

ISSN 1653022  
9 771865 1502004

Schutz-  
gebühr  
9,- Euro

Das Wissenschaftsmagazin

Ausgabe 7 | Dezember 2010

Technische Universität München

TUM

# Faszination Forschung



## Wie man ins Innere der Erde schaut

**Pflanzen im Stress:** Hohe Erträge trotz widriger Umweltbedingungen

**CoTeSys:** Ein Sinnesorgan für Roboter-U-Boot Snookie

**Simulation im OP:** 3-D-Innovationen für die Plastische Chirurgie



## Sind alternative Energien die einzige Alternative?



QR-Code mit  
dem Handy  
scannen und  
mehr über unser  
Umweltportfolio  
erfahren.

**Mit unserem Umweltportfolio sorgen wir für weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Energieerzeugung, -übertragung und -verbrauch.**

Ob in der Nutzung erneuerbarer Energien, in hocheffizienten Kraftwerken, beim verlustarmen Transport von Strom über weite Strecken oder in der energetischen Sanierung von Gebäuden: Mit dem größten Umweltportfolio der Welt helfen wir, Kosten und Emissionen zu senken. So haben unsere Kunden im Jahr 2009 insgesamt 210 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart.

[siemens.com/answers](http://siemens.com/answers)

**SIEMENS**

Liebe Leserinnen und Leser,

*Technische Errungenschaften sind so stark in unser tägliches Leben vorgedrungen, dass viele Menschen „dahinterschauen“ wollen. Sie wollen das zugrunde liegende Funktionsprinzip verstehen und sie wollen wissen, wie gut sie sich auf die neuen Technologien verlassen können. Die meisten Menschen können mit der Komplexität moderner Technik nicht mithalten, was gewiss zur vielfach anzutreffenden Technikskepsis in unserer Gesellschaft beiträgt. Umso mehr sind wir als Spitzenuniversität in der Pflicht, komplizierte Wissenschaft für ein breites Publikum verständlich zu machen.*



Mit Faszination Forschung gewähren wir Einblicke in die Labors und Denkstuben unserer kreativsten Wissenschaftler. Zum Beispiel bei Reiner Rummel, einem maßgeblichen Initiator der Satelliten-Mission GOCE. Zusammen mit seinem Lehrstuhlnachfolger Roland Pail und dessen Team wertet er nun die Daten aus, die ein hochpräzises Bild vom Schwerfeld der Erde zeichnen. Damit lassen sich auch die Ozeanströmungen viel genauer berechnen, die weitreichenden Einfluss auf unser Klima haben. Die Auswirkungen des Klimawandels geben der Forschung der Weihenstephaner Botaniker Anstoß. Sie wollen Nutzpflanzen züchten, die der Trockenheit trotzen und reichlich Ertrag bringen. Besondere Fähigkeiten hat auch das U-Boot Snookie des Exzellenzclusters CoTeSys. Der Roboter kann sich ohne Sicht unter Wasser orientieren. Seine Sensorik ist dem Seitenlinienorgan von Fischen nachempfunden.

Mediziner unseres Klinikums rechts der Isar bringen technische Verfahren aus der industriellen Anwendung in den OP. Sie setzen die Finite-Elemente-Methode (FEM) ein, um in der Plastischen Chirurgie Belastungen auf Knochen und Gewebe zu berechnen und so passgenaue Prothesen für jeden Patienten anfertigen zu können.

Nicht weniger als das „Leben berechnen“ wollen die Bioinformatiker um Burkhard Rost. Sie entwickeln neue Methoden, die helfen, die Struktur und Funktion von Proteinen vorherzusagen. Momentaufnahmen vom Innenleben der Atome will Reinhard Kienberger, einer der Begründer der Attosekunden-Physik, bekommen. Die Wissenschaft erhofft sich hieraus Erkenntnisse über den tatsächlichen Ablauf chemischer Reaktionen, das Verhalten von Elektronen in Festkörpern oder die Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie.

Und nicht zuletzt porträtiert Faszination Forschung auch diesmal wieder einen Fellow des Institute for Advanced Study (TUM-IAS). Der Komplexitätsforscher und Erfinder des Memristor Leon Chua diskutiert mit Patrick Dewilde und Klaus Mainzer über den Nutzen von Modellen und künstliche Intelligenz.

Viel Vergnügen und Faszination beim Lesen wünscht Ihnen

W

Wolfgang A. Herrmann

Prof. Wolfgang A. Herrmann  
Präsident

In dieser Ausgabe

Seite 6

## Pflanzen im Stress

Seite 68

## Für Muster schwärmen

Physiker beobachten Schwärme, um Fragen zum Verständnis komplexer Systeme aufzuklären

Seite 28

## Leben berechnen

Seite 36

## Wie man ins Innere der Erde schaut

Satellit GOCE vermisst das Schwerefeld der Erde mit bisher nicht erreichter Präzision

### Titelgeschichten

#### Pflanzen im Stress

Wie Nutzpflanzen der Trockenheit trotzen . . . . . 6

#### Wie man ins Innere der Erde schaut

Satellit GOCE vermisst das Schwerefeld . . . . . 36

#### 3-D-Simulation im OP

TUM-Mediziner entwickeln neue Verfahren . . . . . 58

#### Ein Sinnesorgan für Snookie

Roboter-U-Boot manövriert auch ohne Sicht . . . . . 70

### Forschung und Technik

#### Kurz, kürzer, atto

Physiker gewinnen neue Einblicke in die Materie . . . 16

#### Leben berechnen

Forscher entschlüsseln die Funktion von Proteinen . . . . . 28

#### Hochauflösende Nano-Computertomografie

Dreidimensionale Darstellung der Knochenstruktur. . . . . 34

#### Hart am Wind

Sensoren melden Schäden an Rotorblättern. . . . . 48

#### Für Muster schwärmen

Physiker untersuchen Bewegungsmuster von Schwärmen . . . . . 68

Fotos/Grafiken Reihe oben: Eckert/Heddergott, TUM; Eckert/Heddergott, TUM; edlundsepp; Fotos/Grafiken Reihe unten: TUM; ESA; Naeser



