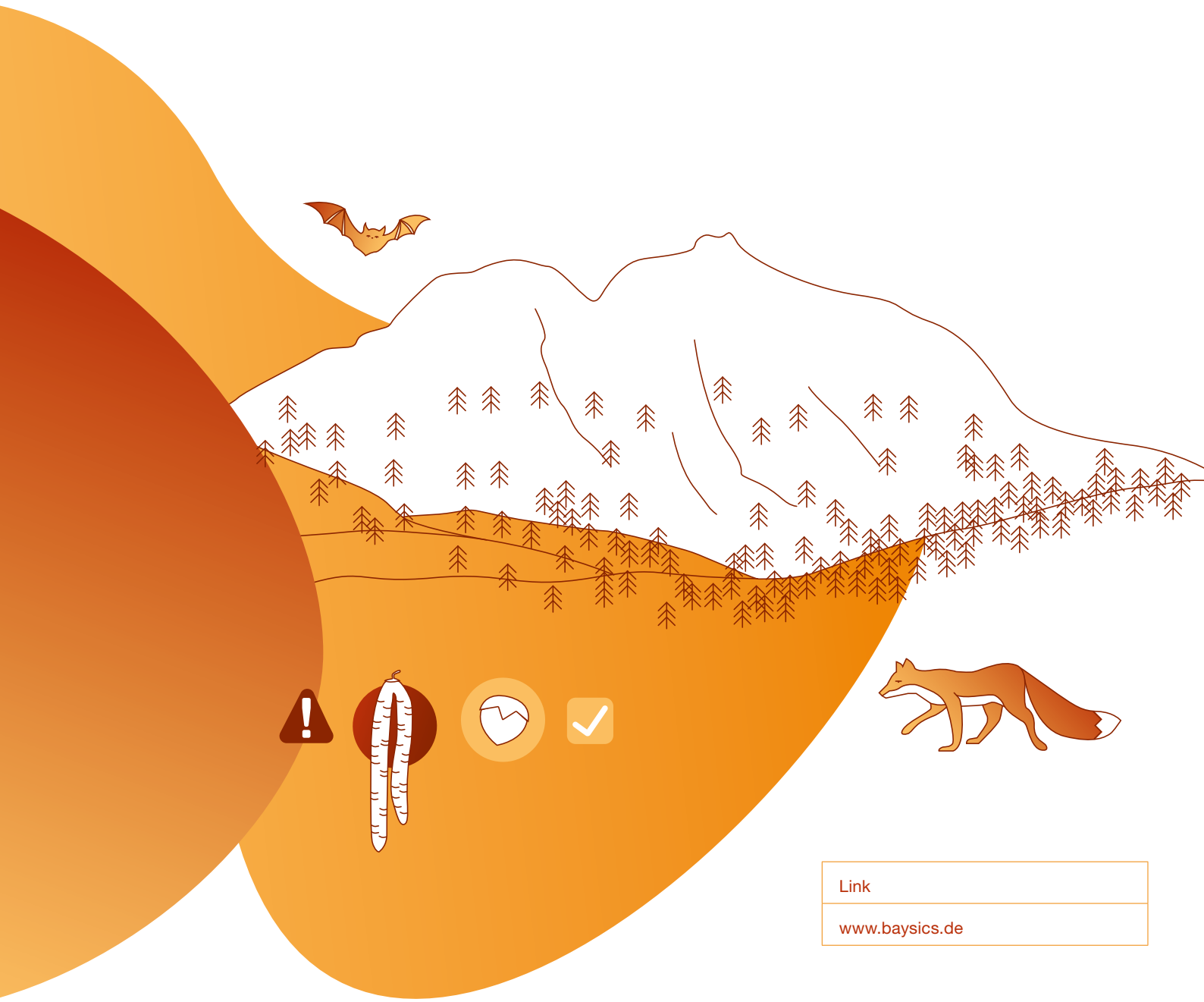
Interview mit Annette Menzel über ihre Erwartungen zum Citizen Science-Projekt.

Wenn die Märzenbecher schon im Februar blühen

Prof. Annette Menzel
Professur für Ökoklimatologie
TUM

Auch der Bergwald reagiert auf den Klimawandel

Prof. Jörg Ewald
Professur für Botanik, Vegetationskunde und Gebirgsökosysteme
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf



Grafik: ediundsepp

Link

www.baysics.de

Dem Heuschnupfen aus dem Weg gehen

Prof. Susanne Jochner-Oette
Physische Geographie/Landschaftsökologie
und nachhaltige Ökosystementwicklung
Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt

Tiere in der Stadt

Prof. Wolfgang Weisser
Lehrstuhl für Terrestrische Ökologie
TUM

Klima-wandel vor der Haustür

Die Folgen der Erderwärmung betreffen uns alle. Sie sind schon heute spürbar und verlangen künftig weitreichende Anpassungen von Mensch und Natur. Annette Menzel erforscht diese komplexen Veränderungen, um einen praktikablen Umgang damit zu finden – zusammen mit Bayerns Bürgerinnen und Bürgern. Das Forum für diesen Austausch bietet ein interaktives Onlineportal namens BAYSICS.

Short version

Climate Change in Your Backyard E

The consequences of global warming can be felt in Bavaria and demand far-reaching changes to our way of life. It will only be possible to implement such changes in democratic societies if significant proportions of the population regard them as necessary, acceptable and realistic. Following its motto of "conveying knowledge – raising awareness – communicating complexity", the interdisciplinary collaborative research project BAYSICS strives to engage citizens in research into climate change. Four citizen science subprojects give ordinary citizens the opportunity to explore natural phenomena and understand how they are changing as a result of global warming. Its focus topics include climate-induced changes in mountain forests and pollen counts, as well as plant phenology and occurrence of animals during different seasons. Participants benefit directly from the knowledge generated in the BAYSICS project. At the same time, researchers gain valuable data to use in their own scientific studies in natural sciences, education, and sociology. □

„Wir versuchen, große Teile der Bevölkerung anzusprechen und für die Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen zu gewinnen. Nur so können wir in der Gesellschaft etwas bewegen.“

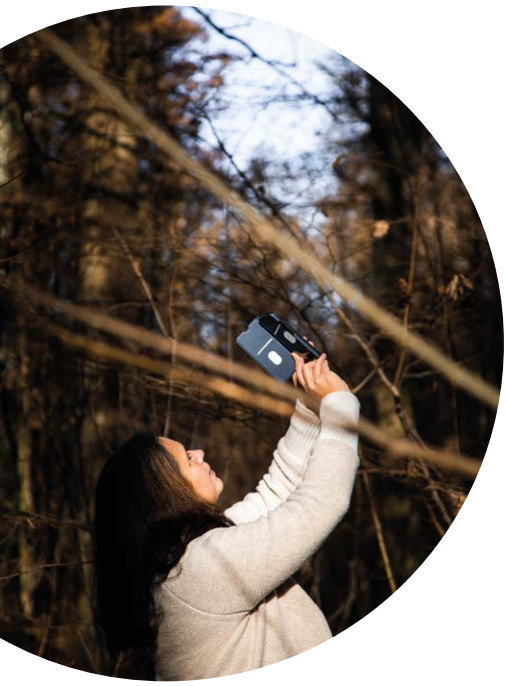
Annette Menzel

Bildquelle: Juli Eberle; Grafik: ediundsepp

Link
www.oekoklimatologie.wzw.tum.de

Frau Professor Menzel, welche Ziele verfolgen Sie mit BAYSICS?
Das neue Portal ist Teil des Bayerischen Netzwerkes für Klimaforschung. Kurz gesagt wollen wir damit Wissen vermitteln, Wahrnehmung fördern und Komplexität kommunizieren. Es geht darum, möglichst viele Mitglieder der Gesellschaft für die Phänomene und Folgen des Klimawandels zu sensibilisieren und als Citizen Scientists an deren Erforschung teilhaben zu lassen.

Was verstehen Sie unter Citizen Science?
Übersetzt heißt das Bürgerwissenschaft und meint die Beteiligung der Bevölkerung am Wissenschaftsprozess. Interessierte Laien sind aufgerufen, ihre Umwelt zu erkunden und Beobachtungen zu melden. So generieren sie Daten und schaffen einen Mehrwert für die Wissenschaft. Davon profitieren aber nicht nur die professionell Forschenden, sondern auch die Citizen Scientists selbst: Sie können Experimente durchführen, ihre Befunde mit bestehenden Datensätzen vergleichen, eigene Forschungsfragen stellen und überlegen, was sie wissen und verstehen möchten. Die geeignete Plattform dafür bietet das neue BAYSICS-Portal. ▷



Über eine App können Bürgerinnen und Bürger bei BAYSICS mitmachen. Hier macht Prof. Annette Menzel mit der App ein Bild, das hochgeladen werden kann.

Prof. Annette Menzel

Immer bestrebt um den Dialog zwischen Forschung und Gesellschaft, verbindet Prof. Annette Menzel ihre Forschung als Forstwissenschaftlerin mit dem Staatsdienst als Forstbeamtin. Dem Diplom an der LMU München folgen das Staatsexamen und einige Jahre Dienst in der Bayerischen Staatsforstverwaltung. 1997 promoviert Menzel über die Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen. Das Themenfeld Klimawandel und Biosphäre beforscht sie auch nach ihrer Habilitation am Lehrstuhl für Ökoklimatologie der TUM: ab 2003 als kommissarische Leiterin, seit 2007 als Extraordinaria. Von 2004 bis 2008 wirkt sie als Leitautorin am Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC mit, 2012 erhält sie einen Grant des Europäischen Forschungsrats (ERC).

Wie funktioniert das BAYSICS-Portal?

Das Herzstück ist eine App, die speziell für unsere Citizen Science Projekte entwickelt wurde. Anders als kommerzielle Anwendungen, die man aus dem App-Store aufs Handy laden kann, haben wir uns für eine Progressive Web App entschieden: Sie lässt sich verändern oder ergänzen, falls künftig neue Fragestellungen und Themenfelder auftauchen. Ihre Programmierung sowie das „Backend“ des Portals koordiniert Prof. Dieter Kranzlmüller am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in enger Abstimmung mit Frau Prof. Liqiu Meng vom TUM Lehrstuhl für Kartographie. Ihre beiden Teams sorgen dafür, dass die gesamte Infrastruktur leicht zu bedienen ist und schön aussieht.

Wer ist an BAYSICS beteiligt?

Wir sind ein wirklich interdisziplinärer Verbund! Es gibt vier Citizen Science-Projekte mit unterschiedlicher naturwissenschaftlicher Ausrichtung sowie drei Teilprojekte aus den Gesellschaftswissenschaften. Prof. Ulrike Ohl von der Universität Augsburg hat in Kooperation mit mehreren bayerischen Gymnasien ein didaktisches Konzept zum „Forschenden Lernen“ mit Anregungen für Schülerinnen und Schüler und ihre Lehrkräfte entwickelt. Prof. Arne Dittmer von der Universität Regensburg erarbeitet ebenfalls Konzepte, wie sich der Klimawandel – auch in seiner politisch-ethischen Dimension – angemessen im Unterricht behandeln lässt. Und Prof. Henrike Rau von der LMU interessiert sich für die öffentliche Meinung und fragt: Wen sehen verschiedene Bevölkerungsgruppen in der Verantwortung für den Klimawandel? Wie werden Gegenmaßnahmen beurteilt und mitgetragen?

Was erhoffen Sie sich vom Dialog mit Bayerns Bürgerinnen und Bürgern?

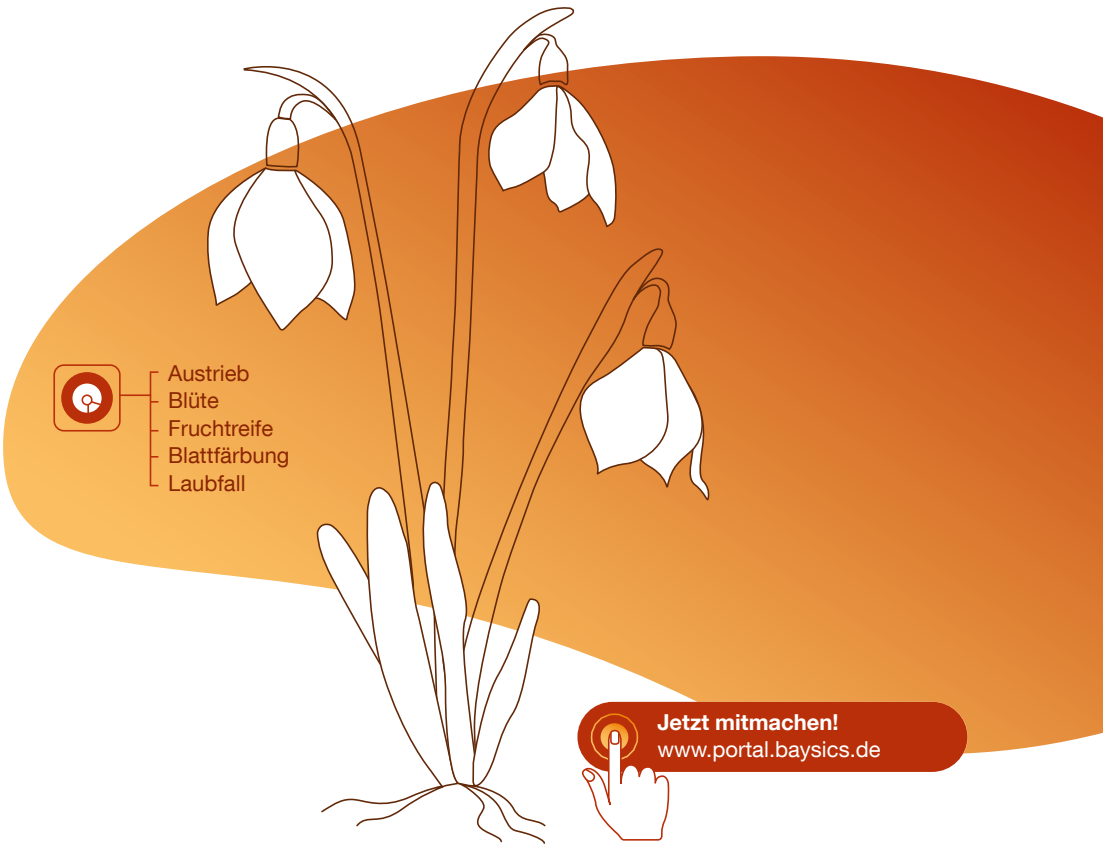
Wir wollen die Menschen motivieren, sich mit dem Klimawandel zu befassen. Sie sollen wirklich verstehen, wie ernst es ist – und dass sich unser Lebensstil grundlegend ändern muss. Also versuchen wir, große Teile der Bevölkerung anzusprechen und für die Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen zu gewinnen. Nur so können wir in der Gesellschaft etwas bewegen.

■ *Monika Offenberger*

Klimawandel
Frühe Blüte
Bergwald
Heuschnupfen
Tiere in der Stadt

Bildquellen: Juli Eberle; Grafik: ediundsepp

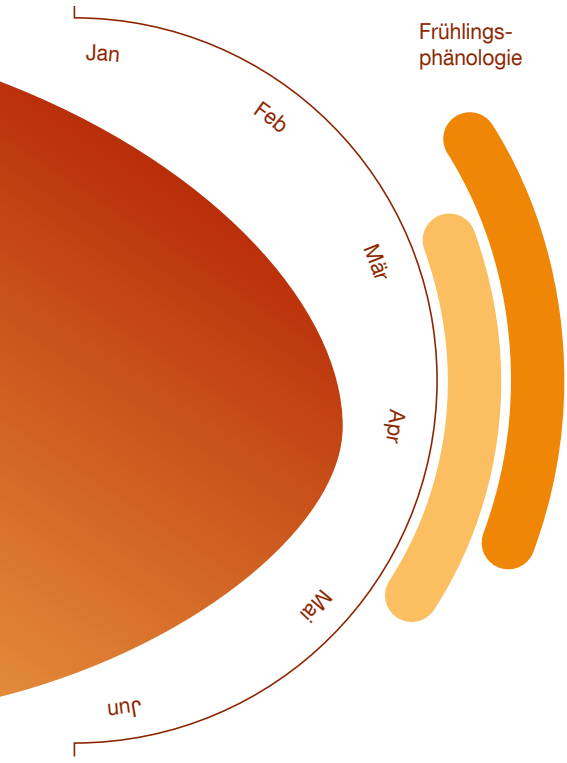
Auf der Dachplattform hoch über dem Campus der TUM School of Life Sciences werden an der Klimastation meteorologische Messungen durchgeführt und Messgeräte für den Feldeinsatz getestet.

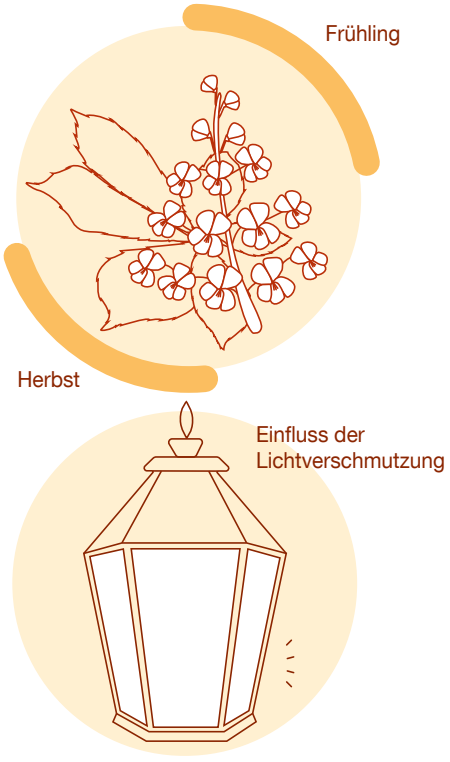


Wenn die Märzen-becher **schon im Februar blühen**

Abgemagerte Eisbären auf einer Eisscholle im offenen Meer: Dieses Bild steht beispielhaft für die dramatischen Folgen der Erderwärmung. „Viele Medien greifen auf solche starken Bilder zurück, wenn sie über den Klimawandel berichten. Das birgt die Gefahr, dass sich viele Menschen gar nicht betroffen fühlen. Denn die Arktis ist weit weg von ihrem Alltag“, sagt Annette Menzel, Professorin für Ökoklimatologie an der TUM. Tatsächlich verändert der Klimawandel aber längst auch in unseren Breiten den Lebensrhythmus von Pflanzen und Tieren. Vögel beginnen früher zu brüten. Die Vegetation grünt und blüht zeitiger als noch wenige Jahre zuvor. Früchte reifen schneller, während der herbstliche Laubfall auf sich warten lässt.

Diese jahreszeitlich bedingten Erscheinungsformen werden unter dem Fachbegriff Phänologie zusammengefasst. Ihre Veränderung lässt sich eindeutig auf die Erderwärmung zurückführen: Steigen die Temperaturen Ende des Winters im Mittel um ein Grad Celsius, so beginnt der phänologische Frühling im Durchschnitt 2,5 bis 5 Tage früher. Das konnte Menzel durch die Auswertung von Daten aus ganz Europa belegen, die zwischen 1971 und 2000 die Phänologie von 542 Pflanzen- und 19 Tierarten erfasst hatten. Als Citizen Scientists können Bayerns Bürgerinnen und Bürger diese Zusammenhänge nun selbst erforschen.





