

# Faszination Forschung

**Forschungshighlights der TUM**

Technische Universität München | Das Wissenschaftsmagazin

Juni 2019 | Ausgabe 23

**Francis Kéré:**  
Architekt der Gemeinsamkeit

**Schaltkreis im Fliegenhirn:** Aufgeben oder weitermachen?

**Das Flugzeug der Zukunft:** Fliegen mit weniger Treibstoff

**Neutrinos:** Eiskalte Detektivarbeit

ISSN 18653022



9 771865 302004

Schutzgebühr  
EUR 9.00



**„Stiften  
stiftet  
Zukunft  
an.“**

Prof. Wolfgang A. Herrmann,  
Alumnus und Präsident der TUM



Liebe Leserinnen und Leser,

**Als bald übergebe ich nach 24 Jahren das Präsidentenamt an meinen Nachfolger Thomas Hofmann. Stolz auf das zusammen Erreichte und Freude über den weiteren Zukunftshorizont unserer Alma Mater verdrängen auch nur den kleinsten Anflug von Wehmut. Im Gegenteil: Ich weiß die TUM in guten Händen – jenen von Thomas Hofmann und in Ihren, denen unserer Alumni. Sie sind „Ihrer TUM“ lange verbunden. Sie sind unsere Botschafter, Unterstützer, Freunde und Förderer.**

Es ist unser Anspruch, die wichtigen Zukunftsthemen an vorderster Front der Forschung zu gestalten. Wie unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dies umsetzen, präsentieren wir Ihnen in meiner Abschiedsausgabe von Faszination Forschung. Sie stellt Persönlichkeiten heraus, deren Berufung an die TUM mir ein besonderes Anliegen war – Schlüsselberufungen, die in der wissenschaftlichen Welt hoch anerkannt sind und gewiss noch viel von sich reden machen werden.

Tief ins Universum blickt Elisa Resconi. Gemeinsam mit einem internationalen Forscherteam gelang es ihr erstmals, eine Strahlungsquelle von Neutrinos im All nachzuweisen: einen Blazar, 5,7 Milliarden Lichtjahre entfernt.

Die Neurobiologin Ilona Grunwald Kadow untersucht Fruchtfliegen und möchte wissen, wie das Gehirn Entscheidungen trifft und welche Nervenzellen daran beteiligt sind. Gemeinsam mit der Mathematikerin Julijana Gjorgjeva identifizierte sie einen neuronalen Schaltkreis, der Motivation und Durchhaltevermögen bei der Futtersuche steuert.

Interdisziplinäre Anwendung finden mathematische Modelle, die unser Humboldt-Professor Andreas S. Schulz entwickelt. Seine Algorithmen lassen sich auf viele Fragestellungen anwenden: etwa bei der Organisation von Flugplänen, beim Bedienen von Hochregallagern, aber auch bei der Verteilung von Hilfsgütern in Katastrophengebieten.

Für die Verschränkung von Fächern steht Sami Haddadin, der dem Ruf an die TUM gefolgt ist, anstatt nach Stanford oder ans MIT zu gehen. Der Direktor unserer neuen Munich School of Robotics and Machine Intelligence, die unsere langjährige Spitzenforschung zu Robotik und KI bündelt, will Roboter schaffen, die sensibel mit Menschen in Kontakt treten.



Das neue Bayerische Kernresonanz-Zentrum (BNMRZ) eröffnet der fakultätsübergreifenden Proteinforschung bisher ungeahnte Dimensionen. Michael Sattler, einer unserer profiliertesten biomolekularen Strukturforscher, will dort komplexe Strukturen von Proteinen aufklären und so Zielstrukturen für neue Medikamente ermitteln.

Dass unsere neue Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie auf fruchtbarem Boden errichtet wird, zeigen unsere Masterstudierenden. Ein vierköpfiges Team gewann mit seinem Konzept für einen verbrauchsarmen Verkehrsjet die Design Challenge, ausgelobt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Visionär und dennoch mitten im Leben geerdet ist Architekt Francis Kéré. Im Interview spricht er über die gesellschaftliche Bedeutung von Architektur und die Beteiligung der Menschen bei der Planung der gebauten Umwelt. Denn die Umwelt, in der wir uns wohlfühlen sollen, beginnt mit dem Dach über unserem Kopf!

Schon heute lade ich Sie alle herzlich in den Anniversary Tower ein, den wir nach den Entwürfen dieses großartigen Architekten auf unserem Forschungscampus Garching errichten wollen – zugegebenermaßen ein ehrgeiziges Projekt. Weithin sichtbar, offen und einladend: als Ort zum Austausch – eine Einladung an die generationenverbindende Gemeinschaft unserer wunderbaren Universität.

150 Jahre TUM sind nur der Anfang. Aber ein guter, hoffnungsvoller Anfang!

Wolfgang A. Herrmann

Prof. Wolfgang A. Herrmann



# Inhalt

## 06 Wie Proteine funktionieren

Eiweißmoleküle bestehen aus Ketten von Aminosäuren, die auf komplizierte Art gefaltet sind. Im neuen NMR-Zentrum der TUM können Forscherinnen und Forscher solch komplexe Strukturen und ihre Wirkungsweise aufklären.

## 18 Aufgeben oder weitermachen?

Wie trifft das Gehirn Entscheidungen? Die Neurobiologin Ilona Grunwald Kadow beobachtet genau, was Fruchtfliegen tun, wenn sie hungrig sind. Zusammen mit der Mathematikerin Julijana Gjorgjieva entwickelte sie ein Modell, das vielleicht auch menschliche Essstörungen erklären könnte.

## 28 Neutrinos: Eiskalte Detektivarbeit

Am 22. September 2017 registrierten Sensoren im Eis der Antarktis ein Lichtsignal. Es führte die Neutrino-Forscherin Elisa Resconi auf eine heiße

Spur: Gemeinsam mit Kollegen gelang es ihr nachzuweisen, dass ein 5,7 Milliarden Lichtjahre altes Neutrino zur Erde gelangt war.

## 36 Indoor-Beet mit Internet-Anschluss

Mit einem intelligenten Gewächsschrank für die Wohnung bringt das Start-up Agrilution das „Vertical Farming“ in die Küche. Das Gerät bietet optimale Bedingungen für den Anbau von Salaten, Microgreens und Kräutern.

## 38 Feingefühl für Roboterhände

Was ist das Wesen menschlicher Intelligenz? Und wie kann man es in Roboter übertragen? Diesen und anderen Fragen geht Professor Sami Haddadin in der „Munich School of Robotics and Machine Intelligence“ nach.



**Seite 70**

TUM mit vier  
**Exzellenzforschungs-  
clustern erfolgreich**



**Seite 48**

„Partizipation ist  
nicht nur eine roman-  
tische Idee“



**Seite 28**

Neutrinos:  
**Eiskalte  
Detektivarbeit**

**48 „Partizipation ist nicht nur eine romantische Idee“**

Francis Kéré erzählt, warum er als Junge aus Burkina Faso nicht Bauer wurde, sondern in Berlin studierte und Architekt wurde, und was er an deutsche Studenten weitergeben will.

**60 Das Flugzeug der Zukunft**

Vier Studierende der TUM gewannen mit ihrem Design eines turboelektrisch angetriebenen Flugzeugs im Jahr 2018 die DLR/NASA Design Challenge. Es würde fast zwei Drittel weniger Treibstoff verbrauchen als ein Airbus A321.

**70 TUM mit vier Exzellenzforschungsclustern erfolgreich**

Die Forschungscluster werden in den nächsten sieben Jahren mit jeweils bis zu 50 Millionen Euro finanziert. Es geht um Energiewandlung, Quantentechnologie, die Entstehung des Universums und neurologische Krankheiten.

**80 Operations Research – eine mathematische Wunderwaffe** Computeralgorithmen aus der OR können die Lagerhaltung verbilligen, Verkehrsflüsse optimieren, Personaleinsatzpläne erstellen oder Projekte effektiver managen. Und den Forschern manchmal verblüffende Einsichten beschern, wie Andreas S. Schulz berichtet.

**In jeder Ausgabe**

- 03 Editorial
- 90 Autoren
- 90 Impressum

E

Hier finden Sie die englische Ausgabe als PDF:

[www.tum.de/faszination-forschung](http://www.tum.de/faszination-forschung)

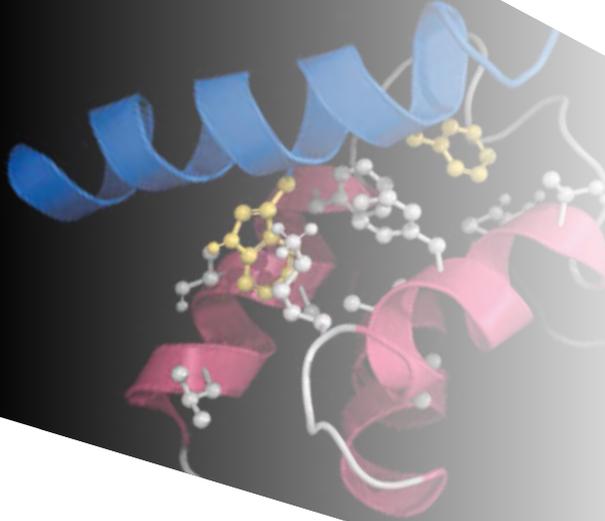


Link

[www.bnmrz.org](http://www.bnmrz.org)

Die Professoren (im Uhrzeigersinn) Aphrodite Kapurniotu, Bernd Reif und Michael Sattler arbeiten am neuen NMR-Zentrum der TUM an der Aufklärung der Strukturen und Funktionen von komplizierten Eiweißmolekülen.

Ringe, Ketten, Schleifen, Spiralen: Strukturen wie die hier gezeigten werden im neu errichteten Gebäude des Bayerischen NMR-Zentrums der TUM auf dem Garching Forschungscampus untersucht.



# Wie Proteine funktionieren

Eiweißmoleküle bestehen aus Ketten von Aminosäuren, die auf komplizierte Art und Weise gefaltet sind. Für ihre Wirkungsweise ist nicht nur die Abfolge der Aminosäuren, sondern auch diese Faltung entscheidend. Im neuen NMR-Zentrum der TUM können Forscherinnen und Forscher auch solch komplexe Strukturen aufklären.

In der Halle des NMR-Zentrums stehen bereits sieben NMR-Spektrometer. Drei weitere werden aus anderen Abteilungen noch umziehen, und später kommt noch eines der weltweit stärksten Geräte mit einer Frequenz von 1,2 Gigahertz und einer Magnetfeldstärke von fast 30 Tesla dazu.



## Abstract

# How proteins work

E

Although the structure of many proteins is largely determined by the sequence of their amino acids, this cannot yet be predicted and must be determined experimentally. Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy is a powerful and comprehensive method of achieving this, allowing not only the precise measurement of the complex three-dimensional spatial structure of proteins but also more specifically analysis of their internal dynamics. NMR plays a particularly important role in investigating the molecular interactions and internal mobility of molecules, providing invaluable insights that complement findings from other methods.

TUM's new Bavarian NMR Center officially opened its doors in October 2018. Seven spectrometers have already been brought together under its roof, with three more waiting to move in. The system's core will be one of the world's most powerful NMR spectrometers, with a

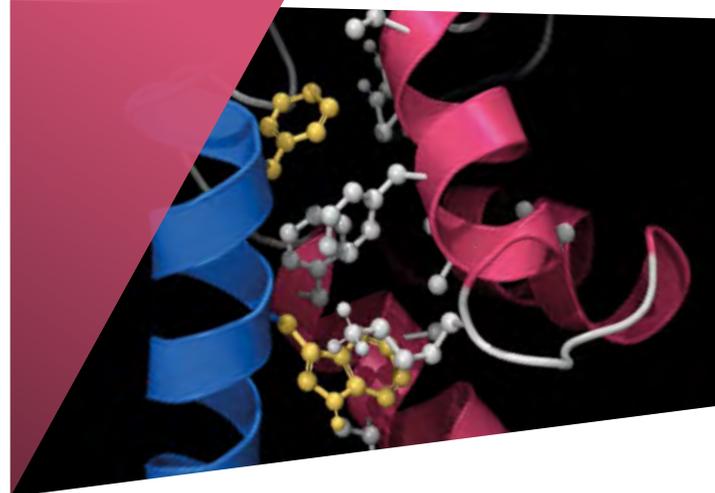
frequency of 1.2 gigahertz, to be delivered in three years' time. Even in the medium term, this will be one of only a handful of such devices around the globe. The center is also home to chemists, physicists and biochemists, all working together on an interdisciplinary basis.

Prof. Michael Sattler, for instance, has been able to show that NMR spectroscopy can be used to determine target structures for new drugs to combat Chagas' disease. Meanwhile, Professors Bernd Reif and Aphrodite Kapur-iotu are involved in a series of projects – some of them joint – as part of a quest for active substances suitable for the treatment of Alzheimer's. NMR spectroscopy opens up completely new approaches here, allowing the binding sites that play a role in misfolding to be viewed at high resolution for the first time. It thus enables targeted optimization of drug candidates. □



Das BNMRZ kooperiert auch eng mit den Forschern des Center for Functional Protein Assemblies (CPA), dessen neues Gebäude derzeit in unmittelbarer Nachbarschaft auf dem Garching Campus entsteht.

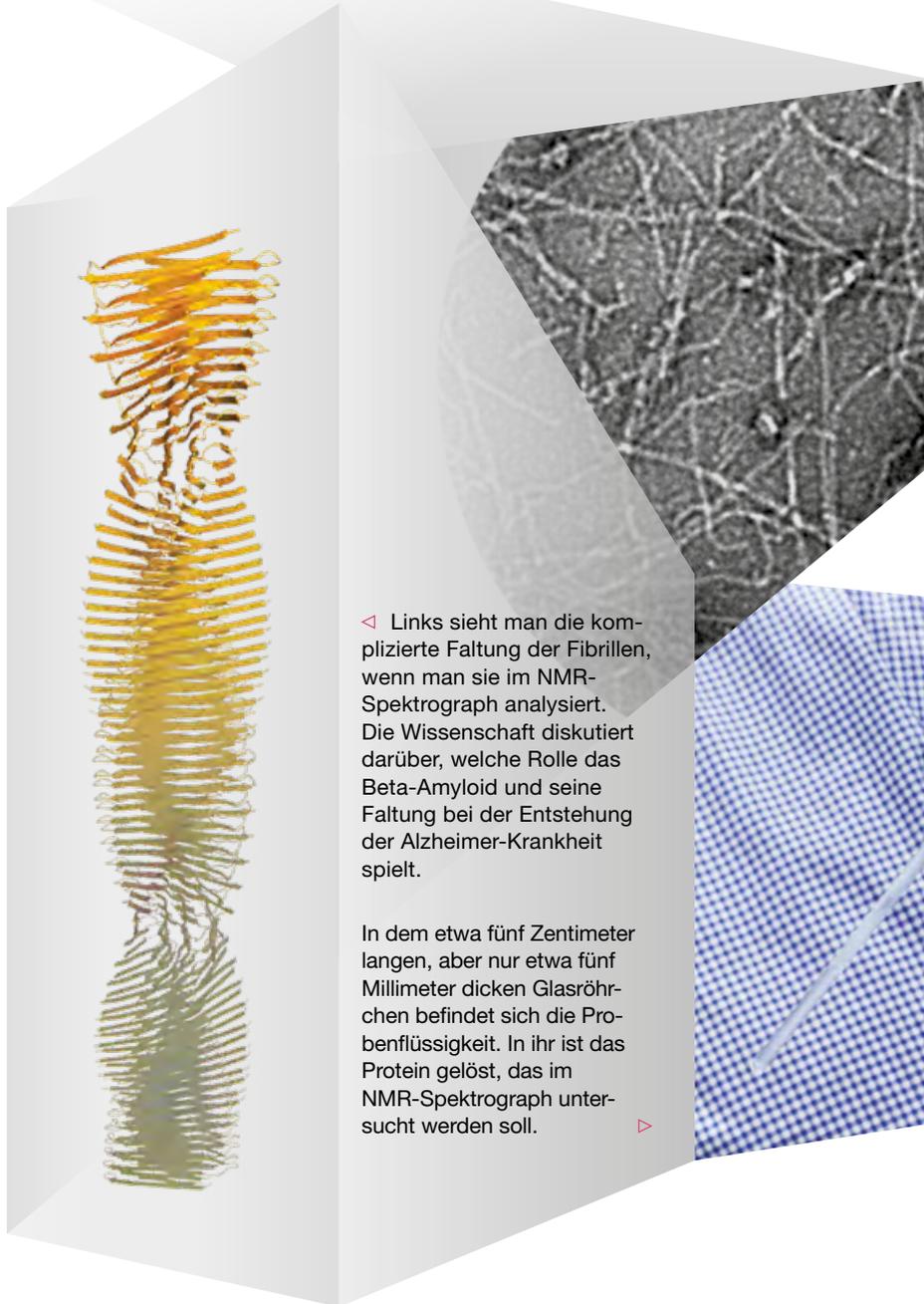
Vom gut abgeschirmten Kontrollraum der Maschinenhalle aus werden die Anlagen gesteuert, außerdem laufen hier alle Daten zusammen.



**P**rofessor Bernd Reif hält ein etwa fünf Zentimeter langes, aber nur etwa fünf Millimeter dickes Glasröhrchen in die Höhe und schüttelt es vorsichtig, während er es betrachtet. In der Flüssigkeit, die darin zu sehen ist, ist ein Eiweißstoff (Protein) gelöst. Seine Struktur wurde in einem der sieben Kernspinresonanz-Spektrometern ermittelt, die in einer rund 700 Quadratmeter großen Messhalle nebeneinander aufgereiht sind.

Diese Halle ist Teil des neuen Bayerischen Kernresonanz-Zentrums (BNMRZ) der Technischen Universität München, das im Oktober 2018 offiziell eröffnet wurde. In dem dunkelroten Neubau auf dem Campus Garching dreht sich alles um die Kernspinresonanz-Spektroskopie

(englisch: Nuclear Magnetic Resonance, NMR) – eine Methode, mit der sich die komplexe dreidimensionale Raumstruktur und die interne Beweglichkeit von Proteinen exakt vermessen lassen. Sie ist eine der umfassendsten und leistungsstärksten Verfahren zur Strukturaufklärung in der Chemie und Biochemie. Mit ihrer Hilfe können Forscher die elektronische Umgebung einzelner Atome und ihre Wechselwirkungen zu Nachbaratomen und damit neben der Struktur auch die Dynamik komplexer Moleküle darstellen. Und sie ist eine der Methoden, mit der sich auch Proteine, die aus Tausenden von Atomen bestehen, bis hin zu atomaren Einzelheiten untersuchen lassen. ▶



◁ Bei der Alzheimer-Erkrankung verändert sich die Raumstruktur des sogenannten Beta-Amyloid-Proteins, so dass es in der Folge zu solchen langen, unlöslichen Fibrillen verklebt. Parallel sterben immer mehr der benachbarten Nervenzellen ab.

◁ Links sieht man die komplizierte Faltung der Fibrillen, wenn man sie im NMR-Spektrograph analysiert. Die Wissenschaft diskutiert darüber, welche Rolle das Beta-Amyloid und seine Faltung bei der Entstehung der Alzheimer-Krankheit spielt.

In dem etwa fünf Zentimeter langen, aber nur etwa fünf Millimeter dicken Glasröhrchen befindet sich die Proteinlösung, die im NMR-Spektrograph untersucht werden soll. ▷

Die bisher sieben NMR-Spektrometer des BNMRZ wurden in den vergangenen Monaten aus verschiedenen Gebäuden in die neue Messhalle zusammengezogen. Jetzt stehen sie großzügig verteilt in dem luftigen Raum mit einer Deckenhöhe von acht Metern und laufen rund um die Uhr, sieben Tage die Woche. Das große Raumvolumen und die Ausrichtung des Gebäudes nach Norden unterstützt die Klimaanlage dabei, die Temperaturen im Raum stabil zu halten. Die Geräte enthalten jeweils einen supraleitenden Magnetkern, der mit flüssigem Helium auf konstant vier Kelvin heruntergekühlt werden muss. „Nur so können sehr homogene Magnetfelder in der notwendigen Feldstärke erzeugt werden“, sagt Physiker Bernd

Reif. Auch sonst ist der Messraum gut von äußeren Störfaktoren abgeschirmt. Die Lage am nordwestlichen Zipfel des Campus ist so gewählt, dass weder U-Bahn noch vorbeifahrende Lastwagen die empfindliche Datenerhebung beeinflussen.

„Wir wollten ein Gebäude mit kurzen Wegen zwischen Labors, Büros und Geräten“, sagt Professor Michael Sattler, Chemiker und Leiter des BNMRZ. Die räumliche Nähe bringt viele Vorteile. Die Zusammenarbeit wird enger und effizienter. Nicht nur im Hinblick auf die Forschung und gemeinsame Publikationen, sondern auch für die Ausbildung der Studenten.

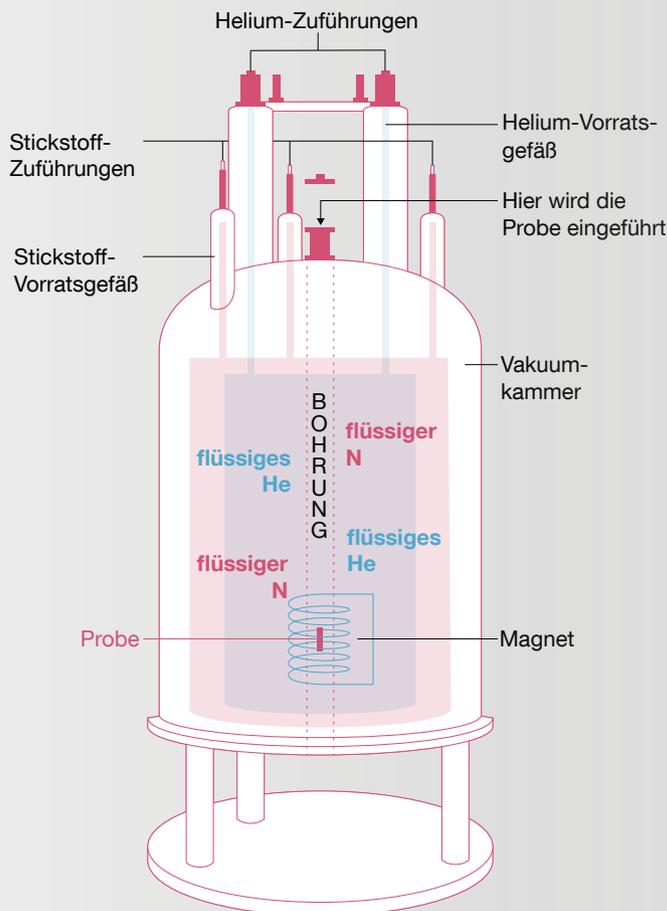
## Das stärkste Magnetfeld auf der Erde

Drei weitere Spektrometer aus den benachbarten Gebäuden warten jetzt noch auf den Umzug. Und dann fehlt nur noch das Herzstück der Anlage: Eines der weltweit stärksten NMR-Spektrometer mit einer Frequenz von 1,2 Gigahertz und einer Magnetfeldstärke von fast 30 Tesla – das höchste bisher dauerhaft erzeugte Magnetfeld auf der Erde. „Die TUM ist die erste universitäre Einrichtung mit einem derartig leistungsstarken Spektrometer“, sagt Satt-

ler. Momentan wird das Gerät von der Firma Bruker entwickelt, seine Auslieferung ist in drei Jahren geplant. Mit ihm können noch größere und komplexere Proteine analysiert werden als bisher. Der Grund: „Mit höheren Magnetfeldern wird das Signal schärfer und gleichzeitig das Hintergrundrauschen, das die Messungen stört, immer kleiner“, sagt Reif. Das stärkste Magnetfeld auf der Erde.



## NMR-Magnet



Im Vergleich zur Probe ist die NMR-Anlage riesig: Die supraleitende Spule zur Erzeugung des Magnetfelds arbeitet nahe dem absoluten Nullpunkt. Zur Kühlung ist sie außen von flüssigem Stickstoff, innen von flüssigem Helium umgeben. Die Probe wird allerdings bei Zimmertemperatur gemessen.



Die Expertise am Standort Garching ist enorm: Sie umfasst die Entwicklung neuer Methoden und stellt eine Zentrumsstruktur dar mit Schwerpunkt auf der Chemie der Biomakromoleküle. In seinem um die Mittagszeit sonnen durchfluteten Büro diskutiert Bernd Reif zusammen mit Michael Sattler und Aphrodite Kapurniotu, Chemikerin am Wissenschaftszentrum Weihenstephan, das weite Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten. Extrem vereinfacht gesagt, werden bei der NMR-Spektroskopie Moleküle einem starken homogenen Magnetfeld ausgesetzt, das die Kerne der Atome wie Kompassnadeln ausrichtet. Zusätzlich eingestrahlte kurze Impulse von Radiowellen stören diese Ordnung. Bei ihrer Neuausrichtung setzen die Kerne einen Teil der vorher aufgenommenen Energie als zeitlich abklingende Radiofrequenz frei, die gemessen und dann am Rechner weiter analysiert wird. „Da sich dabei jeder Atomkern aufgrund seiner Umgebung anders verhält, kann letztlich die genaue Molekülstruktur des

Proteins berechnet werden“, so Reif. Die Daten liefern wichtige Informationen über die Gestalt und damit über die Funktion des Moleküls – etwa darüber, wie es mit anderen Verbindungen interagiert. Ein wichtiger Schritt, wenn man verstehen will, wie Krankheiten entstehen. Außerdem lassen sich so Ziele für die Entwicklung neuer Medikamente ins Visier nehmen.

Sattler erklärt dies am Beispiel eines neuen Wirkstoffkandidaten gegen die Chagas-Krankheit. Die Ergebnisse der gemeinsamen Studie mit Wissenschaftlern des Helmholtz Zentrums München und der Ruhr-Universität Bochum wurden erst kürzlich im Forschungsmagazin Science veröffentlicht. Die Chagas-Krankheit wird durch Trypanosomen, einzellige Parasiten, über blutsaugende Raubwanzen übertragen. Sie schädigt viele Organe, und noch immer verlaufen rund zehn Prozent der Infektionen tödlich. Die existierenden Medikamente haben enorme Nebenwirkungen und können die Erreger nicht vollständig vernichten.



Wegen der Kompliziertheit der Proteinstrukturen machen sich die Forscher modernste Technik zunutze, etwa VR-Brillen, mit denen man die räumliche Anordnung der einzelnen Komponenten hervorheben und intuitiv besser erkennen kann.

*„Jeder Atomkern verhält sich hier aufgrund seiner Umgebung anders, so dass wir am Ende die genaue Molekülstruktur des Proteins berechnen können.“*

*Bernd Reif, Professor für Festkörper-NMR-Spektroskopie*

Trypanosomen, einzellige Parasiten, die die Chagas-Krankheit übertragen, benötigen für ihren Stoffwechsel Enzyme, die sie mit Hilfe eines speziellen Protein-komplexes aufnehmen. Dazu müssen die beiden Proteine PEX14 und PEX5 aneinander binden, hier molekular dargestellt.

Pex14/Pex5

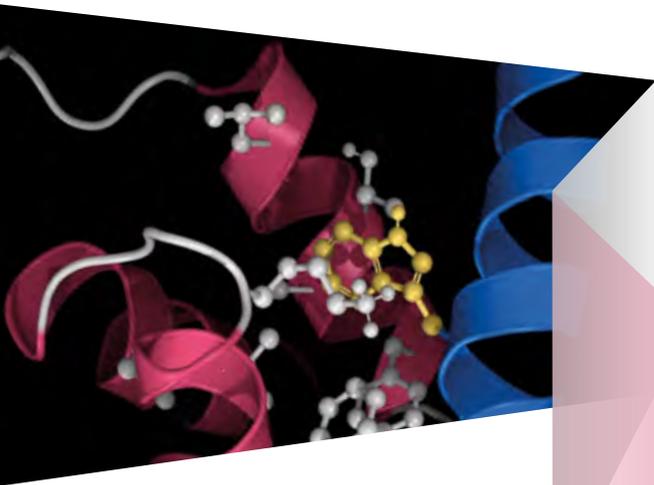


#### Die Faltung ist wichtig

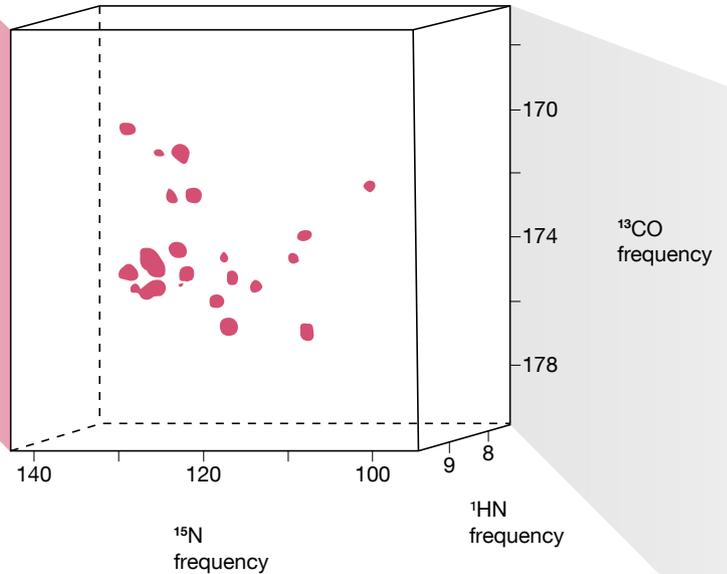
Proteine sind aus Aminosäuren aufgebaut. Wenn sich zwei Aminosäuren zusammenlagern, spricht man von Dipeptiden, Aminosäureketten mit weniger als zehn Aminosäuren nennt man Oligopeptide. Ketten zwischen 50 und 2000 Aminosäuren werden als Polypeptide oder Proteine bezeichnet. Vereinfacht kann man sich das Protein wie eine lange Kette vorstellen, in der verschiedene Aminosäuren aneinandergereiht sind.