Seite 50

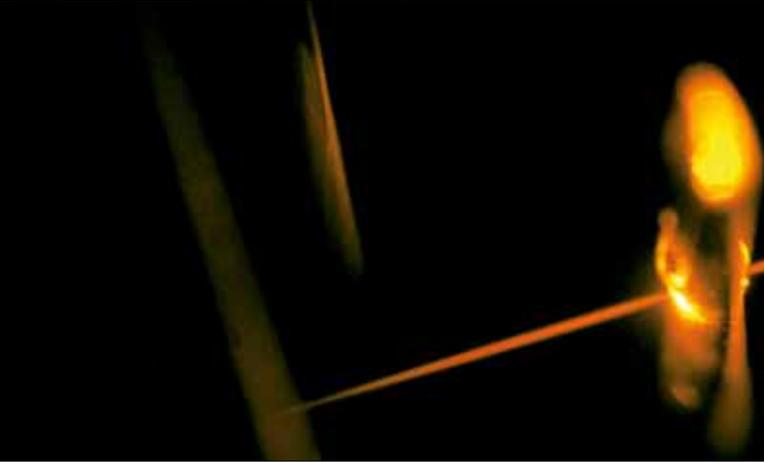
„Unser Gehirn besteht aus Memristoren“



In dieser Ausgabe

Seite 58

3-D-Simulation im OP



Seite 16

Kurz, kürzer, atto

**Elektronen unter Beobachtung:** Mit extrem kurzen Laser-Attosekundenpulsen will TUM-Physiker Reinhard Kienberger mehr über das Verhalten von Elektronen, den Motoren unseres Lebens, herausfinden

## Rubriken

Editorial .....	3
<b>Interview mit Leon Chua</b>	
„Unser Gehirn besteht aus Memristoren“ .....	50
<b>Autoren</b> .....	76
<b>Impressum</b> .....	76
<b>Standpunkt: Dr. Stefan Marcinowski</b>	
Sind wir schon zu satt? .....	78

## Weise Worte der Wissenschaft

### Lyndon B. Johnson (1908 – 1973)

*Unsere gewaltigen Investitionen in Wissenschaft und Forschung sind Ausdruck unseres Glaubens, dass die Wissenschaften den Menschen nicht nur reicher, sondern auch besser machen können.*

### Justus von Liebig (1803 – 1873)

*Die Wissenschaft fängt eigentlich erst da an interessant zu werden, wo sie aufhört.*

### George Bernard Shaw (1856 – 1950)

*Der vernünftige Mensch passt sich der Welt an. Der unvernünftige Mensch besteht darauf, dass sich die Welt nach ihm zu richten hat. Deshalb hängt jeder Fortschritt von dem unvernünftigen Menschen ab.*

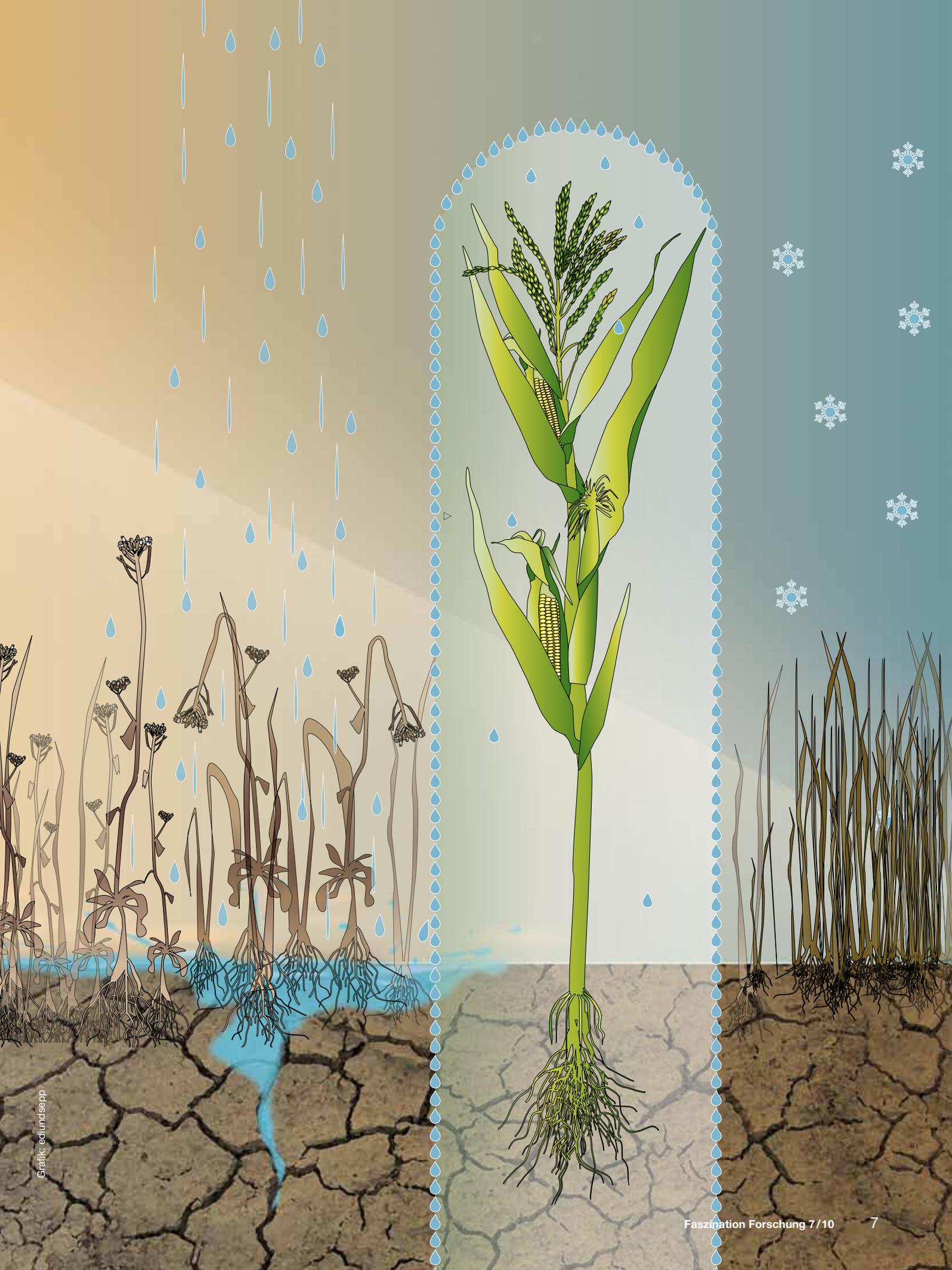
Link

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

# Pflanzen im Stress

**Trockenheit, Kälte, Überschwemmungen: Pflanzen sind vielen Stressoren ausgesetzt. Forscher der TUM untersuchen die Reaktionen von Pflanzen auf Stress. Sie helfen, Nutzpflanzen zu züchten, die auch unter widrigen Bedingungen hohen Ertrag bringen**





**Grundlagenforschung unter standardisierten Bedingungen:** In einer Vegetationskammer wachsen die Versuchspflanzen in kontrolliertem Klima



**D**as Klima verändert sich. Viele Regionen leiden zunehmend unter Hitze und Trockenheit – mit gravierenden Folgen für die Landwirtschaft. In aller Welt arbeiten Forscher daran, Pflanzen an die veränderten Bedingungen anzupassen, um die Versorgung des Menschen mit Nahrungsmitteln zu sichern. Wissenschaftler der TU München haben jetzt Rezeptorproteine identifiziert, die eine zentrale Bedeutung für die pflanzliche Reaktion auf abiotische Stressfaktoren haben.