„Austrieb, Blüte, Fruchtreife, Blattfärbung und Laubfall lassen sich leicht beobachten und in die neue BAYSICS-App eingeben, wo man sie mit Daten des Deutschen Wetterdienstes seit 1951 verknüpfen kann“, erklärt Menzel. Daneben gebe es eine neue Software zur Auswertung von winterlichen Zweigexperimenten für die Nutzer. Das erlaube einen Blick in die Vergangenheit, aber auch in die Zukunft, so die Professorin: „Anhand von statistischen Modellen können wir simulieren, wie sich steigende Temperaturen auf unsere Natur auswirken“.

Dass die BAYSICS-App solche Simulationsexperimente ermöglicht, zeichnet sie vor kommerziellen Programmen aus. „Die Leute können mit echten Datensätzen spielen und verschiedene Szenarien des Klimawandels ausprobieren. So kann Wissenschaft Spaß machen und trotzdem komplexe Zusammenhänge vermitteln“, betont Menzel und verspricht sich zugleich einen Gewinn für ihre Forschung: So wisse man noch wenig darüber, warum etwa Rosskastanien im Herbst erneut Blüten ansetzen. Oder ob die Straßenbeleuchtung die Blattverfärbung beeinflusst. Oder ob die Obstblüte heute häufiger von Spätfrösten vernichtet werde als früher. „Wenn genügend Menschen mitmachen, kommen wir erstmals an Daten über eine Reihe kaum erforschter Phänomene.“

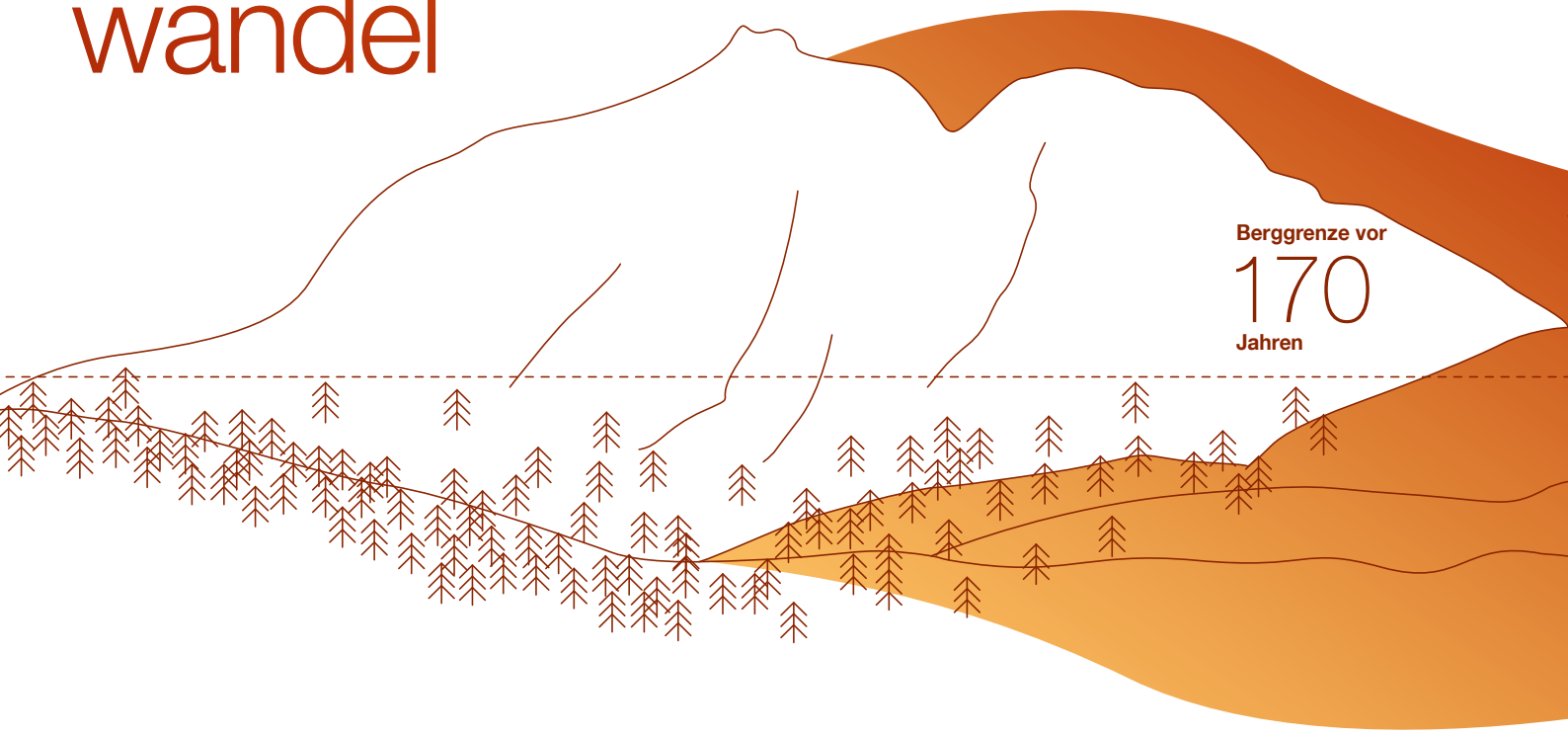
Monika Offenberger

„Wenn genügend Menschen mitmachen, kommen wir erstmals an Daten über eine Reihe kaum erforschter Phänomene.“

Annette Menzel, TUM

Grafiken: ediundsepp

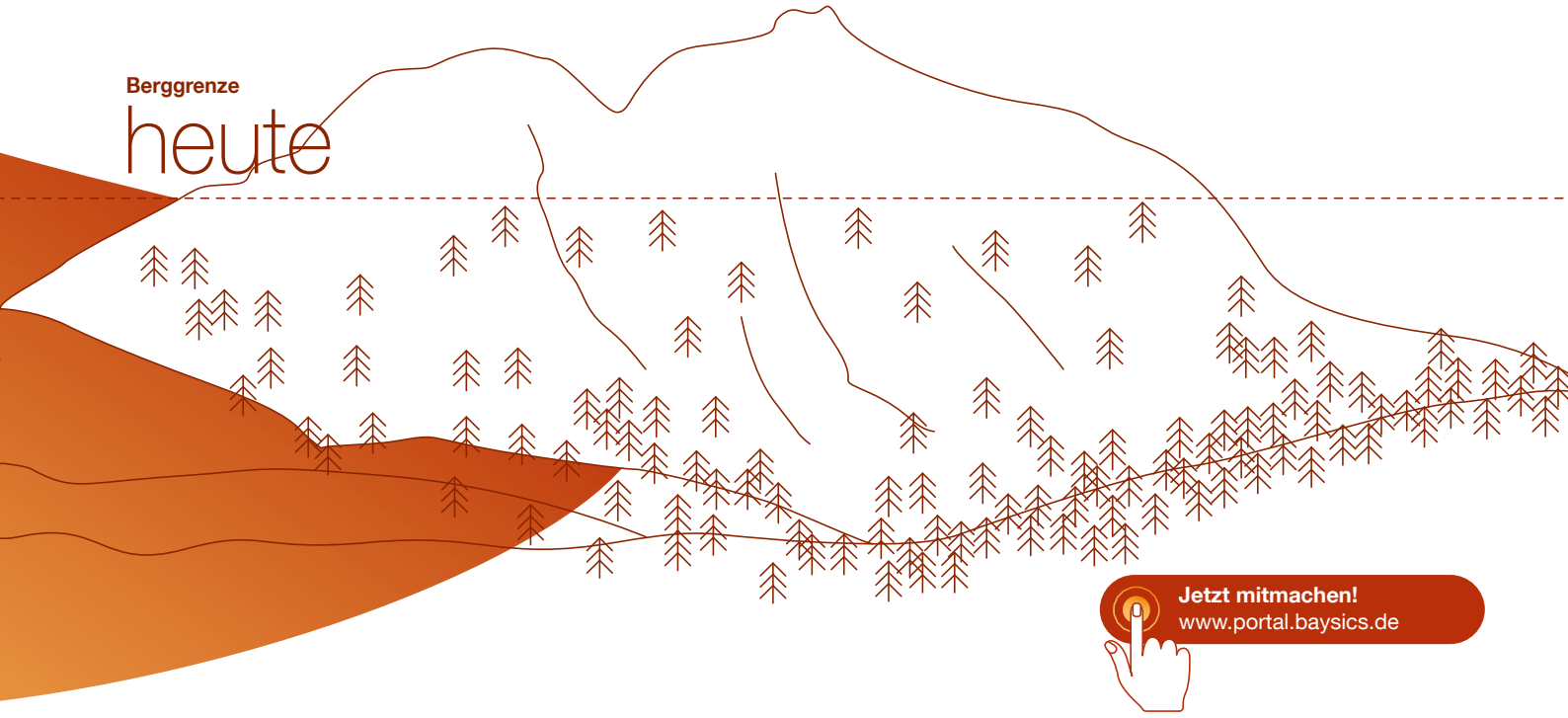
Auch der Bergwald reagiert auf den Klima-wandel



„Was wir jetzt brauchen, sind möglichst viele aktuelle Daten.“

Jörg Ewald,
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

Wer in den Alpen wandert, schätzt neben der körperlichen Bewegung vor allem das Naturerlebnis. „Besonders der Wechsel zwischen Wald und Fels macht den ästhetischen Reiz dieser Berglandschaft aus“, sagt Jörg Ewald, Professor für Wald und Forstwirtschaft an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf. In welcher Höhe noch Bäume und Sträucher wachsen können und wo nicht mehr, bestimmen die klimatischen Bedingungen. Weil diese sich infolge des Klimawandels verändern, rücken weltweit immer mehr Pflanzenarten aus tieferen Lagen in die Gipfelregionen der Hochgebirge nach.
Betrifft dieser Wandel auch den Bergwald in den Bayerischen Alpen? Wachsen auch dort die Buchen und Fichten, Latschen und Zirben weiter oben als früher? In welchen Höhen unsere heimischen Gehölze Mitte des 19. Jahrhunderts – also vor Beginn des Klimawandels – überleben konnten, hat der Münchner Botaniker Otto Sendt-



ner im Auftrag des bayerischen Königs Max II präzise dokumentiert. „Damals stand die höchste Zirbe in den Berchtesgadener Alpen auf 2.041 und eine Fichte auf 1.860 Metern Höhe. Wir haben insgesamt 441 dieser alten Angaben überprüft und digitalisiert. Sie dienen als Referenzwerte zum Vergleich mit den heutigen Vorkommen. Was wir jetzt brauchen, sind möglichst viele aktuelle Daten“, erklärt Ewald. Und so kam dem passionierten Bergsteiger die Idee für ein Citizen Science-Projekt, das die Höhengrenzen von insgesamt 22 Gehölzarten neu vermessen soll.

Bergfexe sind prädestiniert für diese Aufgabe. Denn die meisten interessieren sich für die Vegetation ihrer Wanderziele und können mit etwas Übung Bäume und Sträucher korrekt bestimmen. Ewald erklärt, wie sie dabei vorgehen sollen: „Beim Anstieg konzentriert man sich ja auf die körperliche Leistung und will erst mal auf den Gipfel. Aber beim Abstieg kann man dann die höchste Latsche, Grünerle oder Vogelbeere notieren – zusammen mit den GPS-Daten des Fundorts.“ Idealerweise sollte man noch zwischen dem höchstgelegenen Keimling, Strauch und Baum einer Art unterscheiden und Fotos davon machen, wünscht sich der BAYSICS-Forscher: „So können wir das Alter und damit den Besiedlungszeitpunkt abschätzen.“

Schon im Sommer 2020 speisten etliche Bergsteigerinnen und Bergsteiger sowie Studierende ihre Beobachtungen in das BAYSICS-Portal ein. Demnach liegen die Baumgrenzen der meisten Arten heute rund 150 Meter höher als zu Sendtners Zeiten. Ewald erhofft sich von den neuen Daten Input für weitere spannende Forschungsfragen: „Niemand weiß, wie sich der Bergwald als Ganzes verändert, wenn einzelne Gehölze dem Konkurrenzdruck der von unten nachrückenden Arten ausgesetzt sind.“

■ *Monika Offenberger*

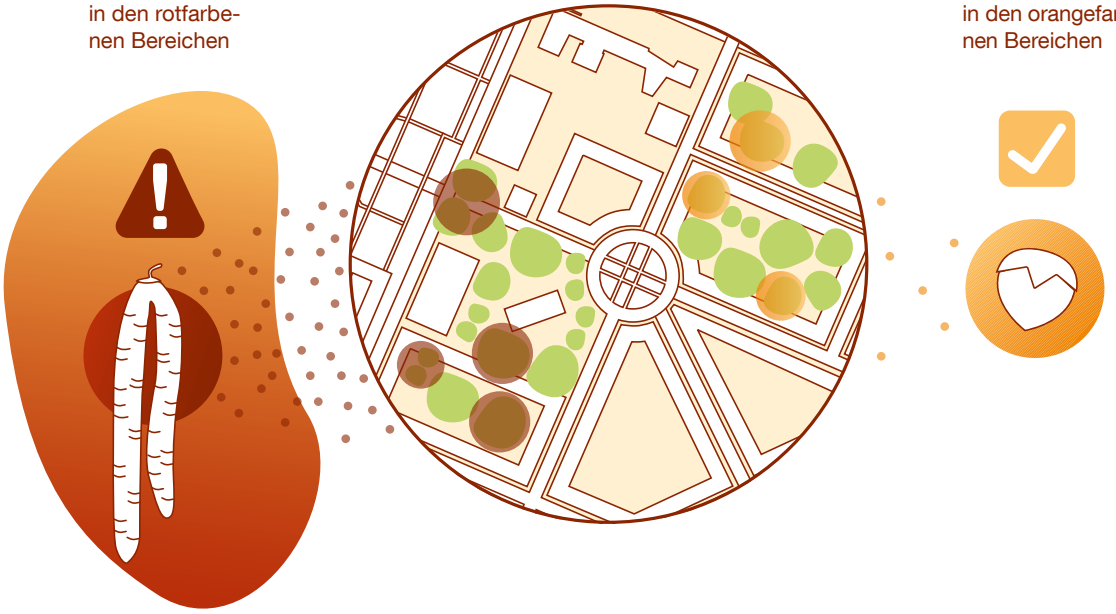
Grafiken: ediundsepp

„Wir fragen von unseren Citizen Scientists nicht nur Daten ab, sondern geben ihnen wichtige Rückmeldungen und wissenschaftliche Einblicke.“

Susanne Jochner-Oette,
Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt

Hohe Intensität
von Birkenpollen
in den rotfarbenen Bereichen

Geringe Intensität
von Haselpollen
in den orangefarbenen Bereichen



Jetzt mitmachen!
www.portal.baysics.de

Klimawandel
Frühe Blüte
Bergwald
Heuschnupfen
Tiere in der Stadt

Dem Heuschnupfen aus dem Weg gehen

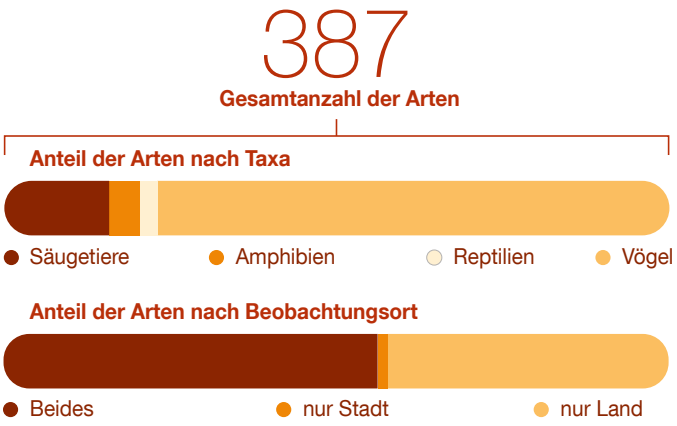
Für Menschen mit einer Pollenallergie beginnt der Frühling häufig schon im Januar, wenn die Hasel ihren Blütenstaub entlässt. Ihr folgen weitere Gehölze, und ab April verleiden Gräser und Kräuter Allergiegeplagten den Aufenthalt im Freien. Ihre Zahl steigt stetig an und liegt derzeit bei zirka 15 Prozent der Bevölkerung. Zu dieser Entwicklung trägt auch der Klimawandel bei, erklärt Susanne Jochner-Oette, Professorin für Physische Geographie, Landschaftsökologie und nachhaltige Ökosystementwicklung an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt: „Bei höheren Temperaturen werden die Pollenkörner in größeren Mengen produziert und früher freigesetzt. Zudem enthalten sie meist mehr Allergene und wirken deshalb aggressiver."

Ein Citizen Science-Projekt soll diese Zusammenhänge untersuchen und Betroffenen nahebringen. „Wir wollen die Menschen dafür sensibilisieren, warum heute Pollen früher und auch oft in größeren Mengen in der Luft vorkommen – und wie sie sich besser davor schützen können", sagt die Geographin und lädt alle Interessenten dazu ein, ihre Beobachtungen via BAYSICS-App mit Gleichgesinnten zu teilen. Wo und wann blühen in meiner Stadt oder Gemeinde Birke, Hasel, Amper, Spitzwegerich und Gräser? Rufen sie Allergiesymptome bei mir hervor – und falls ja, welche? Eine Zuordnung von Gewächsen und Beschwerden kann Betroffenen helfen, bestimmte Orte gezielt zu meiden. Zudem ermöglicht es die App, eigene Befunde mit bekannten Daten abzugleichen, etwa mit dem bayernweiten Blühbeginn bestimmter Pflanzen oder mit Pollendaten vergangener Jahre.

„Wir fragen von unseren Citizen Scientists nicht nur Daten ab, sondern geben ihnen wichtige Rückmeldungen und wissenschaftliche Einblicke. Das unterscheidet unser Projekt von bestehenden Angeboten", betont Jochner-Oette und beklagt weit verbreitete Fehlinformationen: So würden über die Medien häufig pauschale Ratschläge über Lüftungszeiten ausgesprochen, die einer wissenschaftlichen Grundlage entbehren. „Durch das BAYSICS-Projekt erhoffen wir uns genauere Daten, um Wissenslücken zu schließen und künftig fundiertere Empfehlungen aussprechen zu können", sagt die Professorin. Einen wichtigen Beitrag liefert ihre Doktorandin Johanna Jetschni, die seit zwei Jahre in und um Ingolstadt Pollenproben sammelt und analysiert. Erste Auswertungen zeigen, dass die Luft im ländlichen Bereich deutlich mehr Gräserpollen enthält als im Stadtzentrum und in Wohngebieten. Dagegen folgt der Tagesverlauf der Pollenbelastung überall demselben Muster: Sie erreicht zwischen 12 und 14 Uhr ihren Höchstwert.

■ *Monika Offenberger*

Grafiken: ediundsepp



Beobachtungen von Tieren in Nürnberg und Umgebung (50 km um das Stadtzentrum). Mehr als die Hälfte aller Arten leben sowohl im Umland als auch in der Stadt (Daten: Global Biodiversity Information Facility).