Die genaue Reihenfolge der Aminosäuren bestimmt die Identität und die Funktion des Proteins. Proteine können ihre biologische Funktion aber nur erfüllen, wenn sie in einer spezifischen, komplexen räumlichen Struktur gefaltet vorliegen. Der Faltungsprozess erfolgt nach ihrer Synthese oder zum Teil schon währenddessen aufgrund von Wechselwirkungen innerhalb des Moleküls. In manchen Fällen sind für die korrekte Faltung aber auch Enzyme oder bestimmte Hilfsproteine – sogenannte Chaperone – notwendig. Je nachdem, welche Aminosäuren untereinander Bindungen eingehen, bilden sich innerhalb des Proteins Strukturen, die wie Spiralen oder Faltblätter aussehen.

Der dreidimensionale Aufbau eines Proteins im Raum ist für das korrekte Funktionieren des Proteins ausschlaggebend. Ist er gestört, können Krankheiten auftreten.



Von 3D-Flecken zur Eiweißstruktur: So wie unten gezeigt, sehen die Messergebnisse aus, die das NMR-Spektrometer liefert. Aus ihnen können die Forscherinnen und Forscher mit Hilfe komplizierter Algorithmen die Struktur der Proteine berechnen.



Bekannt ist aber, dass die Einzeller in bestimmten Zellorganellen, den sogenannten Glykosomen, Zucker abbauen, den sie für ihr Überleben benötigen. Damit sie dies bewerkstelligen können, müssen sie zunächst bestimmte Enzyme mit Hilfe eines speziellen Proteintransportkomplexes aufnehmen. Genau diesen Mechanismus nahmen Sattler und Kollegen unter die Lupe. Weil sie wussten, dass für den Transport die beiden Proteine PEX14 und PEX5 aneinander binden müssen, bestimmten sie deren genaue Struktur mittels NMR-Spektroskopie. Auf dieser Grundlage optimierten sie anschließend in meh-

rerer Schritten einen chemischen Wirkstoff, so dass dieser optimal an PEX14 bindet und so die Wechselwirkung mit PEX5 verhindert. „Als Folge ist der Stoffwechsel der Erreger blockiert, und die Trypanosomen verhungern in der Zellkultur“, schildert Sattler das Ergebnis. Jetzt soll der Wirkstoffkandidat weiterentwickelt und letztlich in klinischen Studien getestet werden. „Bis zum Medikament ist es noch ein weiter Weg“, sagt Sattler. „Wir konnten aber zeigen, dass die Blockierung des PEX14 Proteins ein vielversprechendes Konzept für neue Wirkstoffe gegen Trypanosomen ist.“

### Falsch gefaltet

Für die Funktion eines Proteins ist nicht nur die genaue Abfolge seiner Aminosäuren, sondern auch seine Faltung – seine exakte räumliche Struktur – ausschlaggebend (siehe Kasten). Manche Erkrankungen gehen mit falsch gefalteten Proteinen einher, die in oder zwischen Zellen verklumpen. Mehr als 30 solcher sogenannter Proteinfaltungserkrankungen sind bisher bekannt. Alzheimer ist wahrscheinlich die prominenteste unter ihnen. Solche Zusammenballungen sind für klassische Verfahren der Strukturbiologie schwer zugänglich. Sie lassen sich aber

mit der NMR-Spektroskopie gut untersuchen. Bei der Alzheimer Erkrankung verändert sich die Raumstruktur des sogenannten Beta-Amyloid-Proteins, so dass es in der Folge zu langen, unlöslichen Fibrillen verklebt. Parallel sterben immer mehr der benachbarten Nervenzellen ab. Obwohl dies schon lange diskutiert wird, bleibt noch immer unklar, welche Rolle das Beta-Amyloid und seine Faltung dabei spielt und wie es zum Absterben der Nervenzellen kommt. Und noch immer gibt es keine Medikamente, die diesen Prozess verhindern. ▶



Ausgehend von der Proteinstruktur von PEX14 und PEX5 entwickelten Prof. Sattler und sein Team schließlich einen chemischen Wirkstoff, der optimal an PEX14 bindet und die Wechselwirkung mit PEX5 verhindert. Damit wird PEX14 inaktiv.

*„Wir konnten zeigen, dass die Blockierung des PEX14-Proteins ein vielversprechendes Konzept für neue Wirkstoffe zur Bekämpfung von Trypanosomen darstellt.“*

*Professor Michael Sattler, Direktor des Bayerischen NMR-Zentrums*



---

**Prof. Aphrodite Kapurniotu**

---

## Forscherin mit internationaler Ausrichtung

Prof. Aphrodite Kapurniotu studierte Chemie in Athen. Nach ihrem Diplom 1984 und ihrer Doktorarbeit 1990 in Tübingen arbeitete sie zwei Jahre als Postdoc an der Rutgers University und ein Jahr als Senior Scientist am Picower Institute for Medical Research in den USA. Zwischen 1994 und 2002 war sie Gruppenleiterin an der Universität Tübingen und habilitierte sich im Fach Biochemie. Von 2002 bis 2007 leitete sie eine biomedizinische Arbeitsgruppe an der RWTH Aachen. 2007 folgte sie einem Ruf an die TUM auf die Professur für Peptidbiochemie.

---

---

**Prof. Bernd Reif**

---

## Von Berlin nach München

Prof. Bernd Reif studierte Physik an der Universität in Bayreuth. Nach dem Diplom 1993 und der Doktorarbeit 1998 an der Goethe-Universität in Frankfurt ging er als Postdoc bis 1999 ans Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) in Cambridge, USA. Danach leitete er bis 2002 eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe an der TUM. Von 2003 bis 2010 arbeitete er am Leibniz-Institut für Molekulare Pharmakologie in Berlin-Buch, parallel erhielt er einen Ruf an die Charité Universitätsmedizin in Berlin. Ab 2007 war er Koordinator der Leibniz Graduate School in Berlin. 2010 folgte er einem Ruf an die TUM. Parallel leitet er seitdem eine Arbeitsgruppe am Helmholtz Zentrum in München.

---



---

**Prof. Michael Sattler**

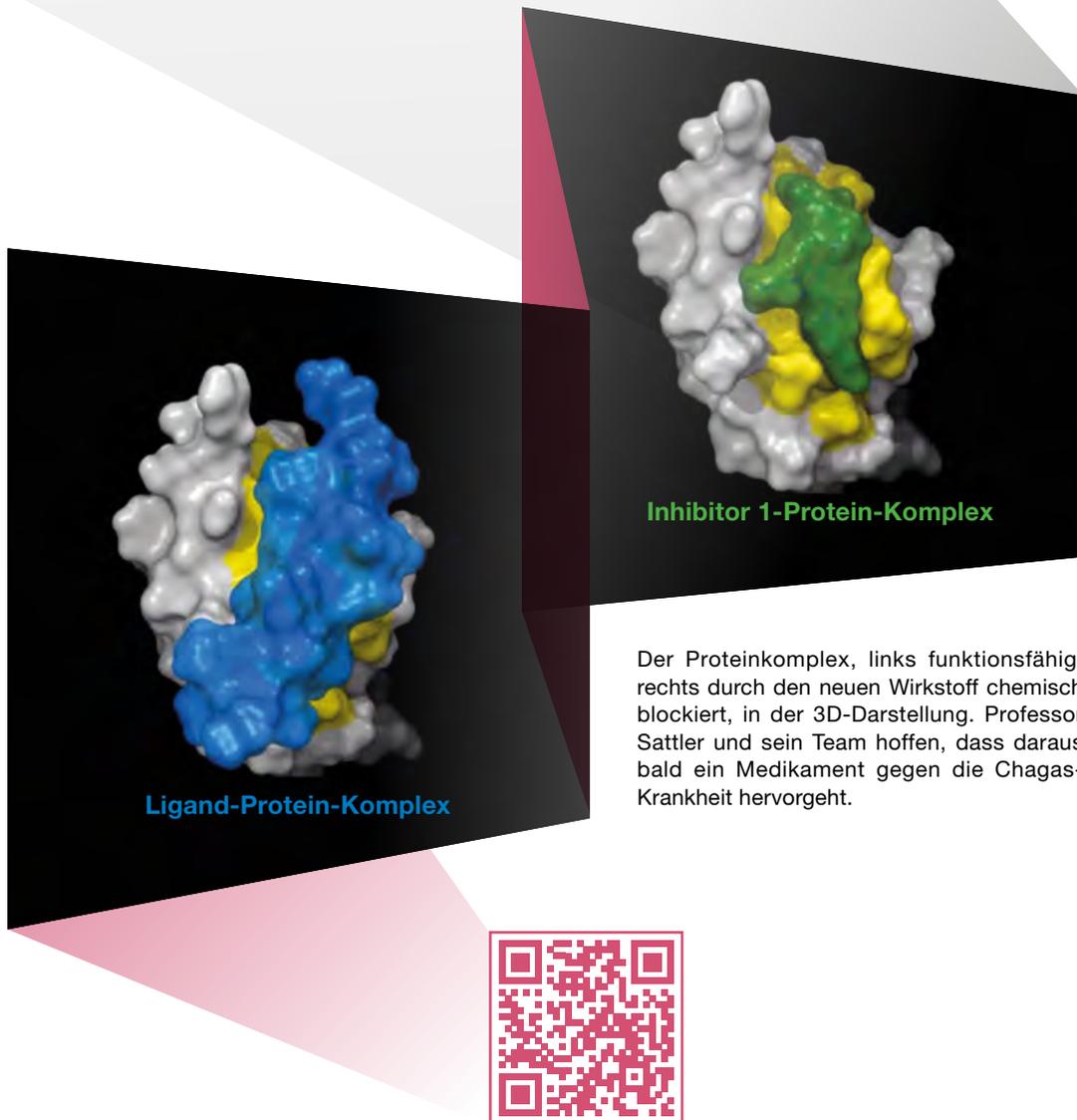
---

## Ein NMR-Forscher der ersten Stunde

Prof. Michael Sattler studierte Chemie an der Goethe-Universität in Frankfurt, wo er 1991 sein Diplom und 1995 seine Doktorarbeit auf dem Gebiet der NMR-Methodenentwicklung abschloss. Danach arbeitete er zwei Jahre lang als Postdoc bei Abbott Laboratories in den USA, einem global agierenden Pharmakonzern. Von 1997 bis 2006 leitete er eine Arbeitsgruppe am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg. Seit 2007 ist er Direktor am Institut für Strukturbiologie am Helmholtz Zentrum München. Parallel hält er den Lehrstuhl für Biomolekulare NMR-Spektroskopie an der TUM und ist Direktor des Bayerischen Kernresonanz-Zentrums.

---





Bekannt ist: Gesunden Zellen stehen normalerweise genügend Katastrophenhelfer in Form spezialisierter Proteine zur Seite, um zu gewährleisten, dass Fehler in der Faltung sofort behoben oder die betroffenen Moleküle aus dem Verkehr gezogen werden. Bernd Reif untersucht ihre Wechselwirkung mit dem Beta-Amyloid-Protein. Seine Kollegin, die Professorin Aphrodite Kapurniotu, setzt parallel dazu auf chemisch-synthetische Ansätze und entwickelt Moleküle, die die Fehlfaltung und die Bildung der Agglomerate des Beta-Amyloid-Proteins blockieren sollen.

„Die NMR-Spektroskopie hilft uns, die Wechselwirkungen von Beta-Amyloiden zu verstehen und so die Eigenschaften von möglichen Hemmstoffen der Aggregation weiter zu verbessern“, sagt Kapurniotu.

Zukünftig wollen die beiden die Ergebnisse aus dem Reagenzglas weiter in Richtung medizinischer Anwendungen entwickeln. Außerdem wollen sie wissen, ob sich die Ergebnisse auch auf andere Erkrankungen, die mit fehlgefalteten Proteinen einhergehen, übertragen lassen. ■

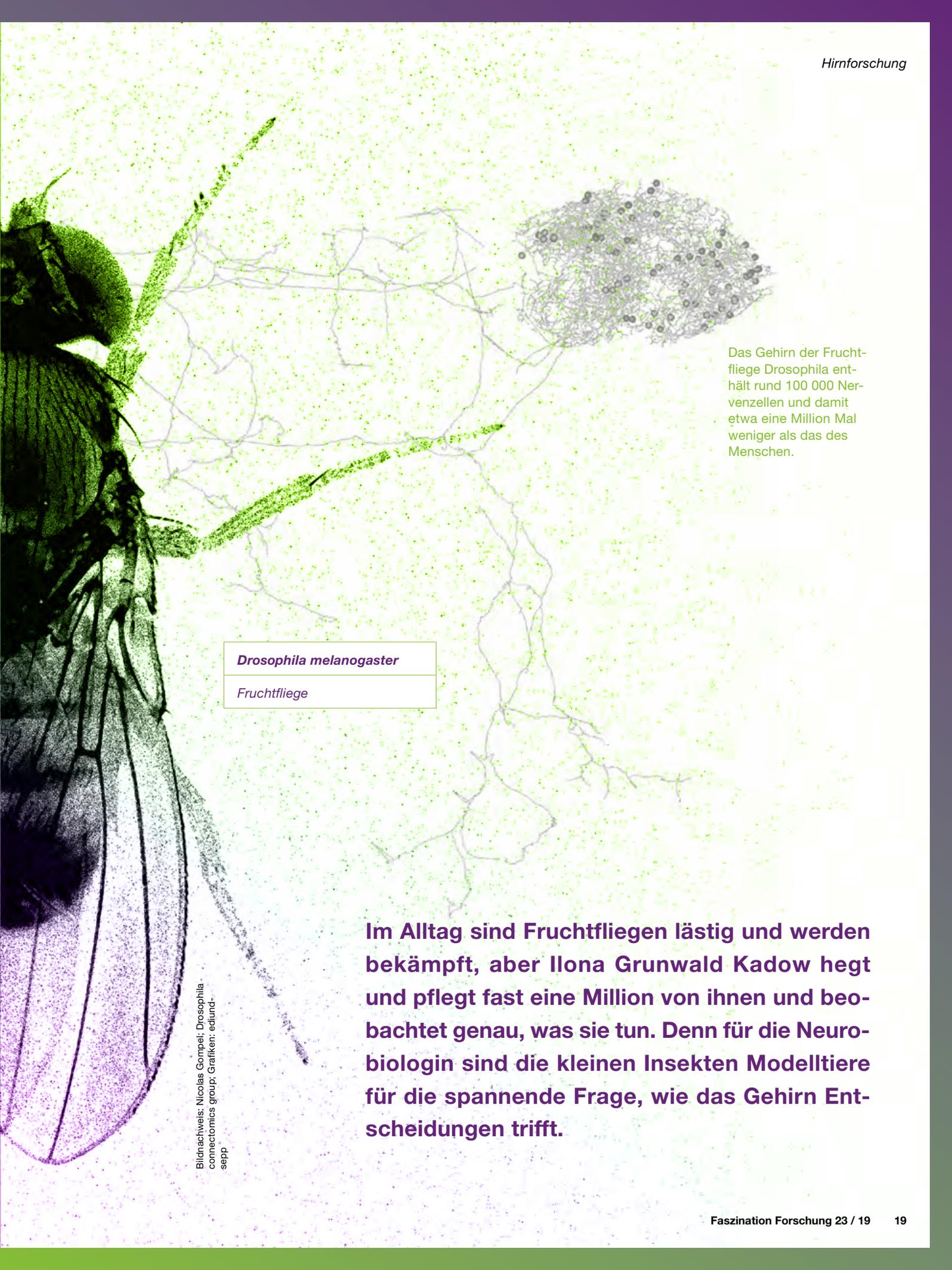
*Karoline Stürmer*

Links

[neuro.wzw.tum.de](http://neuro.wzw.tum.de) | [cns.wzw.tum.de](http://cns.wzw.tum.de)

# Aufgeben oder weiter- machen?





*Drosophila melanogaster*

*Fruchtfliege*

Das Gehirn der Fruchtfliege *Drosophila* enthält rund 100 000 Nervenzellen und damit etwa eine Million Mal weniger als das des Menschen.

Im Alltag sind Fruchtfliegen lästig und werden bekämpft, aber Ilona Grunwald Kadow hegt und pflegt fast eine Million von ihnen und beobachtet genau, was sie tun. Denn für die Neurobiologin sind die kleinen Insekten Modelltiere für die spannende Frage, wie das Gehirn Entscheidungen trifft.

Bildnachweis: Nicolas Gompel; *Drosophila* connectomics group; Grafiken: edlund-sepp

## Keep going or give up?

E

Perceptions and decisions are based on sensory impressions but also on past experiences and the internal state of an animal or person. A hungry animal, for instance, perceives the scent and taste of food much more positively than a full one does. At the same time, it grows more willing to take risks and expose itself to potential dangers to find food. Where in the brain is this decision made? Which nerve cells are involved and how do they determine our behavior? Two professors – neurobiologist Ilona Grunwald Kadow and mathematician Julijana Gjorgjieva – are looking for answers to these questions at the TUM School of Life Sciences in Weihenstephan, using fruit flies of the *Drosophila* genus as a model. With the aid of experiments and computer modeling, the researchers have identified a neural circuit in the fly's brain that controls motivation and perseverance in the quest for food.

Julijana Gjorgjieva and her team developed a mathematical model capable of simulating this behavior. Using

high-resolution electron microscopy, Ilona Grunwald Kadow was then able to work with colleagues in the US and UK to identify the anatomical structures in the fly brain that are involved in executing the proposed circuit. Finally, experiments with genetically modified flies allowed the team to selectively switch the participating nerve cells on and off and thus explore the underlying functionality.

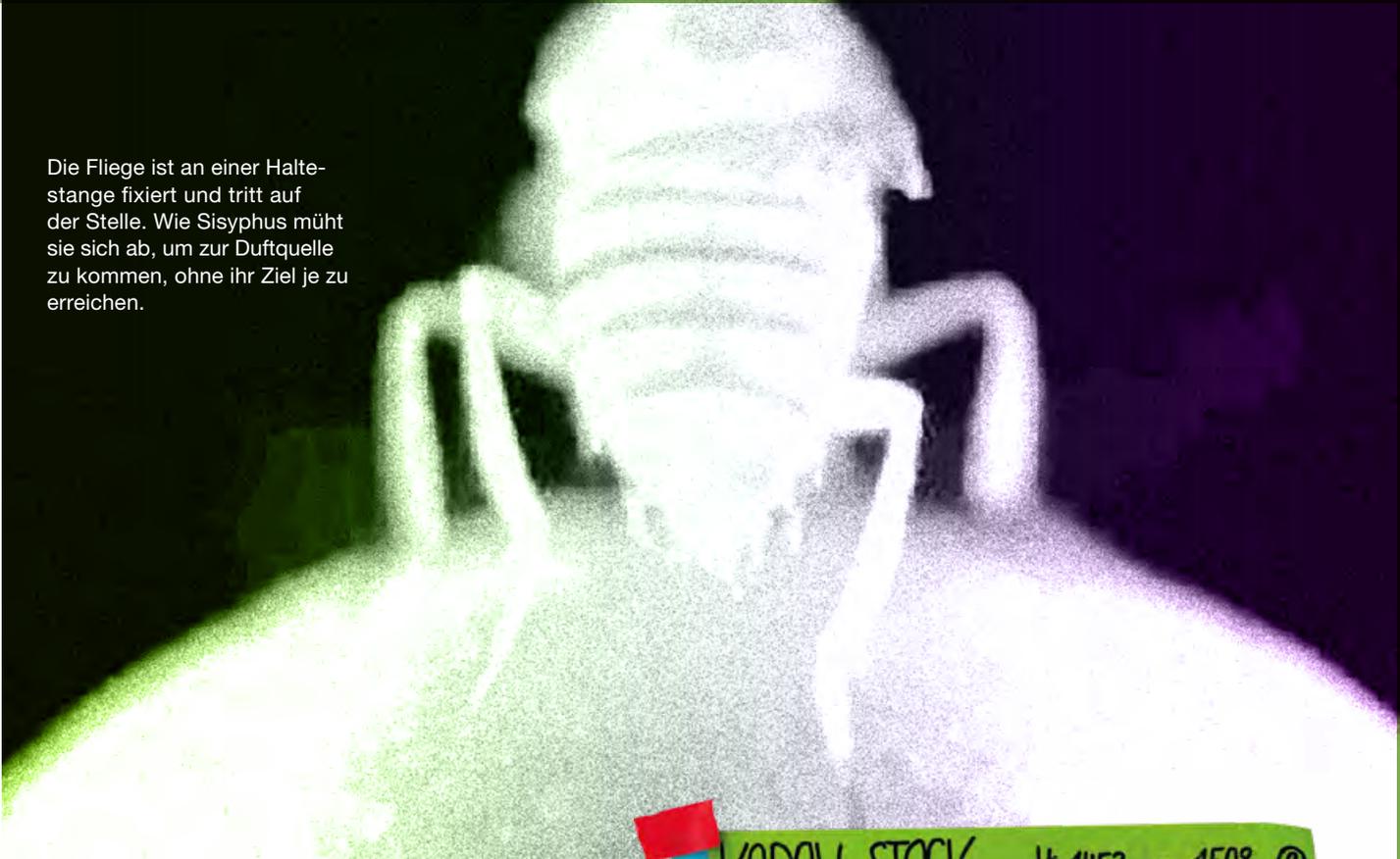
This circuit is located in the fly brain's learning and memory center and is powered and interrupted by two messenger substances – dopamine and octopamine – which are opposite in effect. Dopamine is also found in the human brain, while our equivalent of octopamine is noradrenaline. Since behavioral programs for finding food evolved millions of years ago, researchers suspect that they are subject to a similar neural control process in humans and in *Drosophila* flies. Looking ahead, the new findings could improve our understanding of eating disorders. □



Ilona Grunwald Kadow braucht für ihre aufwändigen Experimente eine Vielzahl an transgenen Fliegenstämmen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Um sie auseinanderzuhalten, werden die Fliegen bei kontrollierter Temperatur und Luftfeuchte in sorgfältig beschrifteten Röhrchen mit Nährmedium gehalten.



Die Fliege ist an einer Haltestange fixiert und tritt auf der Stelle. Wie Sisyphus müht sie sich ab, um zur Duftquelle zu kommen, ohne ihr Ziel je zu erreichen.



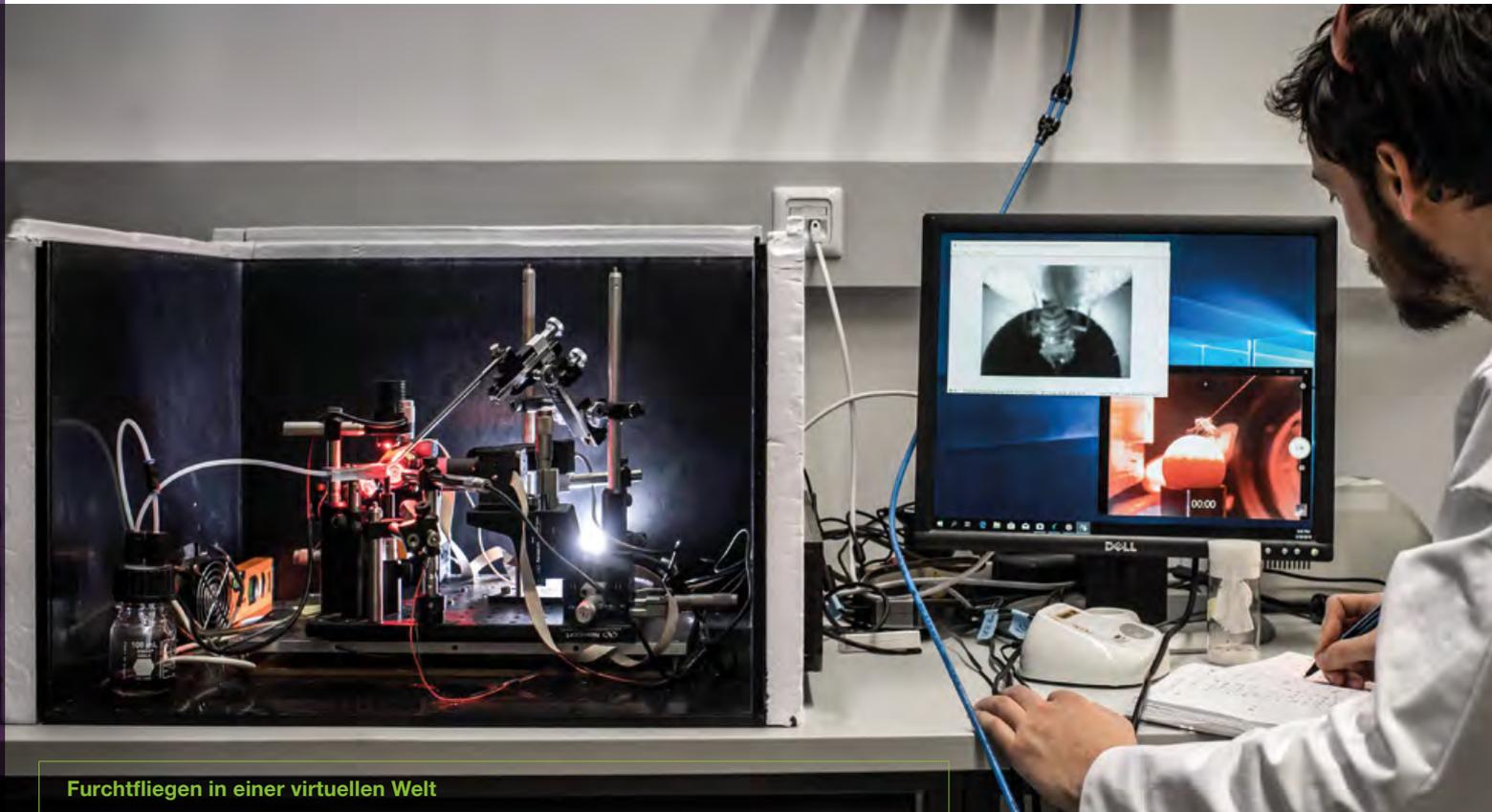
KADOW STOCK # 1453 - 1508 ©



Bildnachweis: Astrid Eckert/TUM; Sercan Sayin

**W**enn es auf die Mittagszeit zugeht, sind sich alle einig: Jetzt wäre was zu essen recht. Man geht in die Kantine, die Arbeit kann warten, denn Hunger hat Priorität. „In dieser Beziehung sind sich Menschen und Fliegen ziemlich ähnlich“, sagt Professor Ilona Grunwald Kadow. Die Neurobiologin weiß, wovon sie spricht, denn in ihrem Labor an der TUM School of Life Sciences in Weihenstephan leben, grob geschätzt, eine Million Fliegen der Gattung *Drosophila*. In wohltemperierter Umgebung gehalten und mit reichlich Futter versorgt, macht

jede Fliege, worauf sie gerade Lust hat: fliegen oder fressen, krabbeln oder kämpfen, sich putzen oder paaren. „Die einzelnen Tiere verhalten sich sehr unterschiedlich, wenn sie kein gemeinsames Ziel haben“, erklärt die Professorin: „Das ändert sich, wenn alle hungrig sind. Dann haben sie plötzlich eine gemeinsame Motivation und verfolgen das gleiche Ziel: an Nahrung zu kommen.“ Nicht nur Motivationen wie Hunger oder Durst leiten das Verhalten von Fliegen und Menschen, sondern auch Sinnesindrücke, Emotionen, Erfahrungen oder der Gesundheitszustand. Wo im Gehirn fließen diese Informationen zusammen? Welche Nervenzellen (Neuronen) sind daran beteiligt und wie bestimmen sie das Verhalten? Ilona Grunwald Kadow sucht bei den Fruchtfliegen nach Antworten. „Das Fliegenhirn hat ungefähr eine Million Mal weniger Nervenzellen als unser eigenes. Daher lässt sich leichter herausfinden, was ein einzelnes Neuron tut“, so die Biologin. Und auch sonst eignen sich die kleinen Insekten gut für Experimente. Ähnlich wie wir Menschen lässt eine hungrige Fliege alles andere außen vor und sucht nach etwas Essbarem. Sobald sie Futterduft riecht, nimmt sie Kurs auf die Quelle. Am Ziel angekommen, stoppt sie und frisst. ▶



### Furchtfliegen in einer virtuellen Welt

Der Versuchsaufbau, links im Original und rechts schematisch dargestellt: Um zu entschlüsseln, wie das Gehirn die Motivation einer Fruchtfliege steuert, werden die Tiere in einem abgedunkelten Kasten in eine Art 'virtual reality' versetzt. Dazu lässt man sie auf einer beweglichen Kugel laufen (hier im Zentrum, rot beleuchtet) und bläst ihnen einen appetitlichen Duft vor die Nase. So wähnen sie sich auf dem Weg zum Futter. Tatsächlich sind sie aber an einer Halterung am Rücken festgeklebt und treten auf der Stelle. Dieser Trick erlaubt es dem Experimentator, von seinem Arbeitsplatz rechts einzelne Fliegen bei voller Aktion am Monitor oder unter dem Mikroskop zu beobachten.

Dabei zeigt sie Durchhaltevermögen, auch wenn sie nicht sofort etwas findet.

„Am Beispiel dieses Verhaltens versuchen wir, grundlegende Abläufe im Gehirn zu verstehen. Wir fragen uns: Wie schafft es das Nervensystem, dass die Fliege an ihrem Tun festhält, auch wenn es zunächst nicht zum Ziel führt? Und wie kann es dies plötzlich beenden und ein neues, gegensätzliches Verhalten ausführen, sobald Futter da ist – obwohl doch die Duftsignale fortbestehen?“, sagt Ilona Grunwald Kadow. Dazu braucht es einen flexiblen und dennoch verlässlichen neuronalen Mechanismus, der in jeder Situation das passende Verhalten auslöst und ein anderes unterdrückt. Es gibt also eine Art Hierarchie im Nervensystem – und wer gewinnt, hängt von der Situation, dem Ziel und der inneren Motivation ab.