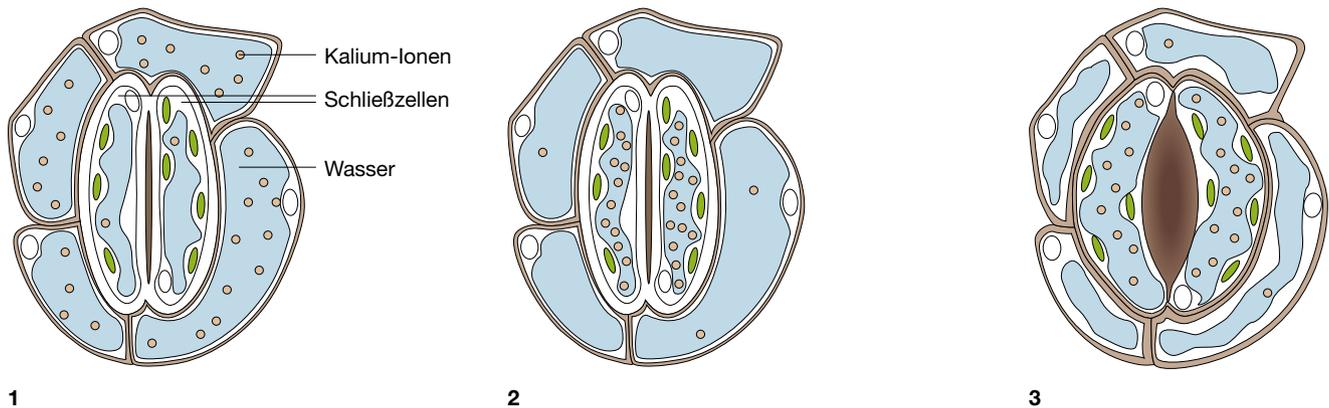
Hitze, Trockenheit, Wassermangel – solche Bedingungen bedeuten für die meisten Pflanzen Stress. Solange die widrigen Verhältnisse nur ein paar Tage lang anhalten, ist das kein Problem. Die Pflanzen können ihren Stoffwechsel auf „Wassersparmodus“ umstellen

und sich vor Schäden schützen. Dabei spielt das Phytohormon Abscisinsäure (ABA) eine wichtige Rolle. Diesen endogenen Botenstoff bilden Pflanzen auch unter normalen Bedingungen ständig in geringer Menge vor allem in Zellen nahe den Leitgefäßen, die Wasser und Nährstoffe transportieren. Über diese Gefäße wird das Hormon in der Pflanze verteilt und sorgt für ein geregeltes Wachstum.

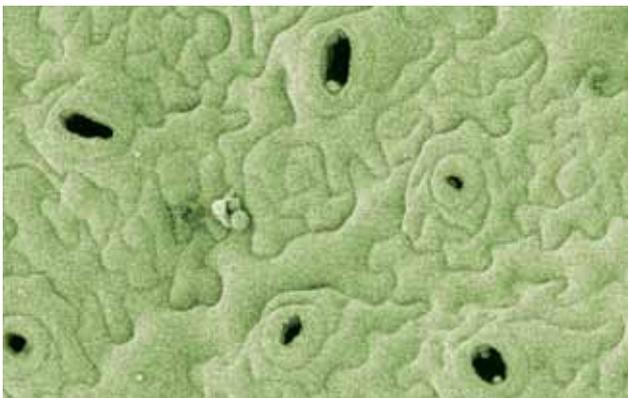
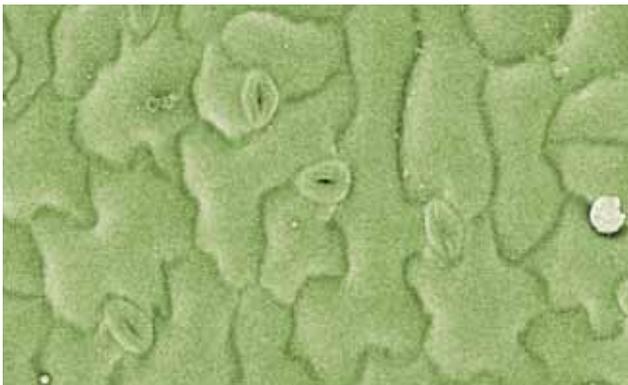
### **Forscher erkunden Signalwege**

In Stresssituationen aber steigt die Produktion von ABA stark an. Besonders angekurbelt wird sie dann in den Schließzellen, bohnenförmigen Zellen, die jeweils zu zweit eine winzige Pore umschließen, die Spaltöffnung (Stoma). Diese Stomata in der Oberfläche der ▶

**Dr. Alexander Christmann** ist einer von vielen Forschern weltweit, die wissen möchten, wie sich Pflanzen gegen Trockenstress schützen können



**Zwei Schließzellen mit den umliegenden Epidermiszellen** bilden einen sogenannten Spaltöffnungsapparat (1). Sie befinden sich in großer Zahl meist ausschließlich an der Unterseite eines Blattes. Wenn Licht auf das Blatt trifft, steigt die Fotosyntheserate. Bei der Fotosynthese wird Kohlendioxid in Wasser und Sauerstoff umgewandelt. Diese Gase können durch die Spaltöffnungen diffundieren. Dafür müssen die Schließzellen jedoch erst einen Spalt bilden: Dazu werden Kalium-Ionen in die Schließzellen transportiert (2). Wasser aus der Epidermis strömt wegen des entstandenen osmotischen Drucks nach, die Schließzellen dehnen sich aus und der Spalt öffnet sich (3). Bei Wasserdefizit produziert die Pflanze in verstärktem Maße Abscisinsäure, die einen Kalium-Ausstrom verursacht. Das verringert den osmotischen Druck, die Schließzellen erschlaffen und werden von den Epidermiszellen zusammengedrückt – der Spalt wird geschlossen