Jetzt mitmachen!
www.portal.baysics.de

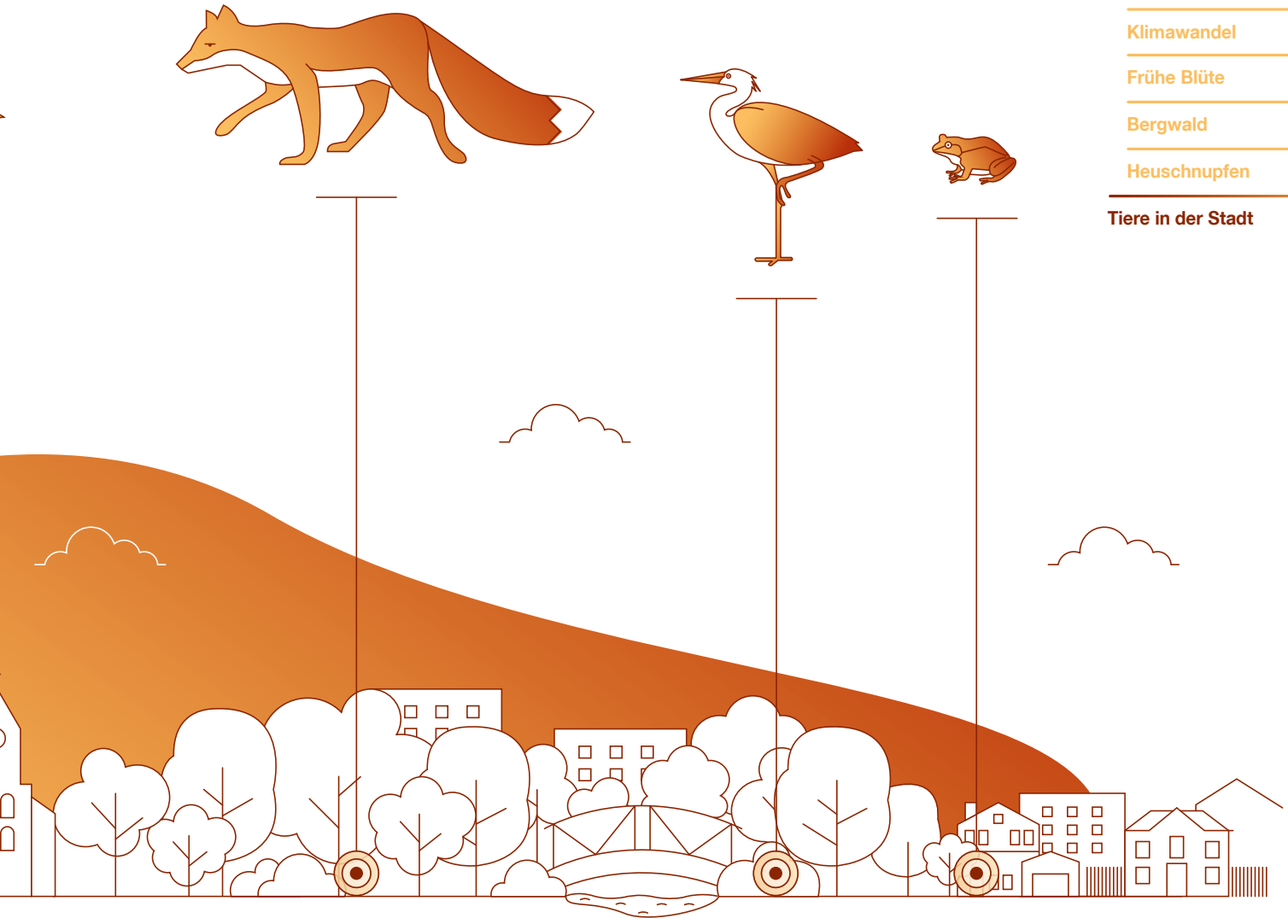
Tiere in der Stadt

„Wer eigene Befunde […] einspeist, kann sie mit bestehenden Datensätzen abgleichen.“

Wolfgang Weisser, TUM

Städte sind nicht nur für Menschen attraktiv. Mehr als hundert Vogelarten brüten allein im Stadtgebiet von München, Fuchs und Biber haben dort Reviere, acht verschiedene Fledermäuse jagen in Parks und Hinterhöfen nach Insekten. „Viele Tiere finden in der Stadt Lebensräume. Und für viele Menschen ist die Stadtnatur die einzige Natur, mit der sie im täglichen Leben in Kontakt kommen“, sagt Wolfgang Weisser, Professor für Terrestrische Ökologie an der TUM. Dennoch sei die Stadtplanung nicht gut ausgerichtet auf das Zusammenleben von Mensch und Tier, so der Biodiversitätsforscher: „Die Stadt wird immer stärker verdichtet, Grünflächen gehen verloren. Viele Gebäude werden – auch als Antwort auf den Klimawandel – so saniert, dass Spatzen und Mauersegler keine Nistmöglichkeiten mehr finden. Dadurch geht mehr und mehr Lebensraum für die Tiere verloren.“

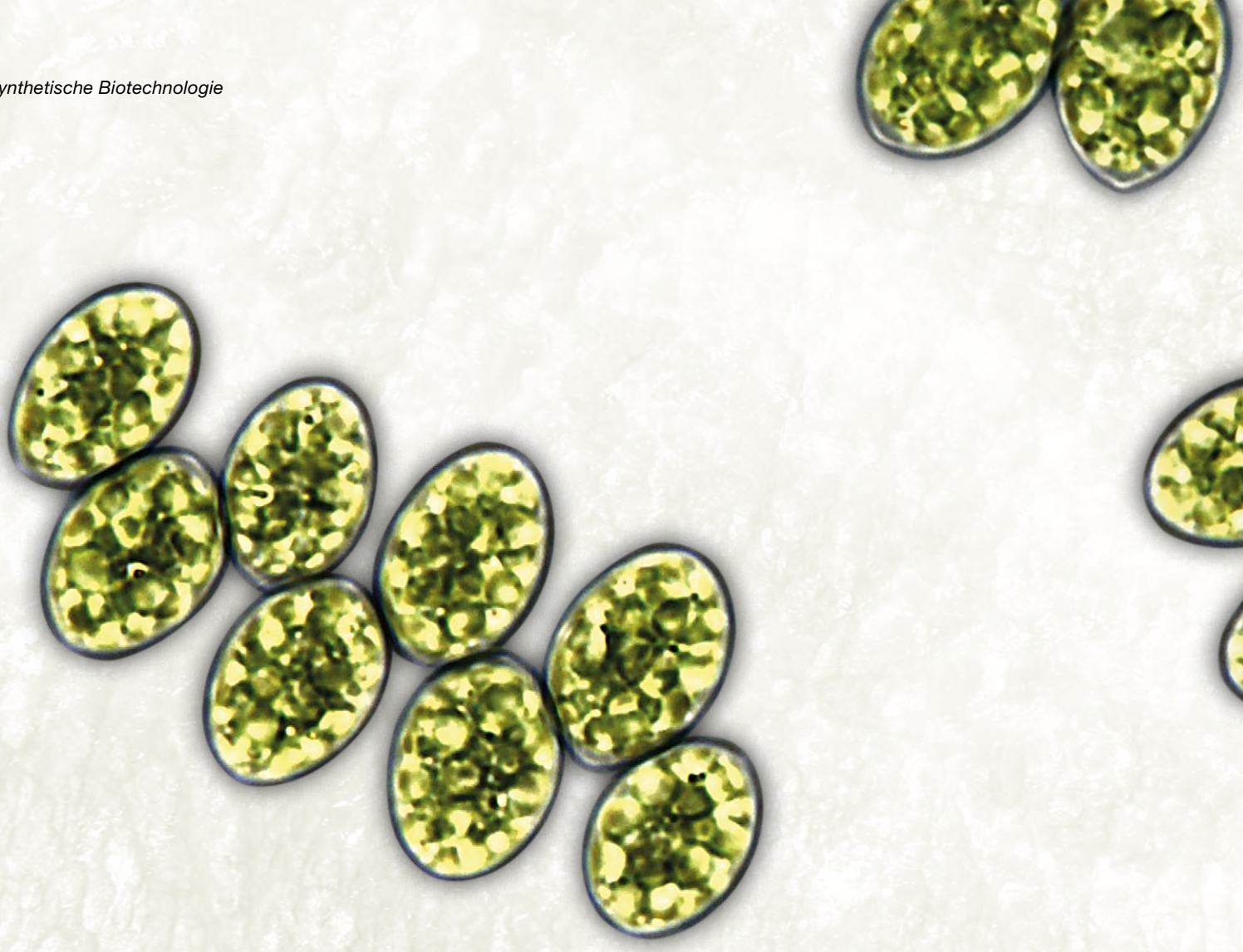
Klimawandel
Frühe Blüte
Bergwald
Heuschnupfen
Tiere in der Stadt



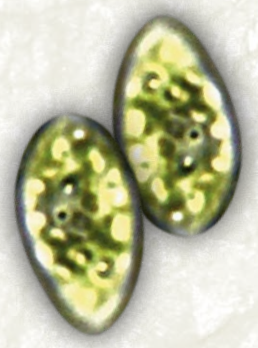
Grafiken: ediundsepp (Daten: TUM)

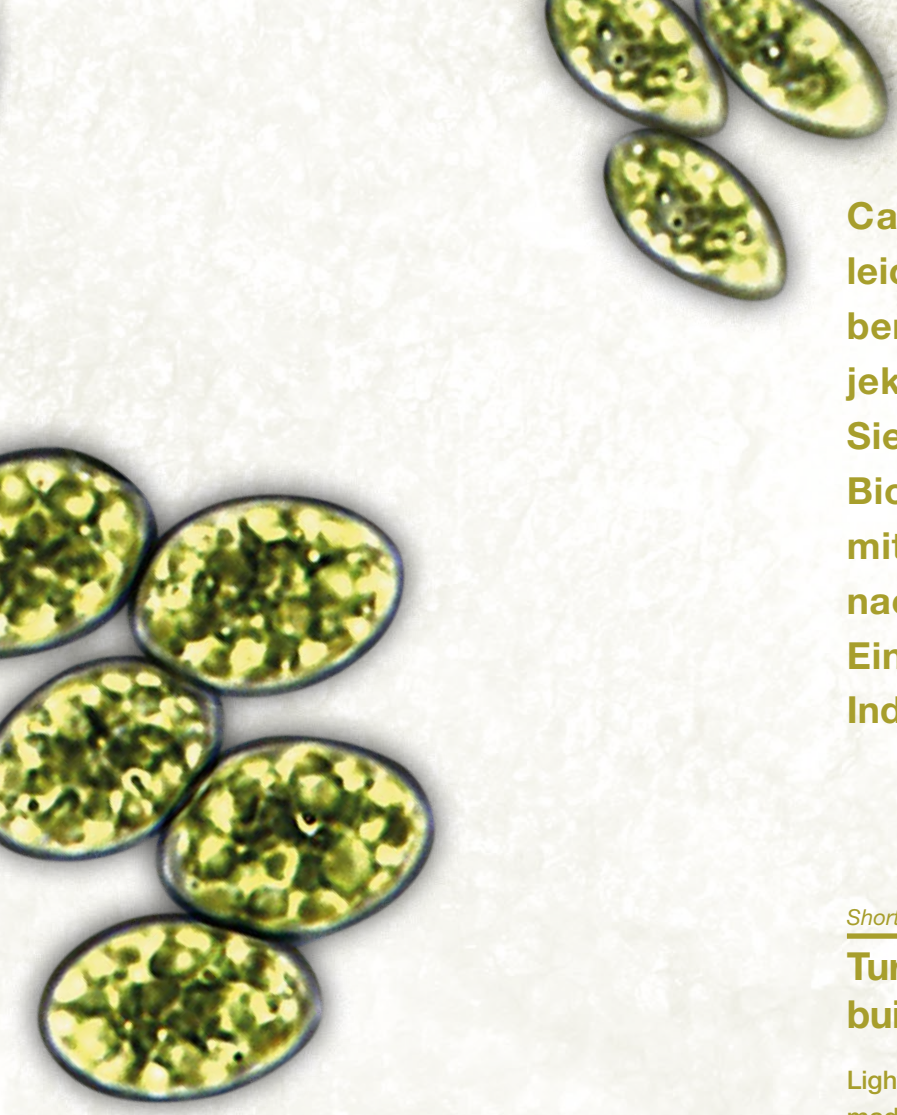
Die Verantwortlichen in Wohnbaugesellschaften und Planungsbüros sind sich meist nicht bewusst über die Folgen ihres Tuns. Das ergab eine bundesweite Befragung unter Mitwirkung von Weissers Team. „Viele würden die Bedürfnisse von Tieren stärker berücksichtigen, wenn sie nur wüssten, wie. Und sie fragen sich, ob die Bewohnerinnen und Bewohner da mitmachen“, so der Münchner Biologe. Deren Einstellungen will der Forscher nun ergründen: „Wir wollen wissen, welche Tiere die Leute in ihrer Nähe mögen und welche nicht. Und ob sie Maßnahmen zum Schutz bestimmter Arten in ihrer Umgebung unterstützen.“ Eine Teststudie mit rund tausend Studierenden hat gezeigt, dass die Zu- und Abneigung gegenüber bestimmten Tieren auch von Geschlecht und Herkunft der Befragten abhängt. Den unterschiedlichen Motivationen soll nun ein Citizen Science-Projekt weiter auf den Grund gehen. Zudem soll es Bürgerinnen und Bürger zur Auseinandersetzung mit ihrer Umwelt anregen. „Wir fragen gezielt nach bestimmten Tieren wie Igel, Eichhörnchen oder Taubenschwänzchen. Wann und wo wurden sie gesichtet? Wer eigene Befunde in das BAYSICS-Portal einspeist, kann sie mit bestehenden Datensätzen abgleichen. So können auch Laien verstehen lernen, wie der Klimawandel und die bauliche Verdichtung der Städte das Leben von Tieren beeinflussen“, erklärt Weisser. Auch die Selbstauskünfte sollen letztlich den Mitwirkenden zugutekommen. Sie sollten dabei helfen, Stadtplanungsprozesse künftig stärker an die Bedürfnisse von Tieren und Menschen anzupassen, fordert der Professor: „Im Sinne der Umweltgerechtigkeit muss jeder Mensch die Chance haben, Natur dort zu erleben, wo er wohnt und arbeitet, also auch in der Stadt.“ ■

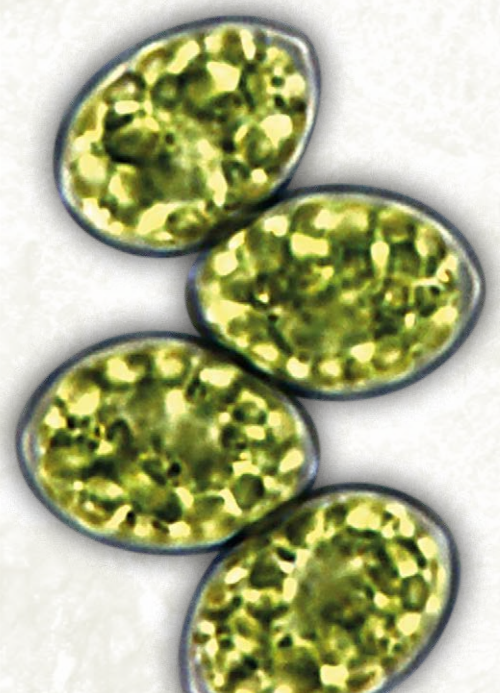
Monika Offenberger



Leichtbau-werkstoffe aus Algen







Carbonfaser-Bauteile sind extrem leicht und stabil. Für ihre Produktion benötigt man bislang Erdöl. Im Projekt Green Carbon stellt der Werner Siemens-Lehrstuhl für Synthetische Biotechnologie der TUM zusammen mit Partnerfirmen das Material jetzt nachhaltig aus Algen und Hefen her. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Industrialisierung der Methode.

Short version

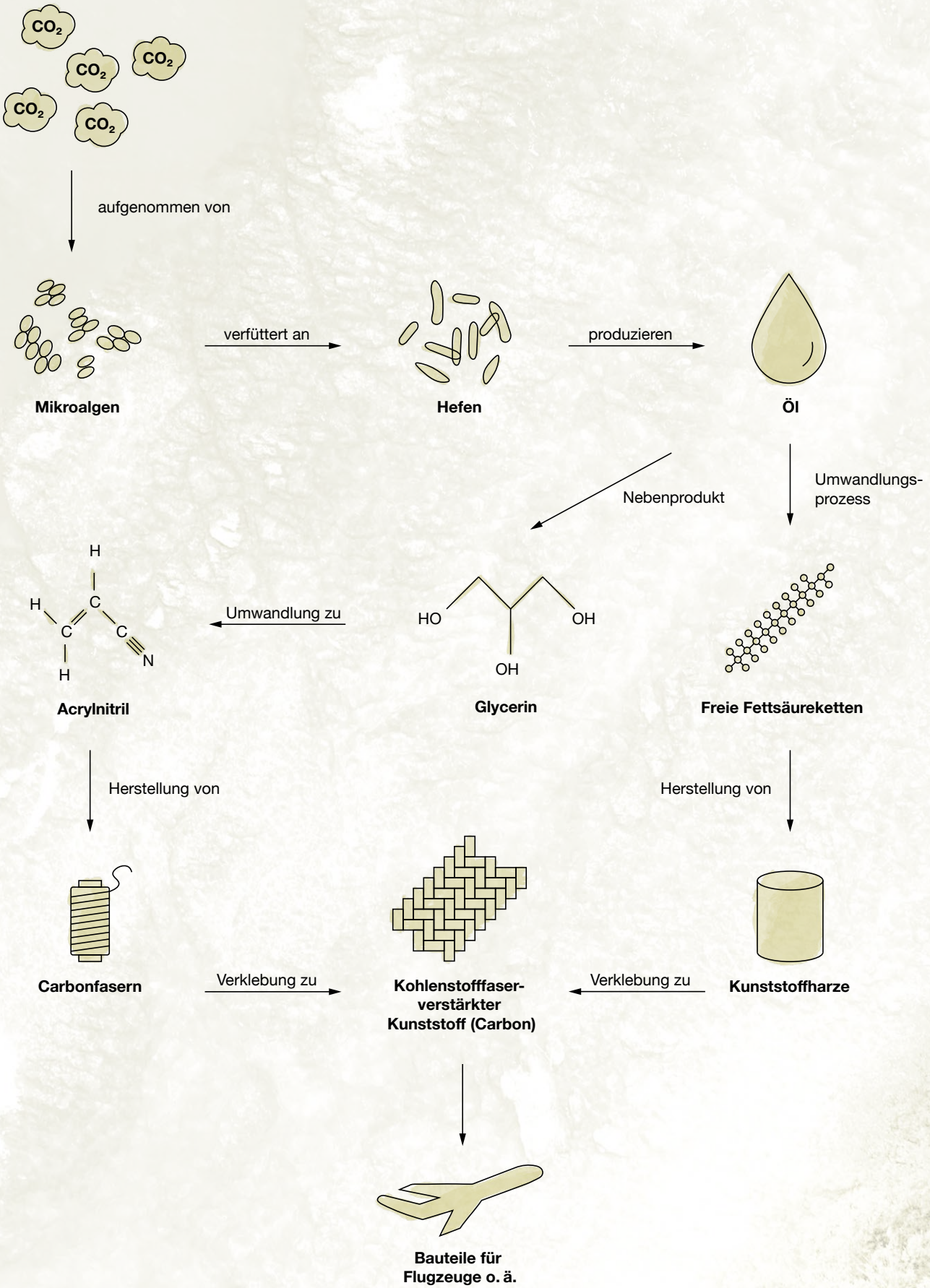
Turning algae into lightweight building materials

E

Lightweight carbon fibre reinforced polymers are usually made from oil. Within the context of the Green Carbon project, TUM biotechnologist Prof. Thomas Brück is now working on obtaining the raw materials for CFRPs entirely from algae and yeast. Based on a process developed at TUM, algae are cultivated and the algal biomass then fed to special oil-producing yeasts. The oil is then broken down into its constituent parts of glycerol and long chain fatty acids. The Green Carbon project makes use of both to produce green carbon fibre composites. The glycerol is transformed into acrylonitrile, from which carbon fibres can be manufactured. The fatty acids are processed to produce resins, which bond the carbon fibres in producing the required components. The Green Carbon project is also pioneering the process of combining thin layers of carbon fibre composites with thin layers of stone. These lightweight, very robust carbon fibre stone composites are especially suitable for use in housing construction, where they can replace heavy steel beams, for example. □

Link
www.department.ch.tum.de/wssb

Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM)


CO_2
CO_2
CO_2
CO_2
CO_2
aufgenommen von
Mikroalgen
verfüttert an
Hefen
produzieren
Öl
Nebenprodukt
Umwandlungs-
prozess
H
H
C
C
C
N
H
Acrylnitril
Umwandlung zu
HO
OH
OH
Glycerin
Freie Fettsäureketten
Herstellung von
Herstellung von
Carbonfasern
Verklebung zu
Kohlenstofffaser-
verstärkter
Kunststoff (Carbon)
Verklebung zu
Kunststoffharze
Bauteile für
Flugzeuge o. ä.