Um zu entschlüsseln, wie das funktioniert, werden die Fliegen in Weihenstephan in eine Art ‚virtual reality‘ versetzt. Dazu bläst man ihnen einen appetitlichen Duft vor die Nase und lässt sie auf einer beweglichen Kugel laufen. So wähnen sie sich auf dem Weg zum Futter. Tatsächlich sind sie am Rücken festgeklebt und treten auf der Stelle. Dieser Trick erlaubt es dem Experimentator, einzelne Fliegen bei voller Aktion am Monitor oder unter dem Mikroskop zu beobachten. „Dabei zeigt sich, dass hungrige Tiere nach einem Futterduftsignal länger, schneller und zielgerichteter laufen als satte“, erklärt Versuchsleiterin Grunwald Kadow. ▶

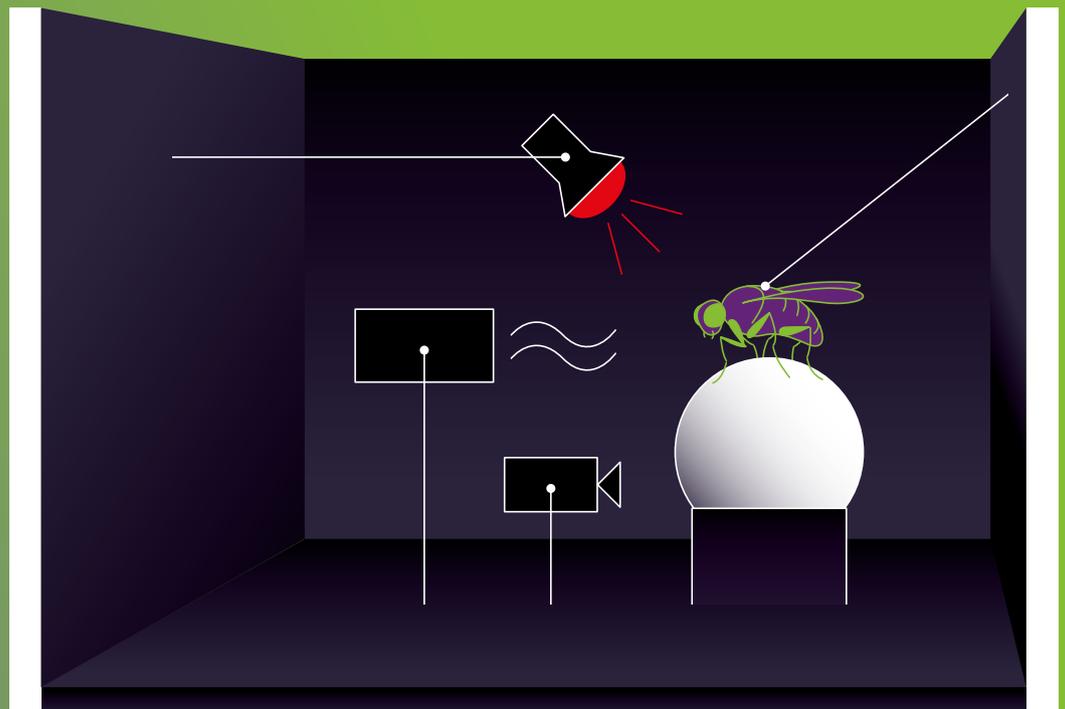


*„Wir vermuten, dass Menschen und Fliegen einer ähnlichen neuronalen Kontrolle unterliegen.“*



*Ilona Grunwald Kadow*

Der schematische Versuchsaufbau: Eine Fruchtfliege, festgeklebt an einer Halterung, läuft auf einer beweglichen Kugel. Von links strömt ihr Futterduft entgegen, gleichzeitig wird sie mit rotem Licht beleuchtet, so dass ihre Futterneuronen aktiviert werden. Eine Kamera überträgt ihr Verhalten zum Monitor.

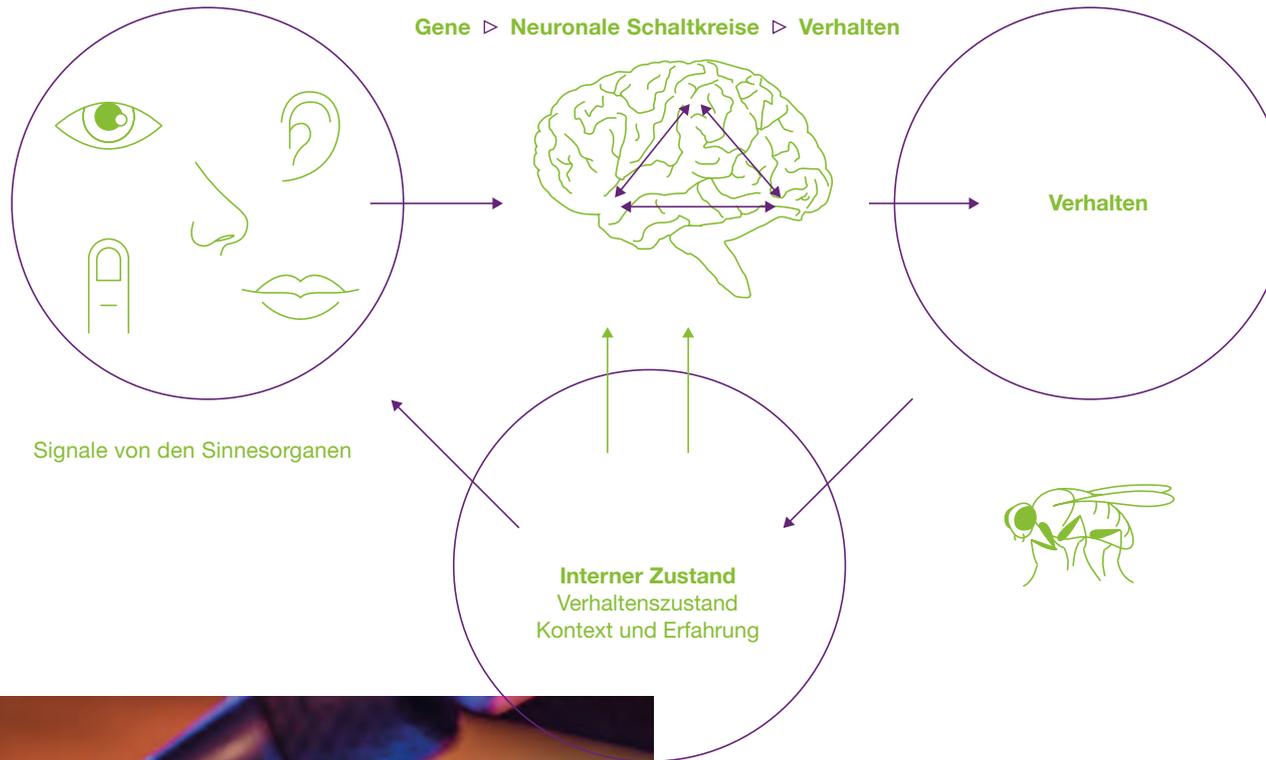


Das war zu erwarten. Für Überraschung sorgte jedoch der Befund, dass die hungrigen Fliegen selbst nach zehn erfolglosen Versuchen nicht aufgeben. Während satte Tiere schnell nachlassen, strengen sich die hungrigen von Mal zu Mal mehr an. Offenbar schaukelt sich aufgrund ihrer inneren Motivation das Programm ‚Laufen und Suchen‘ mit jeder Wiederholung weiter auf.

„Das lässt sich am einfachsten durch eine Art Rückkopplungsschleife im Gehirn erklären. Also haben wir nach entsprechenden Strukturen im Fliegenhirn gesucht“, sagt die Neurobiologin. Im Lern- und Erinnerungszentrum, das seiner Form wegen Pilzkörper genannt wird, wurde das TUM-Team fündig: „Elektronenmikroskopische Aufnahmen unserer Kollegen in USA und England zeigen uns, welches Neuron mit welchem spricht. So fanden wir eine wechselseitige Verbindung zwischen Neuronen, die sich

mithilfe von Dopamin – einem chemischen Botenstoff, der auch beim Menschen vorkommt – verständigen“, berichtet die Wissenschaftlerin. Diese ‚Dopaminzellen‘ unterhalten sich nicht nur mit ihresgleichen, sondern auch mit Input- und Output-Zellen, die auf eintreffende Duftsignale ansprechen und die Fliegen zum Laufen veranlassen. Eine wichtige Rolle spielen zudem auf Zucker und andere Geschmacksreize empfindliche Zellen: Diese ‚Futterneuronen‘ kommunizieren mit den Output-Zellen über den Botenstoff Octopamin, welcher in seiner Funktion dem menschlichen Noradrenalin nahe kommt.

An diesem Punkt kommt Professor Julijana Gjorgjieva ins Spiel. Die Expertin für Computational Neuroscience entwickelte ein Rechenmodell, mit dem sich das Verhalten der Fliegen anhand von Interaktionen der drei Neuronentypen nachvollziehen lässt.



Die Fliegen werden mit Kälte oder CO<sub>2</sub> anästhesiert und dann mit Pinzetten und Mikromanipulatoren unter dem Mikroskop bewegt. Festgeklebt werden sie mit UVgehärtetem Dentalkleber, der extrem schnell härtet.



„Wir fanden einen Schaltkreis von Neuronen, die sich mithilfe von Dopamin verständigen.“

*Ilona Grunwald Kadow*

Durch den Kontakt mit rotem Licht lassen sich bestimmte Neuronen der gentechnisch veränderten Fliegen an- und abschalten. Damit dies nur im Experiment passiert, werden diese Fliegen in blauem Licht gehalten.

Es kann simulieren, wie hungrige Tiere sich nach jedem erfolglosen Versuch mehr ins Zeug legen, um an Futter zu gelangen. Und es erklärt, wie Geschmacksreize die Fliegen dazu bringen, von ‚Laufen und Futtersuchen‘ auf ‚Stoppen und Fressen‘ umzuschalten. Eine entscheidende Rolle spielen dabei die beiden Botenstoffe. Sie üben eine gegensätzliche Wirkung auf die Output-Zellen aus: Dopamin befeuert die Rückkopplung, Octopamin hemmt sie. „Mathematische Modelle helfen uns, die Komplexität neuronaler Schaltkreise zu entschlüsseln. Letztendlich müssen sie aber der Realität standhalten“, betont Julijana Gjorgjieva.

Der Reality Check gelingt mit gentechnisch veränderten Fliegen, die gezielt und ausschließlich in bestimmten

Typen von Nervenzellen manipuliert sind. Dazu werden in ihr Erbgut genetische Elemente eingeschleust, die auf Temperaturerhöhungen oder Lichtreize ansprechen und die betreffenden Neuronen wahlweise ausschalten oder anregen. „Manche dieser transgenen Drosophila-Stämme züchten wir selbst, andere beziehen wir von Kollegen“, sagt Ilona Grunwald Kadow. Ihr Team nutzt die maßgeschneiderten Fliegen, um Schritt für Schritt alle Elemente des postulierten neuronalen Schaltkreises ein- und auszuschalten – beim lebenden Tier. Bei einigen Fliegen blockieren die Forscher die vermutete Rückkopplung innerhalb der Dopamin- oder Output-Zellen. Sie brauchen dazu nur die Raumtemperatur um wenige Grad Celsius zu erhöhen. Denn die transgenen Fliegen sind mit einem ▶

hitzeempfindlichen Protein ausgestattet, das die Ausschüttung von Dopamin in den gewünschten Nervenzellen und folglich die Erregung der Empfängerneuronen verhindert – allerdings erst ab Temperaturen von 30 Grad. Fliegen, die dieses hitzeempfindliche Protein enthalten, fehlt nun die Dopamin-getriebene Rückkopplungsschleife und damit auch das Feedback über frühere erfolglose Versuche. Statt wie gewöhnliche Fliegen ihre Anstrengungen von Mal zu Mal zu steigern, laufen sie stets im selben Tempo und geben schneller auf. Andere Fliegen wurden gentechnisch so verändert, dass ihre Futterneuronen einen lichtempfindlichen Proteinkanal

tragen. Bei Kontakt mit rotem Licht, das von außen durch das Körpergewebe der Fliegen eindringt, öffnet sich der Kanal. So können Natrium- und Kaliumionen die Membran der Nervenzelle passieren und bewirken einen Erregungszustand, der zur Ausschüttung von Octopamin führt. Weil dieser Botenstoff die Output-Zellen hemmt, hören diese Tiere auf zu laufen – auch wenn sie Hunger haben und Futterduft riechen. „Die Fliegen machen also genau das, was unser Modell vorhersagt. Das ist ein sehr starker Hinweis für die Existenz dieses Schaltkreises“, sagt Julijana Gjorgjieva.



Julijana Gjorgjieva (auf dem Bildschirm) entwickelt mathematische Modelle, um die Komplexität neuronaler Schaltkreise zu entschlüsseln. Via Skype diskutiert sie die Ergebnisse ihrer Computersimulationen mit ihrer Kollegin Ilona Grunwald Kadow.



---

**Prof. Ilona Grunwald Kadow**

---

## Genetikerin an vorderster Front der Hirnforschung

Nach ihrem Biologiestudium in Göttingen und San Diego promovierte Ilona Grunwald Kadow am European Molecular Biology Laboratory und an der Universität Heidelberg im Bereich Neurowissenschaften. Nach einem Postdoc an der University of California in Los Angeles und am MPI für Neurobiologie in München/Martinsried leitete sie acht Jahre lang eine Emmy-Noether- und später eine Max-Planck-Forschungsgruppe am MPI für Neurobiologie in München/Martinsried. Anfang 2017 übernahm sie an der TUM School of Life Sciences in Weihenstephan die neu eingerichtete Professur für Neuronale Kontrolle des Metabolismus.

---

---

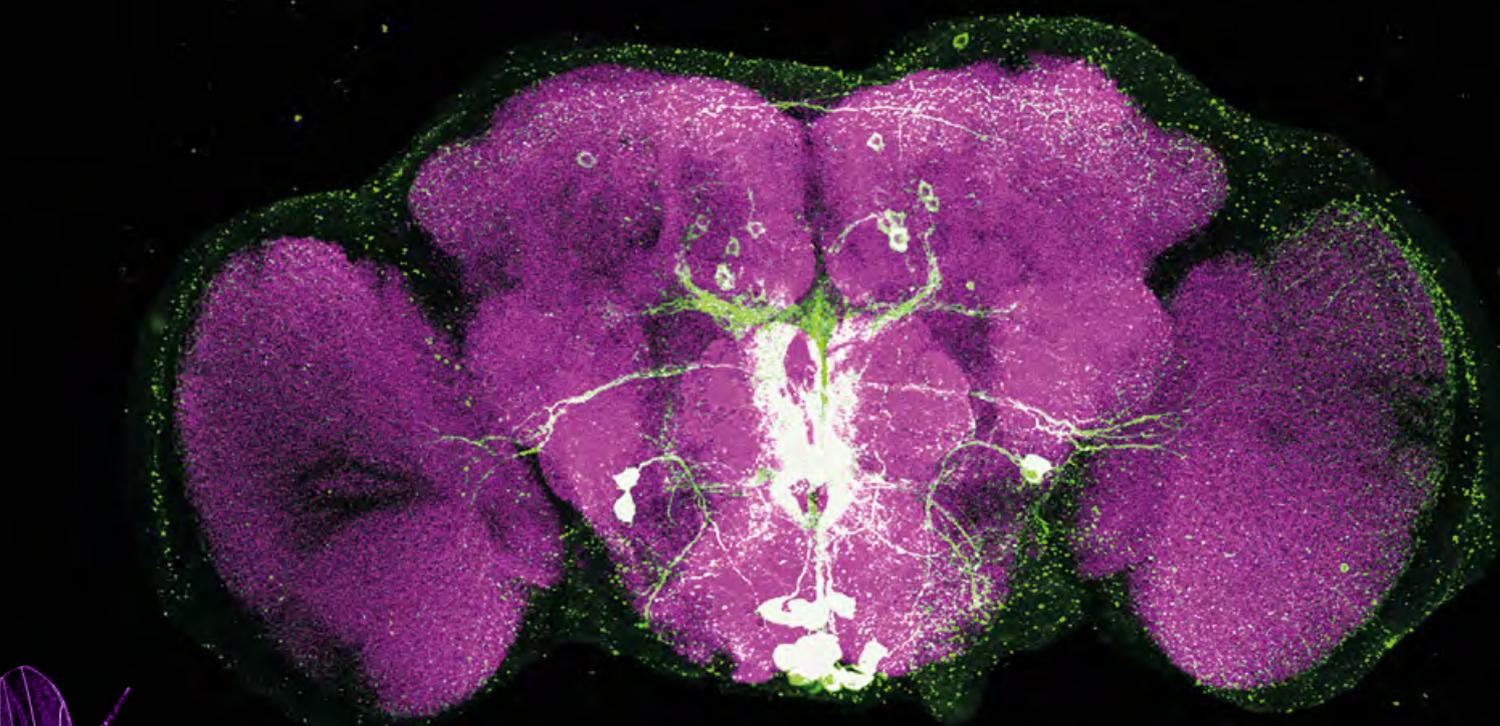
**Prof. Julijana Gjorgjieva**

---

## Junge Spitzenforscherin mit interdisziplinärem Fokus

Die gebürtige Mazedonierin absolvierte ihren Master in Mathematik und ihre Promotion an der University of Cambridge. Zwei Sommersemester entfachten ihr Interesse an Systembiologie und Neurowissenschaften und führten sie als Postdoc zunächst ans Zentrum für Hirnforschung in Harvard und später an die Brandeis University, USA. Seit 2016 leitet sie eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt und hat eine TUM-Professur für Computational Neurosciences an der School of Life Sciences in Weihenstephan inne.

---



Die grün hervorgehobenen Nervenzellen nutzen den Botenstoff Octopamin, um Signale vom Hirnstamm der Fliege an das restliche Gehirn weiterzugeben. Die Magentafärbung entsteht durch Antikörper und kennzeichnet Synapsen, die überall im Gehirn sind. So bilden sich durch die Farbunterschiede Signalwege im Gehirn ab.



Bildnachweis: Astrid Eckert, Nicolas Gompel, Anja Friedrich

Was können wir von *Drosophila* lernen? „Hunger ist eine große Gemeinsamkeit zwischen Menschen und Fliegen. Die zugehörigen Verhaltensprogramme haben sich vor vielen Jahrmillionen entwickelt. Deshalb vermuten wir, dass sie in beiden Lebewesen einer ähnlichen neuronalen Kontrolle unterliegen“, so Ilona Grunwald Kadow. Dass diese Kontrolle nicht immer funktioniert, zeigt sich bei Patienten mit Essstörungen: Manch einer kann nicht aufhören zu essen, obwohl er längst satt ist. Umgekehrt sind Magersüchtige nicht mehr in der Lage, ihrem Hunger-

signal zu folgen und hungern sich im Extremfall zu Tode. „Da ist etwas aus dem Ruder gelaufen. Ein Programm, das definitiv falsch ist, hat es geschafft, ein lebenswichtiges und eigentlich dominantes Programm zu unterdrücken. Wir wollen verstehen, wie das passiert und wie man eventuell eingreifen kann“, so die TUM-Forscherin. Indem sie weiß, wie der Schaltkreis im Fliegenhirn arbeitet, ist sie diesem Ziel einen kleinen Schritt nähergekommen. ■

Monika Offenberger

Link

[www.ph.tum.de/research/groups/group/TUPHECP](http://www.ph.tum.de/research/groups/group/TUPHECP)

# Neutrinos: Eiskalte Detektiv- arbeit

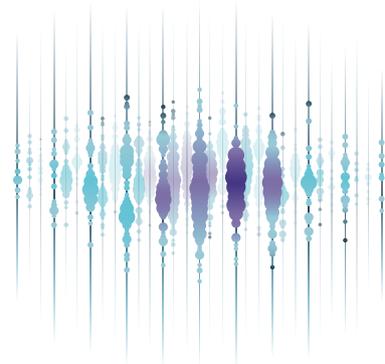


Auf der Suche nach Neutrinos im Rahmen des IceCube-Experiments in der Antarktis stießen Prof. Elisa Resconi und ihr Forscherteam auf ein extrem energiereiches Partikel. Als sie es zurückverfolgten, stellten sie fest, dass es sich um ein 5,7 Milliarden Jahre altes Objekt handelte.



Die Physikerin Elisa Resconi in einer begehbaren Installation des Konzeptkünstlers Tim Otto Roth. Die Kugeln symbolisieren die Detektoren des Experiments IceCube. Die Lichter simulieren den Einschlag eines Neutrinos, ähnlich wie es die Messergebnisse im Bild unten darstellen.

Bildnachweis: Jüli Eberle; Grafiken: edlundsepp (Quelle: IceCube)



Abstract

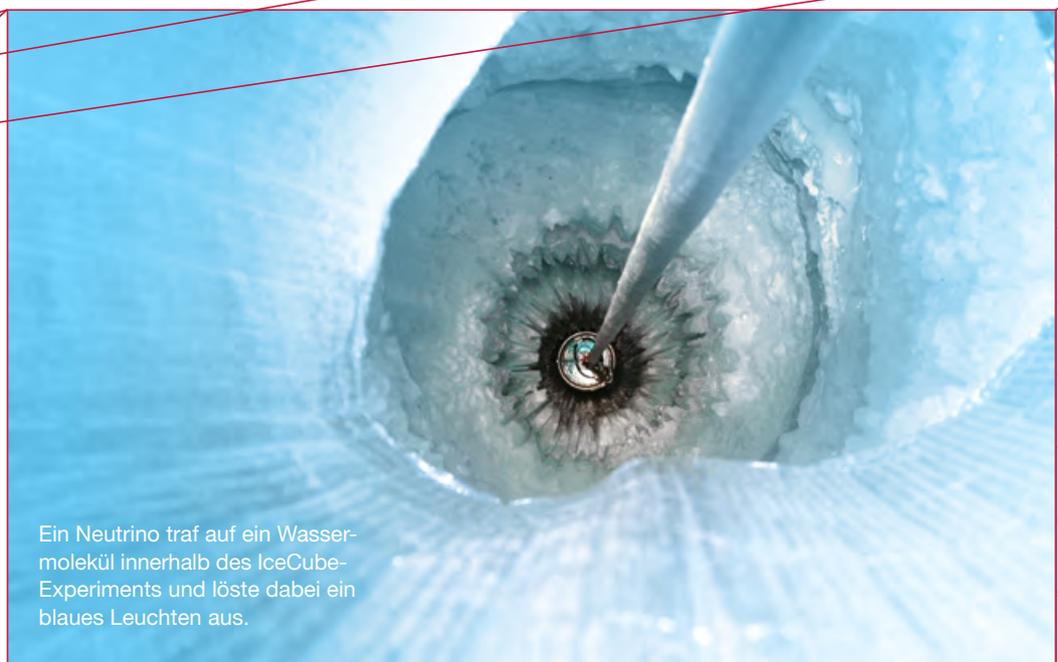
## Tracking down the origin of high-energy neutrinos

E

On September 22, 2017, sensors picked up a glow in the Antarctic ice – and put neutrino researcher Prof. Elisa Resconi on a hot trail. Together with an international research team, she was able to demonstrate that a high-energy neutrino had reached the Earth, and that it originated from a blazar 5.7 billion light years away. “Science” magazine declared this finding one of the biggest breakthroughs of 2018.

Neutrinos are difficult to detect. The smallest particles in the universe have no charge and almost no mass. They pass through matter with ease and are not deflected by magnetic fields. In an effort to trace the elusive neutrinos, a telescope was set up in the Antarctic ice. The IceCube South Pole Observatory can detect neutrinos indirectly. If one collides with an atomic nucleus, a muon can form. This charged elementary particle emits photons along its trajectory. Known as Cherenkov radiation, this is picked up by optical sensors in the ice. From the

measured values, algorithms calculate the energy of the neutrino and the direction it came from. Based on this approach, the particle detected on September 22, 2017 had an energy of 290 tera (thousand billion) electron volts and came from the region of the Orion constellation. In collaboration with astronomers, the IceCube researchers succeeded in pinpointing the exact origin of the cosmic neutrino as blazar TXS 0506+056, a black hole at the center of an active galaxy. This generates a jet of high-energy radiation directed towards Earth. By correlating various telescope measurements with data from the IceCube Observatory, the team was able to show for the first time that a blazar not only emits X-rays and gamma rays during periods of increased activity, but also high-energy neutrinos. As the next step, the researchers aim to investigate the processes involved in forming this high-energy radiation. □



Ein Neutrino traf auf ein Wassermolekül innerhalb des IceCube-Experiments und löste dabei ein blaues Leuchten aus.

Über Kabel liefern die Signale durchs ewige Eis von den Detektoren zum Computer.



*22. September 2017*

**A**m Freitag den 22. September 2017, 20:54 UTC registrieren Sensoren nahe dem Südpol ein schwaches, bläuliches Leuchten in mehr als 1500 Metern Tiefe. Nur wenige Minuten später poppt auf dem Monitor von Prof. Elisa Resconi im Departement für Physik der TUM, 15.000 Kilometer entfernt, eine Alert-Meldung auf. Die Physikerin erinnert sich noch genau an diesen Moment: „Ich kam gerade von einer Besprechung zurück ins Büro und habe die Mail sofort geöffnet. Die Daten deuteten eindeutig darauf hin, dass die Sensoren im IceCube South Pole Observatory Hinweise auf ein hochenergetisches Neutrino gefunden hatten.“ Auf diesen Moment hat die Physikerin lange gewartet: Seit mehr als 20 Jahren ist sie den winzigen Teilchen, die kaum Masse

und keine Ladung haben und die Materie problemlos durchdringen, auf der Spur. Am IceCube-Projekt war sie, zusammen mit Forscherteams aus 12 Ländern, von Anfang an beteiligt.

IceCube ist das ungewöhnlichste Teleskop der Welt: Der Detektor besteht aus 5160 optischen Sensoren. Diese hängen an insgesamt 86 Drahtseilen, die 1500 bis 2500 Meter tief in das Eis der Antarktis versenkt wurden. Über Kabel sind die Sensoren mit der Oberfläche verbunden. Die Anordnung umfasst einen Würfel von einem Kubikkilometer Eis.

Mit dem IceCube-Detektor in der Antarktis lassen sich Neutrinos indirekt nachweisen: Kollidiert eines mit einem Atomkern im Eis, kann ein Myon entstehen. Dieses geladene Elementarteilchen setzt die Flugbahn des Neutrinos fort und erzeugt dabei ein bläuliches Leuchten, die Tscherenkow-Strahlung. Die optischen Sensoren im Eis registrieren die Photonen, eigens entwickelte Algorithmen werten die Messergebnisse aus. Aus der Anzahl der Photonen und ihrer Intensität lässt sich die Energie des Neutrinos ermitteln, aus der Spur der Tscherenkow-Strahlung die Richtung, aus der es gekommen ist. ▶

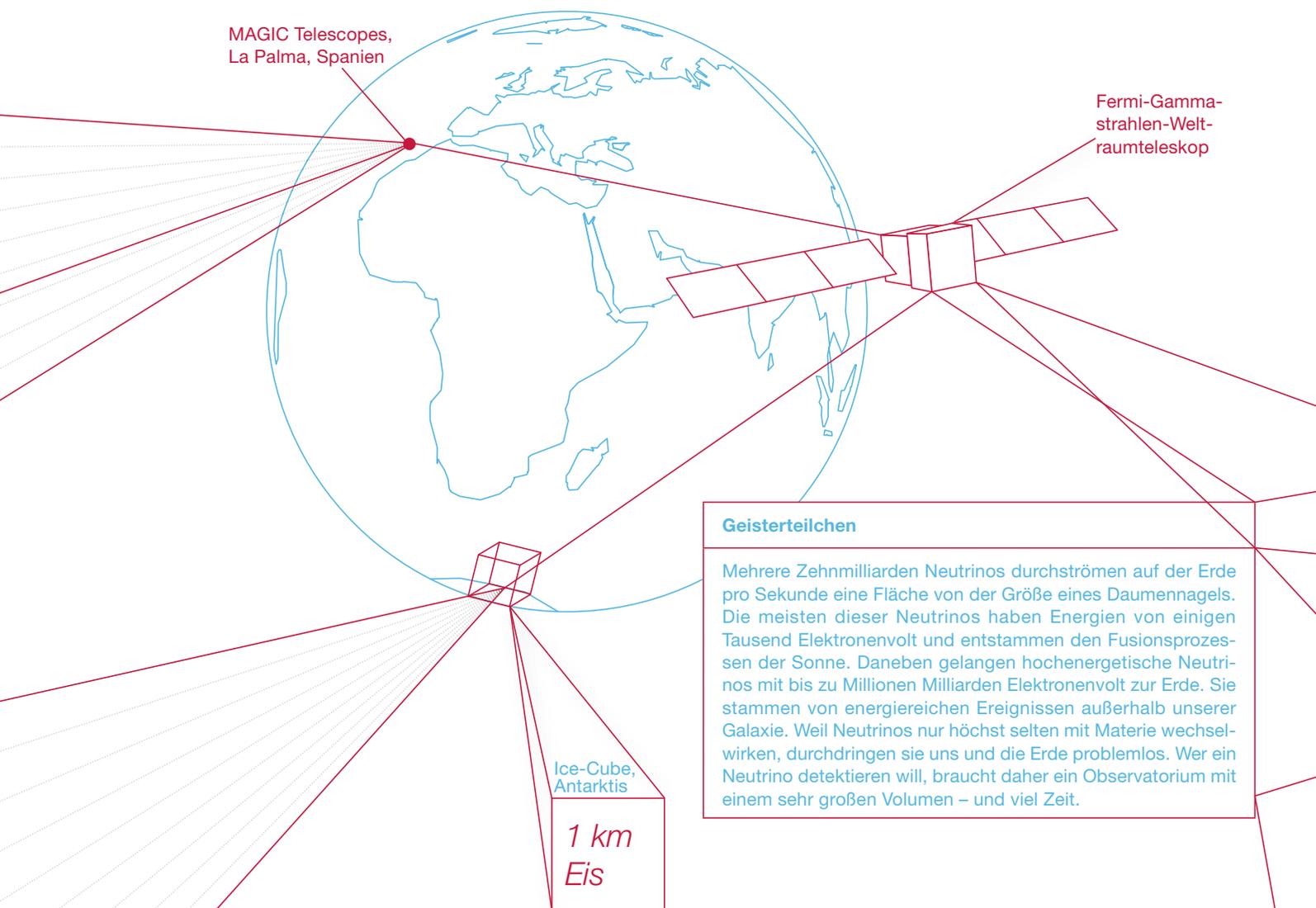


*„Dass Blazare eine Quelle hochenergetischer Neutrinos sind, wurde schon lange vermutet, aber der Beweis stand bisher aus.“*

*Elisa Resconi*

**5.160**  
**Detektoren**

Im Laborgebäude von IceCube liefern die Signale zusammen und wurden dann in alle Welt verschickt. Sie gingen auch an Paolo Padovani (oben links) von der Europäischen Südsterntur, an Paolo Giommi, damals an der TUM, und an das MAGIC-Observatorium auf Palma.