**Der Spaltöffnungsapparat** befindet sich meist an der Unterseite eines Blattes. Unter dem Mikroskop erkennt man geöffnete und geschlossene Schließzellen

oberirdischen Pflanzenteile – oft mehrere Hundert pro Quadratmillimeter – dienen dem Gasaustausch ( $\text{CO}_2$ -Aufnahme,  $\text{O}_2$ -Abgabe) und der Transpiration. Bei Wasserknappheit schließen sie sich, indem die Schließzellen erschlaffen und von benachbarten Zellen zusammengedrückt werden. An diesem Prozess ist die Abscisinsäure maßgeblich beteiligt. „Bei Trockenheit gibt ein bisher unbekannter Sensor ein Signal, das die Enzyme für die ABA-Bildung aktiviert“, erklärt Dr. Alexander Christmann vom Lehrstuhl für Botanik am TUM-Wissenschaftszentrum Weihenstephan. „Die für die ABA-Bildung verantwortlichen Gene werden vermehrt exprimiert, der ABA-Level steigt auf etwa das 50-Fache an. Das ist die Voraussetzung dafür, dass die physiologischen Anpassungsreaktionen starten können.“

Eine Erhöhung des endogenen ABA-Spiegels steht damit am Anfang der Reaktionsabläufe, mit denen Pflanzen auf Hitze, Trockenheit oder eine erhöhte Salzkonzentration des Bodens antworten. Als Nächstes stellen sie ihren gesamten Stoffwechsel drastisch um; weit mehr als 1000 Gene sind daran beteiligt, schätzt Christmann. Diese Prozesse führen – aus wissenschaftlich-analytischer Perspektive – zu recht unübersichtlichen Verhältnissen. Diverse Signalwege werden parallel aktiviert, beeinflussen sich gegenseitig und sind daher nur mühsam zu verfolgen. Darum ließen sich diejenigen Reaktionen, die letztlich zur ABA-Wirkung führen, bisher nicht klar erkennen. Den TUM-Botanikern ist ▷

**In den Plexiglasröhren**, die jede einzelne Versuchspflanze umfassen, sammeln sich die Samen, die die Wissenschaftler mit dieser Methode Pflanze für Pflanze entnehmen können

### Isotherme Titrationskalorimetrie

Mithilfe der Kalorimetrie lassen sich die thermischen Eigenschaften biologisch relevanter Moleküle untersuchen. Speziell für die thermische Analyse von Bindungsprozessen dient die isotherme Titrationskalorimetrie (ITC). Treten zwei Komponenten in Wechselwirkung, wird entweder Wärme abgegeben oder absorbiert. Bei einer ITC-Messung wird zu einem Reaktionspartner in der Messzelle der andere Partner schrittweise zugegeben (titriert). Die dabei abgegebene oder absorbierte Wärmemenge steht in direktem Verhältnis zu neu entstandenen Bindungen zwischen den Partnern.

es geglückt, Licht in das Dunkel zu bringen: Sie haben die Rezeptoren identifiziert, an die ABA bindet. Im Prinzip war bekannt, wie die Abscisinsäure den Verschluss der Spaltöffnungen herbeiführt: Zum Erschlaffen der Schließzellen kommt es, weil sich in den äußeren Zellmembranen Ionenkanäle öffnen und zunächst Anionen, anschließend dann in größerem Umfang Kationen ausgeschleust werden. Als passive Reaktion wird Wasser mitgezogen – die Schließzellen schrumpfen. Verantwortlich für das Öffnen der Ionenkanäle sind Kinasen, die normalerweise inaktiv sind, weil sie von bestimmten Phosphatasen blockiert werden. Wenn, etwa bei Trockenstress, der Abscisinsäurespiegel ansteigt, wird ABA durch Rezeptorproteine erkannt, die sich dann mit den Phosphatasen zu Komplexen verbinden. Die Phosphatasen verlieren damit ihren Kinasen-hemmenden Effekt. Die nun aktivierten Kinasen bewirken das Öffnen der Ionenkanäle.

Die TUM-Botaniker haben in ihren von der DFG und der EU mit insgesamt 475.000 Euro geförderten Studien eines der Rezeptorproteine, an das ABA bindet, als Interaktionspartner der Phosphatasen gefunden bzw.

in seiner Funktion erkannt: RCAR1, Regulatory Component of the ABA-Receptor 1. Den Erfolg teilen sie mit kalifornischen Kollegen, die ein nahe verwandtes Rezeptorprotein gleichzeitig entschlüsselten, ihm aber einen anderen Namen gaben: PYR1. Damit haben die beiden Arbeitsgruppen die Voraussetzung geschaffen, den ABA-Signalweg vollständig aufzuklären. Wenn das gelingt, stehen die Chancen gut, Nutzpflanzen wie Getreide so „aufzurüsten“, dass sie schwierigere Bedingungen tolerieren und dennoch gute Erträge erbringen. Wie so oft in der Wissenschaft, kam der Erfolg auf einem Umweg. Eigentlich waren die Weihenstephaner Botaniker auf der Suche nach Interaktionspartnern der Phosphatasen, mit denen sie seit Langem arbeiten. In Hefezellen entdeckten sie mehrere interessante Moleküle, darunter auch zwei Proteine, die als geeignete Partner erschienen. Diese Proteine ließen sie in Bakterienkulturen exprimieren, isolierten sie und mischten sie mit Phosphatasen. Nach Zugabe von ABA zeigte sich, dass besonders einer der beiden Komplexe aus Protein und Phosphatase eine starke Bindung mit ABA einging. Zum Nachweis dieser Interaktion diente eine elegante Methode: die isotherme Titrationskalorimetrie (siehe Kasten). Sie misst winzigste Temperaturveränderungen, die auftreten, wenn Moleküle miteinander reagieren. Die notwendige Ausstattung und entsprechende Expertise lieferten TUM-Kollegen vom Forschungscampus Garching: Am dortigen Lehrstuhl für Biochemie gehört das Verfahren zur Routine.