Manchmal nehmen Forschungsprojekte überraschende Wendungen. Vor allem, wenn man den Mut hat, spontan neue Wege einzuschlagen. Als Prof. Thomas Brück vor sieben Jahren begann, Algen zu züchten, wollte er daraus eigentlich hochwertiges Biokerosin für Flugzeuge herstellen. Seine Idee klang verwegen. Er wollte Algen züchten, um die Algenmasse als Nahrung für spezielle Hefen zu nutzen, die Öl produzieren. Das Öl aus den Hefen sollte dann zu Biokerosin weiterverarbeitet werden. Und so baute er in den folgenden Jahren am TUM Standort in Ottobrunn eine Art Hightech-Gewächshaus auf, in dem die Algen in großen Becken heranwachsen, beleuchtet von einer weltweit einzigartigen Lichtanlage, die die Sonnenstrahlung in verschiedenen Regionen und Klimazonen der Erde nachahmt. Die Experimente waren ein Erfolg: In langen Testreihen fanden Brück und sein Team die idealen Wachstumsbedingungen für die Algen und die Hefen. „Wir haben einen Prozess entwickelt, in dem die Ölhefen innerhalb von vier bis fünf Tagen Algenmasse in Öl umwandeln“, sagt Brück. „Tatsächlich können wir das Öl anschließend zu hochwertigem Kerosin weiterverarbeiten.“

Glycerin als Rohstoff

Algen nehmen Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und verarbeiten es zu Biomasse, die reich an energiereichen Zuckern ist. Die Hefen wandeln die Masse in Öl um. Das ist ausgesprochen nachhaltig. Brück hätte es dabei belassen können. Doch eines trieb ihn um: Bei der Herstellung von Kerosin aus Öl entsteht Glycerin. Sollte die Ölindustrie tatsächlich künftig in großem Stil in die Biokerosin-Produktion einsteigen, überlegte Brück, würden enorme Mengen von Glycerin anfallen. Immerhin entstehen pro Tonne Biosprit rund 100 Kilogramm Glycerin. „So viel Glycerin benötigt die Industrie aber gar nicht“, sagt er. „Glycerin wird in der Kosmetik- und Pharmaindustrie verwendet. Aber bei weitem nicht in den Mengen, die eine Biokerosin-Produktion liefern würde.“ Was also tun mit dem überschüssigen Glycerin? Brück, Leiter des Werner Siemens-Lehrstuhls für Synthetische Biotechnologie, hatte die zündende Idee: Glycerin lässt sich über einige wenige chemische Reaktionen in eine ausgesprochen interessante chemische Verbindung überführen, in Acrylnitril, jene Substanz, aus der Carbonfasern hergestellt werden. Carbonfasern sind ein Zukunftswerkstoff. Seit vielen Jahren schon werden diese mit Kunstharzen zu sehr haltbaren und vor allem leichten carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CfK) verarbeitet. Die CfK kommen vor allem in der Flugzeugindustrie und bei der Herstellung von Windrädern zum Einsatz – der Airbus A350 zum Beispiel besteht bereits zu mehr als 50 Prozent aus CfK. Die leichten CfK senken den Verbrauch der Flugzeuge deutlich. Für die Produktion von einer Tonne Carbonfasern würde man 9,7 Tonnen Glycerin benötigen. ▷

„[Mit diesem Prozess] erhalten wir am Ende hundertprozentig biologisch hergestellte Carbonfaserkomposite auf der Basis von CO_2.“

Thomas Brück

Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM)

Hundertprozentig grüne Bauteile

Inzwischen ist Brück von der Anfangsidee einer Kerosinproduktion fast gänzlich auf den CfK-Pfad eingeschwenkt. Weil sich nicht nur das Glycerin dafür nutzen lässt, sondern das ganze Hefeöl. Öle bestehen aus Fettsäureketten, die wie lange Schnüre nebeneinander an einem Glycerinmolekül hängen. Durch eine chemische Reaktion lassen sich die Fettsäuren vom Glycerin trennen. Ursprünglich hatte Brück diese Fettsäuren für das Kerosin vorgesehen. „Fettsäuren lassen sich aber auch chemisch modifizieren und zu Kunststoffen verarbeiten“, sagt er. „Beispielsweise zu jenen Kunststoffharzen, die man für die Produktion von carbonfaserverstärkten Kunststoffen benötigt.“ Das ist der Clou: Brück züchtet Algen, aus denen sich mithilfe der Ölhefen nicht nur Carbonfasern, sondern zugleich Kunststoffe für CfK produzieren lassen. „Damit erhalten wir am Ende hundertprozentig biologisch hergestellte Carbonfaserkomposite auf der Basis von CO_2.“ Um grüne CfK künftig im industriellen Maßstab und vor allem wirtschaftlich herzustellen, benötigt man ausreichend große Algenfarmen. Sinnvoll wäre es, sie in der sonnigen Mittelmeerregion aufzubauen. Mindestens vier Quadratkilometer Fläche sollte eine solche Algenfarm haben, schätzt Brück.

12 Millionen Euro für das Industrieprojekt „Green Carbon“

Den Weg dahin soll jetzt das Projekt Green Carbon ebnen, in dem Brück zusammen mit Industriepartnern die Produktion der Öko-Carbonbauteile aus Algen zu einem industrietauglichen Herstellungsprozess weiterentwickelt. Das Projekt wird mit 12 Millionen Euro vom Bundesforschungsministerium gefördert. Mit dabei ist unter ande-

Algenkultivierung in geschlossenen Photobioreaktoren im Labormaßstab. Die hier gewonnenen technischen Daten bilden die Grundlage für die nächsten Schritte hin zur Produktion in größerem Maßstab im TUM Algentechnikum in Ottobrunn.

Glycerin

rem der Carbonfaser-Hersteller SGL Carbon, der seine CfK-Expertise einbringt. „Das Acrylnitril, das wir aus Glycerin gewinnen, ist dasselbe Molekül wie jenes, das man normalerweise aus Erdöl erzeugt – insofern hat es dieselbe Qualität“, sagt Brück.

Um ein Verfahren aus der Universität in die Anwendung und vom Pilotprojekt-Maß in die industrielle Dimension zu übertragen, müssen die Anlagen größer werden und höhere Massenströme verarbeiten – im Vergleich zur Forschungsanlage mindestens das 50.000- bis 100.000-fache. Partner in Green Carbon ist deshalb auch das Beratungsunternehmen AHP. Die Experten analysieren im Computermodell, wie groß die Massenflüsse einer industriellen Produktionsanlage sind, wie viel Energie oder wie viel Platz sie benötigt. Ihre Kalkulation bildet die Grundlage für eine künftige Finanzierung einer solchen Anlage. ▷

Bildquelle: Andreas Heddergott, Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM)

Die nächste Stufe der Entwicklungen im Bereich Algen-Biotechnologie. Am Werner Siemens-Lehrstuhl für Synthetische Biotechnologie beschleunigt eine automatisierte Screening Platform die Auswahl der besten ölproduzierenden Algenstämme.

Carbonfasern

Prof. Thomas Brück

Prof. Thomas Brück ist die Praxisrelevanz seiner Forschung wichtig. Daher engagiert er sich in interdisziplinären Projekten, an denen die Industrie beteiligt ist. Er wurde 1972 in Köln geboren und ging für sein Studium nach Großbritannien, wo er Chemie, Biochemie und Betriebswissenschaft studierte. An der Keele University in Stoke-on-Trent beendete er dann sein Masterstudium in Molekularmedizin. 2002 erlangte er den britischen Doktorgrad in „Philosophy“ an der University of Greenwich für seine Arbeiten an biochemischen Reaktionen wichtiger Enzyme. 2006 kehrte er nach Deutschland zurück und ging dort in die Industrie. 2010 wurde er Leiter der Forschungsgruppe für Industrielle Biokatalyse an der TUM. Seit 2018 hat er den Werner Siemens-Lehrstuhl für Synthetische Biotechnologie inne.

Neuartige Produkte aus Carbonfaserstein

Inzwischen wurde Brück für seine Arbeit mit dem ersten Nachhaltigkeitspreis der TUM ausgezeichnet. Vor einiger Zeit meldete sich die Firma TechnoCarbon Technologies (TCT) mit einer verblüffenden Idee bei ihm: einer Verschmelzung von Carbonfaserkompositen mit Stein. Hier werden Carbonfaserkomposite mit hauchdünn geschnittenen Schichten aus Hartgestein, wie zum Beispiel Granit, kombiniert. Erste Versuche zeigten, dass das tatsächlich funktioniert: Das Team von Brück verklebte zusammen mit den TCT-Experten millimeterdünne Granitschichten mithilfe der aus Algen produzierten Kunststoffharze mit Carbonfaserkompositstreifen zu einem äußerst biegsamen und widerstandsfähigen Bauteil. Die Ergebnisse waren so vielversprechend, dass TCT zum Partner im Green Carbon-Projekt wurde. Inzwischen ist ein Doppel-T-Träger aus Carbonfasern und bayerischem Granit entstanden, der nur halb so schwer wie ein herkömmlicher Träger aus Stahl ist. Solche Bauteile dienen im Hausbau zum Abstützen von Geschossdecken. Je nach Anwendung und Tragkraft benötigt man mit Carbonfaserstein zwei- bis viermal weniger Stahl oder Zement. Inzwischen hat Brück zusammen mit TCT die Technologie nach Begutachtungen in mehreren internationalen Fachmagazinen vorgestellt. Sogar der Weltklimarat zählt die Carbonfasersteinkomposite in einem seiner Berichte zu den vielversprechenden Beiträgen, mit denen die Industrie die CO_2-Emission reduzieren kann. „Die Stahl- und Zementherstellung gehören zu den klimaschädlichsten Industriezweigen überhaupt“, erklärt Brück. „Wenn es uns gelingt, Carbonfasersteinkomposite als alternativen Baustoff zu etablieren, ließe sich der jährliche Kohlendioxidausstoß der Stahl- und Zementindustrie nicht nur neutralisieren, sondern sogar rückgängig machen.“

Kohlendioxid für lange Zeit binden

Denn das sei das wichtigste Ziel des Green Carbon-Projektes: das Klimagas Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu holen, dauerhaft in Form von Carbon zu speichern und so dem Klimawandel entgegen zu wirken. Entweder in Form von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CfK) für Autos, Flugzeuge oder Windräder oder gar als Carbonfasersteinkomposite für Gebäude. Jährlich setzt die Verbrennung von Kohle, Erdgas und Erdöl rund 37 Milliarden Tonnen Kohlendioxid frei. Etwa ein bis zwei Gigatonnen pro Jahr könnte allein eine industrielle CfK-Produktion aus Algen schlucken – immerhin. „Mir geht es darum, das Kohlendioxid langfristig der Erdatmosphäre zu entziehen, denn nur dann liefert das Verfahren wirklich einen Beitrag zum Klimaschutz“, sagt Brück. Carbonfasersteinkomposite könnten in Gebäuden 100 Jahre und weit darüber hinaus genutzt werden.

Die Lebensdauer von CfK in Flugzeugen oder ähnlichen Anwendungen ist natürlich kürzer, weil die Fahrzeuge irgendwann ausgemustert werden. Aber Carbonfasern lassen sich recyceln, wenn zum Beispiel ein Flugzeug nach 25 Jahren verschrottet wird. Etwa zwei- bis dreimal ist ein Recycling möglich. Danach ist Schluss, weil die Fasern beim Recycling brechen und schließlich zu kurz sind. Auch zur Lösung dieser Frage hat Brück bereits erste Ideen, denn: „Grüne Carbonfaserbauteile sind eine ungemein nachhaltige und klimafreundliche Alternative. Wann sollten wir sie auf die Straße bringen, wenn nicht jetzt.“

Tim Schröder

„Carbonfasersteinkomposite als alternatives Material zu Stahl und Zement könnten die Kohlenstoffemissionen dieser Industrie mehr als neutralisieren.“

Thomas Brück

Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM)

Die Idee hinter Green Carbon:
CO_2 wird der Atmosphäre entzogen und permanent in Carbonfasern gespeichert. Grüne CfK können beispielsweise in Flugzeugen, Autos oder Windturbinen eingesetzt werden. Weiterverarbeitet zu Carbonfaserstein können sie eine klimafreundliche Alternative zu Stahl und Zement eröffnen.

Bildquelle: Andreas Heddergott

Link

www.ar.tum.de/en/hk/associate-professorship
www.3fstudio.de

Viele Funktionen, ein Material, ein Prozess

Moritz Mungenast entwirft recyclebare Gebäudefassaden. In seiner Forschungspromotion untersuchte der Architekt, wie sich die traditionelle Bauweise durch 3D-gedruckte Fassaden vereinfachen und verbessern lässt.

Short version

Many Features, One Material, One Process

E

Up until now, the role of digitalization in architecture has been confined to the design process. However, the development of ever-better 3D printers that can produce increasingly large components in full scale is opening up a new area of potential. Dr. Moritz Mungenast has been conducting systematic research in this field as part of his doctoral project entitled “3D Printed Future Facade.” A research fellow at the Associate Professorship of Architectural Design and Building Envelope at TUM, he has been investigating the possibilities for additive manufacturing that 3D printing is offering for the first time. Specifically, he has devised functional geometries and trialed the functional integration of 3D-printed facade elements. He has tested the optical, thermal, and structural properties of an element created by way of a prototype and subjected it to a long-term test at TUM’s solar station. This revealed the possibilities that exist for meeting complex technical and design requirements on an individualized basis using only a single material and a single process. □

Dr. Moritz Mungenast

Dr. Moritz Mungenast, Jahrgang 1974, studierte Architektur in Kaiserslautern, Lausanne und Barcelona, bevor er 2003 an der TUM sein Diplom machte. Er war u. a. für Auer Weber in München sowie für Shigeru Ban in Paris tätig. 2009 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudelehre und Produktentwicklung der TUM, seit 2010 am Lehrstuhl für Entwerfen und Gebäudehülle sowie am Lehrstuhl Emerging Technologies. 2014 initiierte und leitete er die Forschungsinitiative „3d-printed envelopes“ parallel zu seiner 2019 abgeschlossenen Promotion. 2018 war er Mitgründer des Start-ups 3F Studio.

Was ist die Grundidee Ihres Forschungsprojektes?

Die Ausgangsfrage lautet: Kann man mittels 3D-Druck eine leistungsfähige und funktionsintegrierte Fassade herstellen, die obendrein recyclebar ist? Am Beispiel der Fassade zeige ich erweiterte Möglichkeiten des 3D-Drucks für eine 1:1-Anwendung in der Architektur auf. Ein Schwerpunkt liegt auf der Integration verschiedener Funktionen in die gedruckte Fassade. Daraus ergeben sich weitere Fragestellungen. Etwa: Wie werden bewegliche Teile gestaltet? Wie sieht beispielsweise eine 3D-gedruckte Tür aus, die sich an eine Freiform anpassen kann? Da es um Architektur geht, spielen neben technischen Gesichtspunkten auch gestalterische eine zentrale Rolle.

Welche Teilaspekte waren zu bearbeiten?

Meine Überlegung war: Wie kann eine Fassade aussehen, die Möglichkeiten des Computational Design und des 3D-Drucks optimal verbindet? Bei gleicher Leistungsfähigkeit soll das Bauen vereinfacht und die digitale Kette zwischen Entwurf und Fertigung geschlossen werden. Das setzt voraus, neue Geometrien zur Erfüllung der Funktionen, sogenannte Funktionsgeometrien, zu entwickeln. Aus einem Blumenstrauß neuer Möglichkeiten galt es diejenigen auszuwählen, die geeignet sind, Teil eines Fassadenelements zu sein. Zunächst wurden einzelne Aspekte wie Dämmung, Sonnenschutz, Belüftung, akustische Streuung und Beweglichkeit, etwa einer Tür, prototypisch per 3D-Druck untersucht. Nach Auswertung der Ergebnisse wurden diese Funktionen in einem funktionsintegrierten Bauteil zusammengeführt. Auch dieses wurde anschließend überprüft und optimiert.

Was bedeutet Funktionsintegration?

Normalerweise ist eine Fassade aus Elementen zusammengesetzt. Da gibt es das Fenster, ein geschlossenes Paneel übernimmt die Dämmung, ein weiteres Element dient dem Sonnenschutz, ein anderes Bauteil stellt die Belüftung sicher und so fort. Im Zusammenwirken dieser Einzelkomponenten werden Funktionen erfüllt. Hier ist die Idee, mittels einer leistungsfähigen Geometrie Funktionen zu integrieren. Der gewünschte Komfort, beispielsweise Dämmung, Belichtung, Eigenverschattung und Belüftung, wird mit einem einzigen Element aus einem Material erreicht, das in einem Prozessschritt hergestellt wird und komplett recyclebar ist.

Was kann eine 3D-gedruckte Fassade, was konventionelle Fassaden nicht können?

Sie soll zunächst einmal all das leisten, was herkömmliche Fassaden auch können. Doch lässt sie sich besser individuell an unterschiedliche Orte und ihre Besonderheiten anpassen. Dann bietet sie einen zirkulären Materialkreislauf. Das bedeutet, die Fassade wird wieder zur Fassade, was im konventionellen Bauen längst nicht erreicht ist. Zudem bietet sie eine große Varianz an Gestaltungsmöglichkeiten.