Bildnachweis: ESO, Eckert / TUM; 1 Daniel Lopez / IAC; IceCube Collaboration; Grafiken: edlundsepp

Das Gros stammt aus der Sonne und hat Energien von einigen Millionen Elektronenvolt. Wesentlich seltener treffen hochenergetische Neutrinos mit bis zu Millionen Milliarden Elektronenvolt – abgekürzt Peta eV - die Erde. Und noch seltener trifft eines, wie am 22. September 2017, genau den Kubikmeter Eis in der Antarktis, den der IceCube-Detektor umfasst.

An diesem Abend bleibt Elisa Resconi länger im Büro. Während sie sich die Messergebnisse genau ansieht, unterbrechen auf Grund der Alert-Meldung ein Dutzend Teleskope ihr Routineprogramm und nehmen das Sternbild Orion ins Visier. Dort befindet sich den Berechnungen zu Folge die Quelle der Neutrino-Strahlung. Es ist der Beginn einer interdisziplinären Detektivarbeit: „Die Suche

nach der Herkunft der hochenergetischen Neutrinos gleicht einem kriminalistischen Indizienbeweis“, betont die Physikerin.

Die Beobachtungen des Fermi Gamma-ray Space Telescope sowie das Gammastrahlen-Teleskops MAGIC deuten auf einen Hauptverdächtigen hin: den Blazar mit der Katalognummer TXS 0506+056. Er befindet sich genau in dem Himmelssegment, aus dem das IceCube-Neutrino gekommen ist. Blazare sind aktive galaktische Kerne, Schwarze Löcher, die Materie verschlingen und dabei „Jets“ aus hochenergetischen Teilchen, Röntgen- und Gammastrahlen erzeugen, die auf die Erde gerichtet sind. Der Jet des Blazars TXS 0506+056 fällt am 22. September 2017 auf durch eine erhöhte Strahlungsintensität. ▶

„Damit hatten wir eine heiße Spur, die wir weiterverfolgen konnten“, berichtet Resconi. „Dass Blazare eine Quelle hochenergetischer Neutrinos sind, wurde schon lange vermutet, aber der Beweis stand bisher aus.“

Mit einem einzelnen Neutrino war dieser freilich nicht zu erbringen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler durchforschten daher das IceCube Archiv nach weiteren Spuren von Teilchen, die aus derselben Richtung gekommen waren, denen man aber zuvor keine Beachtung geschenkt hatte, weil ihre Energie etwas niedriger war. „Als

das Ergebnis der Datenanalyse auf dem Monitor aufgepoppt ist, sind alle fast ausgeflippt“, erinnert sich die Physikerin: „Mehr als ein Dutzend Teilchen deuteten auf denselben Ursprungsort hin.“

Aber stammten sie wirklich vom Blazar TXS 0506+056? Um diese Frage zu beantworten, brauchte Resconi die Unterstützung von Astronomen: „Es war ein glücklicher Zufall, dass zwei Blazar-Forscher in der Nähe waren: Paolo Padovani, der an der Europäischen Südsternwarte (ESO) arbeitet, sowie Paolo Giommi, damals Fellow am Institute for Advanced Study der TUM.“



13. Juli 2018

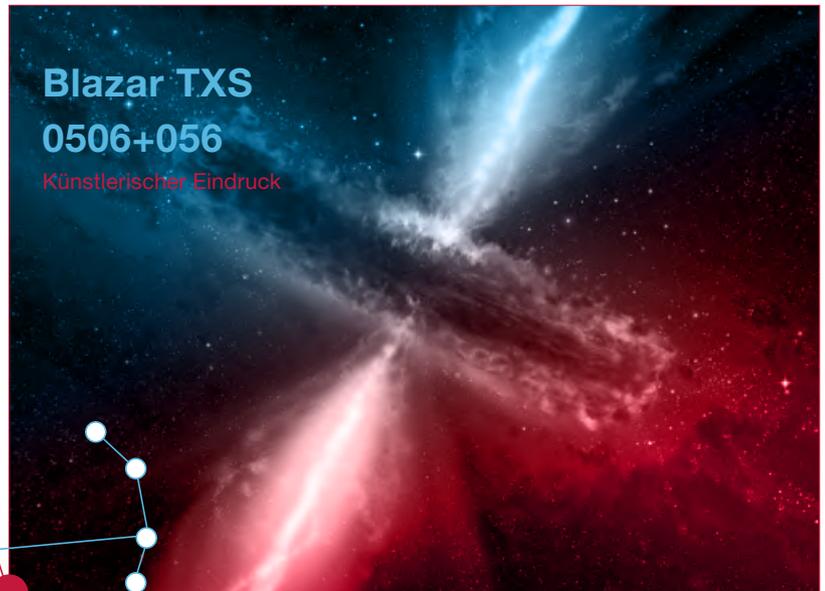


Prof. Elisa Resconi

## Physikalische Detektivin in Sachen Neutrinos

Die Berufswahl fiel Elisa Resconi nicht schwer: „Es hat mich immer glücklich gemacht, Dinge zu verstehen. Daher war klar, dass ich Physikerin werden wollte“, erinnert sich die heute 47-Jährige. Ihre Karriere als Neutrino-Forscherin begann nach dem Studium in Mailand und Genua mit ihrer Promotion am Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Seit 18 Jahren ist sie beteiligt am Design und Aufbau der IceCube Versuchsanordnung.

Resconi war Marie Curie Postdoctoral Fellow am DESY-Zeuthen, es folgte ein Aufenthalt am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und eine Gastprofessur in Nürnberg-Erlangen. Seit 2011 ist sie Professorin – und nebenbei auch Frauenbeauftragte – im TUM-Department für Physik. Sie ist Sprecherin des DFG Sonderforschungsbereich 1258 „Neutrinos und Dunkle Materie in der Astro- und Teilchenphysik“, sowie Mitglied des Cluster of Excellence Universe sowie des Cluster of Excellence Origins.



## Blazar TXS

0506+056

Künstlerischer Eindruck

5,7

Milliarden Lichtjahre entfernt

Orion

Schließlich stellte sich heraus, dass das Neutrino vom Blazar mit der Katalognummer TXS 0506+056 im Sternbild des Orion stammen musste.



Die Nachricht ging um die Welt: Science brachte sie auf die Titelseite und machte sie zum „Breakthrough“ des Jahres 2018, die NASA drehte einen Film über die Entdeckung (siehe QR-Code).

Das Team durchsuchte die aktuellen Messdaten und Archive zahlreicher Teleskope: „Der Vergleich der Daten des Fermi Gamma-ray Space Telescope und der verschiedenen IceCube-Messungen zeigte eine eindeutige Korrelation von erhöhter Blazar-Aktivität und hochenergetischer Neutrinostrahlung“, erklärt Resconi. „Damit konnten wir diese zum ersten Mal einem kosmischen Objekt – 5,7 Milliarden Lichtjahre entfernt – zuordnen.“ Die Ergebnisse erschienen am 12. Juli 2018 als Titelgeschichte im Wissenschaftsmagazin Science. Kurz darauf erklärte Science die Entdeckung der IceCube-Forscher zu einem der „Breakthrough“ des Jahres 2018.

„Hochenergetische Neutrinos eröffnen uns jetzt ein neues Fenster zum Universum: Mit ihnen können wir Quellen hochenergetischer Strahlung aufspüren und erforschen“, resümiert die Wissenschaftlerin. Dazu freilich brauche man erheblich mehr Messungen. Zusammen mit Teams aus Kanada, Russland und Europa arbeitet sie derzeit an der Planung eines weltumspannenden Netzwerks von Neutrino-Teleskopen: „Die Realisierung des Projekts PLENUM – Planetary Neutrino Telescope – wird einfacher sein als alles, was wir bisher gemacht haben, denn wir wissen jetzt, wonach wir suchen müssen.“ ■

Monika Weiner

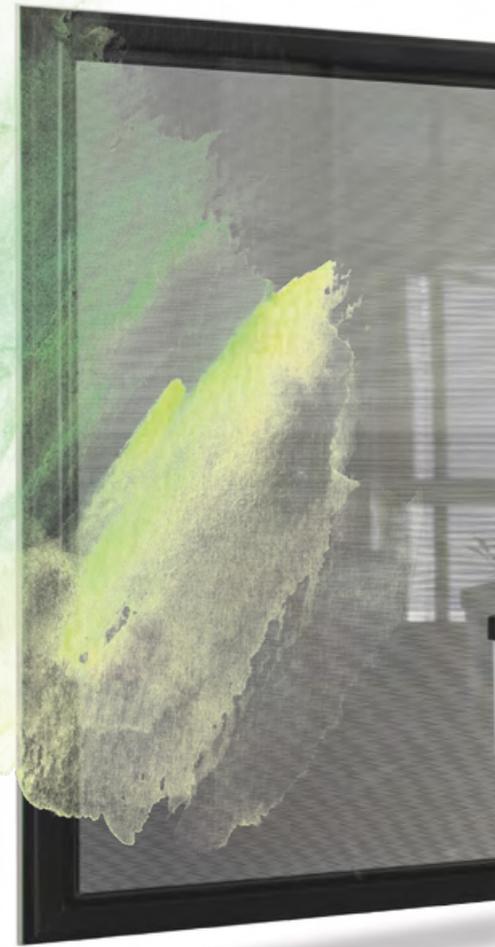
# Indoor-Beet mit Internet- Anschluss

**Mit einem intelligenten Gewächsschrank für die Wohnung bringt das junge Unternehmen Agrilution die Technologie des „Vertical Farming“ in die Küche. Das Gerät bietet optimale Bedingungen für den gesunden Anbau von Salaten, Microgreens und Kräutern.**

**W**enn immer mehr Menschen in die Metropolen ziehen und immer mehr Ackerland unter Beton verschwindet, gleichzeitig aber die Weltbevölkerung weiter zunimmt, werden in absehbarer Zeit Anbauflächen knapp. Gleichzeitig wollen viele Verbraucher Lebensmittel, die frisch, knackig und frei von Pestiziden sind. Seit einigen Jahren gibt es deshalb den Trend zum „vertical farming“. Anstatt Pflanzen auf weiten Feldern anzubauen, stapelt die vertikale Landwirtschaft die Anbauflächen übereinander, etwa in Gebäuden.

Die beiden Gründer Maximilian Lössl und Philipp Wagner haben mit ihrer 2013 gegründeten Firma Agrilution diese Idee aufgegriffen und weiterentwickelt. Sie bieten nun einen intelligenten Gewächsschrank für Privathaushalte an, in dem jeder sein Grünzeug selbst anbauen kann. „Wir haben eine komplett neue Gerätekategorie ins Leben gerufen und sind damit international der erste Anbieter eines solchen Gewächsschranks“, sagt Maximilian Lössl. „Wir geben Menschen überall auf der Welt die Möglichkeit, täglich frisches Gemüse für sich zu Hause zu ernten, das gesund ist, intensiv schmeckt und eine breite Vielfalt an alten, neuen und internationalen Sorten bietet. Gleichzeitig achten wir auf höchste Umweltstandards.“

Man erhält den Gewächsschrank seit Ende 2018 im gehobenen Küchenhandel und bei großen Elektromärkten, sowie online. Es ist ein recyclingfähiger Schrank mit acht Schubladen, in die man sogenannte Saatmatten einlegen kann. Diese bestehen aus rezyklierten Stoffresten, in die in passenden Abständen die Samen eingelagert sind. Die nötigen Nährstoffe für die Pflanzen werden durch das



Das junge Unternehmen bietet einen intelligenten, computergesteuerten Gewächsschrank für Privathaushalte an, in dem jeder Kräuter, Salate und Kleingemüse selbst anbauen kann.



Maximilian Lössl und Philipp Wagner gründeten das Unternehmen agrilution, das im Westen von München angesiedelt ist, im Jahr 2013. Inzwischen umfasst die Firma 25 Mitarbeiter.



Licht – Wärme – Luft



Internet-Anschluss



Steuerung per App



Samenmatte

Automatische Bewässerung



Wasser aus einem Tank zugeführt, daher kann auf Erde ganz verzichtet werden. Die Hersteller garantieren, kein gentechnisch verändertes Saatgut zu verwenden. Und da es in dem Gewächsschrank keine Schädlinge gibt, kann man auch alte, bewährte Sorten verwenden, die auf offenen Feldern keine Chance haben. Die Firma forscht derzeit daran, das Angebot auf bis zu 100 neue Pflanzensorten zu erweitern.

Der Gewächsschrank ist mit dem Internet verbunden und erfährt über eine App, welche Pflanzen vom Anwender wo eingelegt sind. Für die verschiedenen Pflanzenarten sind bestimmte Parameter in der Cloud hinterlegt, die für optimales Wachstum sorgen. Auf diese greift der Gewächsschrank zu und weiß dadurch, wann wie viel bewässert werden muss, welche Lichtverhältnisse die Pflanzen benötigen und wann welche Temperatur herrschen soll. Man kann das Gerät sogar bis zu drei Wochen selbständig weiterlaufen lassen, wenn man beispielsweise im Urlaub ist.

„Ein neues Küchenprodukt in den Markt zu bringen, von der Vision bis zur Serienproduktion, ist kein Kinderspiel“,

betont Philipp Wagner, der an der TUM Mathematik mit Nebenfach Wirtschaft studiert hat. „Das Gerät ist äußerst komplex, da es alle Umgebungsfaktoren für die Pflanzen kontrollieren und einhalten muss. Die Hardware und Software auf die Biologie abzustimmen, um verlässliche, wiederholbare Ergebnisse zu bekommen, war eine große Herausforderung.“ Für das Konzept des jungen Unternehmens sprechen etliche Preise: 2018 gewann es den Green Product Award, 2015 den Ecosummit Award und 2013 die Thought For Food Challenge.

Unterstützung erhielt das Start-up in seinen Anfangszeiten von der UnternehmerTUM beim Aufbau und war Teil des Kickstarter-Programms. Zeitgleich war es, ebenfalls von der UnternehmerTUM unterstützt, Teil des Climate KIC Programms. Zudem arbeitete es im Rahmen von Design Enterprise mit dem Lehrstuhl für Industrial Design zusammen. Inzwischen sind potente Investoren bei Agrilution eingestiegen, das Team umfasst mittlerweile über 25 Personen, die in Vollzeit dort arbeiten. ■ *Brigitte Röthlein*

# Munich School of Robotics and Machine Intelligence – **Der sanfte Roboter**



Link

[www.msrm.tum.de/rsi/lehrstuhl-fuer-robotik-und-systemintelligenz](http://www.msrm.tum.de/rsi/lehrstuhl-fuer-robotik-und-systemintelligenz)



**So sanft kann eine Roboterhand sein:** Anders als die meisten Industrieroboter, vor deren Kraft man den Menschen schützen muss, können Haddadins Roboter sogar eine Testperson rasieren.

**Was ist das Wesen menschlicher Intelligenz? Und wie kann man es in Roboter und andere intelligente Maschinen übertragen? Diesen und anderen Fragen geht Professor Sami Haddadin in der „Munich School of Robotics and Machine Intelligence“ nach. Aufbauend auf neuen Theorien und Methoden entwickelt er zusammen mit seinem Team Roboter mit intelligentem Tastsinn – und ganz praktisch einsetzbare lernfähige und miteinander vernetzte Roboterassistenten.**

## Collectively learning robots

E

Machine intelligence aims to create smart robots with human-like sensory abilities. As machines evolve, they will increasingly collaborate with people, so safe, intuitive interaction is a must.

The Technical University of Munich is set to play a key role in shaping the evolution of human-robot interaction. By founding the Munich School of Robotics and Machine Intelligence (MSRM), it is exploring new ways of making mechanical assistance systems smarter and more responsive.

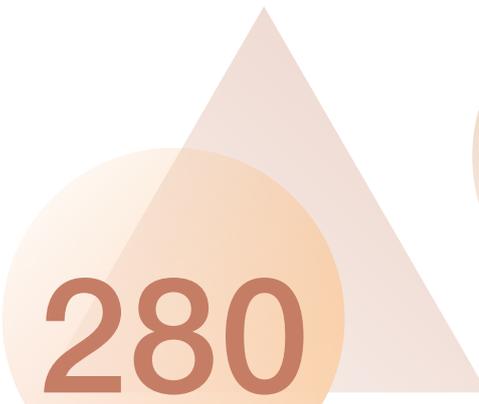
The Director of the newly founded institute is Prof. Sami Haddadin, one of the leading lights in the field of robotics and systems intelligence research. TUM President Wolfgang Herrmann was instrumental in attracting the robotics luminary to Munich – thus outpitching elite institutions such as Stanford University and Massachusetts Institute of Technology.

Prof. Haddadin's current flagship project involves robots cooperating through collective machine learning, enabling them to acquire new skills almost instantly and with minimal computing power. Proof-of-concept at the heart of this research project is a lock and key: A robot learns to insert keys into various keyholes to open the

lock. For an adult human, this would be a straightforward task, but it is a highly complex operation for a machine. The acquired knowledge is then available for other robots to use via the cloud.

For Haddadin, robotics has a lot to do with the way people “tick”. He views his robots as a type of testbed for studying the basic principles of intelligent behavior and simulating the human blueprint at a technical/systemic level. This modeling means that robots are better able to work alongside humans.

MSRM has currently defined three research strands with a specific application focus. “The future of health” explores the use of robotics and artificial intelligence to support elderly people, “The future of work” focuses on collective learning by safe robotic assistants, and “The future of mobility” seeks to develop teams of autonomous mobile systems. Prof. Haddadin's research is also flanked by ethical discussions. □



280

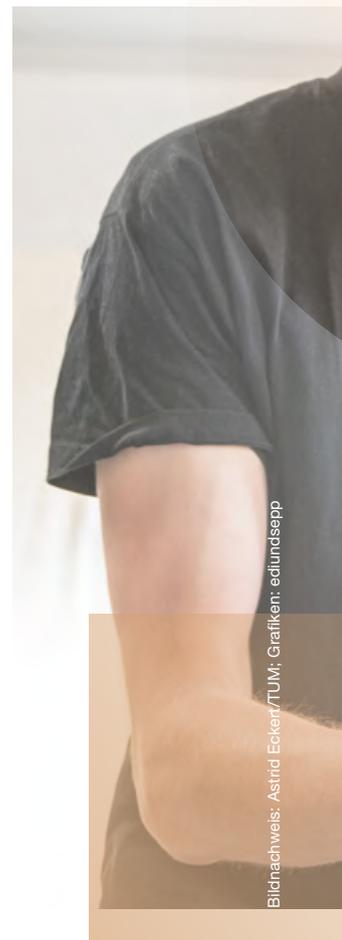
Millionen Euro will die Bayerische Staatsregierung für das Kompetenznetzwerk Künstliche Maschinelle Intelligenz bis 2023 bereitstellen



54

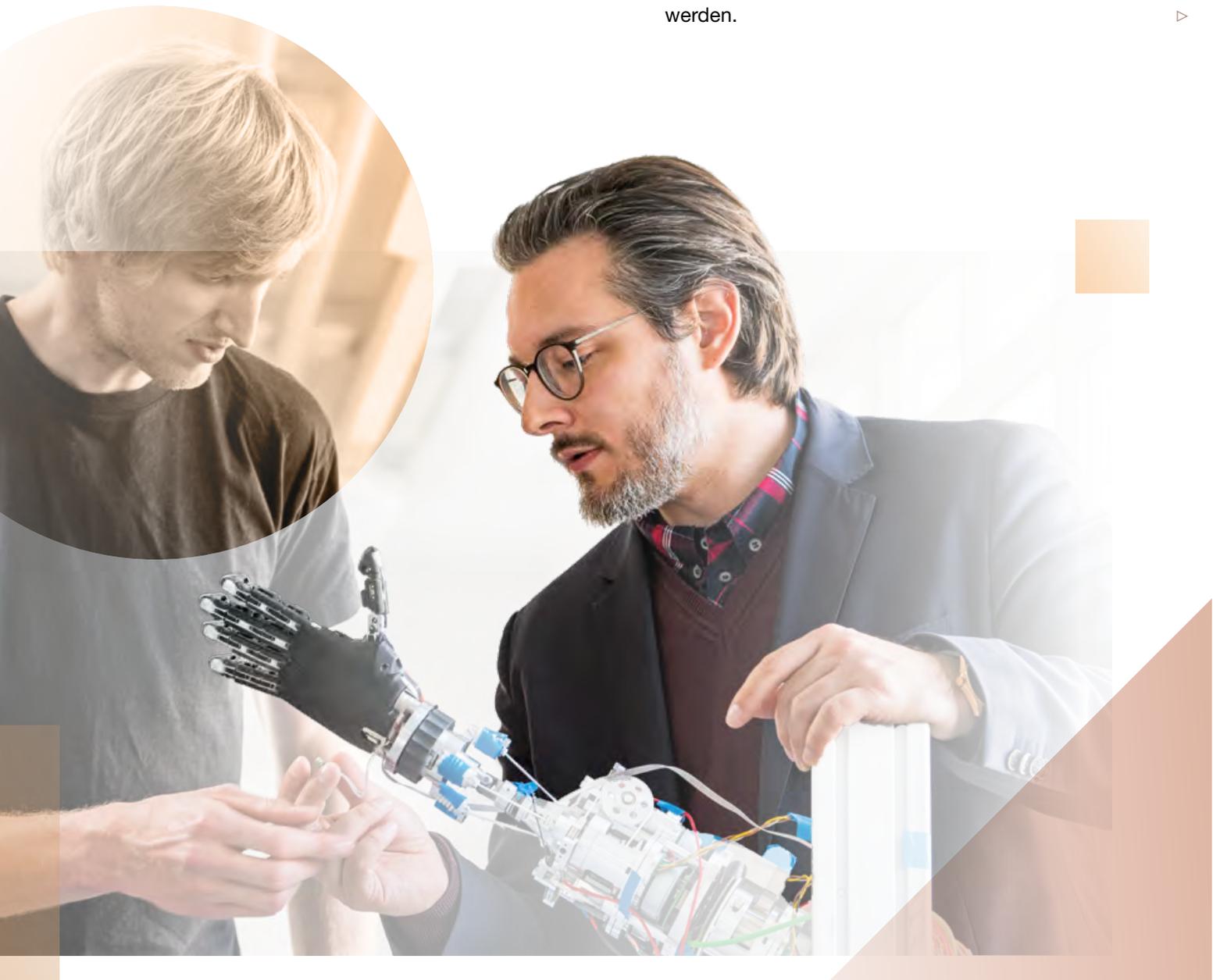
Professoren arbeiten an der TUM an roboternahen Themen

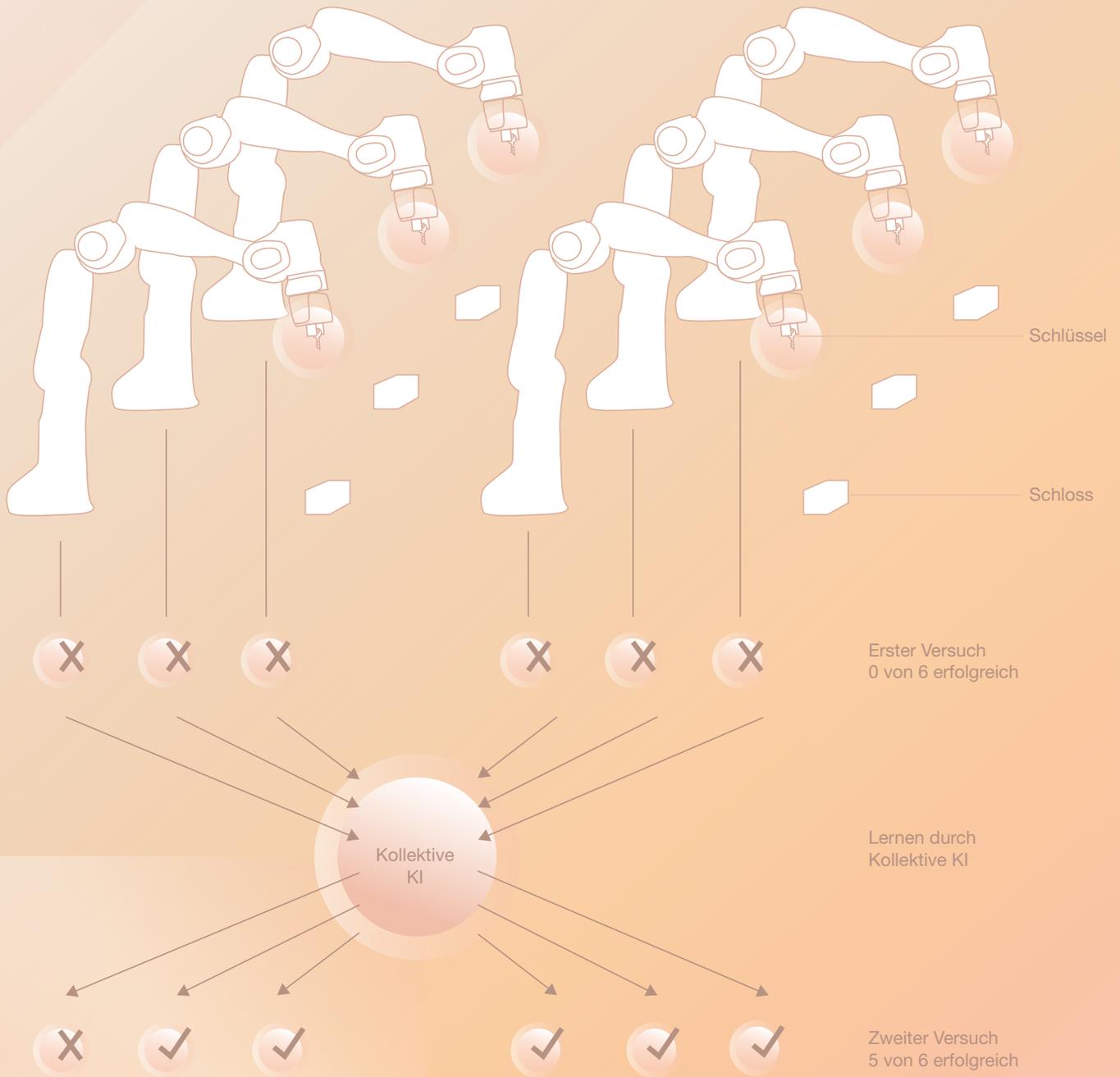
Alexander Tödtheide (links), hier in einer Besprechung mit Prof. Sami Haddadin, entwickelt eine Handprothese mit künstlichen Muskeln.



**R**oboter und intelligente Maschinen werden in den nächsten Jahren unseren Arbeitsalltag und unser Zusammenleben spürbar verändern. Die Maschinen sollen einerseits nach menschlichem Vorbild lernen, sich jedoch gleichzeitig auch klar von ihren biologischen Vorbildern als technisches System unterscheiden – sie werden künftig mit Menschen in Kontakt treten und müssen daher nicht nur intuitiv zu bedienen, sondern auch sicher sein. Die TUM will diese Entwicklung maßgeblich mitgestalten und hat mit Professor Sami Haddadin einen der bedeutendsten Wissenschaftler auf dem Gebiet der Robotik und Systemintelligenz verpflichtet.

Seit April 2018 ist der 38-jährige Forscher Direktor der neu gegründeten Munich School of Robotics and Machine Intelligence (MSRM) – untergebracht in den ehemaligen Gebäuden der Papiertechnischen Stiftung in München-Schwabing. Das Ziel der MSRM ist es, neue Wege zu beschreiten, um Roboter und andere Maschinen auch durch modernste Künstliche Intelligenz „schlauer“ zu machen. TUM-Präsident Wolfgang Herrmann hatte den Topwissenschaftler nach München geholt – und damit die Eliteuniversität Stanford und das MIT in Massachusetts ausgestochen. Für die Hochschule war das ein starker Coup – denn Haddadins Forschung in der Mensch-Roboter-Interaktion gilt als bahnbrechend. Seine Arbeiten eröffnen eine völlig neue Sichtweise auf die Art und Weise, wie Roboter gebaut werden, wie sie lernen und programmiert werden. ▸





**Kollektives Lernen:** Ein Roboter lernt, wie man Schlüssel in verschiedene Schlüssellöcher steckt, um ein Schloss zu öffnen. Anschließend kann er sein Wissen über kollektive Künstliche Intelligenz an seine „Kollegen“ weitergeben. Sie haben Zugang zu dem sich ständig vergrößern- den Pool, in den alle Maschinen ihr Wissen eingespeist haben.