### Pflanzen mit hoher Stresstoleranz züchten

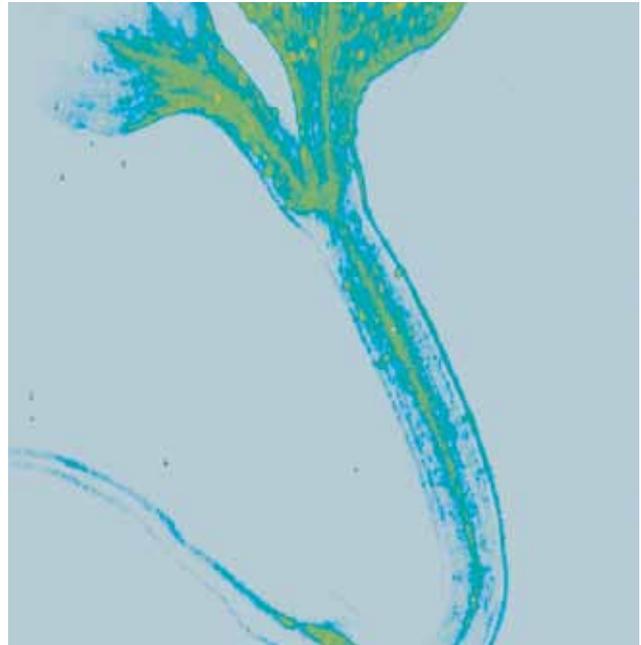
Eine Datenbankrecherche ergab, dass die beiden getesteten RCAR-Proteine zu einer Familie von 14 Mitgliedern aus sehr ähnlich strukturierten ABA-Bindungsproteinen gehören. Als Reaktionspartner kommen neun Phosphata-

**Im Labor des Lehrstuhls für Botanik in Weihenstephan** werden ausgewählte genetische Eigenschaften verschiedener Linien durch Kreuzung zusammengeführt. Die Freilegung des Fruchtknotens aus den winzigen, noch geschlossenen Blütenknospen der Ackerschmalwand



sen infrage. Deshalb wollen die Forscher weitersuchen – vielleicht finden sie ja eine noch günstigere Kombination, einen Komplex aus RCAR-Protein und Phosphatase mit besonders starker Affinität für ABA, der deshalb schon auf geringe Konzentrationen des Hormons reagiert. Dann kann man gezielt solche Pflanzen aufspüren, die mit dieser Kombination in ihren Blättern ausgestattet sind, ihre Spaltöffnungen also frühzeitig schließen, damit weniger Wasser verlieren und Trockenheit besser vertragen. Geeignete Pflanzen lassen sich dann züchterisch weiterentwickeln. „Es geht nicht unbedingt darum, transgene Pflanzen zu generieren“, betont Christmann. „Sondern wir wollen auch die in der Natur in Form zahlreicher und unterschiedlich stressresistenter Ökotypen vorhandene Vielfalt nutzen.“

Versuchspflanze am TUM-Lehrstuhl ist, wie üblich in Botanik und Pflanzengenetik, die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*). Sie ist in unzähligen Varietäten fast auf der ganzen Welt zu Hause, angepasst an ganz unterschiedliche Bedingungen. In dem riesigen Genpool muss „nur“ der richtige Genotyp gefunden und gezielt mit züchterischen Methoden weiter optimiert werden, der von Natur aus besonders empfindlich auf ABA reagiert. Da die Proteinausstattung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen auf sehr ähnliche Abläufe und Signalwege schließen lässt, stehen die Chancen gut, dass an Arabidopsis gefundene Erkenntnisse sich etwa auf Getreide übertragen lassen. Deshalb wollen die TUM-Wissenschaftler in Zukunft mit Pflanzenzüchtern kooperieren. Die Grundlagenforschung aber findet im Institut statt. Dort im Keller wächst, blüht und fruchtet die Ackerschmalwand unter standardisierten Bedingungen. Die Vegetationskammern mit Pflanzen in allen Entwicklungsstadien sind 16 Stunden am Tag beleuchtet, die Temperatur beträgt tagsüber 22 °C und wird nachts auf



**Forscher der TUM machen die Aktivität des Stresshormons Abscisinsäure sichtbar:** Gestresste, transgene Reporterpflanzen (hier ein Keimling der Ackerschmalwand) zeigen das Muster der Hormontätigkeit durch Bildung des Glühwürmchen-Enzyms Luciferase an. Eine lokale Anhäufung des Hormons macht sich als starkes Leuchten bemerkbar

16 °C gesenkt. Altpflanzen, rund 40 bis 50 cm hoch, stecken jeweils in einer oben offenen Röhre aus Plexiglas, deren unterer Rand den Stängel umfasst. Dort sammeln sich die feinen Samen und können Pflanze für Pflanze entnommen werden. Einzelne Blätter junger Pflanzen sind an eine an der Universität Würzburg entwickelte Messapparatur angeschlossen, die den ▶

Bild: TUM

erfordert eine ruhige Hand (Bilder 1 – 3). Schließlich wird der Pollen einer Spenderpflanze auf die Narbe des Fruchtknotens aufgetragen (Bild 4) und zwei bis drei Wochen später können Samen mit einer neuen Genkombination für weitere Untersuchungen geerntet werden



Fotos: Eckert/Heddergott, TUM

Wissenschaftler messen die **Wasserversorgung** eines Blattes mithilfe eines an der Universität Würzburg entwickelten Drucksensors. Gut mit Wasser versorgte Blätter besitzen einen hohen Innendruck (Turgor), ein Absinken des Druckes zeigt Wassermangel an



Foto: Eckert/Heddegott, TUM

hydrostatischen Druck im Blattgewebe bestimmt. Die Werte geben Aufschluss über die Wasserversorgung des Blattes und indirekt auch Hinweise auf den Öffnungsgrad der Spaltöffnungen. Der lässt sich auch mittels Wärmebildkamera direkt sichtbar machen: Sind die Stomata offen, findet Transpiration statt und die Blattoberfläche bleibt kühl, geschlossene Spaltöffnungen lassen die Temperatur steigen. So können die Wissenschaftler feststellen, wie empfindlich einzelne Pflanzen auf Trockenstress reagieren: Wann schließen sie, einem Stressor ausgesetzt, ihre Spaltöffnungen? Reagiert ein Exemplar frühzeitig, könnte es ein Kandidat sein für das Herauszüchten trockenresistenter Pflanzen.