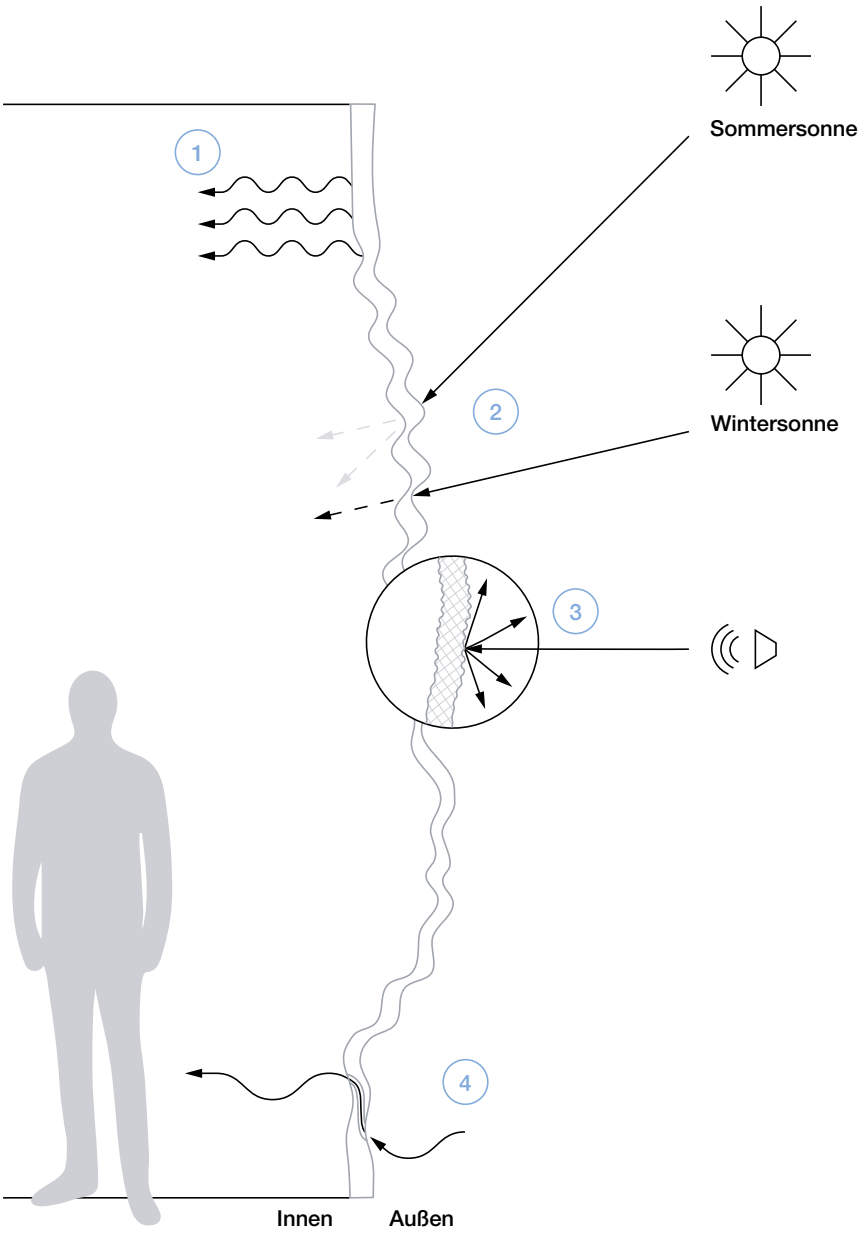
Welche Probleme mussten Sie lösen, um zum Ziel zu gelangen?

Zunächst musste geklärt werden, welche Funktionen sich sinnvollerweise mit dem 3D-Drucker realisieren lassen, welche Parameter informieren die Funktionsgeometrie und wie lassen sie sich zusammen in einem Bauteil herstellen. Dies habe ich in Lehrformaten mit Studenten untersucht. Danach ist die größte Herausforderung noch immer die Umsetzung, die Produktion der Geometrien mit Kunststoff im Maßstab 1:1. Dieser Prozess steht am Anfang. Die 3D-Drucker sind noch nicht so prozesssicher, dass man nur auf den Knopf drücken muss, um ein gleichbleibendes Ergebnis zu erlangen. Das Anschmelzen des Materials, das Drucken und Abkühlen – das sind hochsensible Parameter, die man kontrollieren muss. Hinzu kommt der zeitliche Aspekt: Noch dauert das Drucken sehr lange. Bereits in den Folgeprojekten sind jedoch Toleranzen deutlich besser geworden und die Druckdauer ist wesentlich kürzer. Die Technik entwickelt sich extrem schnell weiter. ▷

3D-Druck eines Fassadenelements (ca. 80 x 90cm) mit einem Großformat Delta Drucker im Technischen Zentrum der Fakultät für Architektur der TUM.

Bildquelle: Peter Langenhahn

Integration verschiedener Funktionen und Eigenschaften in eine gedruckte, aus einem Material bestehende Fassade. Dr. Moritz Mungenast entwarf komplett neue, sogenannte Funktionsgeometrien, um Funktionen wie Sonnenschutz oder Dämmung zu realisieren.



1 Dämmung
2 Sonnenschutz
3 Akustische Streuung
4 Belüftung

Wie fand die Festlegung auf bestimmte Geometrien statt?

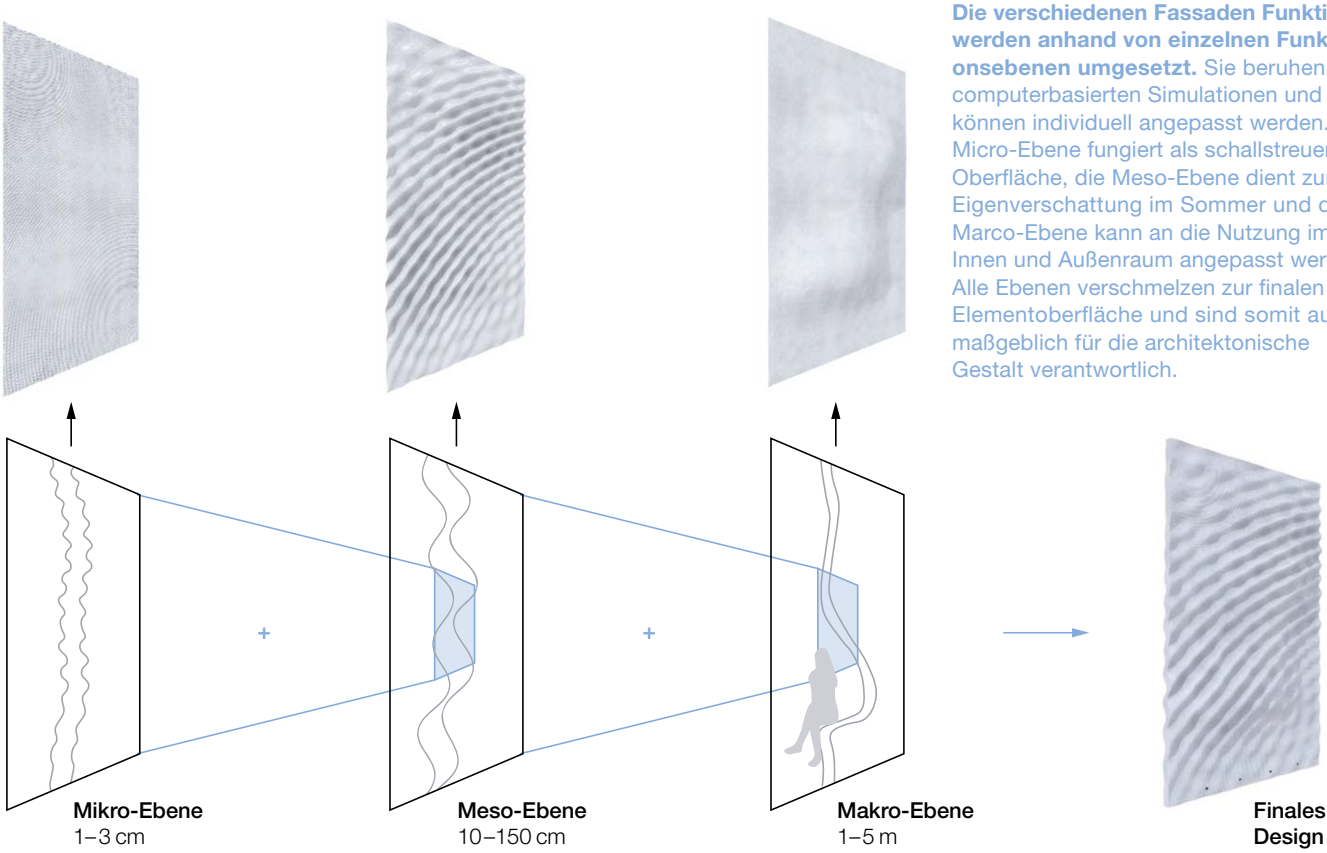
Da gibt es verschiedene Auswahlkriterien: Ist eine Geometrie druckbar? Gibt es ein geeignetes Material? Es ist ein iterativer Prozess: Verschiedene Varianten wurden ausgedruckt, getestet und weiter optimiert. Bei dieser Art von Architektur geht es um Research by Design. Man kommt nur durch Ausprobieren weiter. Valide Resultate erreicht man durch den Übergang zum Originalmaßstab. Schließlich wird der Standort mit seinem Sonnenverlauf simuliert, was entscheidende Auswirkungen auf die Geometrien hat, etwa was die Eigenverschattung angeht.

Was folgt daraus für die Architektur?

Bislang arbeiten wir mit mehr oder minder starren Konstruktionssystemen, die wir für verschiedene Bauaufgaben und Standorte anwenden. Dies führt dazu, dass man sich oft mit Kompromisslösungen begnügen muss. Man nutzt Systeme und Module, die überall mehr oder minder gut passen. Computational Design erlaubt es uns, passgenaue und komplexe Lösungen für spezielle Anforderungen und den speziellen Ort zu entwickeln und sie mittels additiver Fertigung effektiv umzusetzen. ▷

„Die Entwicklung neuer Materialien sowie eines geschlossenen Materialkreislaufs für eine transparente oder lichtdurchlässige Fassade oder Gebäudehülle bietet großes Potenzial.“

Moritz Mungenast



Die verschiedenen Fassaden Funktionen werden anhand von einzelnen Funktionsebenen umgesetzt. Sie beruhen auf computerbasierten Simulationen und können individuell angepasst werden. Die Micro-Ebene fungiert als schallstreuende Oberfläche, die Meso-Ebene dient zur Eigenverschattung im Sommer und die Marco-Ebene kann an die Nutzung im Innen und Außenraum angepasst werden. Alle Ebenen verschmelzen zur finalen Elementoberfläche und sind somit auch maßgeblich für die architektonische Gestalt verantwortlich.

Grafiken: ediundsepp (Quelle: M. Mungenast); Bildquelle: Peter Langenhahn

Was sind Ihre nächsten Schritte?

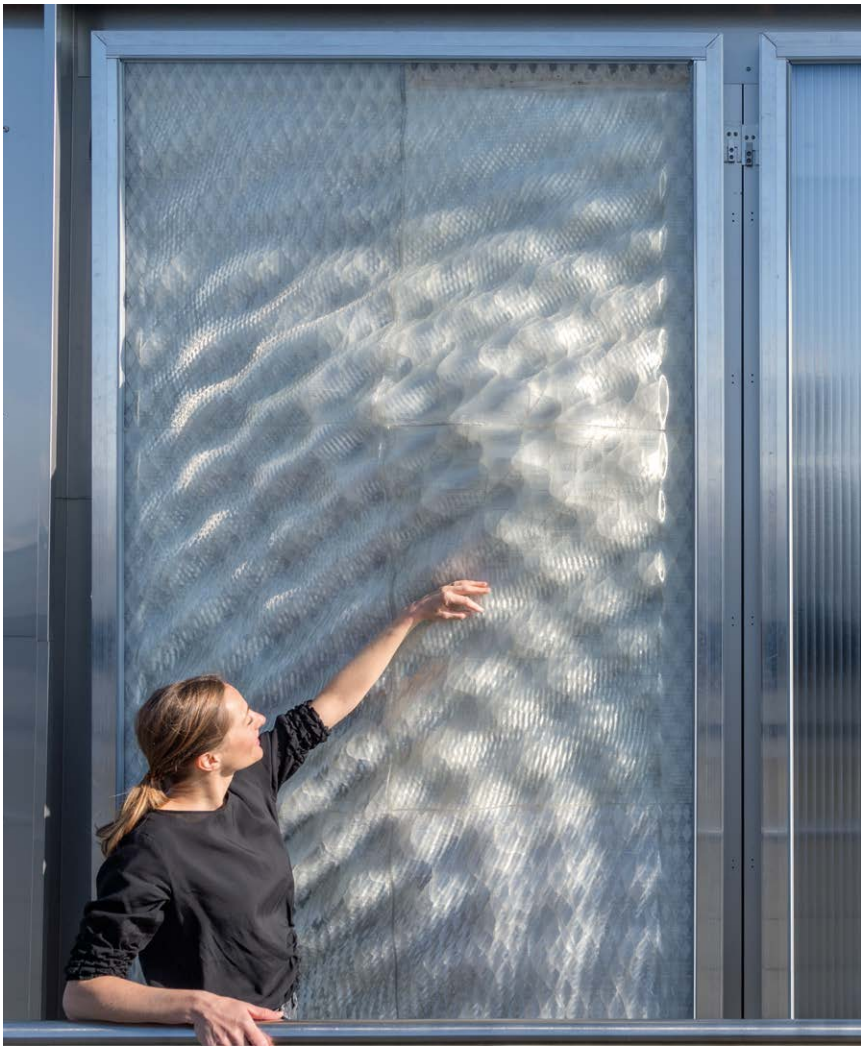
Die übergreifende Motivation ist, einen Beitrag für die zukünftigen globalen Bauaufgaben zu leisten. Für Gebäudekonstruktionen gibt es bereits Lösungen aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, aber bei lichtdurchlässigen Fassaden sind wir noch am Anfang. Die Aufgabe, neue Materialien sowie einen geschlossenen Materialkreislauf für eine transparente oder lichtdurchlässige Fassade oder Gebäudehülle zu entwickeln, bietet ein großes Potenzial. Um die Idee weiterzuentwickeln, haben wir die Firma 3F Studio gegründet. Wir haben gerade eine Anwendungsstudie abgeschlossen für eine 3D-gedruckte, funktionsintegrierte 250 Quadratmeter große Fassade, die im industriellen Maßstab produziert werden kann.

Welches Material nutzen Sie?

Ziel ist es, vom herkömmlichen Kunststoff wegzukommen. In Zukunft möchten wir auf jeden Fall mit biobasierten nachwachsenden Rohstoffen arbeiten. Der ölbasierte Kunststoff PET war der Startpunkt. Derzeit verwenden wir recycelten Kunststoff, zum Beispiel aus Wasserflaschen. Künftig möchten wir Algen oder auch Chitin in den 3D-Druck und in das Baugewerbe überführen. Diese Materialien sind transluzent und leichter als Glas. Wir suchen nach geeigneten Wegen, um transparenten Biokunststoff herzustellen. Wir werden das mit unseren Materialpartnern weiterentwickeln.

Thomas Edelmann

Weltweit erster Prototyp einer 3D-gedruckten, multifunktionalen und translu-zenten Fassade. Testinstallation auf der Solarstation der TUM für experimentelle Vergleichstests und Untersuchung des Langzeitverhaltens durch verschiedene Witterungseinflüsse.



1

Schritt zur Produktion einer 3D-gedruckten Fassade

>8

Schritte benötigt die Produktion einer Elementfassade

Bildquelle: Andreas Heddergott; M. Mungenast

1

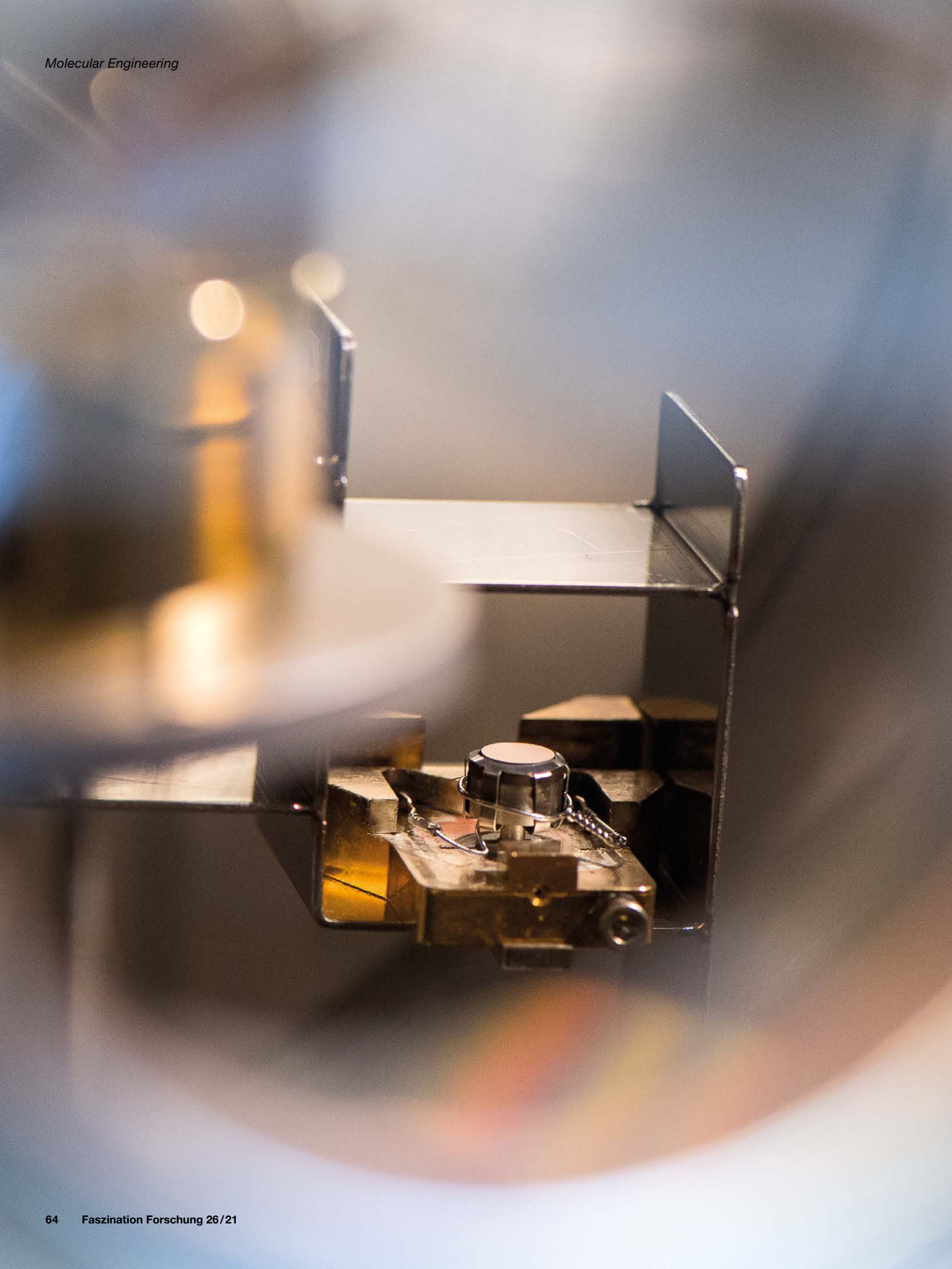
Material für 3D-gedruckte Fassade benötigt

>6

Einzelmaterialien für Elementfassade benötigt

Anwendungsstudie für eine 3D-gedruckte funktionsintegrierte Fassade im industriellen Maßstab

Ein bisher einmaliges Projekt: Diese 750 Quadratmeter große, 3D-gedruckte Fassade wurde für einen Interimseingang des Deutschen Museums, das gerade generalsaniert wird, entworfen. Das TUM Spin-off 3F Studio erarbeitete das Design auf Grundlage der Forschungsarbeit von Moritz Mungenast. Die multifunktionale und lichtdurchlässige Fassade besteht aus recyclebarem Material. Die zelluläre Struktur der Fassadenelemente aus dem 3D-Drucker sorgt für Stabilität, ihre luftgefüllten Hohlräume dienen zugleich der optimalen Dämmung. Wölbungen spenden im Sommer Schatten. 3F Studio wurde gegründet von Mungenast, Oliver Tessin und Luc Morroni und hat sich auf 3D-gedruckte Architektur und Gestaltung spezialisiert.