Prof. Haddadins aktuelles Vorzeigeprojekt sind durch Kollektives Maschinelles Lernen kooperierende Roboter, die binnen kürzester Zeit und bei geringstem Rechenbedarf nahezu verzögerungsfrei neue Fertigkeiten erlernen. Der Prüfstein bei diesem Forschungsprojekt ist eine Schlüssel-Schloss-Einheit: Ein Roboter lernt, Schlüssel in verschiedene Schlüssellöcher zu stecken und das Schloss zu öffnen – eine für einen erwachsenen Menschen geradezu triviale, für eine Maschine aber höchst komplexe Handlung.

## Sensible Maschinen

Um einen Schlüssel in ein passendes Gegenstück einzuführen, braucht es eine gehörige Portion Feingefühl – etwas, das sich Roboter erst aufwändig beibringen müssen. Damit sich die Roboterhand ähnlich sensibel wie eine Menschenhand bewegt, konstruierte Prof. Haddadin einen ganz neuen Mechanismus nach dem Vorbild des menschlichen Bewegungsapparats. „Mit dieser Art von Feinfühligkeit haben wir für Maschinen die Grenzen des aktuell technisch Machbaren erreicht“, sagt er. „Kinder können das erst mit drei oder vier Jahren. Wenn Sie andere Roboter das machen lassen, dann sind entweder der Schlüssel oder das Schloss beschädigt. Wir sind sozusagen die Feinmotoriker der Robotik.“

Die Hand gilt in der Robotik als zentrales Instrument – sie ist quasi die Schnittstelle zwischen Geist und Umwelt. Und die Hand brachte Sami Haddadin mehr oder weniger zu seinem jetzigen Forschungsgebiet. „Zu meiner Studienzeit waren Roboter noch grobschlächtige Maschinen; das fand ich nicht besonders interessant“, sagt er. „Auf der Hannover-Messe habe ich dann aber schon Ende der 90er etwas total Spannendes gesehen: eine Roboterhand. Das Faszinierende für mich: Hier wurde ein technisches System umgesetzt, das von der menschlichen Hand inspiriert und sehr nahe – zumindest dachte ich das damals – am Menschen war.“ Diese Verbindung von Mensch und Maschine hat Haddadin dazu gebracht, sich schon früh mit biologischen Systemen zu befassen.

## Roboter-Kollektiva lernen wie Kleinkinder

Die Feinfühligkeit ist aber nur Mittel zum Zweck. Der Clou an dem Projekt ist, dass der Roboter das Gelernte an andere weitergeben kann; seine Kollegen holen sich das generierte Wissen aus der Gesamtheit aller Maschinen. „Die Roboter können dieses Wissen nicht nur lernen und weitergeben, sondern auch konstruktiv verwenden – mit der Konsequenz, dass das Lernen durch die Vernetzung plötzlich massiv beschleunigt wird“, erklärt Sami Haddadin. Er möchte es aber nicht bei diesem einfachen Schlüssel-Schloss-Beispiel belassen. Das jetzige System kann weiter ausgebaut werden. So plant er zum Beispiel, das Anwendungsszenario in die Mehrarmigkeit zu überführen und neue Hände zu entwickeln, die basierend auf dem Verständnis des Menschen weitere Fähigkeiten haben. ▷

**Über Drehmomentsensoren in den Gelenken**  
in Kombination mit einem künstlichen zentralen Nervensystem fühlt der Roboter, wie er den Schlüssel richtig positionieren muss.



Prof. Haddadin schwebt schließlich auch ein weltumspannendes Netz von Robotern vor, die miteinander verbunden sind. „Ein paar tausend Roboter, miteinander vernetzt, werden innerhalb von kürzester Zeit Fähigkeiten von Kleinkindern erlernen können – nicht in Jahren, nicht mit Großrechnern und Riesenrechenkapazitäten, und auch nicht mit aufwändigen Big-Data-Algorithmen. Stattdessen sorgt einfach nur die Systemintelligenz in den neuartigen KI-Algorithmen dafür, dass sie die Fähigkeiten ähnlich wie der Mensch in wenigen Schritten lernen. Ich sehe nahezu unendliche Möglichkeiten in diesen Technologien. Es liegt dann wieder an uns Menschen, sie auch zum Wohle aller richtig und verantwortungsbewusst einzusetzen.“

### Verstehen heißt Nachbauen

Für Haddadin hat die Robotik sehr viel damit zu tun, wie der Mensch funktioniert. „Die Frage nach dem Verständnis von Grundprinzipien der Intelligenz treibt mich eigentlich an“, sagt er. Ähnlich wie die Newtonschen Gesetze oder die Maxwell'schen Gleichungen die physische Welt universell beschreiben, gibt es für Prof. Haddadin auch in intelligenten Systemen Grundprinzipien, die das systemische Verhalten im Hintergrund bestimmen. Ein Beispiel für ein solches Grundprinzip ist die Antwort auf die Frage, wie die menschliche Hand nach einem Gegenstand greift. Sie beeinflusst den Entwurf der Roboter wie auch die intelligenten Lernalgorithmen. Als Ergebnis wird die Bedienung der Roboter kinderleicht und erfordert keinerlei Programmierkenntnisse: Tätigkeiten, die der Roboter ausführen soll, braucht man ihm lediglich vormachen. Daraus lernt die Maschine und kann das erworbene Wissen selbständig auch für andere Herausforderungen nutzen – eine Fähigkeit, die herkömmliche Industrieroboter nicht haben.

Zentral ist für Haddadin dabei nicht die Natur der Intelligenz: Intelligente Systeme können künstlich sein, biologisch oder hybrid. In seinen Robotern sieht er eine Art „Testbed“, um die Grundprinzipien intelligenten Verhaltens zu studieren und den menschlichen Bauplan in seinen Robotern technisch-systemisch nachzubilden. Sein Credo lautet „Verstehen heißt Nachbauen“: Wenn die dem Menschen technisch nachgebildeten künstlichen Systeme in etwa die Performance biologischer Systeme erreichen, dann ist das doch zumindest ein Indikator, dass wir etwas Essentielles über den Menschen verstanden haben. Für ihn

„Man könnte uns die Schöpfer der Feinmotorik nennen.“

Sami Haddadin

sind seine künstlichen Systeme auch Erklärungsversuche von Intelligenz beim Menschen oder anderen biologischen Systemen – Erklärungen, die uns bislang verschlossen waren.

Der theoretische Hintergrund seiner Arbeit ist aber nicht Selbstzweck. Die grundsätzlichen Überlegungen zur Maschinenintelligenz bilden die Basis für Haddadins Forschungsprojekte. „Ergebnisse aus der Grundlagenforschung sollen in praktische Anwendungen von hoher gesellschaftlicher Relevanz einfließen“, erläutert er seine Pläne. Gemeinsam mit KollegInnen, Industriepartnern und Start-ups will er seine Entwicklungen im Alltag erproben und umsetzen.

Inzwischen gibt es an der TUM bereits über 50 Professoren, die sich in unterschiedlichen Disziplinen mit Maschinenintelligenz befassen – Informatiker, Mechatroniker und Ingenieure, Mediziner und Physiker. Sie alle sollen mit den Robotikforschern kreativ und auf Augenhöhe zusammenarbeiten. Die Wissenschaftler kooperieren dabei auch eng mit der Wirtschaft – im Industriebeirat der MSRM, hier sitzen Vorstandsmitglieder und Leadership von Siemens, BMW, IBM, Airbus und anderen Konzernen.

Drei Themen bilden aktuell die praktischen sektorzentrierten Forschungsschwerpunkte: In der „Zukunft der Gesundheit“ geht es beispielsweise um die Unterstützung älterer Menschen durch Robotik und Künstliche Intelligenz, in der „Zukunft der Arbeit“ stehen kollektiv lernende und sichere Roboterassistenten im Mittelpunkt, und in der „Zukunft der Mobilität“ sollen Teams von autonomen mobilen Systemen entwickelt werden.

### Roboterassistenten unterstützen Senioren

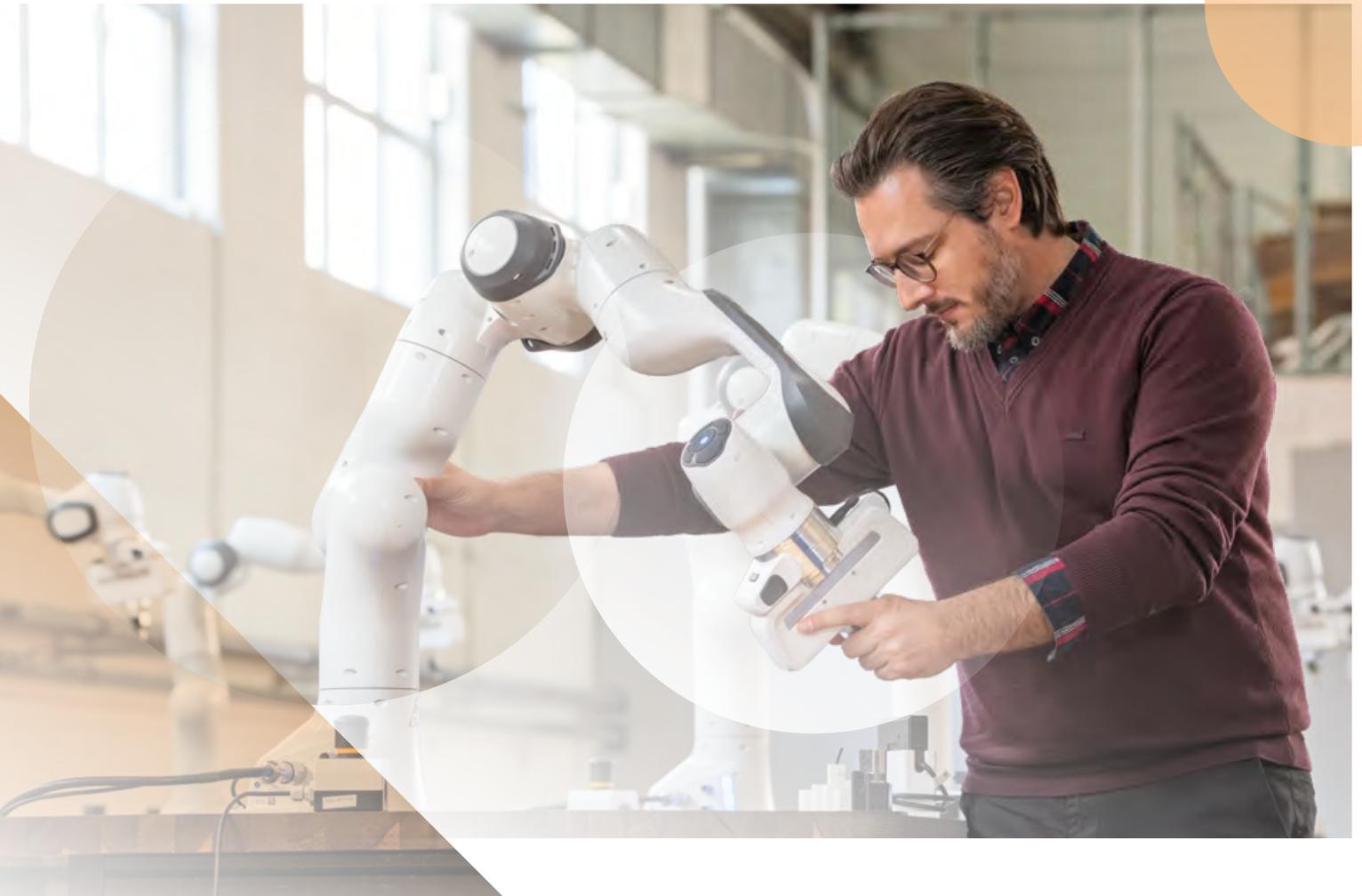
Der erste Punkt soll in einem Geriatrie-Zentrum, das gerade in Garmisch-Partenkirchen aufgebaut wird, bearbeitet werden. In dieser Außenstelle der MSRМ entwickeln Forscherinnen und Forscher Roboterassistenten für ein selbstbestimmtes Leben im Alter. Wichtigstes aktuelles Projekt dabei ist der zweiarmlige Roboterassistent GARMI. Er soll älteren Menschen bei Alltagstätigkeiten wie dem Aufstehen helfen, beim Essen machen oder beim Abräumen des Tisches. Zudem können sich Ärzte mit ihm verbinden und aus der Ferne beispielsweise Diagnosen erstellen, Ultraschall-Aufnahmen machen und Medikamente verordnen.

Ein anderes Projekt sind smarte Reha-Roboter. Speziell entwickelte Roboter für Schlaganfallpatienten oder frisch Operierte nehmen diese an die Hand und führen sie so, dass die Patienten lernen, bestimmte Aufgaben wieder auszuführen und die motorische Kontrolle nach und nach wieder zu erlangen. Auch hier gilt Haddadins Grundprinzip: „Alles, was mit Menschen interagiert, braucht ein Verständnis des Menschen.“

Prof. Haddadin ist sich bewusst, dass seine Forschungsarbeiten zwangsweise rechtliche und ethische Fragen aufwerfen. „Wir müssen sehr viel kommunizieren und verstehen, was die Menschen wollen, was sie nicht wollen, was nützlich und nicht nützlich ist – und was akzeptiert und nicht akzeptiert wird.“



Seit April 2018 ist der 38-jährige Professor Sami Haddadin – einer der bedeutendsten Wissenschaftler auf dem Gebiet der Robotik und Systemintelligenz – Direktor der neu gegründeten Munich School of Robotics and Machine Intelligence (MSRM).





Um im Austausch mit Kollegen der Ethik, der Philosophie und den Sozialwissenschaften diesen Diskurs zu führen, engagiert er sich in der Enquete-Kommission des Bundestags und in der High-Level Group „Artificial Intelligence“ der Europäischen Kommission. Er tauscht sich aber auch mit Juristen aus, um zu verstehen, mit welchen rechtlichen Grenzen sich die Robotik- und KI-Forschung auseinandersetzen muss.

Bei allen Vorbehalten, die Menschen gegen Roboter haben: „Angst sollten wir nicht haben“, rät Professor Haddadin. Intelligente Maschinen befreien künftig Menschen von lästigen und gefährlichen Tätigkeiten, Pflegekräfte können sich anspruchsvoller Pflege widmen und Arbeiter sinnstiftende statt monotone Tätigkeiten übernehmen. Die Arbeit der Menschen verändert sich mit dem Fortschritt – und wichtig ist es, die richtigen Weichen zu stellen. „Ich glaube, Angst ist immer schon der schlimmste aller Ratgeber gewesen – vielleicht sogar der gefährlichste.“ ■

*Klaus Manhart*

---

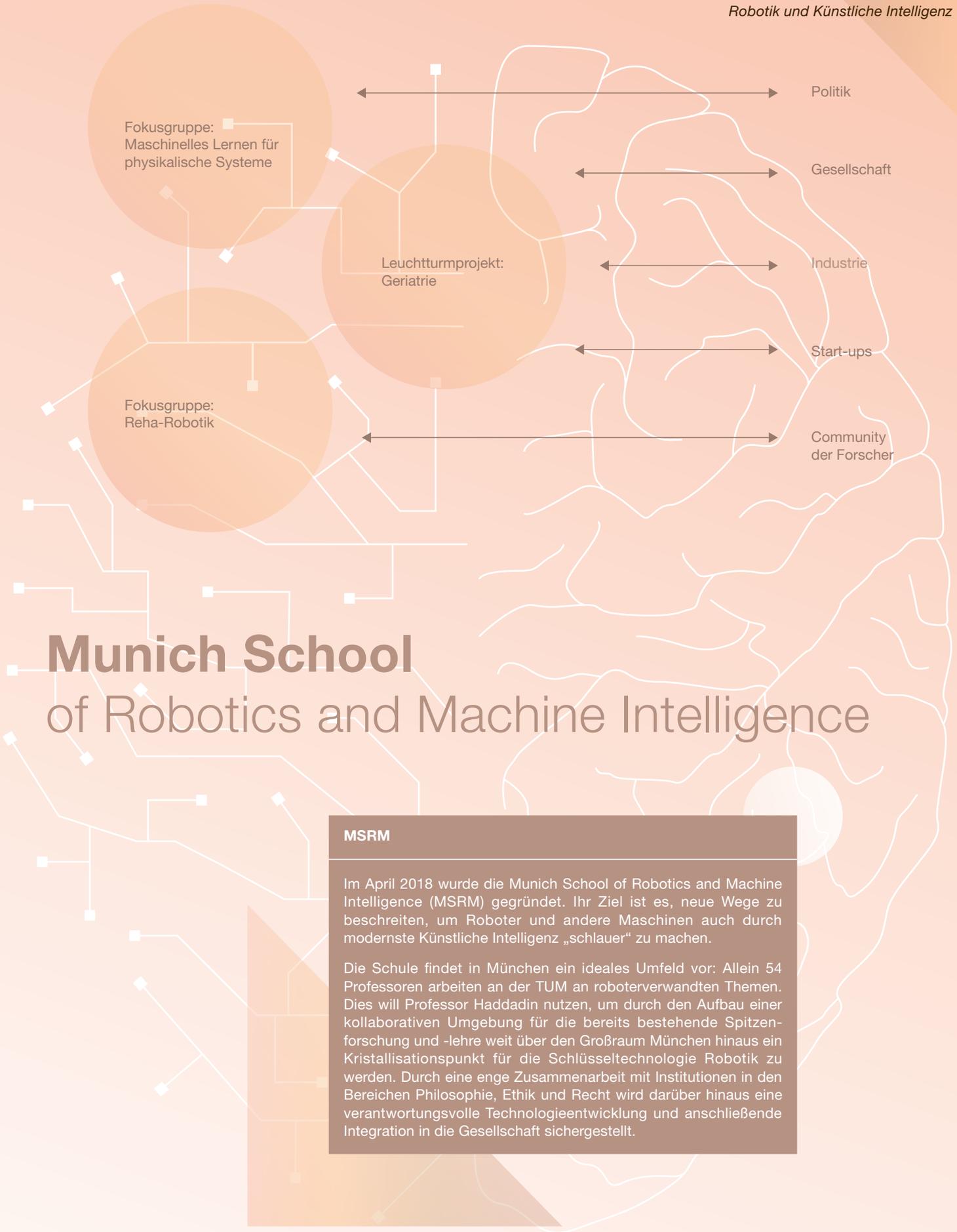
**Prof. Sami Haddadin**

---

## Ein vielfach ausgezeichneter Roboterforscher

Prof. Sami Haddadin (38) studierte Elektrotechnik und Informatik an der TUM sowie Technologiemanagement am Center for Digital Technology and Management (CDTM) – einem gemeinsamen Institut von TUM und LMU. Nach seiner Promotion an der RWTH Aachen war er am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt tätig. 2014 berief ihn die Gottfried Wilhelm Leibniz Uni-versität Hannover auf einen Lehrstuhl für Regelungstechnik. Für seine Forschung erhielt er den Early Career Award der IEEE Robotics and Automation Society und den Alfred Krupp Preis. Zusammen mit seinem Bruder Simon Haddadin und Sven Parusel hat er 2017 den Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten bekommen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zeichnete Sami Haddadin 2019 für seine wegweisenden Robotik-Forschungen mit dem Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis aus. An der MSRМ bringt Haddadin als Gründungsdirektor herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Robotik und Künstliche Intelligenz unter einem Dach zusammen.

---



# Munich School of Robotics and Machine Intelligence

## MSRM

Im April 2018 wurde die Munich School of Robotics and Machine Intelligence (MSRM) gegründet. Ihr Ziel ist es, neue Wege zu beschreiten, um Roboter und andere Maschinen auch durch modernste Künstliche Intelligenz „schlauer“ zu machen.

Die Schule findet in München ein ideales Umfeld vor: Allein 54 Professoren arbeiten an der TUM an roboterverwandten Themen. Dies will Professor Haddadin nutzen, um durch den Aufbau einer kollaborativen Umgebung für die bereits bestehende Spitzenforschung und -lehre weit über den Großraum München hinaus ein Kristallisationspunkt für die Schlüsseltechnologie Robotik zu werden. Durch eine enge Zusammenarbeit mit Institutionen in den Bereichen Philosophie, Ethik und Recht wird darüber hinaus eine verantwortungsvolle Technologieentwicklung und anschließende Integration in die Gesellschaft sichergestellt.

**„Partizipation  
ist nicht nur eine  
romantische  
Idee“**



**Professor Francis Kéré stammt aus Burkina Faso, und er ist geprägt von der Kultur der Gemeinschaft und Beteiligung, die dort selbstverständlich ist. Sie drückt sich auch in seinen Werken aus, bald auch in dem Anniversary Tower, den er für die TUM plant.**

Link

[www.ar.tum.de/de/ap/architectural-design-and-participation](http://www.ar.tum.de/de/ap/architectural-design-and-participation)

**Das Foto zeigt Francis Kéré (links) auf einem Musterdachgewölbe für die Gando Primary School mit Bewohnern in Gando, Burkina Faso. Indem Kéré die Stabilität der gebauten Infrastruktur demonstriert, schafft er Vertrauen und fördert das Interesse der Bewohner an der Teilnahme am Aufbau der Gemeinde.**



## The dream of better building

E

As a pupil in western Africa, Francis Kéré was already dreaming of building better schools so others could learn more freely one day. He went on to put his native village on the map of international architecture with a series of outstanding places to learn. Today, Francis Kéré researches and builds in Europe as well as in Africa. His projects emphasize simple building, always aligned with local customs and practices. Kéré is a realist for whom the dream remains an important part of the design process. His architecture is socially sustainable because it involves users at an early stage. His pipeline Anniversary Tower for TUM is set to create a meeting point for the scientific community, while also testing out new, material-saving construction methods. □

**Das Thema der Bildung verbindet Ihre Arbeit im Architekturbüro mit der Lehre. Ihr Vater, Oberhaupt des Dorfes Gando in Burkina Faso, ermöglichte es Ihnen, die Schule zu besuchen, später zu studieren. Was bedeutet Bildung für Sie?**

**Francis Kéré:** Mein Papa leistete Verzicht. Für meine Bildung brachte er ein Opfer. Er wurde belächelt. Man fragte sich, warum er seinen Erstgeborenen in die Stadt gehen und lernen lässt, anstatt sich von ihm bei der Feldarbeit helfen zu lassen. Zu mir sagte er: Du gehst und lernst, wie man liest und schreibt. Dann kannst Du mir die Briefe vorlesen, die vom Staat kommen. Ob es ihm bewusst war, kann ich nicht sagen, aber er war ein Visionär.

**Was bedeutet Bildung für die Gesellschaft und was für den Beruf des Architekten?**

**FK:** Ohne Bildung geht nichts voran. Bildung erlaubt es jedem, im Leben weiterzukommen. Eine Gesellschaft ohne Bildung hätte keinen Zugang zu Errungenschaften, zu Ergebnissen von Wissenschaft und Kultur. Sie wäre nicht in der Lage, sich mit anderen Völkern auszutauschen. In der Kolonialzeit wurde Wissen für die Einwohner gefiltert weitergegeben. Es ist aber wichtig, selbst einen Zugang zu haben. Ich arbeite in Gegenden, wo die Worte Architektur und Architekt unbekannt sind. Bis heute können mehr als 60 Prozent der Bevölkerung von Burkina Faso weder lesen noch schreiben. Kommt man aus einer Region, wo Fachwissen, wo Kompetenz im Grunde genommen nicht existiert, dann hat Vermittlung eine sehr große Bedeutung. ▷

**Francis Kéré unterstützt mit seinem Wissen** auch sein Geburtsland Burkina Faso. Er hat innovative Baustrategien entwickelt, die traditionelle Techniken und Materialien mit modernen Ingenieurmethoden verbinden.



**Architekt sein bedeutet also auch Vermittler sein? Sie haben schon früh realisiert, dass Sie Menschen um sich herum überzeugen müssen, um Ihre Ideen zu realisieren?**

**FK:** Man muss überzeugen, damit erschafft man ein Umfeld. In diesem können andere einen Teil der Aufgaben übernehmen, und so kann man mit neuen Ideen selber weiterkommen.

**Heute stehen Architekten in einem Spannungsfeld. Sie müssen aktuelle Baunormen kennen, aber auch die historische Formgeschichte der Architektur, Möglichkeiten und Grenzen der Materialien sowie Erwartungen von Investoren und Nutzern. Welche Rolle spielt in diesem Geflecht die Bildung?**

**FK:** Man muss sich ein breit gefächertes Wissen aneignen, um mit den vielfältigen Erscheinungsformen von Architektur klarzukommen. Fehlt dies, besteht die Gefahr, dass man sich auf einen zu engen Aspekt des Berufs beschränkt und nicht in der Lage ist, über den Tellerrand zu schauen. Wir zeichnen ja nicht nur, denken nicht nur, wie Gebäude beschaffen sein sollten, wir arbeiten mittlerweile interdisziplinär, und das nimmt immer mehr zu. Bildung bedeutet Offenheit, das Verlangen mehr zu wissen, um Erfahrungen zu sammeln. Sie schafft die Möglichkeit, in Kontakt zu kommen, hilft uns heute, den Beruf auszuüben. Früher war das etwas anders. Da entwickelte ein Baumeister seine Ideen. Für die Umsetzung gab es Handwerker, die trainiert waren, Formen nachzubilden. Heute geht es nicht mehr ohne Austausch.

*„Ich bin überzeugt, dass Beteiligung zu einer glücklicheren Gesellschaft führen kann.“*

Francis Kéré

**Die Klassenraummodule des Lycée Schorge** sind kreisförmig um einen zentralen öffentlichen Innenhof angeordnet. Diese Konfiguration schafft Privatsphäre, abgeschieden von der Außenwelt, schützt den Innenhof vor Wind und Staub und ist ein Ort für informelle und formelle Zusammenkünfte.





**Das Operndorf in Burkina Faso** (hier im Modell) geht auf eine Idee des Film- und Theaterregisseurs Christoph Schlingensiefel zurück. Nach massiven Überschwemmungen, die das Projektgelände und die umliegenden Dörfer verwüsteten, wurde beschlossen, die Ressourcen und Mittel der Oper zu bündeln, um auch Wohn-, Bildungs- und Freizeitangebote in den Plan aufzunehmen.



Bildnachweis: Kéré Architecture, Hans-Georg Gaul; Grafiken: edlundsepp

**Bei Vorträgen, in Schriften, Ausstellungen und Installationen heben Sie immer wieder die Bedeutung von Bauen als Aufgabe der Gemeinschaft hervor. Sie zeigen, wie Leute zusammenfinden, um etwas Notwendiges herzustellen. Ist dieser Gedanke in unseren westlichen Gesellschaften ausreichend präsent?**

**FK:** Das ist ja gar nicht einfach. So unterscheidet sich die Gesellschaft in Deutschland grundlegend von der in Burkina Faso. Die eine ist industriell und wirtschaftlich hoch entwickelt. Hier gibt es Rationalisierung und Arbeitsteilung. Dort ist das gemeinschaftliche Schaffen Grundlage für Erfolg, Voraussetzung fürs Überleben. Hier hat man Fachleute, die man einbezieht. Für das Erschaffen im Team gibt es ein urbayerisches Beispiel: Das Aufstellen des Maibaums. Nur in Gemeinschaft gelingt, wozu ein Einzelner nicht in der Lage wäre. Ist der Baum aufgerichtet, dient er als Treffpunkt des Dorfes.

Solche Prinzipien beim Bauen umzusetzen ist schwierig. Zwar wirken die unterschiedlichen Gewerke zusammen. Doch Fragen individueller Haftung und Verantwortung erschweren gemeinschaftliches Handeln. Umso wichtiger sind Baugruppen, bei denen sich Menschen zusammentun, die möglichst selbstbestimmt in einem Gebäude leben möchten. Sie suchen sich Planer, die in der Lage sind, diese Idee auszuarbeiten. Der Fachfrau oder dem Fachmann übertragen sie ihre Wünsche. Doch bevor es ans Bauen geht, möchten sie detailliert darüber reden. ▶

### Weshalb erscheint das so schwierig?

**FK:** Eine hochorganisierte Gesellschaft ist leicht überfordert, verschiedene Wünsche auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen. In der Wirtschaftlichkeit liegt die Herausforderung. In anderen Gesellschaften ist man daran gewöhnt zu reden, damit jeder seinen Beitrag leisten kann. In Burkina Faso ist es für mich wichtig, gemeinschaftlich ein Werk zu erschaffen. Das Wir-Gefühl bringt die Leute voran. Die Gemeinschaft hat es geschafft, ich trete dahinter zurück. Dieses wir bedeutet sehr viel für ein Werk. In Deutschland gilt ein solches Wir-Gefühl nur als Kostenfaktor. Bis man ein Wir erreicht, kommen viele Stunden zusammen. Und leider ist hier jede Stunde volkswirtschaftlich belegt – das hemmt sehr viele Dinge. Architekten haben ja gar nicht die Kapazität, sich lange damit zu beschäftigen.

**Das allererste Gebäude von Francis Kéré** war die Gando Primary School in seinem Heimatdorf in Burkina Faso. Eine Ton-Zement-Mischung wurde hauptsächlich für die Wände verwendet, und eine trocken gestapelte Ziegeldecke sorgt für maximale Belüftung. Die Wände sind durch ein großes, überhängendes Blechdach vor schädlichen Regenfällen geschützt.