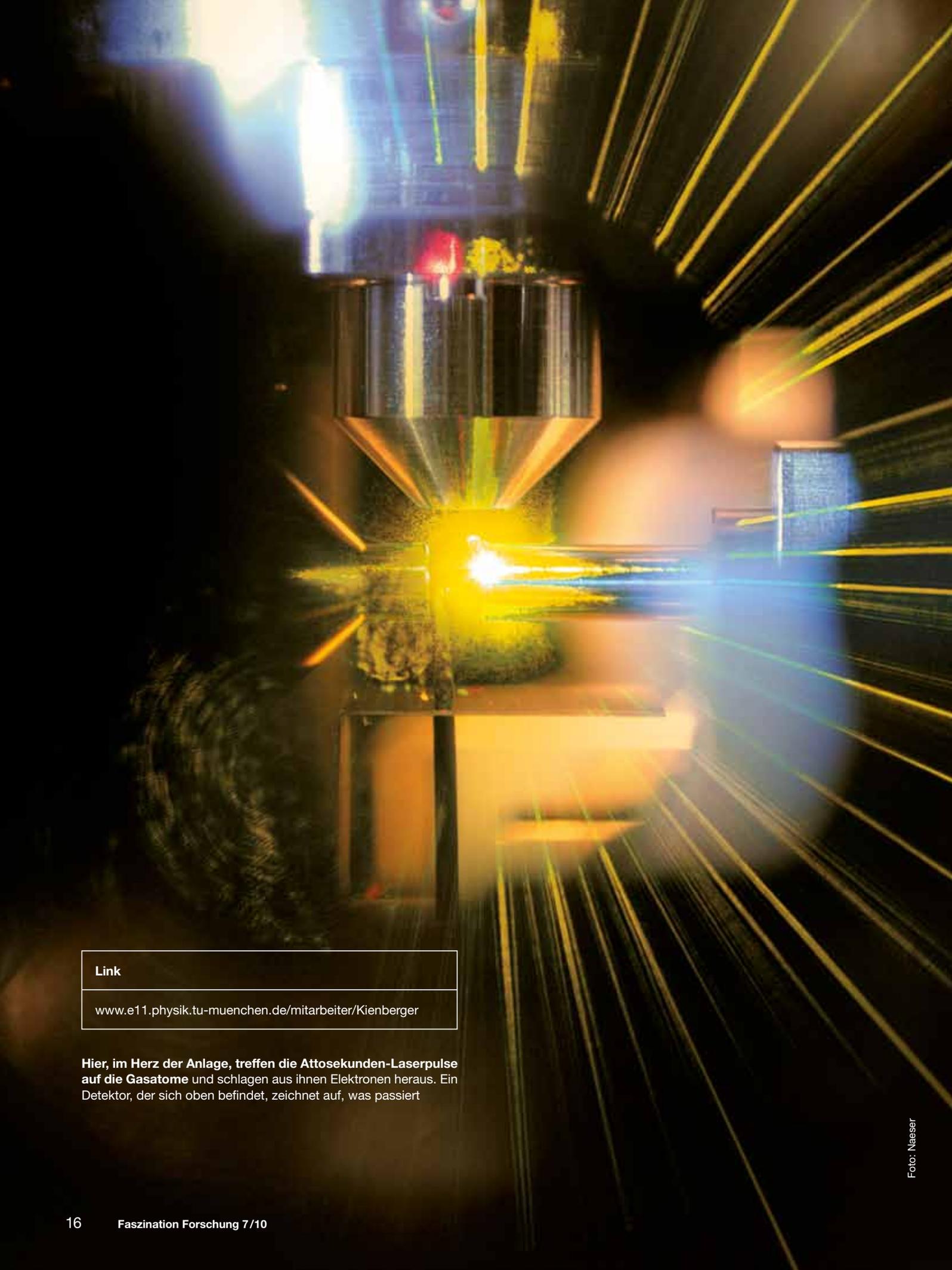
### Glühwürmchengen lässt Pflanzen leuchten

Weitere Arbeiten widmen sich dem konkreten Mechanismus, über den die Pflanzenzellen das Signal der Trockenheit in eine gesteigerte ABA-Produktion übersetzen. Ein von den Wurzeln wahrgenommener Wassermangel wird in einer sehr schnellen Reaktion als hydraulisches Signal an alle Teile der Pflanzen gemeldet, die daraufhin sofort die Biosynthese von ABA ankurbeln. Doch was geschieht zwischen dem hydraulischen Signal und der ABA-Wirkung, welche biochemischen Prozesse laufen ab? Um Antworten auf solche Fragen zu finden, fahnden die Forscher in einer Vielzahl selbst produzierter Mutanten der Ackerschmalwand nach solchen Individuen, die auf das Stresssignal hin besonders viel ABA produzieren. Pfiffig die Art, wie sie das testen: Sie bauen den

Pflanzen das Gen ein, das Glühwürmchen zum Leuchten bringt, plus eine Promotorsequenz, die durch ABA aktiviert wird. Je mehr ABA eine Pflanze bildet bzw. je empfindlicher sie auf ABA reagiert, desto heller erstrahlt sie. Manche Pflanzen bringen es auf ein rund zehnfach so helles Leuchten wie normale Exemplare. An solchen Reporterpflanzen wollen die Wissenschaftler herausfinden, welche Mutation in welchem Gen dieses Phänomen bedingt.

Ihre für die landwirtschaftliche Praxis relevante Grundlagenforschung hat die Botaniker aus Weihenstephan auch in den neu eingerichteten bayerischen Forschungsverbund FORPLANTA gebracht, der im August 2010 seine Arbeit unter dem Motto „Pflanzen fit für die Zukunft“ begonnen hat. Zunächst drei Jahre lang fördert das bayerische Wissenschaftsministerium die Studien zur Stressresistenz von Pflanzen mit insgesamt 1,5 Millionen Euro. Beteiligt sind neben der TUM die Universität Erlangen-Nürnberg, die LMU München, die Universität Würzburg und die Hochschule für Philosophie München. Die naturwissenschaftlichen Projekte untersuchen die Anpassungsfähigkeit von Pflanzen an insbesondere durch den Klimawandel hervorgerufene Stressoren. Langfristiges Ziel ist es, Nutzpflanzen durch gezielte Veränderung zu ertüchtigen und so ihren Ertrag unter veränderten Klimabedingungen zu sichern und zu steigern. Ein begleitendes geisteswissenschaftliches Projekt analysiert die kulturell-ethischen Aspekte der Debatte um die Grüne Gentechnik. Sibylle Kettembeil

Ertragsverlust durch biotischen (z. B. Schädlinge oder Unkrautbewuchs) und abiotischen Stress (z. B. Trockenheit, Hitze oder Kälte)						
Rekordernte (kg/ha)	19300	14500	7390	11400	94100	121000
Mittlere Ernte (kg/ha)	4600	1800	1610	2050	28300	42600
Mittlerer Verlust (biotisch)	1950	730	666	765	17775	17100
Mittlerer Verlust (abiotisch)	12700	11900	5120	8590	50900	61300
Abiotisch (% Rekordernte)	65,8	82,1	69,3	75,4	54,1	50,7



Link

[www.e11.physik.tu-muenchen.de/mitarbeiter/Kienberger](http://www.e11.physik.tu-muenchen.de/mitarbeiter/Kienberger)

Hier, im Herz der Anlage, treffen die Attosekunden-Laserpulse auf die Gasatome und schlagen aus ihnen Elektronen heraus. Ein Detektor, der sich oben befindet, zeichnet auf, was passiert

Foto: Naesser

# Kurz, kürzer, atto

Es ist nicht die Jagd nach Rekorden, die Reinhard Kienberger antreibt, immer kürzere Laserimpulse zu entwickeln, sondern die Notwendigkeit, besondere physikalische Instrumente zu erschaffen. Mit ihnen will er neue Erkenntnisse über die Materie gewinnen