Die Molekül-Ingenieure

Einzelne Moleküle und atomar strukturierte Materialien zeigen immer wieder verblüffende Eigenschaften. Mit ausgeklügelten Ideen und anspruchsvollen analytischen Methoden erkunden Wissenschaftler um Willi Auwärter und Johannes Barth neue Wege hin zu künftigen Anwendungen in den Bereichen Nanoelektronik, Photonik, Sensorik, Katalyse und Quantenmaterialien.

Short version

Molecular engineering

E

Today's computer chips are produced by printing tiny circuits on large silicon wafers – the process involves going from the macroscopic to the microscopic. But it is also possible to take the opposite approach and assemble tiny electrical switches from individual molecules. This bottom-up paradigm underpins the scientific activities of molecular engineers Dr. Joachim Reichert, Prof. Willi Auwärter and Prof. Johannes Barth. Together with their research groups at the Physics Department of TUM, they are exploring new ways of producing functional units. Potential applications range from molecular switches and tiny sensors, to more efficient light sources and energy storage, to fast-reacting materials for catalysts, nanomotors, and even functional units for future quantum computers.

"Our experiments are taking us into scientifically uncharted territory," says research unit leader Johannes Barth. Thus a prototype switch was introduced, being just a single molecule from a group of chemicals called oligophenyls. Besides building new functional units, the nanoresearchers are employing a portfolio of sophistated analytical methods, ranging from scanning tunnelling microscopes to optical methods developed in-house. They are using these to measure the properties of individual molecules or complex metal-organic structures. In doing so, the researchers are laying the foundations for real applications in areas ranging from nanoelectronics to photonics to catalysis – in line witih the ambitous research programmes of Munich's Cluster of Excellence e-conversion, the Munich Quantum Center and the TUM Institute of Advanced Study. □

Eine atomar wohldefinierte Probe dient als Konstruktionsplattform für maßgeschneiderte Nanoarchitekturen, die hier mit hochauflösender Rastersondenmikroskopie untersucht werden.

Bildquelle: Astrid Eckert/TUM

Link
www.ph.tum.de

„Wir erkunden innovative Möglich-
keiten, um Paradigmenwechsel
vorzubereiten.“
Johannes Barth

Bildquelle: Astrid Eckert/TUM

Drei Forscher mit einer Leidenschaft für den Bau von Nanostrukturen nach Bottom-Up-Konstruktionsprinzipien. Biografien unten von links nach rechts.

Prof. Willi Auwärter

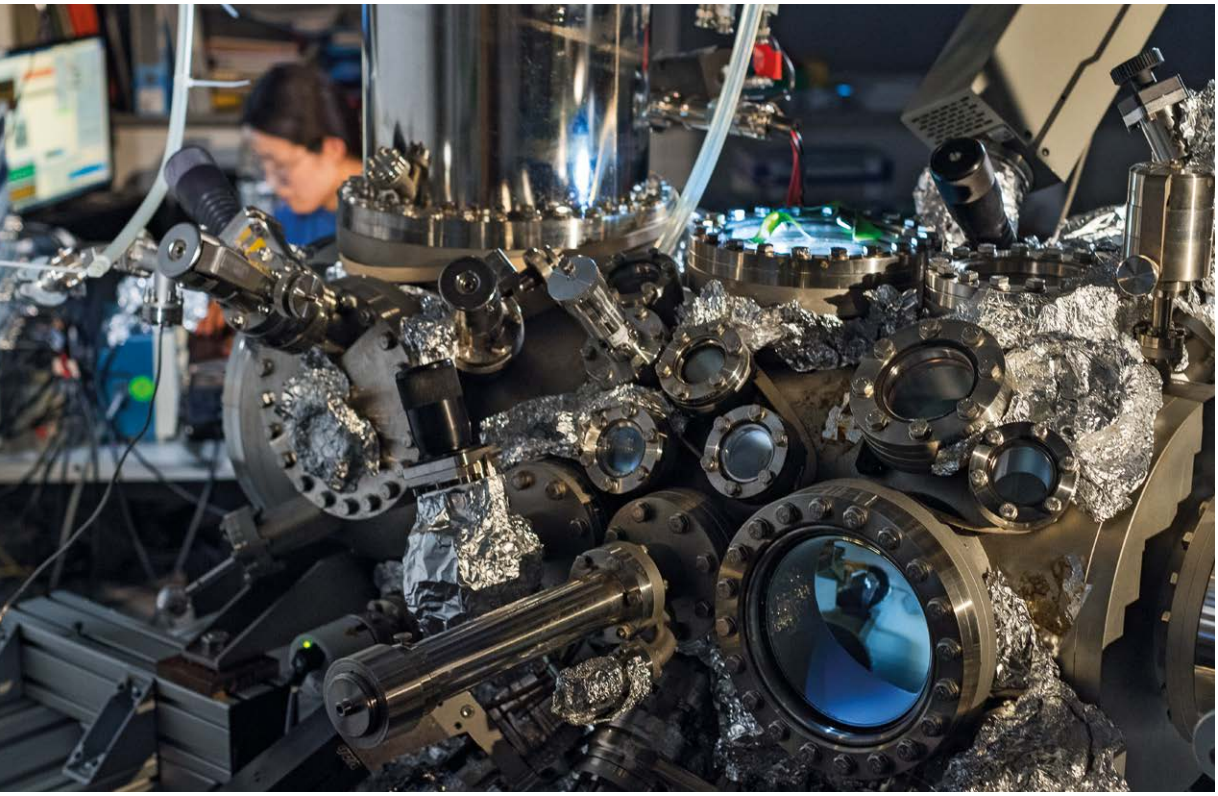
Nach seiner Physik-Promotion an der Universität Zürich 2003 forschte Willi Auwärter an der University of British Columbia in Vancouver und an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2007 wechselte er an die TUM, wo er zuerst Fellow des TUM Institute for Advanced Study war und seit 2015 eine Professur innehat. Seine Forschung wurde durch einen ERC Consolidator Grant und eine Heisenberg-Professur gefördert. Mit seiner Arbeitsgruppe forscht er an atomarpräzisen, molekularen Nanostrukturen und niedrigdimensionalen Materialien.

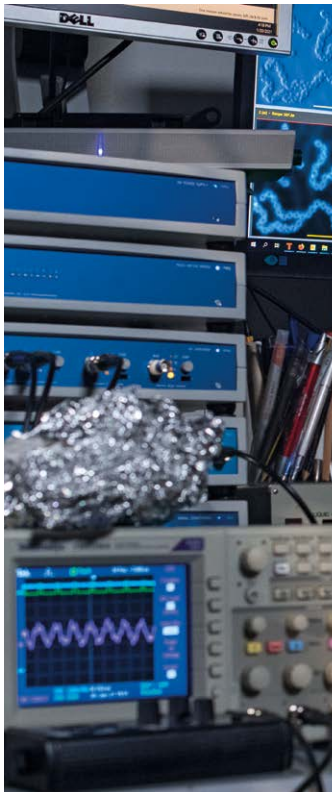
Prof. Johannes V. Barth

Der Physiker Johannes V. Barth promovierte 1992 bei Nobelpreisträger Gerhard Ertl am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin in Physikalischer Chemie. Nach Forschungsaufenthalten am IBM Almaden Research Center in San Jose und seiner Habilitation an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne hielt er eine Professur für Physik und Chemie an der University of British Columbia in Vancouver. Seit 2007 forscht und lehrt er an der TUM als Professor für Oberflächen- und Grenzflächenphysik und steht seit einigen Jahren dem Physik-Department als Dekan vor. Mehrfach ausgezeichnet widmet er sich – auch dank des renommierten ERC Advanced Investigator Grant – funktionalen Grenzflächen, der chemischen Physik von Oberflächen und molekularen Nanowissenschaften.

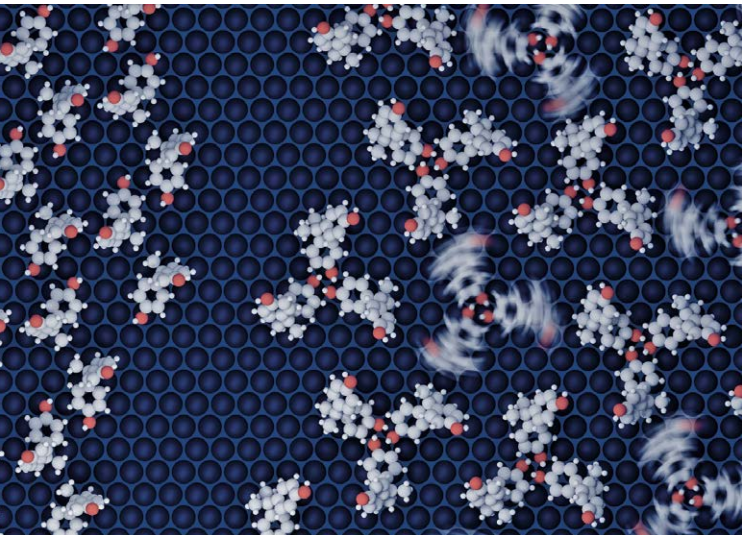
Dr. Joachim Reichert

promovierte 2003 in Physik am Karlsruher Institut für Technologie. Danach vertiefte er seine Forschung an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster und der University of British Columbia in Vancouver. Seit 2007 leitet er eine Forschungsgruppe an der TUM, mit der er funktionelle Nanostrukturen analysiert, weiterentwickelt und dabei nach potenziellen Bauelementen für die molekulare Elektronik der Zukunft fahndet.





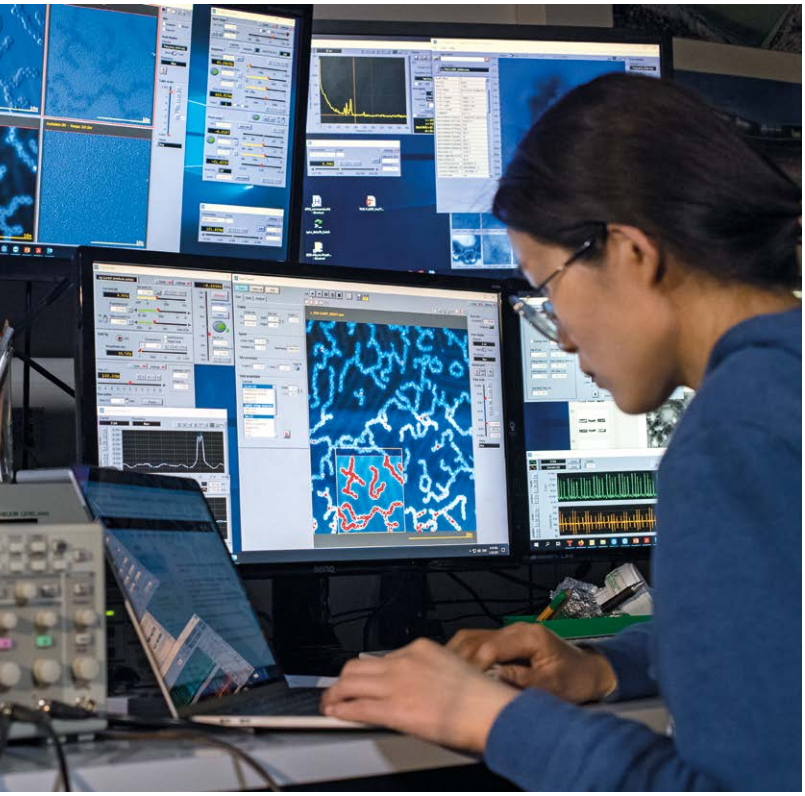
△ **Um einzelne Moleküle zu untersuchen,** nutzen die Forscher Rasterkraft- und Rastertunnelmikroskopie.



△ **Computerbild einer aus Bisphenol-A-Molekülen gebildeten Struktur.** Auf extrem glatten Oberflächen (hier: Silber) formen drei BPA-Moleküle sogenannte Trimere. Einzelne molekulare Trimere können rotieren, während die sie umgebende Matrix aus denselben Molekülen statisch bleibt.

Viel kleiner kann ein elektrischer Schalter nicht mehr werden. Er besteht nur aus einem einzigen Molekül aus der Gruppe der Oligophenyle. Dieses verändert kontrolliert seine Struktur, wenn man es elektrisch auflädt. Zugleich wandeln sich die elektronischen und optischen Eigenschaften – die Basis für den Wechsel von 0 zu 1 in digitalen Schaltern. Fließt ein Strom bei einer Spannung von etwas mehr als einem Volt durch das organische Molekül, ordnen sich die drei im Raum verdrehten Phenylringe aus je sechs Kohlenstoffatomen gemeinsam koplanar – also flach zueinander – an. „Durch transientes, nicht dauerhaftes Aufladen wandelt sich das Molekül damit vom Isolator zum elektrischen Leiter und wird streuaktiv“, sagt Dr. Joachim Reichert, Nanowissenschaftler am Physik-Department der TUM. Im Klartext: Einfallendes Licht wird von dem Molekül plötzlich stark gestreut und liefert ein untrügliches Zeichen für den erfolgreichen Schaltprozess.

Der Weg bis zu einem extrem leistungsfähigen Prozessor aus Myriaden solcher Moleküle ist allerdings noch sehr weit. „Bisher ist der Schaltprozess deutlich primitiver als in einem Transistor“, sagt Reichert. Doch die Basis für eine



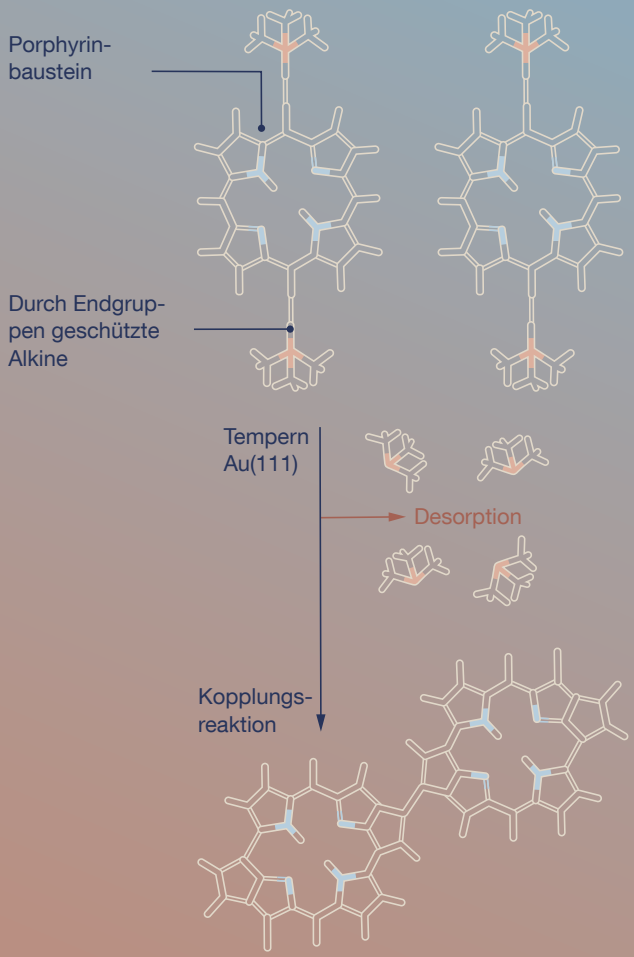
△ **Die Doktorandin Nan Cao** arbeitet am Rastertunnelmikroskop. Die STM-Bilder auf den Bildschirmen zeigen kettenähnliche, kovalent gebundene molekulare Strukturen (weiss/hellblau), die auf einer Goldoberfläche (dunkelblau) gewachsen wurden. Einzelne Molekülketten sind rot hervorgehoben.

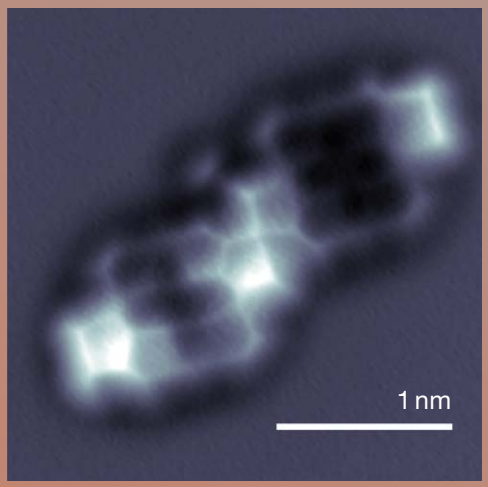
molekulare Nanoelektronik ist gelegt, Chiphersteller wie Intel oder AMD beobachten diese eindrucksvolle Entwicklung aufmerksam. Denn klassische Silizium-Schaltkreise schrumpfen bereits auf Strukturen von nur noch fünf bis sieben Nanometern. Die Grenzen dieser Technologie rücken immer näher. Aber mit um ein Vielfaches kleineren Schaltern aus einzelnen Molekülen, die sich nur über einen Bruchteil eines Nanometers erstrecken, könnten Prozessoren ihre rasante Miniaturisierung fortsetzen oder andere, nützliche Features und Ansprecheigenschaften bieten.

Bottum-Up statt Top-Down: Vom Molekül zum Werkstoff

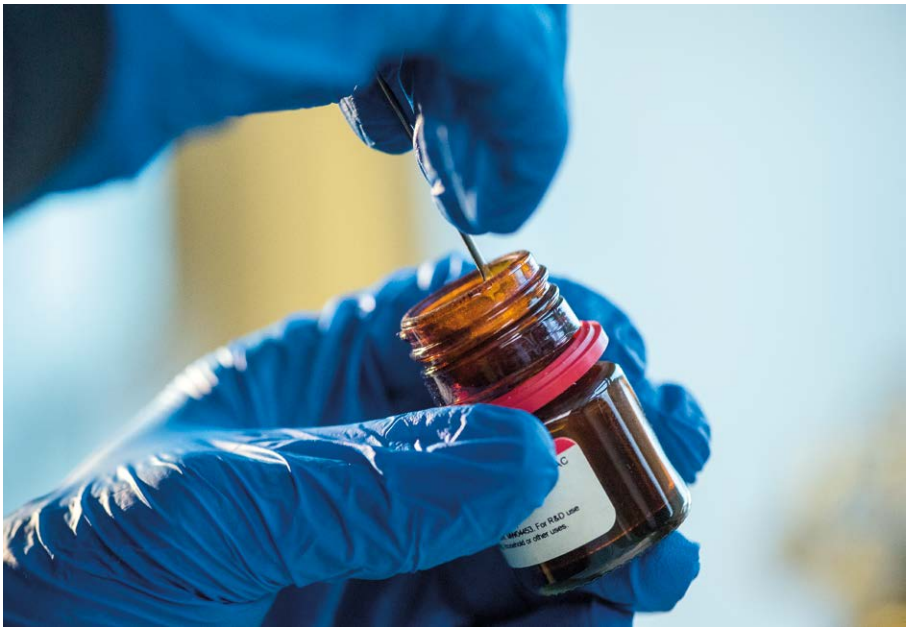
„Mit unseren Experimenten betreten wir wissenschaftliches Neuland“, erläutert Prof. Johannes V. Barth, der die Forschungsgruppe gegründet hat. „Wir erkunden innovative Möglichkeiten, um Paradigmenwechsel vorzubereiten.“ So kehren Barth und seine Kollegen eine konventionelle Richtung für die Entwicklung neuer, vielseitiger Materialien um. Sie formen nicht mehr immer kleinere Strukturen aus größeren Werkstoff-Rohlingen, sondern ▷

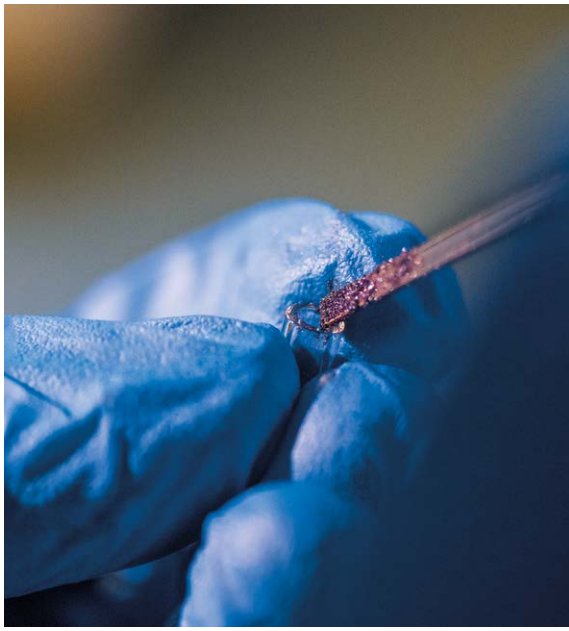
▽ **Porphyrinbausteine bilden kettenähnliche molekulare Strukturen,** wenn sie auf eine Goldoberfläche aufgebracht und getempert werden. Dafür vorgesehene Schutzgruppen lösen sich dabei ab, und die verbleibenden Komponenten bilden neuartige Nanodrähte. Das Rasterkraftmikroskopie-Bild zeigt die chemischen Bindungen innerhalb einzelner „Ringe“ und die ausgebildeten Kohlenstoff-Kohlenstoff Kopplungen zwischen ihnen.