**Ihre Bildungs- und Kulturbauten wie das Operndorf, das Sie mit Christoph Schlingensiefel entwickelt haben, und viele andere Ihrer Projekte werden von Stiftungen getragen. Sie selbst haben eine Stiftung gegründet. Ist das eine Voraussetzung für einfaches und humanes Bauen?**

**FK:** Ich denke schon. Tatsächlich ist es leichter, mit Stiftungen diese Projekte zu machen. Es gibt Mittel, klare Regeln und eine gewisse Schnelligkeit solcher Projekte. Stiftungen wollen Ideen fördern und Dinge anders machen. Sie bringen den Mut auf, jemanden zu suchen, von dem man erwartet, er würde die eigene Vorstellung erfüllen. Sie verfügen über die Kapazität und sind verpflichtet, so zu handeln. Mit Christoph Schlingensiefel habe ich gearbeitet, weil er meinte, er kenne Afrika nicht. Er war überzeugt, allein mit seinen westlichen Vorstellungen würde er scheitern. Er brauchte jemanden an seiner Seite, der aus Afrika kommt und weiß, wie man sich da zu benehmen hat. Das Operndorf sollte ja etwas Besonderes erreichen. Etwas, das den Vorstellungen und Visionen des Künstlers Christoph Schlingensiefel entsprach. Dinge anders machen zu wollen hat auch etwas mit Erforschen zu tun. Ausgangspunkt ist nicht eine dringende Notwendigkeit, es gibt das Element der Neugier wie bei der Forschung und auch das Moment der Überraschung.





**Der Entwurf für den Burkina Faso National Assembly & Memorial Park in Ouagadougou,** der auf dem Gelände der ehemaligen und jetzt zerstörten Nationalversammlung errichtet werden soll, zeigt einen Geist von Transparenz und Offenheit. Die Außenfassade des Parlamentsgebäudes ist für die Öffentlichkeit begehbar ausgelegt. Die Bürger können das stufenförmige Pyramidengebäude besteigen und einen erhöhten Blick auf die Stadt genießen.

**Im Deutschen gibt es die Redewendung „Not macht erfinderisch“. Ihre Arbeit in Burkina Faso basiert auf dem Vorgefundenen. Wie können angehende Architektinnen und Architekten an der TUM von solchem Denken und Handeln profitieren?**

**FK:** Das ist in der Tat nicht einfach. Aber die TUM fördert den Blick über den eigenen Tellerrand. Manche Professoren haben es sich zur Aufgabe gemacht, neben der Lehre in Europa den Studierenden das Reisen zu ermöglichen, damit sie das Bauen in anderen Regionen und Kulturen kennenlernen. Das könnten wir zum regulären Bestandteil der Ausbildung machen. Die Studenten sollten ihren Blick schärfen. Wie kann man architektonisch etwas erschaffen, das den Nutzern dient und es gleichzeitig den Studierenden erlaubt, sich zu entfalten? Wie können wir diesen Ansatz so weiter entwickeln, damit daraus zeitgemäße Gebäude entstehen? Gebäude, die Sinn und Struktur haben, dauerhaft sind und funktionieren? Studierende sollen lernen, wie Architektur entsteht. Letztendlich wollen wir Menschen dienen. Das einfache Bauen auf Basis des lokal Vorhandenen ließe sich in der TUM mehr noch als bisher verankern.

**Sie sind Professor für Architectural Design and Participation an der TUM. Sie beschreiben Neugier, die Beteiligung am Bau, aber auch die kritische Beobachtung in Burkina Faso. Wie unterscheidet sich das von unserer Praxis in Deutschland, und wie kann sich unsere Praxis der Partizipation verbessern?**

**FK:** Seit Stuttgart 21 kennen wir mögliche Konsequenzen mangelnder Beteiligung. Ein Architekt hat bei einem fairen Wettbewerb gewonnen. Die politischen Kräfte, die dort lange regierten, versuchten völlig zurecht, das Wettbewerbsergebnis umzusetzen. Man dachte, es ist gut und schön. Es mussten alte und wertvolle Bäume gefällt werden. Zunächst langsam und dann immer breiter rührte sich der Protest. Die Tatsache mangelnder Einbindung der Bevölkerung führte politisch gesehen zu einem Erdbeben. Und so ist Partizipation nicht nur eine romantische Idee. Es hört sich utopisch an, aber ich bin überzeugt, Beteiligung kann zu einer glücklicheren Gesellschaft führen. In Deutschland versuche ich, mit solchen Vokabeln vorsichtig zu sein. Ich denke, es wäre gut für uns alle, wenn ich im Prozess sehe, was auf mich und meine Nachbarschaft zukommt. Letztlich hat Partizipation Grenzen. Wo man kann, sollte man sie nutzen. ▸



**Anlässlich des 150jährigen Bestehens der TUM** soll am Standort Garching der TUM Anniversary Tower entstehen, designt von Francis Kéré. Der Turm soll inspirierend und identitätsstiftend wirken. Alle sind willkommen und treffen sich.

**Die TUM verfügt bereits über den Oskar von Miller-Turm und den Thiersch-Turm. Anlässlich des 150jährigen Bestehens der TUM soll am Standort Garching Ihr Anniversary Tower entstehen. Was ist die Grundidee des Gebäudes?**

**FK:** Es wird ein Herz sein, das für die TUM schlägt. Es soll einladend, inspirierend und identitätsstiftend wirken. Der Turm ist so angelegt, dass er zum Anziehungspunkt wird. Zu einem Ort, der sich nicht verschließt. Alle sind willkommen und treffen sich. Er wirkt verbindend. Alle Fakultäten und Fachrichtungen der TUM können sich dort wiederfinden. Oben gibt es eine Plattform, einen Platz für facettenreiche Veranstaltungen. Alumni können dorthin kommen, junge Studenten können entdecken, was die TUM an Studiemöglichkeiten und Kooperationen zu bieten hat. Wir werden mit warmen Materialien arbeiten, aber auch mit Beton. Es wird eine „sustainable construction“, erstellt mit neuen Verfahren, die Beton sparsam nutzen. Natürlich wird die Fassade grün sein wie ein Maibaum. ■ *Das Interview führte Thomas Edelmann*



**Der Turm ist so angelegt, dass er zum Anziehungspunkt wird, zu einem Ort, der sich nicht verschließt.**



---

**Prof. Diébédo Francis Kéré**

---

## Der Architekt des Vorgefundenen

Während des Studiums an der TU Berlin kehrte Professor Diébédo Francis Kéré (Jahrgang 1965) in sein Heimatdorf Gando zurück, um dort mit Hilfe einheimischer Materialien und Techniken und unter Beteiligung der Bewohner eine Grundschule zu errichten. 2004 wurde der Bau mit dem Aga Khan Award for Architecture ausgezeichnet. Weitere Schulbauten für Gando und viele andere Orte folgten. Er gründete die Kéré Foundation und sein Architekturstudio in Berlin. Für soziales und nachhaltiges Bauen erhielt er bedeutende Auszeichnungen und Preise. Mit Christoph Schlingensiefel realisierte Kéré das Operndorf in Burkina Faso. Ausstellungen präsentieren Gebäude und Entwurfsprinzipien von Francis Kéré. Er lehrte in Harvard und in Mendrisio. Zum Oktober 2017 wurde Kéré auf die Professur „Architectural Design and Participation“ an der Technischen Universität München berufen.

---

### Afrika-Initiative der TUM

Die TUM hat Ende 2018 eine Afrika-Initiative auf den Weg gebracht. Neben der Zusammenarbeit in einzelnen Projekten sind langfristige Partnerschaften in den Schlüsselbereichen Lehre, Forschung und Entrepreneurship geplant, die an der TUM von einem fakultätsübergreifenden Afrika-Netzwerk getragen werden. Ziel ist es, zusammen mit Partnern vor Ort eine nachhaltige Entwicklung des Kontinents zu fördern.

Einen Überblick über die vorgesehenen Maßnahmen gab im November 2018 das Symposium „Sustainable Development in Africa“ am Campus Garching. Professorinnen und Professoren der TUM stellten dort die verschiedenen Projekte aus den Bereichen Gesundheit, Ressourcen, Fahrzeugtechnik, Architektur oder erneuerbare Energiesysteme vor. Keynote-Speaker war Professor Francis Kéré.





Bildnachweis: Kéré Architecture, Erik-Jan Ouwerkerk; Grafiken: edlindsepp

Die Lycée Schorge Secondary School setzt einen neuen Standard für pädagogische Exzellenz in Burkina Faso und verwendet lokal hergestellte Baumaterialien auf innovative und moderne Weise.



Der Masterplan von Kérés Operndorf in Laongo/Burkina Faso umfasst Klassenzimmer für bis zu 500 Schüler, verschiedene Wohnformen, Kunst- und Medienlabore, Werkstätten und Gastronomie.

*„Man muss überzeugen, damit erschafft man ein Umfeld.“*

Francis Kéré

# Das Flugzeug der Zukunft

Link

[www.lfs.mw.tum.de](http://www.lfs.mw.tum.de)

Bildnachweise: [M]: Design: A. Frühbeis, I. Held, P. Sieb, A. Usbek/TUM;  
CGI: DLR (CC-BY 3.0)



Technical  
University  
of Munich



**Vier Studierende der TUM schafften das, was in der Welt des Flugzeugbaus heute noch Mangelware ist: Sie arbeiteten fachübergreifend zusammen, um das Design für ein möglichst sparsames Flugzeug zu entwickeln. Mit ihrem Entwurf für einen turboelektrisch angetriebenen Jet gewannen sie 2018 die DLR/NASA Design Challenge.**

*eRay*

Diese vier Studierenden der Luft- und Raumfahrt gewannen mit ihrem Entwurf eines neuen Flugzeugkonzepts 2018 gemeinsam die DLR/NASA-Design Challenge. Von rechts Alexander Frühbeis, Isa Held, Artur Usbek, und Patrick Sieb.



Abstract

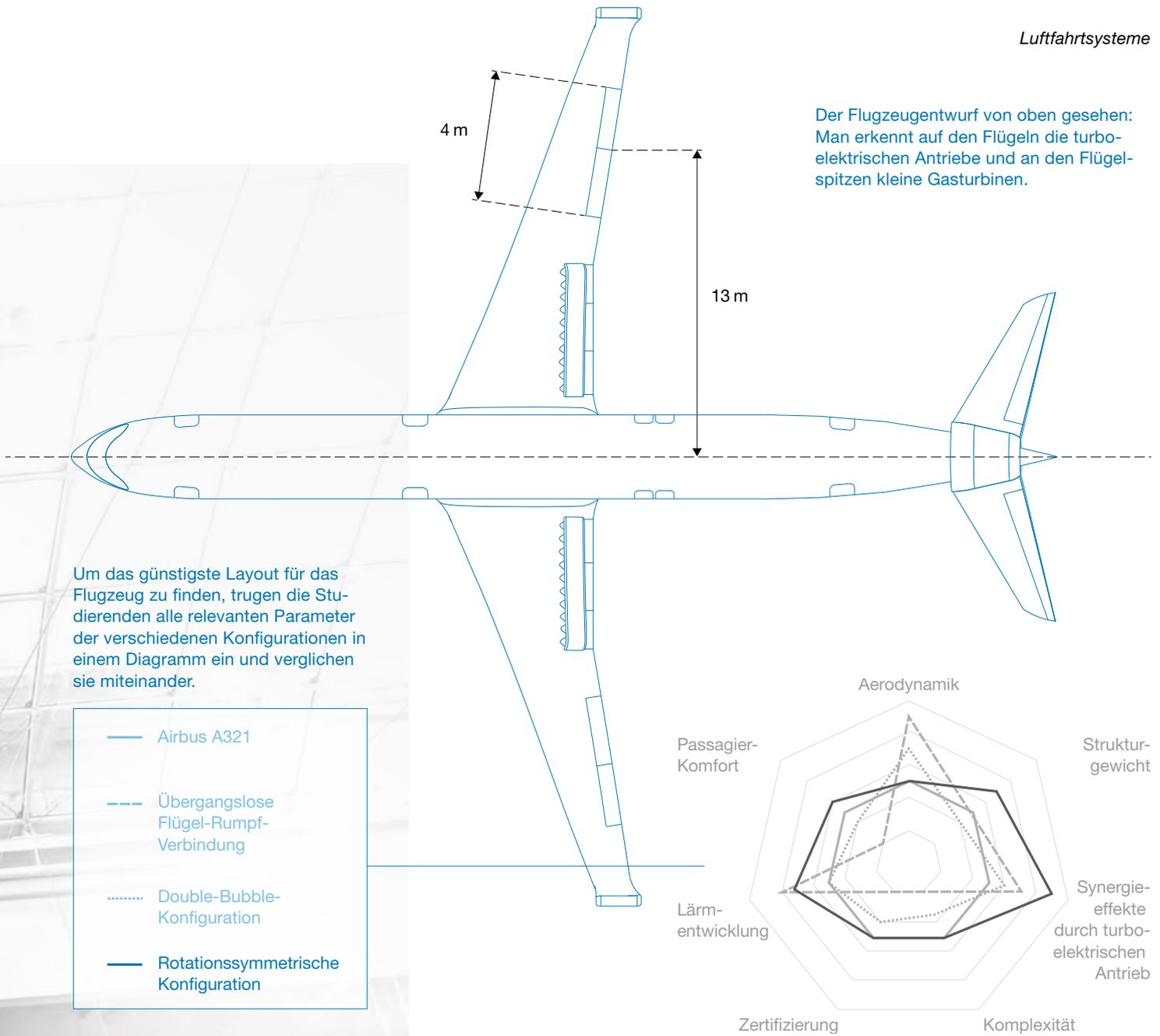
## The airplane of the future flies with almost two thirds less fuel

E

In 2018, Master's students Alexander Frühbeis, Artur Usbek, Isa Held and Patrick Sieb successfully created a striking design for a future commercial aircraft. The TUM team won the DLR/NASA Design Challenge with their eRay jet. The aircraft could save up to 64 percent energy in comparison with today's Airbus 321, cutting harmful emissions. Their approach harnesses synergy effects from innovations across the areas of propulsion, aerodynamics and structural design for an ultra-efficient overall system. The windowless jet has a carbon fiber fuselage,

featuring a larger stage fan at the tail and small electric propulsion units attached to the trailing edge of the wings. This clever combination of individual improvements makes the eRay lighter, with greater propulsion efficiency and lower air resistance than today's commercial aircraft.

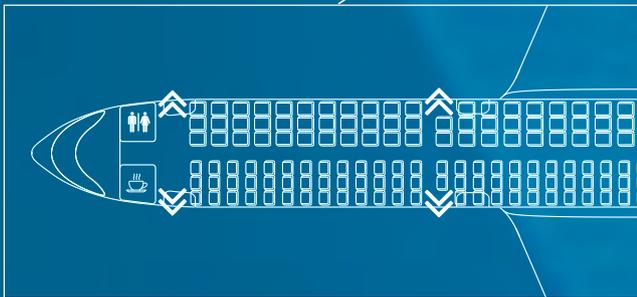
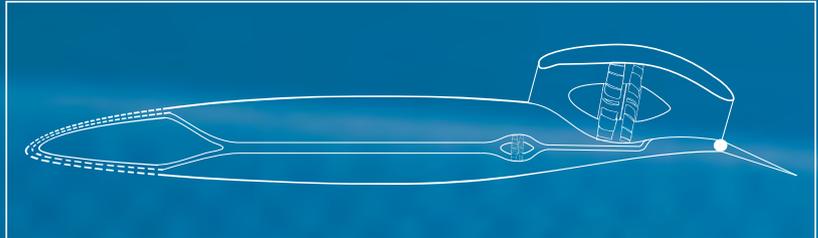
□



„Die Luftfahrt steht vor einer gewaltigen Herausforderung. Wir wissen alle, dass wir mit der immer weiter wachsenden Zahl an Flügen und einem sich alle 15 bis 20 Jahre verdoppelnden Passagieraufkommen der Umwelt nichts Gutes tun“, sagt Alexander Frühbeis. Der 24-jährige Masterstudent der Luft- und Raumfahrt an der TU München ist überzeugt: „Um dieses immense Wachstum umweltverträglich zu gestalten, braucht es neue Flugzeugkonzepte.“ Derart bahnbrechende neue Würfe für die Fliegerei von morgen forderten das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die National Aeronautics and Space Administration (NASA) in der zweiten Auflage ihrer gemeinsamen Design Challenge für Studierende deutscher und amerikanischer Hochschulen. Im Wettbewerb des

Jahres 2018 lag der Schwerpunkt auf Flugzeugkonzepten mit einer massiven Reduktion schädlicher Emissionen. Die Aufgabe: 60 Prozent oder mehr Energieersparnis im Vergleich zu einem heutigen Airbus A321-200, bei vergleichbarer Transportkapazität, mindestens drei Stunden Flugfähigkeit über Wasser, Tauglichkeit für eine Direktverbindung zwischen kleinen Flughäfen sowie möglichst geringe Herstellungs- und Betriebskosten. Frühbeis erinnert sich: „Als ich davon hörte, wusste ich sofort, dass ich teilnehmen werde, da es genau um die zwei Themen ging, die mich antreiben: die Faszination fürs Fliegen und den Wunsch, an der grünen Gesellschaft von morgen mitzuarbeiten.“

Das Flugzeug nutzt den sogenannten „Boundary Layer Infektion“-Effekt, bei dem die Grenzschicht, die eigentlich den Strömungswiderstand erhöht, effizienzsteigernd von den Triebwerken aufgenommen wird.



Das Team der Münchner Studierenden legte einen Entwurf für einen fensterlosen Jet für 200 Passagiere mit einem Rumpf aus Carbonfasern vor, mit einer größeren elektrischen Turbine am Heck und kleineren, an den hinteren Tragflächenkanten angebrachten elektrischen Antriebspaketen.

Dank seines elektrischen Antriebs wäre eRay leiser, und zwar sowohl bei Start, Flug und Landung als auch bei Bewegungen auf der Rollbahn.



eRay benötigt nur eine vergleichsweise geringe Menge an Sprit für die beiden an den Flügelspitzen angebrachten Gasturbinen. Mit ihren Generatoren produzieren diese die elektrische Energie zum Betrieb der E-Triebwerke.

Zusammenhang zwischen Antrieb und Aerodynamik: Am Heck des Flugzeugs sitzt eine große elektrische Turbine, die bei der Umströmung des Flugzeugrumpfes verlangsamte Luftschicht effizienzsteigernd aufnimmt und dadurch den Luftwiderstand des Rumpfes reduziert.

### **Auf dem Weg zum Flugzeug von morgen**

Im Januar 2018 bildete sich an der TUM das spätere deutsche Siegerteam, bestehend aus den Masterstudierenden Alexander Frühbeis, Artur Usbek, Isa Held und Patrick Sieb. In gerade mal einem halben Jahr, zwischen einem ersten Treffen aller Teilnehmer von unterschiedlichen deutschen Universitäten in Hamburg im Februar und der Endpräsentation ihrer Konzepte Anfang August in Braunschweig, entstand dann der Entwurf für ein ultraeffizientes Flugzeug, das sie eRay nannten.

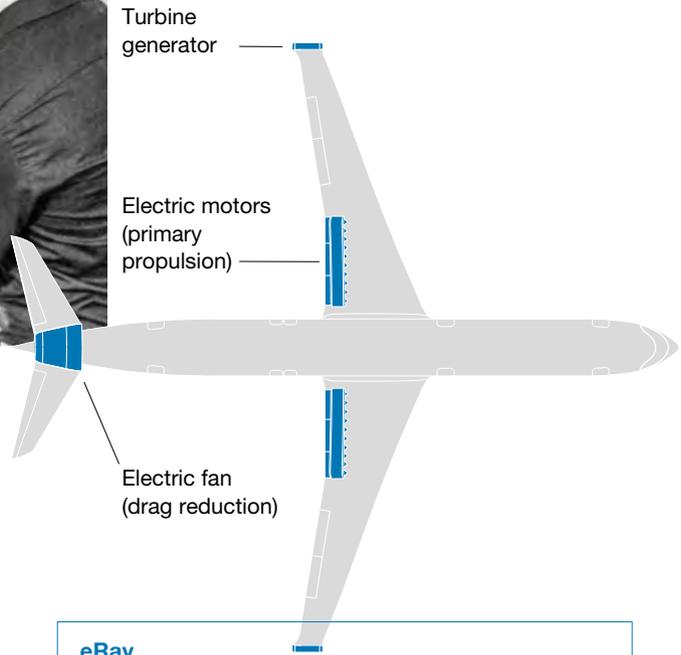
Im Wettbewerb wurden die Studierenden von Professor Mirko Hornung, dem Leiter des Lehrstuhls für Luftfahrtssysteme, und dem wissenschaftlichen Mitarbeiter Lysandros Anastasopoulos betreut. Letzterer beschreibt die Ausgangslage: „In Sachen Reisegeschwindigkeit, Nutzlastkapazität und Reichweite sind Verkehrsflugzeuge mit Strahltriebwerken heutzutage technisch weitgehend ausgereizt. Zuletzt wurde sehr viel im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit, sprich, auf die Reduktion von Emissionen wie CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oder Ruß sowie von Lärmemissionen geforscht. Mittlerweile muss man aber auch in diesem Bereich sehr viel Aufwand betreiben, um noch erhebliche Verbesserungen zu erzielen.“



Konventionelle Strahltriebwerke

#### Airbus A321

Das Vergleichsflugzeug für den Wettbewerb war der Airbus A321-200 aus dem Jahr 2005, der von zwei konventionellen Triebwerken angetrieben wird. Die Aufgabe war, ein Konzept für ein Flugzeug zu entwickeln, das bei vergleichbarer Transportkapazität mindestens 60 Prozent weniger Energie verbraucht.



Turbine generator

Electric motors (primary propulsion)

Electric fan (drag reduction)

#### eRay

Der Entwurf eRay, der den Wettbewerb gewann, wird elektrisch angetrieben und zeigt im Vergleich zum A321 eine Reduzierung der Masse um 30 Prozent und eine Verbesserung der Antriebsleistung um 48 Prozent, was zu einer allgemeinen Reduzierung des Energieverbrauchs um 64 Prozent führt.

### Cleverer Einsatz von Synergien

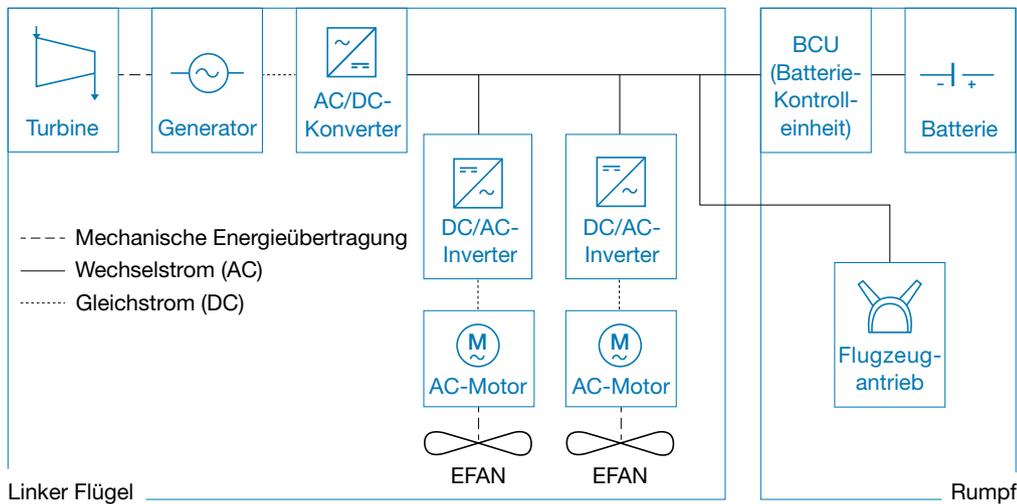
Der Ansatz der Münchner Studierenden war es deshalb, zum einen bestimmte Flugzeugkomponenten zu verbessern, zum anderen aber vor allem Synergieeffekte aus den Bereichen Antrieb, Aerodynamik und Struktur zu nutzen. Das Team um Frühbeis legte einen Entwurf für einen elektrisch angetriebenen, fensterlosen Jet mit einem Rumpf aus Carbonfasern vor, mit einer größeren Fan-Stufe am Heck und kleineren, an der hinteren Tragflächenkante angebrachten elektrischen Antriebspaketen. Ihr eRay weist ein geringeres Gewicht, eine höhere Antriebseffizienz und

eine verbesserte Aerodynamik auf. Letztere durch die Anwendung des Prinzips der Laminar Flow Control (LFC), eine verkleinerte, V-förmige Leitwerksfläche und aktive Minderung von Böenlasten an der Struktur. Dieses intelligente Gesamtpaket setzte sich in der Design Challenge durch, als im August 2018 die Gewinner bekanntgegeben wurden. DLR-Luftfahrtvorstand Rolf Henke lobte die Sieger: „Der konsequente und passgenaue Einsatz verschiedener eng aufeinander abgestimmter Technologien hat uns in der Jury überzeugt.“

### 64 Prozent Treibstoffersparnis

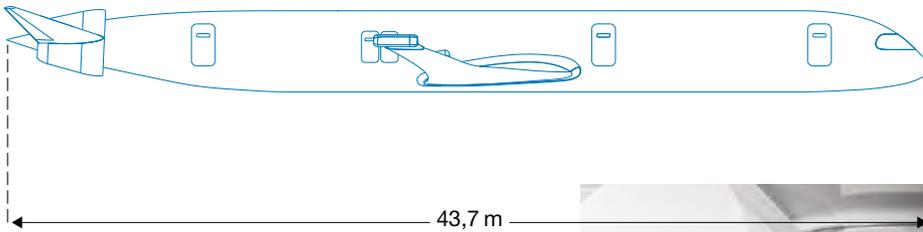
Der eRay ist erheblich leichter als ein Airbus 321, obwohl er genauso viele Passagiere fasst (die allerdings teilweise im Stehen reisen). Möglich machen das der Einsatz neuer Materialien, der Verzicht auf Fenster sowie die vergleichsweise geringe Menge an Sprit, die der Flieger lediglich für die beiden an den Flügelspitzen angebrachten Gasturbinen mitführen muss. Mit ihren Generatoren produzieren sie elektrische Energie zum Betrieb der E-Triebwerke. Der „eRay“ hat dank verschiedener Synergien (siehe Kasten) einen geringeren Luftwiderstand und spart auch damit Treibstoff ein.

Das Flugzeug zielt auf den wachsenden Bedarf kurzer und mittlerer Direktverbindungen in Asien ab. Aber auch ganz generell verspricht es manche Vorteile. Zum Beispiel ist es dank seines elektrischen Antriebs leiser, sowohl bei Start, Flug und Landung als auch bei Bewegungen auf der Rollbahn. Damit böte der „eRay“ eine interessante Möglichkeit, nachts Flughäfen zu nutzen, deren Kapazitäten tagsüber ausgeschöpft sind. ▶

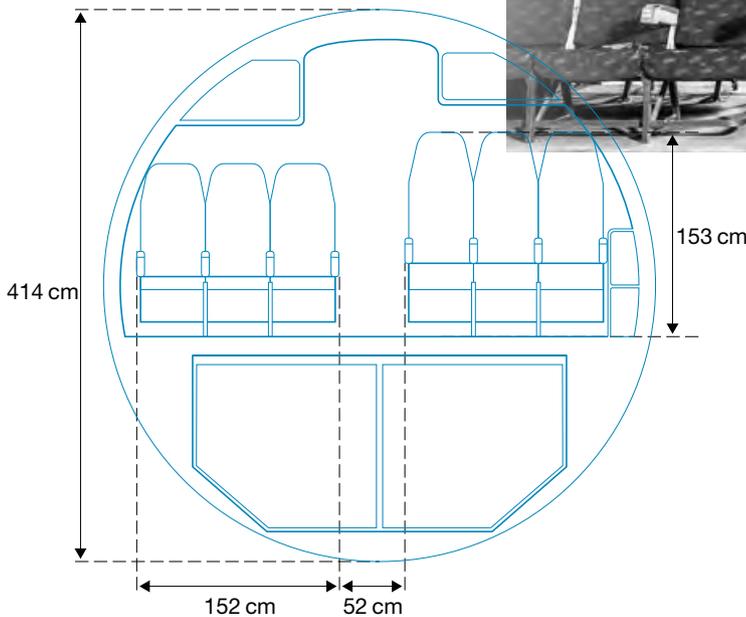


Schematische Anordnung des elektrischen Antriebssystems des Flugzeugs: Die Gasturbinen versorgen über Generatoren und Gleichrichter die turboelektrischen Antriebe und die elektrische Turbine am Ende des Rumpfes. Parallel versorgen sie Batterien als Puffer für den hohen Energiebedarf bei Start und Landung.





Der siegreiche Entwurf in der Seitenansicht: das fensterlose Flugzeug ist 43,7 Meter lang, 1,3 Meter kürzer als ein A 321.



Um mehr Fluggäste unterzubringen, haben die Studierenden geplant, dass ein Teil der Passagiere im Stehen reist.

### Wird dieser Vogel fliegen?

Ob der „eRay“, wie von den Studierenden prognostiziert, ab etwa dem Jahr 2045 wirklich ein alltagstaugliches Flugzeug sein wird, hängt noch von bestimmten Entwicklungen ab. Das Münchner Team setzt in seinem Konzept enorme Fortschritte in der Batterietechnologie voraus (dem eRay dienen Batterien als Puffer für den hohen Energiebedarf bei Start und Landung) sowie eine erhebliche Verbesserung von Flugleitsystemen und die Anpassung von Zulassungsvorschriften. Auch die Akzeptanz von fensterlosem Fliegen und das Fliegen im Stehen durch die Passagiere, das im effizientesten Szenario des Siegerentwurfs vorausgesetzt wird, müssen erst einmal Realität werden. Immerhin: Die ersten virtuellen Fenster, auf denen

Fluggäste statt eines echten Blicks nach draußen nur noch Bilder einer Bordkamera sehen, gehen gerade mit der neuen ersten Klasse der Boeing 777-300ER von Emirates in Dienst.