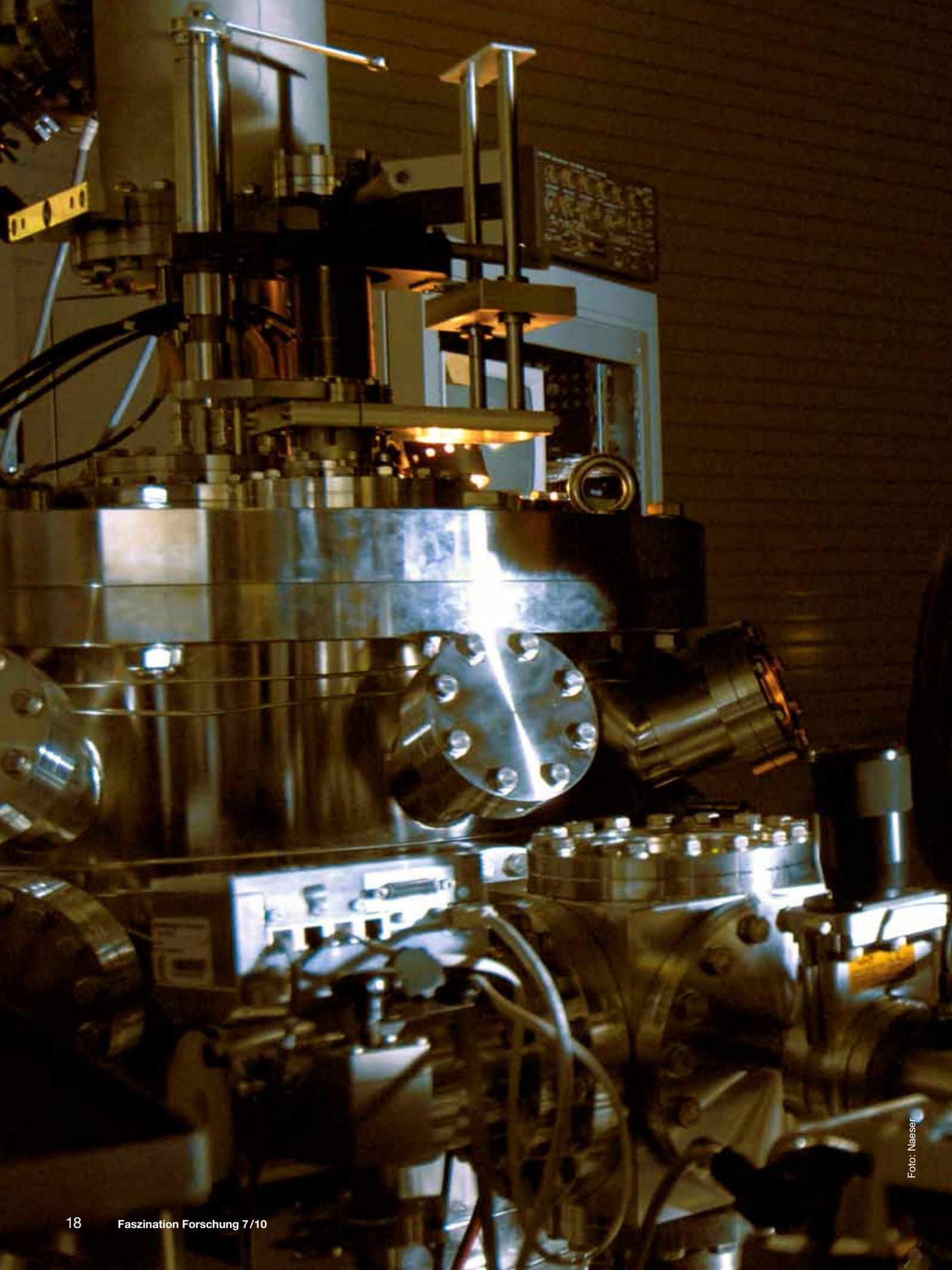
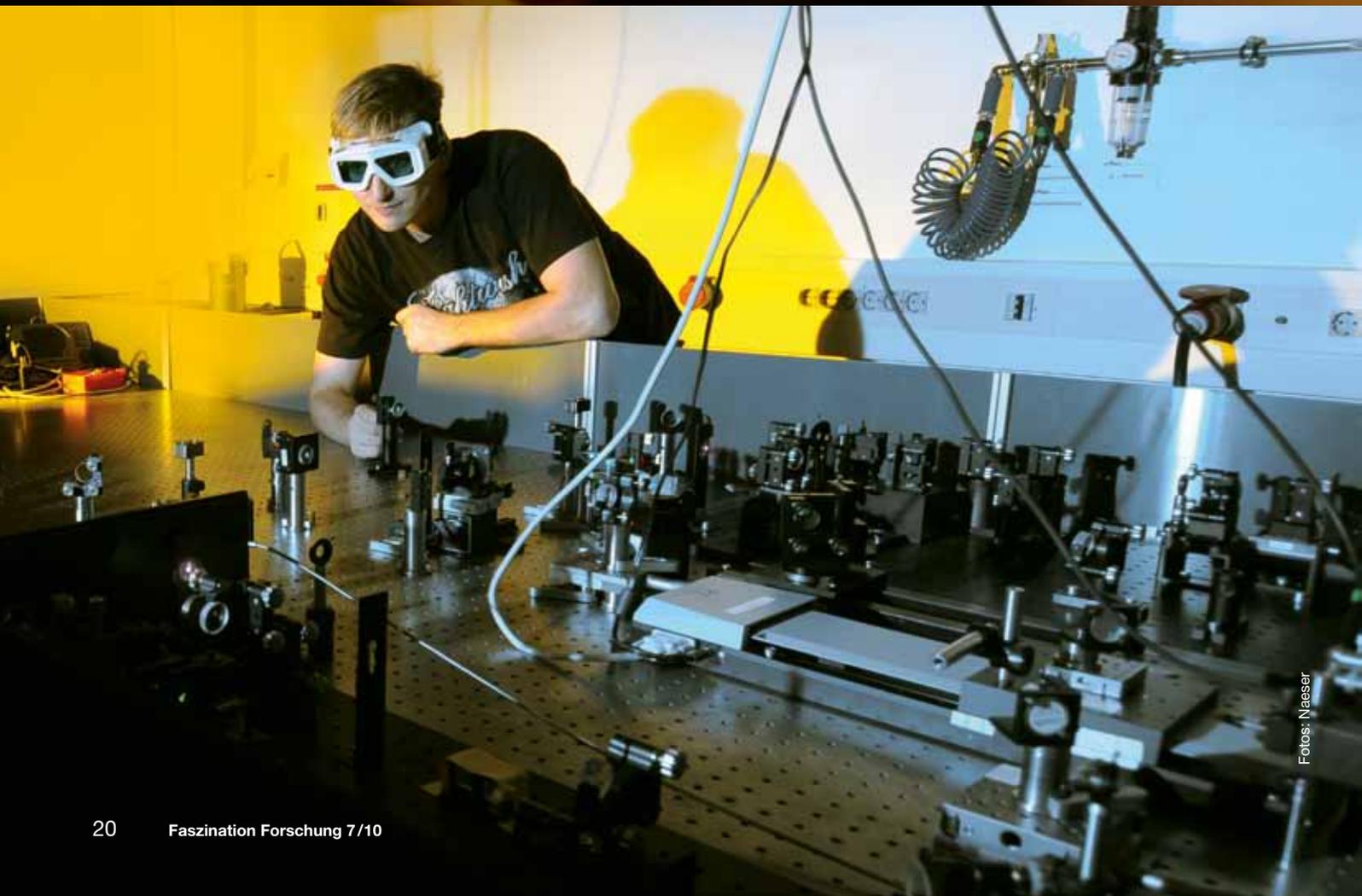