Bildquellen: TUM/Julian Lloyd, Astrid Eckert/TUM, TUM/Nan Cao; Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM)



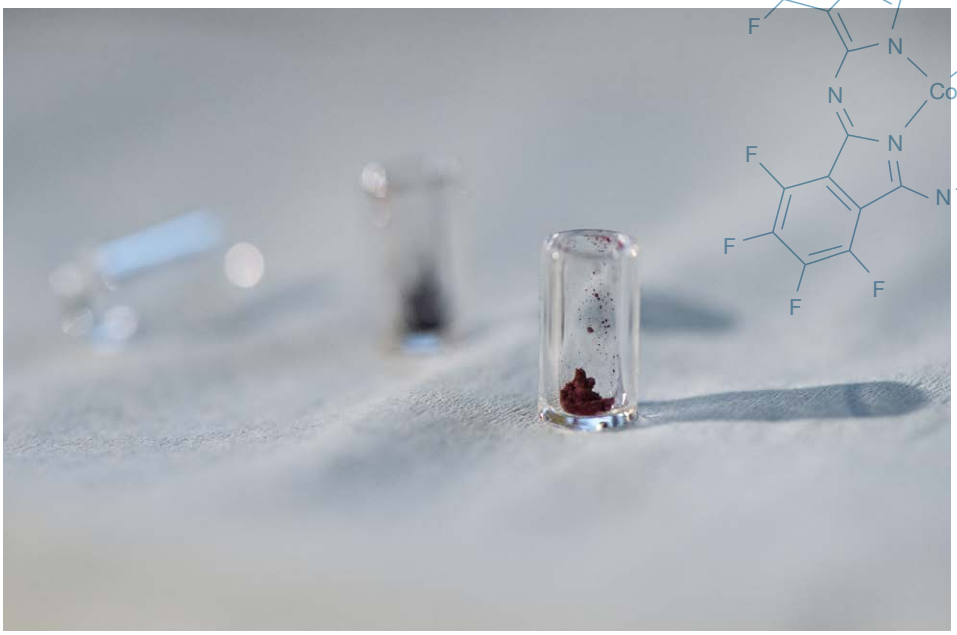


Vorbereitende Schritte, um Moleküle auf eine Oberfläche zu verdampfen: Cobalt-Phthalocyanin-Moleküle werden von einem Behälter in einen Quarztiegel übertragen.

setzen – Molekül für Molekül – funktionelle Einheiten an Grenzflächen zusammen, um Hybridsysteme mit völlig neuen Eigenschaften zu generieren. Bottum-Up statt Top-Down lautet der Fachslang für diesen Ansatz der Nanotechnologie. Die Nanoelektronik ist dabei nur eines von vielen möglichen Anwendungsfeldern des „Molecular Engineering". Das Potenzial reicht weit, von winzigen Sensoren über effizientere Lichtquellen, Solarzellen und Energiespeicher bis hin zu responsiven, reaktionsschnellen Materialien für Katalysatoren, Nanomotoren und sogar zu Recheneinheiten zukünftiger Quantencomputer.

„An vielversprechenden Substanzen mangelt es nicht", sagt Physikochemiker und Molekülingenieur Barth. So nahm seine Gruppe zum Beispiel neben einem Oligophenyl das aromatisch-organische Molekül Bisphenol A für molekulare Schaltprozesse unter die Lupe. Wie ein sternförmiger Rotor ließ es sich auf extrem glatten Oberflächen aus Silber kontrolliert um seine Achse drehen. Zweidimensionale poröse Schichtstrukturen, in denen sich Atome in wabenförmigen Gitterstrukturen nur in einer Ebene, aber nicht mehr im dreidimensionalen Gitter anordnen, taugen als Käfige für einzelne Atome und Moleküle. „Wir entwickelten beispielsweise metallorganische Netzwerke mit einstellbarer Porengröße, in denen sich gezielt einzelne Gastmoleküle und Metallatome einbinden und kontrollieren lassen", sagt Barth. Auch komplexe Sandwichstrukturen, die neue Eigenschaften erwarten lassen, können die Forscher mit ihrem molekularen Baukastensystem kreieren. „Für maßgeschneiderte Moleküle arbeiten wir häufig eng mit anderen Arbeitsgruppen zusammen", sagt Barth und betont fruchtbare Kooperationen mit Chemikern der Universität Basel, dem Karlsruher Institut für Technologie oder dem Trinity College Dublin.

„Massive Unterstützung zum Bau unserer molekularen Strukturen bekommen wir aber von der Natur selbst", sagt Barth. Denn nahezu alle biologischen Gebilde vom Erbgutstrang über die Kraftwerke in den Zellen bis hin zu den Zellmembranen entstehen durch Selbstorganisation. Der Bauplan für diese Grundeinheiten des Lebens ist in den Molekülen bereits angelegt. Die dabei autark ablaufenden Prozesse werden immer besser verstanden. Und genau solches Wissen machen sich die Wissenschaftler zunutze. Dank einer ausgeklügelten Auswahl der Grundchemikalien sowie Substratmaterialien und Symmetrien bringen sie die Moleküle dazu, sich selbstständig in einem gewünschten Muster anzuordnen. ▷

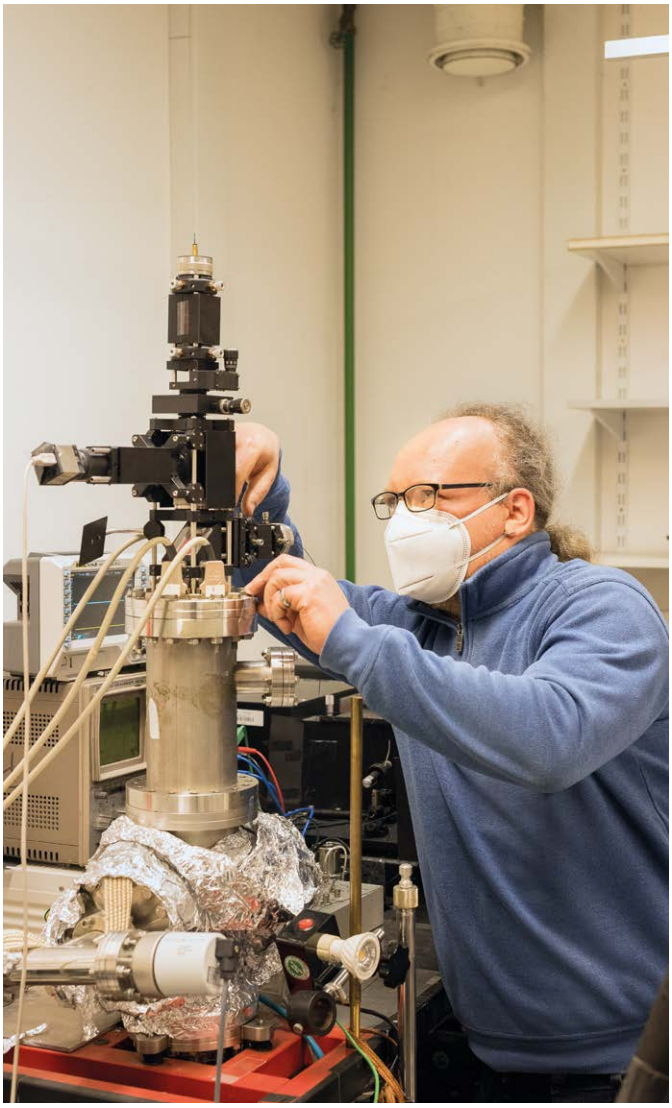


In einem späteren Schritt montiert man den gefüllten Tiegel in einem Verdampfer, der an der Ultrahochvakuum-Kammer befestigt wird.

„Die größte Herausforderung in unseren Experimenten ist die Messung.“

Willi Auwärter

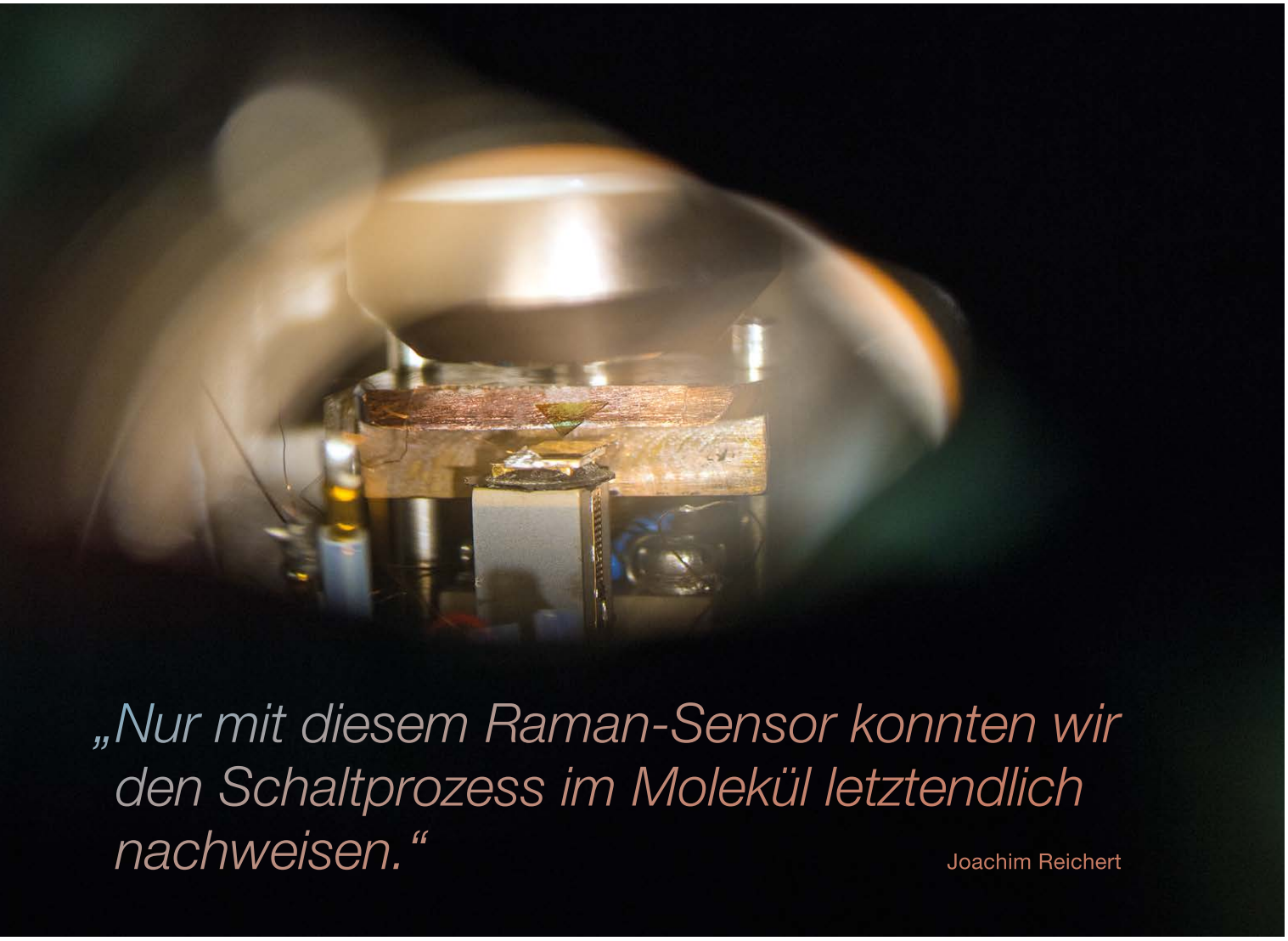
Bildquellen: Astrid Eckert/TUM



Joachim Reichert bereitet ein Raman-Streuexperiment vor, um den Schaltvorgang eines einzelnen Moleküls zu untersuchen. Elektrisch kontaktiert wird es mittels einer Nanoelektrode.

Herausforderung Analyse

Die Synthese neuer funktioneller Einheiten ist aber nur der Anfang. Um die chemischen und physikalischen Eigenschaften einzelner Moleküle oder komplexer metallorganischer Strukturen genau zu untersuchen, brauchen die Molekülingenieure einen ganzen Strauß an Analyseverfahren. Teils sind diese bereits verfügbar, teils müssen sie erst aufwendig optimiert oder gar neu entwickelt werden. „Die größte Herausforderung in unseren Experimenten ist die Messung“, sagt Willi Auwärter, Professor für Molecular Engineering at Functional Interfaces an der TUM. „Wir schauen auf die Eigenschaften und die Bindungen eines einzelnen Moleküls“, erklärt er den Unterschied zu klassischen Messungen in der Chemie, die typischerweise nur über Abermilliarden Moleküle gemittelte Daten liefern. Auwärter setzt dafür auf die besten derzeit verfügbaren Mikroskoptypen: das Rastertunnelmikroskop (STM – scanning tunneling microscope) und das Rasterkraftmikroskop (AFM – atomic force microscope). Mit den atomar feinen Mikroskopspitzen nähert er sich den einzelnen Molekülen an. Diese Versuche laufen im Vakuum und in auf etwa minus 268 Grad Celsius extrem tief gekühlter Umgebung ab, um Störeinflüsse zu minimieren. Über die Regelung des Tunnelstroms zwischen Oberfläche und Mikroskopspitze lassen sich einzelne Atome und auch die Struktur eines Moleküls



„Nur mit diesem Raman-Sensor konnten wir den Schaltprozess im Molekül letztendlich nachweisen.“

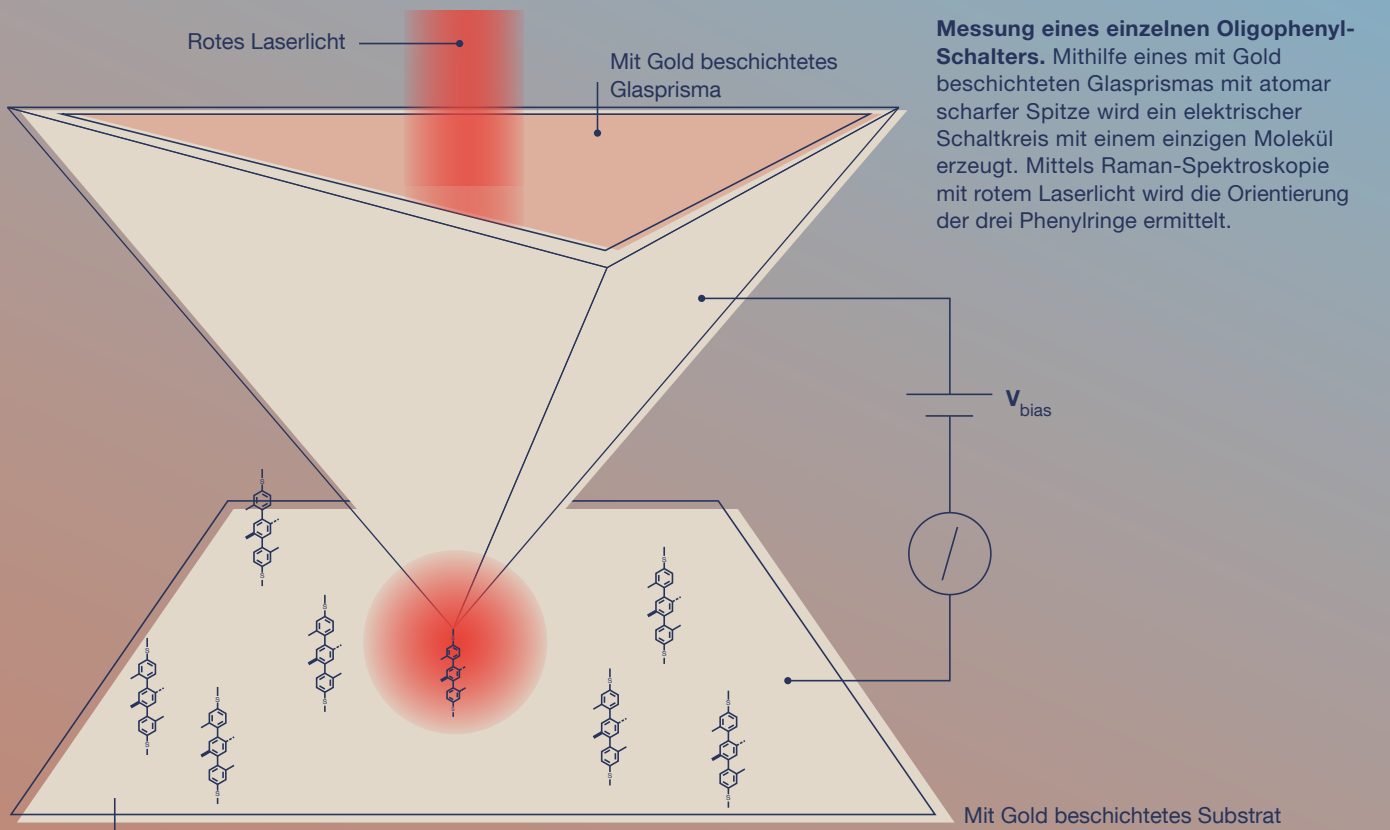
Joachim Reichert

Ein Blick in die Messkammer: Ein mit Gold beschichtetes Glasprisma dient zur elektrischen Kontaktierung eines schaltbaren Oligophenyl-Moleküls.