Die jungen Wissenschaftler der TUM sind optimistisch, dass sich die Fliegerei in Richtung ihrer Vision entwickeln wird. „Während der Challenge hat mich am meisten fasziniert, was alles noch möglich ist. Das Flugzeug in seiner heutigen Form ist bei weitem nicht das Beste, das wir uns vorstellen können“, betont Frühbeis. „Jetzt gilt es, diese Konzepte umzusetzen und zu erproben. Dabei sollten auch Wirtschaft und Politik mutig vorangehen und nicht vor Neuerungen zurückschrecken. Konzepte wie eRay

„Meine Jurykollegen und ich waren beeindruckt von der systematischen Verzahnung komplementärer Technologien, die perfekt zueinander passten.“

Rolf Henke, Member of the DLR Executive Board



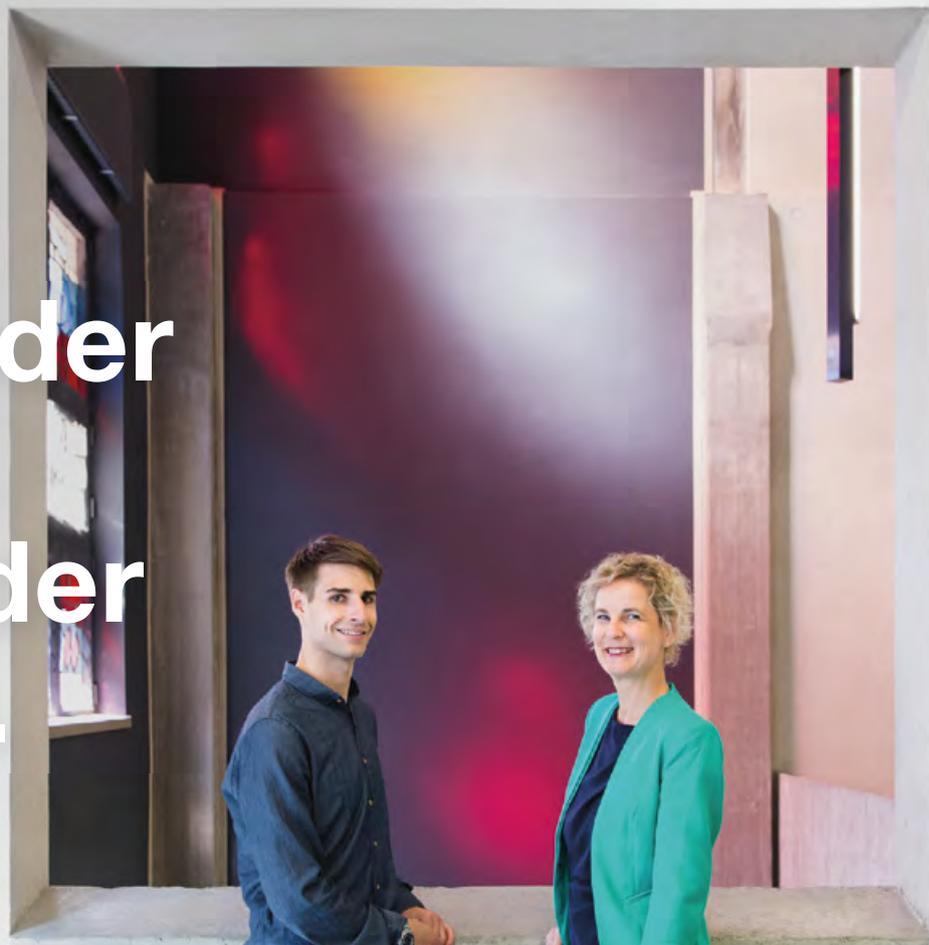
setzen ein hohes Maß an Zusammenarbeit voraus. Das haben wir auch schon in unserem kleinen Team gemerkt. Der Aerodynamiker muss sich sehr stark mit dem Antriebssystem auseinandersetzen und umgekehrt. Das widerspricht der strikten Arbeitsteilung in der Industrie. Langfristig will ich daran mitarbeiten, dass dieser Wandel gelingt.“

Der 24-jährige Artur Usbek nimmt sich diese Zusammenarbeit als Vorbild: Er studiert Maschinenwesen, Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau und Management sowie Entwicklung und Konstruktion. Mit vier Masterabschlüssen in der Tasche kann er sich vorstellen, später als Ingenieur am Gesamtsystem militärischer Jets oder am Gesamtsys-

tem Triebwerk zu arbeiten. Sein Resümee: „Mir war schnell klar, dass es bei neuen Flugzeugkonzepten darum geht, gute Kompromisse zu finden. Besonders hat mir bei diesem Wettbewerb die Vernetzung mit anderen Enthusiasten der Luft- und Raumfahrtbranche gefallen. Ich würde jedem empfehlen, einmal bei so einem Projekt mitzumachen.“

An der deutsch-amerikanischen Design Challenge beteiligten sich mehr als 100 Studierende. Die beiden Siegergruppen wurden bei einem Symposium am NASA-Hauptsitz in Washington D.C. im Oktober 2018 gewürdigt. Auch in diesem Jahr ist die TUM wieder bei ähnlichen Wettbewerben mit dabei. ■

Karsten Werth



# Voneinander lernen, miteinander wachsen.

Career-Service  
der TUM für  
Studierende und  
Alumni.

**TUM. Ihr Netzwerk. Ein Leben lang.**

TUM Alumni & Career | [www.community.tum.de](http://www.community.tum.de)

Bei TUM Mentoring begleiten Alumni ein Jahr lang Studierende und Promovierende und fördern sie in ihrer persönlichen Entwicklung. Auch TUM Alumna und Professorin Dr. Marion Weissenberger-Eibl war ihrem Mentee Daniel Schellenberger eine wichtige Ratgeberin. Sie selbst gehört zu den 100 einflussreichsten Frauen der deutschen Wirtschaft. Weiterlesen unter [www.150.alumni.tum.de/weissenberger-eibl](http://www.150.alumni.tum.de/weissenberger-eibl)

# TUM mit vier Exzellenzforschungsclustern erfolgreich

In die hochwettbewerbliche Exzellenzinitiative von Bund und Ländern ist die TUM erneut erfolgreich gestartet. Vier Forschungscluster der TUM und ihrer Kooperationspartner werden in den nächsten sieben Jahren mit jeweils bis zu 50 Millionen Euro finanziert. Die Verbünde werden Energiewandlung, Quantentechnologie, die Entstehung des Universums und neurologische Krankheiten erforschen. Zu den Gründen für diesen Erfolg gehörten die hervorragende Qualität der TUM-Forscher und die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen und mehreren Partnerinstitutionen.

## e-conversion

Im Mittelpunkt des Exzellenzclusters e-conversion stehen Energieumwandlungsprozesse für ein nachhaltiges Energie-ökosystem – von der Photovoltaik über die (Foto-)Elektrokatalyse bis hin zu Batterien. Unter Zusammenführung der leistungsfähigen Konzepte der Nanowissenschaften und der mechanistischen Energieforschung entwickelt e-conversion neuartige mikroskopische Konzepte zur Analyse und Orchestrierung dieser Prozesse mit Auflösungen bis zu atomaren Dimensionen und Femtosekunden.

## MCQST

Das Münchner Zentrum für Quantenwissenschaften und -technologie (MCQST) hat das Ziel, ein umfassendes Verständnis quantenmechanischer Phänomene zu gewinnen und damit grundlegende Bauelemente, Materialien und Konzepte für Quantentechnologien voranzubringen. Die interdisziplinäre Forschung reicht von der Analyse der Verschränkung in Vielteilchensystemen bis in die Quantenchemie, Kosmologie und Präzisionsmetrologie.

## ORIGINS

Dieser Cluster wird die innerste Struktur des Universums wie auch den Ursprung des Lebens erforschen. Hierzu wirken die Fachrichtungen Astrophysik, Astrobiologie, Biophysik und Teilchenphysik zusammen, um beispielsweise nach dem Zusammenhang zwischen der Planetenbildung und der Entstehung der ersten Moleküle zu suchen, die als Vorläufer lebender Zellen gelten können.

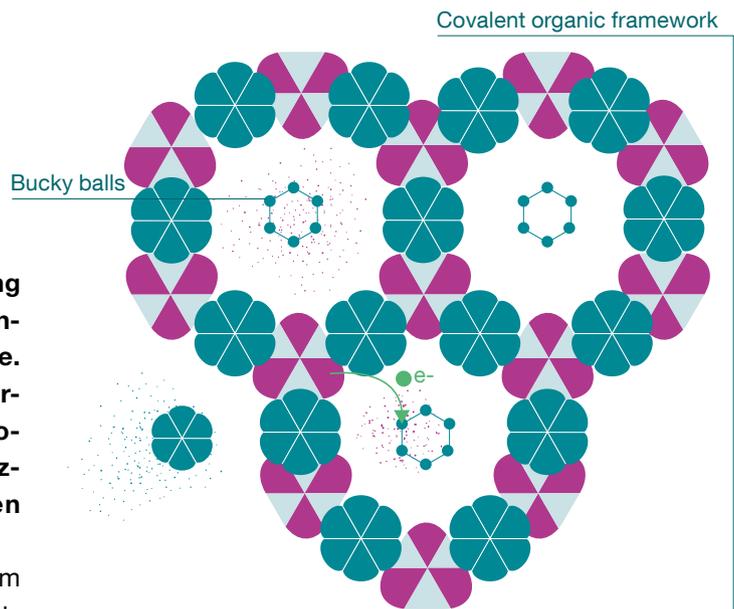
## SyNergy

Der Exzellenzcluster „SyNergy – Munich Cluster for Systems Neurology“ erforscht, auf welche Weise neurologische Erkrankungen wie Multiple Sklerose und Alzheimer entstehen. Weil das Nervensystem hochkomplex ist, beeinflussen dort zahlreiche Prozesse die Entstehung neurodegenerativer Krankheiten. Im Mittelpunkt der Münchner Forschung steht die Systemneurologie als neuer interdisziplinärer Ansatz.

# e-conversion – Materialien zur Energie- umwandlung unter der Lupe

**Nachhaltige Energieerzeugung, etwa durch Nutzung der Sonnenenergie, arbeitet mit völlig anderen Technologien als konventionelle Verbrennungskraftwerke. Hier stehen Prozesse der Energieumwandlung, -verteilung und -speicherung im Vordergrund, die auf atomaren Vorgängen im Material beruhen. Der Exzellenzcluster e-conversion wird diese Mechanismen interdisziplinär erforschen.**

**Z**war hat man in den vergangenen Jahrzehnten im Rahmen der Energiewende bereits große Fortschritte bei der Nutzung regenerativer Energien gemacht, aber immer noch gibt es große Defizite beim Verständnis der atomaren Vorgänge. So kennt man in vielen Fällen noch nicht die Grundprinzipien, die an Grenzflächen in Batterien, Brennstoffzellen oder Solarzellen im Nanomaßstab und in Femtosekunden ablaufen. Sie können dazu führen, dass der Wirkungsgrad der beteiligten Geräte niedrig ist oder dass sie im Dauereinsatz nicht stabil arbeiten.



Transport von Ladungsträgern  
durch energetische Anregung  
in Modellmaterialien

Drei Interpretationen des e im Namen des Clusters sind den Forschern dabei wichtig:

Die erste steht umfassend für „energy“ conversion allgemein. „Der Grund, alle Technologien der Energieumwandlung in einem Cluster zu vereinen, ist die Erkenntnis, dass wir es in diesen – bisher weitestgehend separat beforschten – Gebieten immer wieder mit denselben mikroskopischen Prozessen zu tun haben“, sagt TUM-Professor Karsten Reuter. „Sie spielen eine zentrale physikalische Rolle und bewirken in den aktuellen Systemen die Limitierungen.“

Bisher kommen in der Energietechnik sehr oft gleiche oder ähnliche Materialien zum Einsatz. Die Hoffnung besteht nun, dass man bei e-conversion interdisziplinär voneinander lernen kann, also Synergien und Analogien finden kann. Denn hier sollen Forscher zusammenarbeiten, die bisher unabhängig voneinander an verschiedenen Technologien der Energiekonversion gearbeitet haben.

Die zweite Interpretation des e steht für „elementary“. Die limitierenden mikroskopischen Prozesse bei bisherigen Energiewandlungssystemen spielen sich primär an Grenzflächen zwischen Materialien ab, in der Regel an fest-festen, fest-flüssigen oder fest-molekularen Materialgrenzflächen. Über diese weiß man mikroskopisch bisher nur sehr wenig. Genauere Erkenntnisse dazu wären aber

wichtig, weil sich die Grenzflächen speziell während des Betriebs durch die dabei stattfindenden Prozesse stark verändern können.

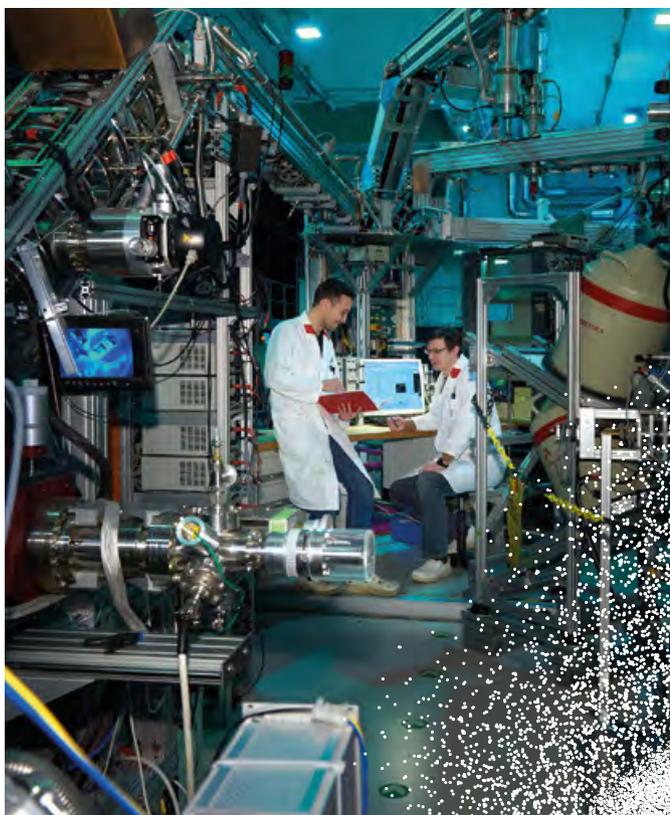
Die Untersuchung ist jedoch speziell bei fest-fest und fest-flüssig sehr schwierig, da die Grenzfläche im Gegensatz zu einer Oberfläche im Innern des Systems versteckt ist. Der zentrale Ansatz von e-conversion ist es daher, neue, vereinfachte Modellsysteme zu erschaffen, die eine Erforschung erlauben. „Der Kniff ist dabei, dass wir nicht einfach reale Systeme nehmen wollen und diese irgendwie vereinfachen“, sagt TUM-Professor Ulrich Heiz. „Stattdessen benutzen wir die neuen Möglichkeiten der Nanotechnologien, um künstliche Systeme quasi Atom für Atom gezielt zusammenzubauen. Wir wollen uns damit geeignete Modelle selber gestalten, die ideal sind für die Untersuchung der Grenzflächen und der daran ablaufenden mikroskopischen Prozesse.“ Daraus erhoffen sich die Forscher ein besseres Grundlagenverständnis für die molekularen Vorgänge. Zudem stellt der Exzellenzcluster hierdurch die Verbindung zwischen den – bisher zwar vorhandenen, aber wenig vernetzten – Bereichen Energieforschung und Nanowissenschaften her.

Eine dritte Interpretation des e ist: excitation, also molekulare Anregungsprozesse. Die Vorgänge in Energiewandlern müssen stets durch eine vorangehende Anregung von Atomen oder Molekülen ausgelöst werden, die die eigentliche Grundlage der Energieumwandlung sind. Bei regenerativen Energien steht dabei oft am Anfang das Sonnenlicht als ewige Energiequelle. Auch die hierbei stattfindenden Prozesse sollen bei e-conversion genauer untersucht werden.

Wenn man die in den Materialien ablaufenden Mechanismen genau kennt, kann man darangehen, schädliche Effekte zu vermeiden und neue Materialien zu entwickeln, die höhere Wirkungsgrade der Energieumwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität oder synthetische Kraftstoffe ermöglichen, oder die zu langlebigen und sicheren Batterien mit hoher Speicherkapazität führen.

Neben der LMU und TUM als gemeinsame Antragssteller sind die Max-Planck-Institute für Chemische Energiekonversion (Mülheim/Ruhr) und für Festkörperforschung (Stuttgart) Partner im e-conversion Cluster. Die TUM-Sprecher sind Prof. Karsten Reuter und Prof. Ulrich Heiz (Chemie). ■

Wissenschaftler an der TUM-Neutronenforschungsquelle FRM II verwenden Positronen zur Messung der Eigenschaften von Batterien. Der FRM II ist ein wichtiges Forschungsinstrument für das Exzellenzcluster e-conversion.

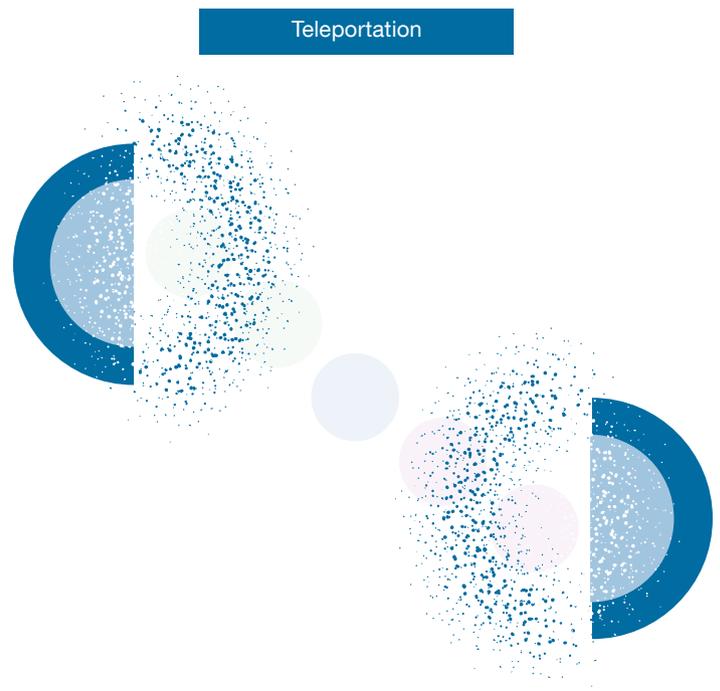


# MCQST –

# Quantenphysik in der praktischen Anwendung

**Ein neuer Umgang mit den Gesetzen der Quantenwelt führt zu völlig neuen Technologien, etwa zu besseren Möglichkeiten der Verschlüsselung, zur Teleportation von Informationen und zum Quantencomputer. Diese neue Forschungsrichtung, die Quantenphänomene für praktische Zwecke einsetzt, wird nun im Münchner Zentrum für Quantenwissenschaften und -technologie (MCQST) fachübergreifend vorangetrieben. Das Anwendungspotenzial ist riesig.**

**C**omputer, Laser, Atomuhren: Technologien, die auf Erkenntnissen der Quantenmechanik beruhen, sind seit Jahren in vielen Bereichen im Einsatz. Diese Wissenschaft, die im ersten Drittel des 20. Jahrhundert entwickelt wurde, beschreibt die zum Teil skurrilen physikalischen Vorgänge in der Welt des Allerkleinsten. Während aber lange Zeit die Einflüsse der Quantenmechanik als Störungen der klassischen Physik angesehen wurden, hat sich inzwischen die Sichtweise komplett geändert. Nun setzt eine neue Generation von Physikern deren Gesetze für ihre Zwecke ein und entwickelt unter dem Begriff „Quantum 2.0“ völlig neue Anwendungen. Das Entscheidende dabei ist: Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten haben sich nicht geändert, nur der Umgang mit ihnen.



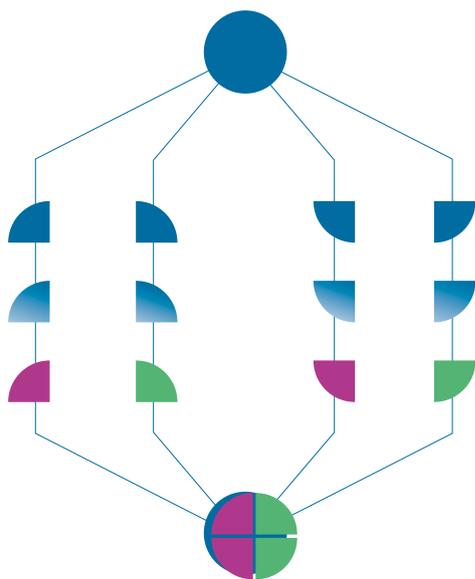
Die Arbeit dieses Zentrums beruht zum großen Teil auf der Nutzung der Überlagerung, Verschränkung und Teleportation von Quantenzuständen. Verschränkung ist eine Erscheinung, die Albert Einstein noch ungläubig als „spukhafte Fernwirkung“ bezeichnet hatte. Zwei Quantenobjekte, die miteinander verschränkt sind, befinden sich immer im gleichen Zustand, egal, wie weit sie voneinander entfernt sind. Ändert sich der Zustand des einen, so ändert sich automatisch auch der des anderen, als ob sie durch eine telepathische Verbindung aneinander gekettet wären. Mit Hilfe dieses Phänomens und der Teleportation gelang es beispielsweise, revolutionäre Verfahren zum Verschlüsseln von Nachrichten zu entwickeln. Sie sind mittlerweile auf dem Weg in die praktische Anwendung.

Die Überlagerung von Quantenzuständen spielt eine wichtige Rolle beim Bau eines Quantencomputers. Das Konzept wurde zum ersten Mal 1981 rein theoretisch vom US-Nobelpreisträger Richard Feynman ins Gespräch

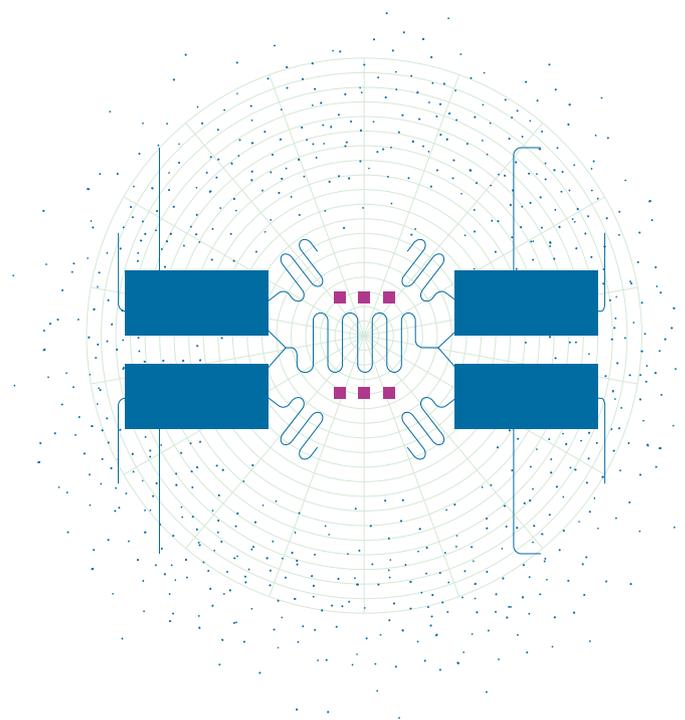
gebracht. Inzwischen gibt es erste Prototypen, Bauteile und Ansätze von geeigneter Software.

Das Münchner Zentrum für Quantenwissenschaften und -technologie hat das Ziel, die Prinzipien der Quanteninformation besser zu verstehen und die beschriebenen Effekte nutzbar zu machen. Seine interdisziplinäre Forschung reicht von der Analyse der Verschränkung in Vielteilchensystemen bis in die Quantenchemie, Astronomie und Präzisionsmesstechnik. An der TUM in Garching entsteht ein Forschungsneubau, dessen Finanzierung (40 Mio. Euro) sich der Bund und der Freistaat Bayern teilen. Neben TUM und LMU als gemeinsame Antragsteller sind das Max-Planck-Institut für Quantenoptik, das Walther-Meißner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und das Deutsche Museum an MCQST beteiligt. Sprecher auf TUM-Seite sind Prof. Rudolf Gross (Physik) und Prof. Ignacio Cirac (Physik / MPI für Quantenoptik). ■

Verschlüsselung



Quantencomputer



# ORIGINS –

# Wie entstand das Universum und das Leben?

**Die Entwicklung des Kosmos – vom „Urknall“ bis zur Entstehung des Lebens – ist immer noch eines der größten Geheimnisse der Wissenschaft. Nachdem der Exzellenzcluster Universe Ende 2018 nach zwölfjähriger erfolgreicher Tätigkeit zu Ende ging, führt der Forschungsverbund ORIGINS die Arbeit weiter. Schwerpunkt des neuen Clusters ist nun, die Struktur des Universums zu verstehen und die Frage, wie das Leben auf die Erde und vielleicht auf andere Planeten kam.**

**V**iel hat die Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten über die Entstehung des Universums und seine Entwicklung bis zum heutigen Tage schon herausgefunden. Man versteht heute viel besser, wie aus Gaswolken und Nebeln Sterne und Galaxien entstehen, und hat eine Unzahl exotischer Phänomene am Himmel entdeckt und teilweise auch erklären können. Dennoch blieben grundsätzliche Fragen ungeklärt. Eine der wichtigsten ist es, wie in den Weiten des Weltalls und auch auf der Erde Leben entsteht und entstand. Damit eng verknüpft ist die Suche nach Exoplaneten, die möglicherweise Heimstatt für lebendige Strukturen sein können. Man nähert sich der Antwort, indem man im Rückgriff untersucht, welche Bedingungen einst nötig waren, um das Leben auf der Erde entstehen zu lassen.

„Der Universe Cluster hat uns zwölf Jahre erfolgreiche Zusammenarbeit von rund 250 Astrophysikern, Kern- und Teilchenphysikern in München und Garching mit exzellenten wissenschaftlichen Ergebnissen beschert, die ohne den interdisziplinären Ansatz so nicht möglich gewesen wären“, reagierten die Cluster-Koordinatoren Professor Andreas Burkert (LMU) und Professor Stephan Paul (TUM)

auf die Bewilligung durch die DFG. „Die dabei gesammelten Erfahrungen bilden die Grundlage für die Erforschung der neuen Herausforderungen, denen wir uns mit ORIGINS stellen. Wir freuen uns sehr, dass wir uns nun weiterhin den Urfragen der Menschheit über die Entstehung des Universums widmen und unsere Arbeiten auf die Entstehung molekularen Lebens ausdehnen können.“ Die Fragestellungen reichen vom Allerkleinsten bis zum Allergrößten. Beispielsweise wollen die Forscher untersuchen, welche Verbindungen es zwischen der Planetenbildung und den ersten präbiotischen Molekülen gibt, um den Ursprüngen des Lebens auf die Spur zu kommen. Eine andere wichtige Fragestellung ist der Zusammenhang zwischen der fundamentalen Natur der Dunklen Materie und der kosmischen Strukturbildung. Bei der Aufklärung werden Forscherinnen und Forscher aus den Fachrichtungen Astrophysik, Astrobiologie, Biophysik und Teilchenphysik zusammenarbeiten.

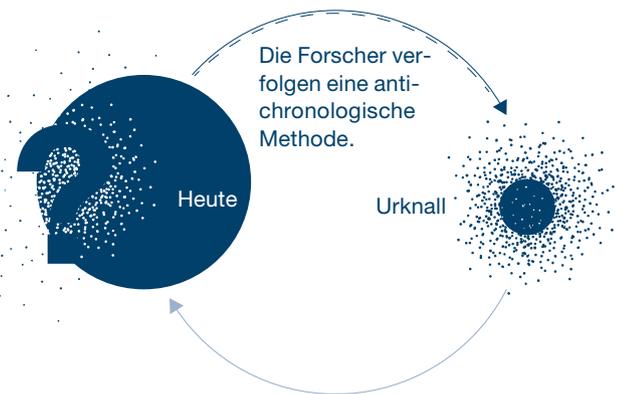
Wichtige Teile der Arbeiten finden dabei in internationalen Kooperationen und an den weltweit größten Forschungseinrichtungen wie dem CERN oder dem Very Large Telescope der ESO in Chile statt. Zusätzlich zu den während



Das Infrarotbild zeigt den Helixnebel, 700 Lichtjahre von der Erde entfernt, aufgenommen von einem Teleskop der ESO, einem der Partner im Exzellenzcluster ORIGINS. Der Cluster erforscht die Entstehung des Universums und des ersten Lebens.

der Laufzeit des Universums entstanden Labors sollen neue Einrichtungen am Standort München entstehen, etwa das Origins Data Science Lab (ODSL). Es bündelt bestehende Expertise in statistischer Datenanalyse und entwickelt die nächste Generation von numerischen und statistischen Methoden, um die künftigen gigantischen und eng vernetzten Datensätze zu analysieren. Und mit dem neuen Eis-, Staub- und Sequenzierlabor (IDSL, Ice, Dust and Sequencing Laboratory) sollen die ersten Zyklen Darwinscher molekularer Entwicklung nachvollzogen werden. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am IDSL wollen verstehen, wie aus unbelebter Substanz lebende Materie entsteht.

Neben TUM und LMU als gemeinsame Antragsteller sind die Max-Planck-Institute für Astrophysik, Biochemie, Extraterrestrische Physik, Physik und Plasmaphysik sowie die Europäische Südsternwarte (ESO), das Leibniz-Rechenzentrum und das Deutsche Museum an „ORIGINS – Vom Ursprung des Universums bis zu den ersten Bausteinen des Lebens“ beteiligt. Sprecher auf TUM-Seite ist Prof. Stephan Paul (Physik). ■



Der Exzellenzcluster SyNergy um Sprecher Prof. Thomas Misgeld, Neurobiologe an der Technischen Universität München (TUM), erforscht Gemeinsamkeiten von neurologischen Erkrankungen wie Alzheimer und Multipler Sklerose.



Vaskuläre  
Veränderungen

# SyNergy – Die ganzheitliche Erforschung von Nervenkrankheiten

**Der Exzellenzcluster „SyNergy – Munich Cluster for Systems Neurology“ erforscht, auf welche Weise neurologische Erkrankungen wie Multiple Sklerose und Alzheimer entstehen. Weil das Nervensystem hochkomplex ist, beeinflussen sich zahlreiche Prozesse gegenseitig bei der Entstehung dieser Krankheiten. Deshalb ist eine fachübergreifende Zusammenarbeit nötig.**

**N**ichts weniger als die Etablierung eines neuen Wissenschaftsfeldes steht im Mittelpunkt dieses Exzellenzclusters, nämlich der Systemneurologie. Bei diesem interdisziplinären Ansatz arbeiten Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen medizinischen Forschungsfeldern zusammen. Ziel ist es, die untereinander eng vernetzten Mechanismen zu erforschen, die bei der Entstehung neurologischer Erkrankungen auftreten.

Bisher gab es Spezialisten für Entzündungen (inflammatorische Prozesse), für den Untergang von Nervenzellen

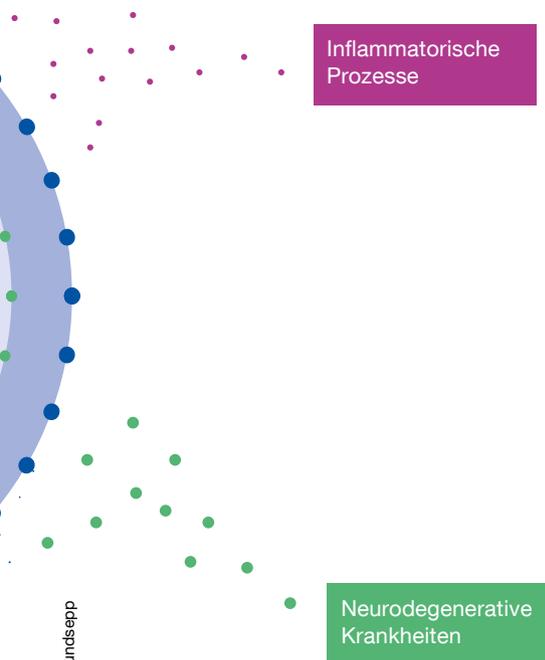
(neurodegenerative Erkrankungen) und für Blutgefäße (vaskuläre Veränderungen). In der Systemneurologie arbeiten sie nun eng zusammen und überwinden die Grenzen zwischen ihren Gebieten. So wird beispielsweise untersucht, wie Entzündungsreaktionen neurodegenerative Prozesse beeinflussen, wie mikrovaskuläre und degenerative Schädigungsmechanismen sich wechselseitig beeinflussen und wie Immunzellen mit der Blut-Hirn-Schranke wechselwirken.

Der SyNergy Cluster schafft die wissenschaftlichen und strukturellen Voraussetzungen, um München als Zentrum für Systemneurologie in Europa zu etablieren. Er baut ein kollaboratives Netzwerk auf zwischen Grundlagenforscherinnen und -forschern, klinischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie führenden Expertinnen und Experten im Bereich der Systemanalyse. Hierbei werden neue, fächerübergreifende Ansätze zur Analyse, Modellierung und Modifikation von Krankheitsprozessen verfolgt. Zu diesem Zweck werden „Tandemprojekte“ gefördert, in denen zwei oder mehr Wissenschaftlerinnen bzw. Wissenschaftler zusammenarbeiten. Diesen Tandemprojekten kommt eine Brückenfunktion zu, und zwar sowohl in „horizontaler“ Richtung zwischen verschiedenen Krankheitsmechanismen als auch „vertikal“ zwischen Grundlagenforschung und klinischer Anwendung.

Zusätzlich wurde eine Anzahl von „SyNergy Professuren“ neu geschaffen, um herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einzubinden, die eine besondere Expertise in den Verbindungsbereichen zwischen den verschiedenen Gebieten aufweisen. Darüber hinaus gibt es ein neues Programm zur Ausbildung und Förderung von jungen wissenschaftlich tätigen Klinikerinnen und Klinikern.

Der Cluster wird schon seit 2012 von der Exzellenzinitiative gefördert. Die enge Zusammenarbeit von Teams unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen hat sich als höchst erfolgreich erweisen. So wurde zum Beispiel entdeckt, dass bei Multipler Sklerose Abbauprodukte des Fettstoffwechsels Entzündungen an defekten Nervenfasern verstärken und die Heilung verhindern.

Neben TUM und LMU als gemeinsame Antragsteller sind das Deutsche Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (Bundesinitiative), das Helmholtz Zentrum München und die Max-Planck-Institute für Biochemie, Neurobiologie und Psychiatrie an SyNergy beteiligt. Sprecher auf TUM-Seite ist Prof. Thomas Misgeld (Medizin), zusammen mit Prof. Christian Haass von der Ludwig-Maximilians-Universität. ■



over Band (// links)

$\alpha^0$   $A_0$  (resources)



$P_1$  (players)

$A_1$

$P$

$A$

$\max_{i \in P} f_i(b_{-i}) \geq f_i(a_{-i}) = f_i(b)$

$\bar{S}^*$  : players

$$u_i(\bar{S}^*) = \sum_{e \in \bar{S}^*} e e_i$$

$$= \left( \frac{\alpha^{e_i}}{\varphi_d} \right)^{e_i}$$

$$\left[ \left( \frac{\alpha}{\varphi_d} \right)^{e_i} \right]^{e_i}$$

$$\left( \frac{i \cdot k}{\sum} \right)$$

# Operations Research – eine mathe- matische Wunderwaffe

Sie können die Lagerhaltung verbilligen, Verkehrsflüsse optimieren, Fahrpläne erstellen oder Schwarzfahrer einfacher aufspüren: Computeralgorithmen aus dem Gebiet Operations Research sind in der Lage, viele Abläufe zu verbessern. Professor Andreas S. Schulz entwickelt die dafür nötigen Verfahren weiter, erfindet neue und stößt dabei manchmal auf verblüffende Ergebnisse.

Link

[www.or.tum.de](http://www.or.tum.de)

## Operations Research – One of math's greatest secret weapons

E

Operations Research is a branch of mathematics primarily concerned with the modeling and optimization of economic processes. Algorithms are used to select the best alternative from many options to support decision-making in business. Andreas S. Schulz, Alexander von Humboldt Professor of Operations Research at TUM, refines the procedures, develops new ones, and often gains exciting new insights that help to advance the underlying theory. He was able to demonstrate, for instance, that a

warehousing problem is at least as difficult to solve as factoring integers. He also showed that the difference between a networked system where everyone seeks to benefit only themselves may function barely worse than a system where everyone acts in the general interest. Reaching beyond economic and business challenges, Schulz also applies his methods to social and humanitarian problems. □

**D**ass die theoretische Mathematik unser Leben mitunter ganz praktisch beeinflussen kann, dafür ist die Arbeit, die am Lehrstuhl für Operations Research (OR) in der Münchner Karlstraße vor sich geht, beispielhaft. Während unten in einem Laden glitzernde Helium-Ballons verkauft werden, die in den Himmel schweben, zerbrechen sich oben im 6. Stock Forscher den Kopf darüber, wie man bestimmte wirtschaftlich-mathematische Ideen zum Fliegen bringen kann. Konkret geht es darum, Verfahren zu entwickeln und zu verbessern, die ökonomische Abläufe abbilden und optimieren. In der Regel gibt es dabei sehr viele Kombinationsmöglichkeiten, und man muss die finden, die am günstigsten ist. „Dabei suchen wir nach Methoden, die sowohl mit großen Datenmengen zurechtkommen als auch mit Unsicherheiten“, sagt der Alexander von Humboldt-Professor Andreas S. Schulz, der seit 2015 diesen Lehrstuhl und gleichzeitig ein interdisziplinäres Forschungszentrum zwischen den Fakultäten für Mathematik und Wirtschaftswissenschaften leitet. „Wir berücksichtigen dabei auch schwierige Umstände, etwa sich ändernde Umgebungen, den Schutz privater Daten und manchmal auch divergierende Zielvorstellungen.“

### Die optimale Reiseroute

Das klassische Problem der OR ist das des Handlungsreisenden (Travelling Salesman Problem, PST). Man versucht herauszufinden, in welcher Reihenfolge dieser seine Kunden aufsuchen muss, um die kürzest mögliche Strecke zurückzulegen. „Das Schöne an diesem Problem ist, dass es sehr praxisnah ist, allgemein verständlich, und jeder glaubt, schnell eine Lösung finden zu können“, betont Andreas S. Schulz. „Das für mich Faszinierende ist jedoch, dass das Problem mathematisch gesehen so schwer ist, dass man es auch nach jahrzehntelanger Forschung noch nicht generell lösen kann. Und es ist ein Prototyp für ähnlich gelagerte Aufgaben, bei denen man unter vielen Kombinationen die beste auswählen muss.“ Bei wenigen Kunden lassen sich die Wege noch errechnen und vergleichen. Aber die Anzahl der möglichen Wege steigt mit der Anzahl der Kunden schnell an: Bei 4 Kunden sind es 24 Möglichkeiten, bei 5 sind es 120. Hätte der Handlungsreisende 12 Kunden, beträgt die Anzahl der Reismöglichkeiten bereits mehr, als es Tippmöglichkeiten beim Lotto 6 aus 49 gibt. Und bei 25 Kunden wären es mehrere Trilliarden. ▶



**5**

**24**

**6**

**120**

**25**

**620 448 401  
733 239 439  
360 000**

Kunden

Anzahl möglicher Reiserouten

Beim Problem des Handlungsreisenden (auch Traveling Salesman Problem, TSP) versucht man herauszufinden, in welcher Reihenfolge dieser seine Kunden aufsuchen muss, um die kürzeste Strecke zurückzulegen. Im Bild oben sind zwei mögliche Routen gezeigt. Das TSP ist ein anspruchsvolles mathematisches Problem, nicht nur weil die Anzahl der möglichen Reiserouten extrem schnell ansteigt (siehe links).

Die besten Supercomputer würden Monate brauchen, um all diese Möglichkeiten durchzurechnen. Aus dieser Aufzählung ersieht man schon, dass es nicht möglich ist, das Problem durch reines Auflisten und Vergleichen der einzelnen Touren zu lösen, wenn es um mehrere hundert Kunden geht. Und bei 25 Kunden wären es mehrere Trilliarden.

Das Problem des Handlungsreisenden tritt in den verschiedensten Zusammenhängen auf, etwa bei der Logistik von Paketdiensten, aber auch bei der Organisation von Flugplänen, beim Bedienen von Hochregallagern, bei Pflegediensten oder beim Bohren von Löchern in Leiterplatten. Inzwischen haben Forscher Mittel und Wege gefunden, wie man sich einer guten Lösung zum Beispiel grafisch annähern kann. Einer der erfolgreichsten Ansätze ist der sogenannte Simplex-Algorithmus, der von George B. Dantzig von der Stanford University stammt. Aber man kann nicht mit Sicherheit sagen, ob man damit jeweils die optimale Lösung findet.

„Die Gründe, warum wir das Travelling-Salesman-Problem bis heute nicht eindeutig lösen können, liegen tief verborgen in der theoretischen Mathematik“, erklärt Schulz. „Nicht umsonst hat das Clay Mathematics Institute in Massachusetts seit dem Jahr 2000 eine Million Dollar ausgelobt für denjenigen, der es lösen oder beweisen kann, dass keine Lösung existiert.“

### Entstanden aus militärischen Anwendungen

Einst entwickelte sich OR aus Verfahren, die die Briten und Amerikaner im Zweiten Weltkrieg und später im Korea-Krieg anwandten, um militärische Strategien und den Waffeneinsatz zu verbessern. Erst in den fünfziger Jahren begannen auch zivile Wirtschaftsunternehmen, solche Optimierungen für ihre Zwecke zu verwenden.



### Wirtschafts-Nobelpreise für Probleme aus dem Gebiet OR

**1969: Jan Tinbergen und Ragnar Frisch** „für die Entwicklung und Anwendung dynamischer Modelle zur Analyse von Wirtschaftsprozessen“.

**1975: Leonid V. Kantorovich und Tjalling C. Koopmans** „für ihren Beitrag zur Theorie der optimalen Ressourcenverwendung“.

**1990: Harry M. Markowitz zusammen mit William F. Sharpe und Merton H. Miller** für „die Anwendung mathematischer oder computerbasierter Methoden für praktische Probleme, insbesondere Geschäftsentscheidungen unter Unsicherheit“.

**1994: John C. Harsanyi zusammen mit John F. Nash Jr. und Reinhard Selten** „für ihre grundlegende Analyse des Gleichgewichts in der nicht kooperativen Spieltheorie“.

**2012: Alvin E. Roth** „für die Theorie der stabilen Verteilung und Marktgestaltung“.



Die Frage nach einer optimalen Lagerhaltungsstrategie kann sehr anspruchsvoll sein: Bei zwei oder mehr verschiedenen Produkten, die gemeinsam bestellt werden können, aber nicht müssen, ist bisher kein effizienter Algorithmus zum Bestimmen einer Lösung bekannt, der die Kosten minimiert.



„Es passiert mir mitunter, dass man ein Problem sieht und denkt: Ah, da kenne ich doch eine Technik, die könnte man dafür ausprobieren“, sagt Professor Schulz.

Bald entstand auch eine wissenschaftliche Gemeinschaft, die sich mit dem Thema befasste. Mittlerweile wurden schon drei Nobelpreise für Wirtschaftswissenschaften an Forscher vergeben, die Entdeckungen auf dem Gebiet des OR gemacht haben. (siehe Kasten)

Man kann heute Programme kaufen für Lagerhaltung, Betriebsabläufe und Logistik; Schulen verwenden solche Algorithmen zur Stundenplan-Erstellung und die Bahn zur Entwicklung ihrer Fahrpläne. Trotzdem ist Operations Research bei vielen Unternehmen noch unbekannt. „Das hängt vielleicht an dem sperrigen Namen“, meint Schulz und blickt in dieser Hinsicht etwas neidisch auf die Kollegen von der Artificial Intelligence. Und es liegt auch daran, dass man zum Anwenden von OR einiges Hintergrundwissen benötigt. „Es gibt Standardsoftware“, sagt der Professor, „aber meine Erfahrung ist, dass jedes Unternehmen Besonderheiten hat, für die diese meist nicht ausreicht. Oft muss man da erst ein passendes Modell bauen, das die speziellen Bedingungen abbildet.“

Schulz gehört weltweit zu den renommiertesten Wissenschaftlern auf dem Gebiet des Operations Research. Er studierte und promovierte an der Technischen Universität Berlin und erregte schon mit seiner Doktorarbeit Aufsehen in Fachkreisen. ▶

Bereits im Alter von 29 Jahren wurde er vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA, als Professor für Mathematics of Operations Research berufen, später hatte er dort den Lehrstuhl des Patrick J. McGovern Chair of Management inne. Am MIT blieb er 17 Jahre lang, unterbrochen von Gastaufenthalten an anderen Universitäten, bevor er im Jahr 2015 einem Ruf an die TUM folgte. Fast im Jahresrhythmus erhielt er Preise und Auszeichnungen für seine wissenschaftliche Arbeit, und seine Erkenntnisse lösten nicht nur lang untersuchte Probleme, sondern haben auch konkrete Auswirkungen auf die praktische Anwendung.

### Ideen unter der Dusche

Auf gute Ideen kommt er oft im Gespräch mit Kollegen: „Auf Fachkonferenzen sind zum Beispiel so viele Vorschläge und Probleme präsent. Da passiert es mitunter, dass man ein Problem sieht und denkt: Ah, da kenne ich doch eine Technik, die könnte man dafür ausprobieren. Oder man hört von einer neuen Technik und denkt: Die könnte ich bei einem meiner Probleme benutzen. Einmal ist es mir passiert, dass in einer Sitzung drei Vortragende über jeweils etwas anderes gesprochen haben, aber ich hatte am Ende das Gefühl, dass sie alle das Gleiche gesagt hatten, ohne es zu merken. Ich habe dann im folgenden Jahr eine gemeinsame Sprache für all diese Probleme entwickelt.“ Aber auch zu Hause gibt es Gelegenheiten zu Diskussionen: „Manchmal kommt ein Gast ans Institut und trägt etwas vor. Man ist dann ganz fasziniert und behält das im Kopf“, sagt Schulz. „Irgendwann hat man dazu eine Idee, sei es beim Spaziergehen oder unter der Dusche. In der Mathematik ist es ganz wichtig, dass Dinge ins Unterbewusstsein gehen.“ Den Computer benutzt er nur, um eine Vermutung oder Idee auszutesten oder kurz mal etwas auszurechnen.

Diese Vorgehensweise empfiehlt Andreas S. Schulz auch seinen Studenten und Doktoranden: „Ich sage meinen Mitarbeitern oft: Es ist wichtig, dass man Dinge tief versteht, dann kommen irgendwann die Lösungen von selbst. Man kann nicht bewusst darauf hinarbeiten. Wir können uns zwar große offene Probleme vornehmen, aber die lösen wir in ein oder zwei Jahren vermutlich nicht. Man findet dann jedoch andere spannende Fragen und kann zumindest Teillösungen aufstellen.“



Auf gute Ideen kommt Andreas S. Schulz oft im Gespräch mit Kolleginnen und Kollegen.

Dies ist immer wieder passiert, etwa bei der Berechnung der optimalen Lagerhaltung. Es geht hier um ein Problem, für das es ebenfalls bis heute keine mathematisch eindeutige Lösung gibt, obwohl es eigentlich recht einfach wirkt: Betrachtet man die Bestellkosten und stellt sie den Kosten für die Lagerhaltung gegenüber, so lässt sich für ein einzelnes Produkt leicht errechnen, in welchen Intervallen dieses geliefert werden muss, um die Gesamtkosten möglichst niedrig zu halten. Aber schon bei zwei Produkten mit unterschiedlichen Daten gibt es keine eindeutig berechenbare beste Lösung mehr. Die Frage, warum dies so ist, lässt einem Mathematiker wie Andreas S. Schulz natürlich keine Ruhe.

Ihm ist es inzwischen immerhin zusammen mit seinem Team gelungen zu zeigen, dass das Problem ebenso schwierig zu lösen ist wie die Faktorisierung ganzer Zahlen. Bei dieser geht es darum, für Zahlen deren ganzzahlige Teiler anzugeben. Reines Ausprobieren führt bei sehr großen Zahlen zu einem Rechenaufwand, der alle realen Möglichkeiten übersteigt. Multipliziert man beispielsweise zwei sehr große Primzahlen miteinander, ist



Auch zur Planung und Optimierung von Verkehrsstrassen sind Verfahren des OR geeignet.

das kein Problem. Kennt man aber nur das Produkt, ist es extrem schwer, die beiden Teiler aufzuspüren. Dies macht man sich beim RSA-Verschlüsselungsverfahren zunutze, das heute häufig angewendet wird.

### Braess-Paradoxon

Das Braess-Paradoxon ist ein unerwartetes Ergebnis der Netzwerktheorie. Es besagt, dass das Hinzufügen von Kapazität die Geschwindigkeit eines Netzwerks verlangsamen kann. Auf Verkehrswege angewendet bedeutet das Braess Paradox, dass zusätzliche Straßen den Verkehr verlangsamen können, oder dass die Sperrung von Straßen den Verkehr beschleunigen kann. So geschah es zum Beispiel in New York, als am 22. April 1990 die 42nd Street nahe dem Times Square am Earth Day für den Verkehr gesperrt wurde. Jeder hatte vorausgesagt, dass ein Verkehrschaos eintreten würde, aber man hatte sich geirrt – der Verkehr verteilte sich reibungslos auf die anderen Straßen.

### Der Preis der Anarchie

Ein anderes Problem, das ebenfalls im Alltag große Bedeutung hat und dessen Lösung mitunter dem gesunden Menschenverstand widerspricht, wurde vor 20 Jahren zum ersten Mal untersucht. Die Frage lautet: Wenn in einem vernetzten System jeder das tut, was für ihn selbst am besten ist, um wieviel ungünstiger funktioniert dann das Gesamtsystem im Vergleich zu dem Zustand, wenn alle das tun, was für die Gemeinschaft am besten ist? Oder mit anderen Worten: Was kostet die Anarchie?

Beispiel Verkehrsfluss: Jeder sucht den seiner Ansicht nach schnellsten Weg, aber man könnte die Autos auch über Leitsysteme so lenken, dass sich Staus vermeiden lassen. Modelliert man diese Systeme mathematisch, zeigt sich überraschenderweise, dass eine zusätzliche Straße die Fahrzeit verlängern kann. Dieser Effekt, der etwa in 50 Prozent der Fälle auftritt, wurde bekannt als Braess-Paradox, 1968 entdeckt vom deutschen Mathematiker Dietrich Braess (siehe Kasten). ▶

*„Es ist wichtig, dass man Dinge tief versteht, dann kommen irgendwann die Lösungen von selbst.“*

*Andreas S. Schulz*

Dass dieser Effekt auch in der Praxis vorkommt, wurde beispielsweise in New York City gezeigt, als am Earth Day am 22. April 1990 die 42. Straße für den Autoverkehr gesperrt wurde. Alle sagten ein großes Verkehrschaos voraus, aber es blieb aus, denn der Verkehr verteilte sich gleichmäßig auf andere Straßen.

Andreas S. Schulz hat versucht, das zu analysieren, und hat für den Preis der Anarchie einen „superschönen geometrischen Beweis gefunden, der heute auch in den Lehrbüchern steht.“ Er konnte zeigen, dass bei einer bestimmten Art von Fahrverhalten die schlimmstmögliche Lösung nur 33 Prozent schlechter als die bestmögliche ist. „Das sind allerdings idealisierte Annahmen“, sagt er. „Man kann das für realistische Straßennetze noch ein bisschen verfeinern. Dann findet man heraus, dass man im schlimmsten Fall 36 Prozent verliert.“

Man kann mit Operations Research viel Geld einsparen. So hat beispielsweise Jannik Matuschke, ein Kollege von Schulz, der im Januar Professor an der Universität Leuven wurde, in seiner Doktorarbeit gezeigt, dass ein Paketzusteller in Deutschland mit einem von ihm entwickelten OR-Programm eine Kostensenkung von 14 Prozent beziehungsweise 1,6 Millionen Euro im Jahr erreichen könnte. Andreas S. Schulz liegt aber viel daran, dass seine Verfahren nicht nur zur Maximierung des Profits von Firmen eingesetzt werden. Er möchte sie nutzen, um der Gesellschaft etwas zurückzugeben und auch Non-profit-Unternehmen zu unterstützen.

So könnte man damit beispielsweise auch die Verteilung von Hilfsgütern in Katastrophengebieten erheblich verbessern oder die Vermittlung von Spendernieren revolutionieren.

Angenommen, jemand spendet freiwillig eine Niere, egal an wen. Dann könnte man diese einem passenden Empfänger zuordnen, für den aber ein Verwandter sich bereit erklärt hat, ebenfalls eine Niere zu spenden. Diese könnte wiederum jemand anderem gegeben werden usw. So entsteht eine Kette von Empfängern, die mit kombinatorischen Verfahren optimiert werden kann, so dass schließlich jeder Empfänger eine möglichst gut passende Niere erhalte. „In den USA wurde das bereits realisiert“, sagt Schulz. „In der EU ist die Spende an fremde Empfänger bisher verboten, deshalb ist diese Art von Vermittlung bei uns noch nicht möglich. Aber das ließe sich sicherlich durch eine Gesetzesmodifikation leicht ändern.“

Insgesamt sieht Andreas S. Schulz eine neue Ära für OR heraufziehen: „Durch die Verknüpfung von Informatik, Mathematik und Ökonomie tun sich neue Möglichkeiten und Anwendungsfelder auf. Wir können bei unseren Methoden zunehmend auch immaterielle Faktoren wie Anreize, Netzwerke und Unsicherheiten mit einbeziehen. Das versetzt uns in die Lage, auch kritische soziale Herausforderungen anzugehen.“ ■

*Brigitte Röthlein*




---

 Prof. Andreas S. Schulz
 

---

## Mathematiker mit Blick für ökonomische Fragestellungen

Prof. Andreas S. Schulz, geb. 1969, studierte angewandte Mathematik an der Technischen Universität Berlin, wo er 1996 promovierte. Danach war er dort zwei Jahre lang Assistenzprofessor, bevor ihn das Massachusetts Institute of Technology (MIT) nach Cambridge, USA, berief. Dort stieg er vom Assistenzprofessor zum Patrick J. McGovern Professor of Management and Professor für Mathematics of Operations Research auf. Als Humboldt-Forschungspreis-träger kehrte er zwischen 2011 und 2013 für einen Forschungs- und Lehraufenthalt an seine Alma Mater in Berlin zurück. Er hat zahlreiche Gastprofessuren ausgeübt, wie an der University of British Columbia, der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich und der Universität Maastricht. Zudem ist er Gründungsmitglied der Jungen Akademie in Berlin/Deutschland.

---

**Autoren**

**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 werden soll.

**Dr. Klaus Manhart** ist freier Autor für IT und Wissenschaft. Er studierte „Logik und Wissenschaftsphilosophie“ und Sozialwissenschaften an der Universität München. Nach seiner Doktorarbeit arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Universitäten München und Leipzig auf den Gebieten Computersimulation, Spieltheorie und Künstliche Intelligenz. Seit 1999 ist er als freier Autor in München tätig.

[www.klaus-manhart.de](http://www.klaus-manhart.de)

**Dr. Monika Offenberger** arbeitet seit 30 Jahren als Wissenschaftsjournalistin und -redakteurin für Tageszeitungen, Magazine, Buchverlage und Forschungseinrichtungen. Zuvor hat sie Biologie an der LMU München studiert und dabei unsere wild lebenden Fruchtfliegen erforscht: Allein im Englischen Garten leben drei Dutzend verschiedene Arten.

[monika.offenberger@mnet-mail.de](mailto:monika.offenberger@mnet-mail.de)

**Dr. Brigitte Röthlein** ist seit vielen Jahren als wissenschaftliche Autorin für Zeitschriften, Fernseh- und Radiosender sowie für Zeitungen tätig. Sie hat ein Diplom in Physik und einen Dokortitel in Kommunikationswissenschaften, Erziehungswissenschaften und Geschichte der Naturwissenschaften. Ihr Hauptinteresse liegt in der Grundlagenforschung.

[www.roethlein-muenchen.de](http://www.roethlein-muenchen.de)

**Dr. Karoline Stürmer** ist freie Autorin. Sie studierte Biologie in Regensburg und begann nach ihrer Doktorarbeit vor mehr als 20 Jahren für verschiedene Zeitungen, Zeitschriften und Forschungseinrichtungen zu schreiben. Ihre Hauptinteressengebiete sind medizinische Entdeckungen, angewandte Wissenschaften und die Auswirkungen des Klimawandels auf die Natur.

**Monika Weiner** ist freie Journalistin. Nach ihrem Studium der Geologie an der Universität München begann sie eine Karriere im Wissenschaftsjournalismus, wo sie für verschiedene Zeitungen, populärwissenschaftliche Zeitschriften und Rundfunkanstalten arbeitete. Ihre Berichterstattung konzentriert sich auf die Auswirkungen von Entdeckungen und neuen Technologien.

[en.monika-weiner.de](mailto:en.monika-weiner.de)

**Dr. Karsten Werth** ist freiberuflicher Wissenschaftsjournalist mit Sitz in München. Er studierte Zeitgeschichte und Amerikanistik und promovierte über das US-Weltraumprogramm der 1960er Jahre. Anschließend sammelte er Erfahrungen bei verschiedenen Industrie- und Medienunternehmen in den USA, Kanada und Deutschland, unter anderem als Chefredakteur einer PR-Agentur.

[karsten.werth@gmx.de](mailto:karsten.werth@gmx.de)



**Impressum**

**Faszination Forschung**

Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München  
 Unterstützt von der Exzellenzinitiative der deutschen Bundesregierung und der Länder

**Herausgeber**

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Wolfgang A. Herrmann,  
 Präsident der Technischen Universität München

**Redakteurinnen**

Dr. Brigitte Röthlein, Tina Heun-Rattei

**Bildredakteurin**

Andrea Klee

**Übersetzung**

Capella & McGrath GmbH, München

**Lektorat**

Baker & Company, München

**Design**

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

**Autoren in dieser Ausgabe**

Thomas Edelmann, Dr. Klaus Manhart, Dr. Monika Offenberger,  
 Dr. Brigitte Röthlein, Dr. Karoline Stürmer, Monika Weiner,  
 Dr. Karsten Werth

**Verantwortlich für den Inhalt und werbliche Inhalte, V.i.S.d.P.**

Dr. Ulrich Marsch

**Fotografen**

Kurt Bauer, Juli Eberle, Astrid Eckert, Magdalena Jooss

**Redaktionssitz**

Technische Universität München,  
 Corporate Communications Center,  
 80290 Munich

**Webseite**

[www.tum.de](http://www.tum.de)

**E-Mail**

[faszination-forschung@zv.tum.de](mailto:faszination-forschung@zv.tum.de)

**Druck**

Druckerei Joh. Walch GmbH & Co. KG, Augsburg

**Auflage**

58,800

**ISSN: 1865-3022**

**Erscheinungszeitraum**

Zweimal im Jahr

**Redaktionsschluss dieser Ausgabe**

27. Mai 2019



---

## Let's write the future.

Mit Robotern, die Hand in Hand mit uns arbeiten.

ABB macht Industrieunternehmen fit für die Produktivität von morgen – durch innovative Automatisierungslösungen, die mit der Digitalplattform ABB Ability™ verknüpft sind. Kollaborative Roboter, vernetzte Fabriken und hochmoderne autonome Systeme verbessern unsere Zusammenarbeit – heute und in Zukunft. Let's write the future. Together. [abb.com](http://abb.com)





Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie  
Technische Universität München

**TUM**

# Ready for Take Off

[www.lrg.tum.de](http://www.lrg.tum.de)

**MUC → LRG**