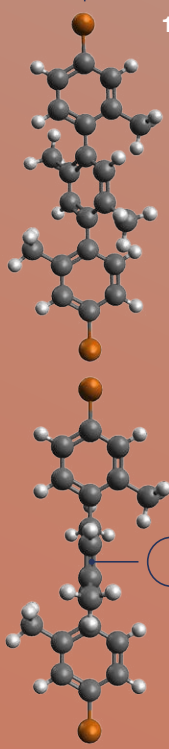
sichtbar machen. Das Rasterkraftmikroskop tastet die Proben mechanisch ab. Die dabei wirkenden Kräfte ändern die Schwingungsfrequenz einer winzigen Blattfeder im Mikroskop. Diese messbare Frequenzveränderung liefert wiederum die Grundlage für atomar aufgelöste Bilder. „Damit können wir auch das Molekül selbst anregen und modifizieren“, sagt Auwärter. Zudem kombiniert er beide Methoden und konnte so chemische Bindungen und sogar die Ladungsverteilung in einem metallorganischen Komplex aus Cobalt und einem Phthalocyaningerüst bestimmen. Ein wichtiger Schritt, um die elektronischen Eigenschaften dieser Verbindung zu entschlüsseln.

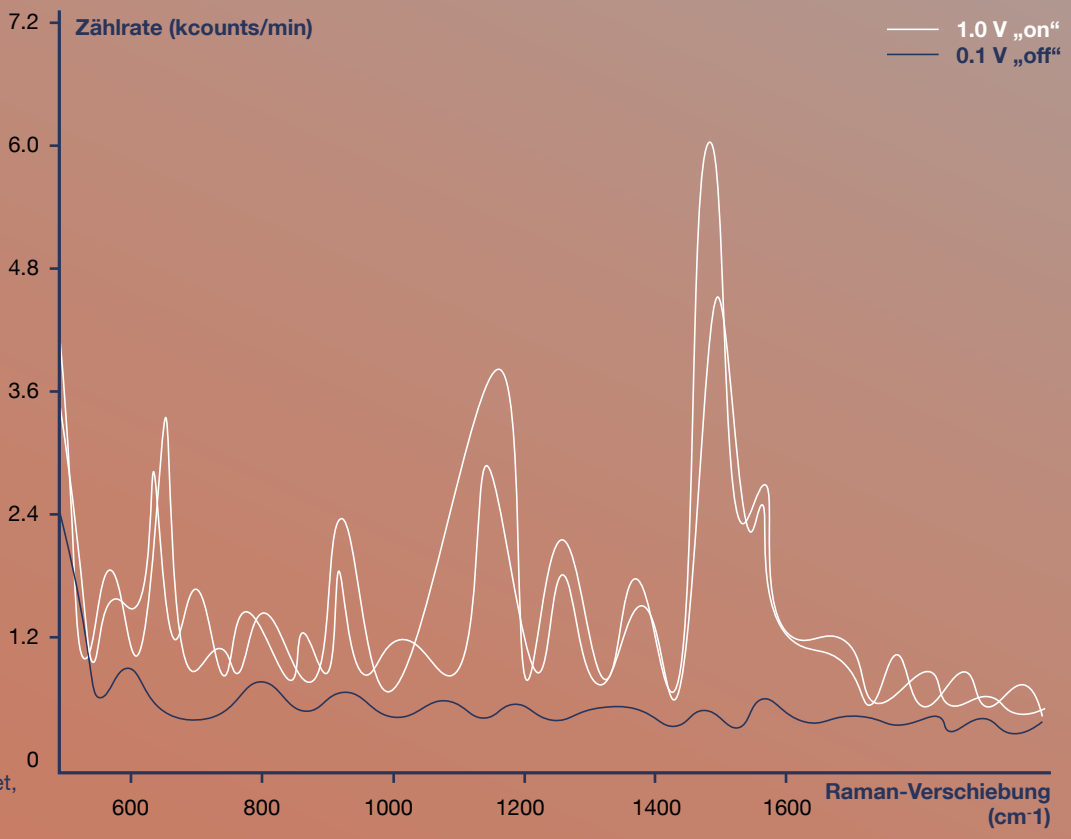
Vorteilhaft wirkte sich für diese Messungen eine spezielle Unterlage für die Molekülproben aus. Auwärter nutzte nicht rein metallische, einkristalline Substrate aus Gold oder Iridium. Er griff stattdessen zu einer Kupferunterlage, die er mit einer atomar dünnen Lage aus Bornitrid beschichtete. Da Bornitrid elektrisch isolierende Eigenschaften aufweist, konnte seine Probe von der Unterlage elektrisch entkoppelt werden. So gelang es Auwärter und seinem Team, die elektronischen Eigenschaften von Molekülen und deren Aggregaten ohne verfälschende Wechselwirkung mit der metallischen Unterlage zu messen. ▷

Bildquellen: Astrid Eckert/TUM



Messung eines einzelnen Oligophenyl-Schalters. Mithilfe eines mit Gold beschichteten Glasprismas mit atomar scharfer Spitze wird ein elektrischer Schaltkreis mit einem einzigen Molekül erzeugt. Mittels Raman-Spektroskopie mit rotem Laserlicht wird die Orientierung der drei Phenylringe ermittelt.





Das Oligophenyl-Molekül schaltet, wenn sich alle drei Phenylringe koplanar zueinander anordnen.

Ein kontrollierter Spaltprozess liefert Glasprismen mit atomar scharfen Spitzen.

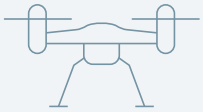
Bildquellen: Astrid Eckert/TUM; Grafiken: ediundsepp (Quelle: TUM/Joachim Reichert)

Elektroden für einzelne Moleküle

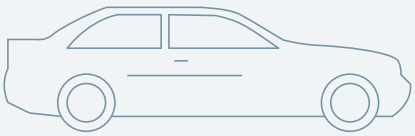
Stück für Stück verfeinert Auwärter seine Rastersondenmethoden zur Analyse einzelner Funktionsmoleküle. Parallel erweitert Reichert die Werkzeugkiste der Münchner Molekül-Ingenieure mit einem pfiffigen Verfahren, das die Vermessung des Oligophenyl-Schalters erst möglich machte. Die Herausforderung: Wie stelle ich einen elektrischen Stromkreis mit einem einzelnen Molekül her? Reichert benutzte dazu kontrolliert gebrochene Glasfragmente mit einer atomar scharfen Bruchkante. Beschichtet mit einer hauchdünnen Goldschicht entstand eine extrem spitze Elektrode, mit der das Oligophenyl-Molekül an eine Gegenelektrode angeschlossen werden konnte. Mehr noch: Durch das Glas schickte Reichert rotes Laserlicht, das vom Schalter-Molekül gestreut wurde. Diese sogenannte Raman-Streuung ließ sich auffangen und lieferte Daten über die spannungsabhängige chemische Struktur des Moleküls. „Nur mit diesem Raman-Sensor konnten wir den Schaltprozess im Molekül letztendlich nachweisen“, erklärt Reichert.

„In unserer Abteilung bündeln wir die Präparation funktioneller Einheiten auf molekularer Ebene mit den geeigneten Analysemethoden“, sagt Barth. Das Spektrum reicht vom Molekülschalter und lichtaktiven Molekülen bis zu winzigen Kohlenstoff-Nanodrähten oder magnetisch aktiven Einheiten. Jeder neue Ansatz, jedes neue Material, jeder Versuch zeigen Barth und seinen gut 30 Kolleginnen und Kollegen die Vielseitigkeit und faszinierenden Entwicklungsmöglichkeiten des Molecular Engineering. „Damit legen wir die Grundlagen, aus denen konkrete Anwendungen von der Nanoelektronik über die Photonik bis zur Katalyse entstehen können.“

Jan Oliver Löfken



Detektion von Windböen, Flugstabilisierung



Reduktion Benzinverbrauch

Wenn es einfach **gut strömt**

Short version

Getting Everything Flowing Nicely E

Sitting in the wind tunnel at BMW, TUM student Katharina Kreitz found herself thinking how much better you could measure if you had probes whose size, shape, and material were tailored perfectly to their respective application. So why not manufacture probes herself? Together with a partner, she set up Vectoflow GmbH, which is on hand wherever anything is flowing – be that in turbomachinery, aircraft, or drones. □

Link
www.vectoflow.de

Ob es darum geht, die Geschwindigkeit eines Rennwagens zu erhöhen, den Verbrauch eines Autos zu reduzieren oder den Flug einer Drohne zu stabilisieren: Wer das Strömungsverhalten seines Produktes kennt, kann es verbessern. Mit Sonden aus 3D-Druck hat Vectoflow den Nischenmarkt der druckbasierten Messtechnik aufgemischt.

Alle Theorie ist grau. Lediglich in Vorlesungen zu sitzen und sich Wissen anzueignen, war nicht die Erfüllung für Katharina Kreitz, die an der TUM Maschinenbau mit den Schwerpunkten Luftfahrt, Gasdynamik und Astronautik studierte. Deswegen arbeitete sie während ihres Studiums in mehreren Unternehmen. Meistens am Prüfstand. Und stellte fest, dass eine US-amerikanische Firma den Nischenmarkt der druckbasierten Messtechnik beherrschte. Und wie das oft so ist, wenn ein Unternehmen quasi ein Monopol auf einem Markt hat, fehlten hier guter Service und maßgeschneiderte Produkte. Als sie während ihrer Masterarbeit im Windkanal bei BMW mit ihrem damaligen Betreuer Dr. Christian Haigermoser saß, überlegten sie gemeinsam, wie viel besser man mit Sonden messen könnte, die perfekt auf die jeweilige Anwendung in punkto Form, Material und Dimension zugeschnitten wären. Warum also nicht selbst Sonden herstellen?

Verbesserung der Geschwindigkeit,
Balance zwischen Auf- und Abtrieb

Gedacht, getan. Die beiden gingen auf einen weltweit führenden Technologieanbieter im industriellen 3D-Druck zu und konstruierten eine Sonde für den Metall-3D-Druck. Ein Produkt, das aus ihrer Sicht für viele Unternehmen von Interesse sein müsste. Warum also nicht ein Unternehmen gründen und diese Sonden herstellen?
Gedacht, getan. Sie bewarben sich beim EXIST-Gründerstipendium des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, das Gründenden ein Jahr lang ein Gehalt sowie Sachausgaben und Coaching zahlt. Die Idee fand großen Anklang. Die Voraussetzung für das Stipendium war allerdings, dass ein BWLer im Gründungsteam vertreten sein sollte. Auf eine Anzeige im Internet meldeten sich viele Interessenten, aber keiner schien geeignet. „Eine Gründung ist wie eine Ehe, das muss hundertprozentig passen", weiß Kreitz. Warum also nicht sich selbst die BWL-Kompetenz aneignen?
Gedacht, getan. Kurzerhand absolvierte Kreitz einen zehnmonatigen internationalen MBA am Collège des Ingénieurs mit Vorlesungen in Paris, München, St. Gallen und Turin. Das Stipendium wurde bewilligt, ein Unternehmen für 3D-Druck stieg als Kapitalgeber ein. So entstand 2015 Vectoflow. Auf die Webseite des Start-ups wurde die Formel 1 aufmerksam. Immer dabei, die Rennwägen zu verbessern, lud man zu einem Gespräch ein.

Daraus entstand der erste Auftrag: die Konstruktion einer Sonde mit drei Köpfen – ein sogenannter kleiner Messrechner für den Windkanal.

Individuell, präzise, integriert

Fünf Jahre später ist Vectoflow überall da tätig, wo etwas strömt – ganz egal ob Windkraftanlagen oder Turbomaschinen, Flugzeuge oder Drohnen, Dunstabzugshauben oder Föhne. Kurz: „Wenn sich etwas bewegt, messen wir", so Kreitz. Denn: Je besser die Hersteller wissen, wie die Strömung fließt, desto besser lässt sich die Aerodynamik gestalten. Im Fall der Formel 1 können sie die Geschwindigkeit, die Balance zwischen Auf- und Abtrieb und den Widerstand eines Rennwagens verbessern, im Fall eines Mittelklassewagens den Benzinverbrauch reduzieren. Bei einer Drohne wiederum lässt sich der Flug stabilisieren, da die Sonden Windböen vorab detektieren und die Bauteile der Drohne anschließend optimal ausrichten. Die Sonden sind dank der additiven Fertigung individuell auf die Kundenanwendung zugeschnitten und messen auch deswegen präziser als bisherige Produkte. Die Algorithmen sind genauer. Die Software lässt sich dank Schnittstellen in die IT des Kunden integrieren. All das können die Produkte der Konkurrenz nicht. Damit hat Vectoflow den Nischenmarkt ganz schön aufgemischt.
Heute hat Vectoflow 15 Mitarbeitende und – über ein internationales Distributoren-Netzwerk – Kunden in rund 70 Ländern. Der TUM, an der sie viele Angebote für Gründende wahrgenommen haben, sind sie nach wie vor eng verbunden. Im Makerspace etwa nutzen sie nach wie vor den Lasercutter, um die Seriennummern auf die Sonden zu lasern. Viele Werkstudentinnen und Werkstudenten kommen von der TUM, einige sind bereits fest angestellt. Eine erste Niederlassung in den USA ist für das kommende Jahr geplant. In Zukunft will Vectoflow der Anbieter für Messtechnik sein. Weltweit.

■ *Gitta Rohling*

Grafiken: ediundsepp (Quelle: Vectoflow)

Autoren

Claudia Doyle ist Wissenschaftsjournalistin und schreibt über Gesundheit, Infektionskrankheiten und Ökologie. Ihre Geschichten erscheinen in der Süddeutschen Zeitung, Spiegel+, in der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung und in vielen Zeitschriften und Radiosendern. Sie ist Absolventin der Deutschen Journalistenschule in München und besitzt einen Masterabschluss in Journalismus und einen Bachelor in Biochemie. *www.writingaboutscience.de*

Thomas Edelmann ist freier Journalist und Publizist mit Schwerpunkt Design. Ab 2005 war er Gastwissenschaftler im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Graduiertenkolleg Kunst und Technik. Außerdem war er Mitglied der Redaktion des „Atlas des Möbeldesigns“, der 2019 veröffentlicht wurde.
thomas.edelmann@gmx.net

Reinhard Kleindl studierte theoretische Physik in Graz. Er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist. Seine Romane wurden mit Preisen ausgezeichnet und erschienen bei Bastei Lübbe und Goldmann. In den letzten Jahren wurde er als Athlet im Slacklinen, einer Disziplin ähnlich dem Seiltanzen, populär. Er beging Highlines über die Victoriafälle, Simbabwe, und den Drei Zinnen in den Dolomiten.
office@reinhardkleindl.at

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

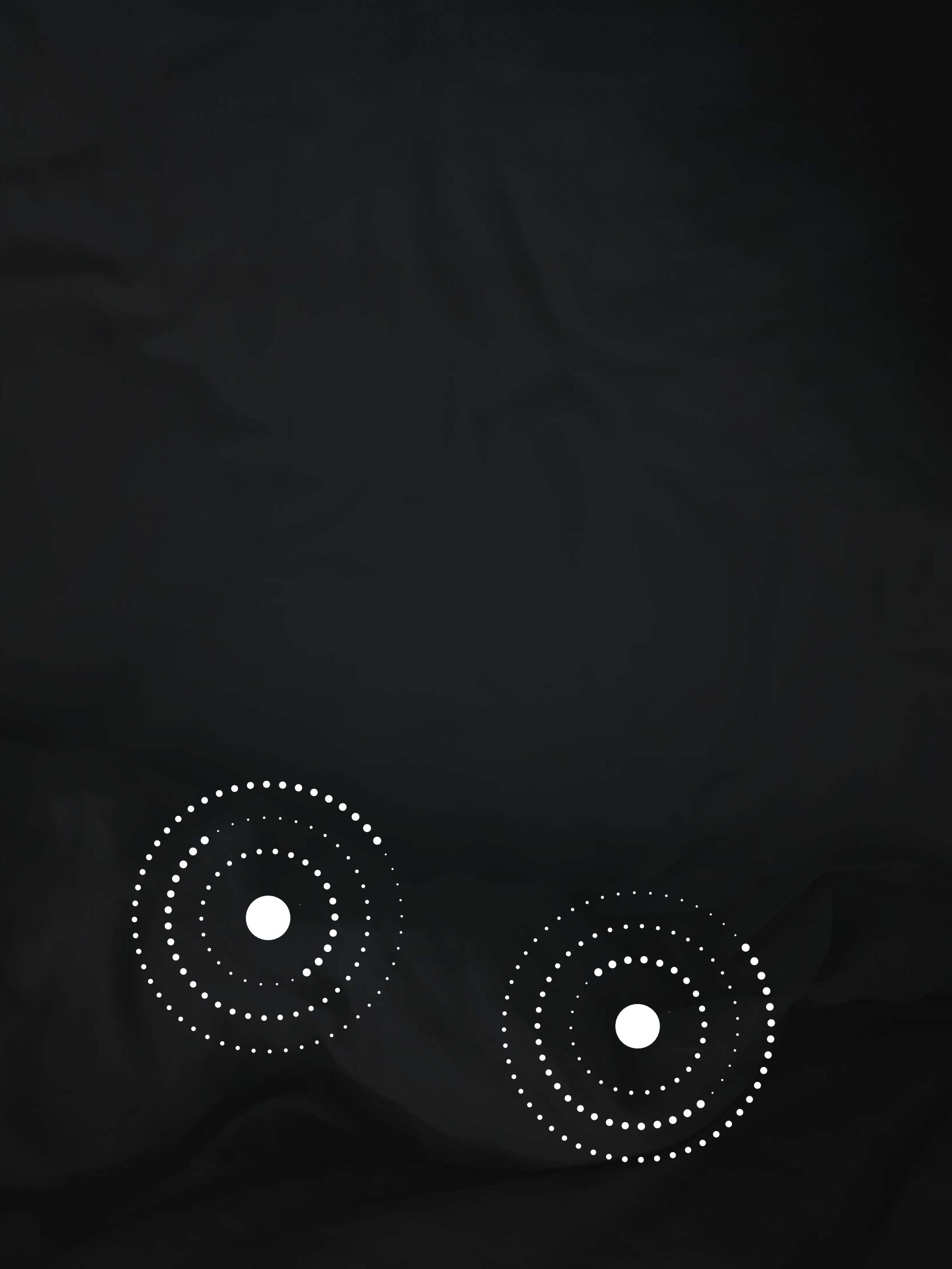
Dr. Monika Offenberger hat an der LMU Biologie studiert. Sie promovierte über Brutsubstrate heimischer Drosophiliden an der LMU. Seit 30 Jahren schreibt sie als freie Wissenschaftsjournalistin für Tageszeitungen, Magazine, Buchverlage und Forschungseinrichtungen über Themen aus Umwelt, Naturschutz und Lebenswissenschaften.
monika.offenberger@mnet-mail.de

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

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

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

©2021 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. Dr. Thomas F. Hofmann,
Präsident der Technischen Universität München
Redakteurinnen
Dr. Christine Rüth, Tina Heun-Rattei
Bildredakteurin
Andrea Klee
Übersetzung und Lektorat
Baker & Company, München
Gestaltung und Layout
ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München
Autoren in dieser Ausgabe
Claudia Doyle, Thomas Edelmann, Reinhard Kleindl, Jan Oliver Löfken, Dr. Monika Offenberger, Gitta Rohling, Dr. Brigitte Röthlein, Tim Schröder
V.i.S.d.P.
Fiorina Schulz
Fotografen
Juli Eberle, Astrid Eckert, Andreas Heddergott, Magdalena Jooss, Peter Langenhahn, 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
63.500
ISSN: 1865-3022
Erscheinungsweise
Zweimal jährlich
Erscheinungsdatum für diese Ausgabe
April 2021
Titel
Astrid Eckert, ediundsepp
Zum 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.