Foto: Naeser

**Reinhard Kienberger**, hier neben der Vakuumkammer der Experimentieranlage, gibt seine jahrelangen Erfahrungen an seine Mitarbeiter weiter, berät sie und hilft, wenn Probleme auftauchen





**Oben: Ein gasgefülltes Röhrchen ist der Ursprung** für die Röntgenstrahlen, aus denen man den Attosekundenpuls formt: Der Laser bohrt ein kleines Loch hinein und trifft auf die Gaselektronen

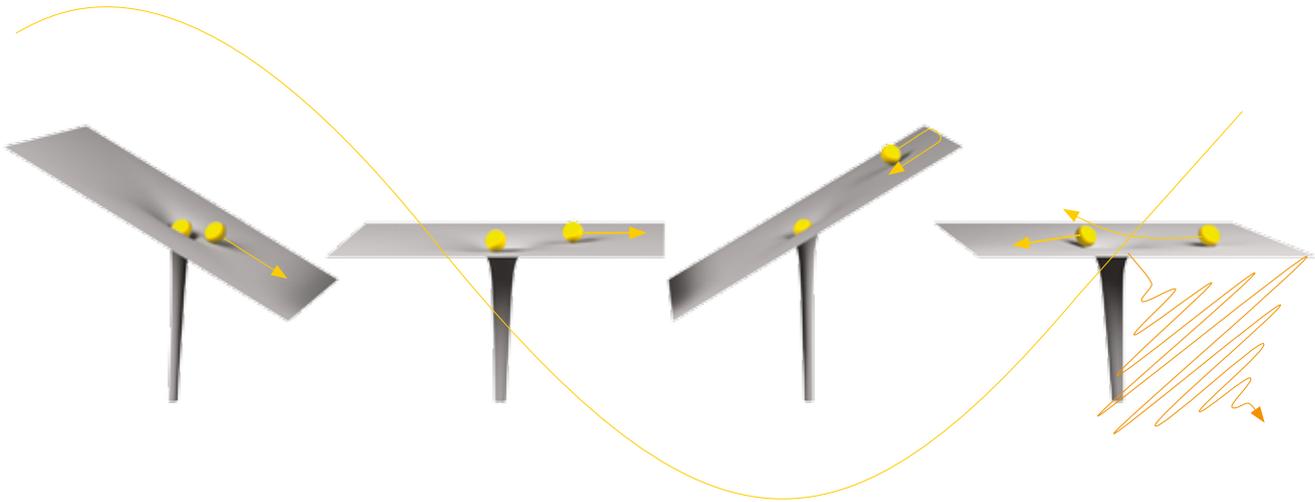
**Unten: In den frisch renovierten Laborräumen an der TUM** entstehen die neuen Experimente der Kienberger-Gruppe. Hier ist Doktorand Peter Lang dabei, Komponenten des Laserstrahls zu justieren

**E**lektronen sind der Motor unserer Welt. Nur wenn die winzigen, elektrisch geladenen Teilchen in Atomen und Molekülen den richtigen Platz einnehmen, wenn sie im passenden Augenblick von einer Zelle zur anderen wandern, Reaktionen anstoßen oder stoppen, funktioniert die Chemie des Lebens. Fließen sie im Überfluss oder fehlen sie am richtigen Ort, entstehen chronische Krankheiten. Aber auch die unbelebte Welt halten sie am Laufen: Sie sorgen dafür, dass es Licht und Wärme gibt, dass Substanzen Strom leiten oder isolieren, dass Informationen fließen. All dies weiß man heute, aber man kennt noch keine Einzelheiten darüber, wie die Partikel sich verhalten: Reagieren sie augenblicklich oder zögern sie, wenn sie angestoßen werden? Nehmen sie immer den direkten Weg oder laufen sie auf Umwegen? Wie schnell durchqueren sie bestimmte Materialien? Hier gibt es noch große weiße Flecken auf der Landkarte des Wissens. Dass man das Verhalten der Elektronen bisher nur ganz grob beobachten konnte, liegt daran, dass die Vorgänge in diesem Bereich unglaublich schnell ablaufen. Es dauert nur einige Attosekunden, also Milliardstel vom Milliardstel einer Sekunde, wenn ein Elektron beispielsweise aus einem Atom herauspringt. Bisher fehlten die

Instrumente, um solch ultrakurze Zeiträume zu untersuchen. Der 39-jährige Physiker Reinhard Kienberger, seit zwei Jahren Professor an der TUM, hat es sich zur Aufgabe gemacht, zu diesem Zweck Laser-Attosekundenpulse zu entwickeln und anzuwenden, und er ist äußerst erfolgreich darin. Nur mit solch extrem kurzen Lichtpulsen kann man in Gasatome oder in einen Festkörper hineinleuchten und die zeitlichen Abläufe im Inneren entschlüsseln.

#### **Extrem kurze Belichtungszeit**

Aus der Fotografie weiß man, dass ein Bild eines bewegten Motivs nur dann scharf wird, wenn die Belichtungszeit deutlich kürzer als die Bewegungsdauer ist. Reicht zur scharfen Abbildung eines fliegenden Tennisballes noch eine Belichtungszeit von knapp einer tausendstel Sekunde ( $10^{-3}$ ), so müssen die Lichtpulse schon eine Billion Mal kürzer sein, um die schnellsten atomaren Bewegungen in Molekülen festzuhalten. Man spricht dann von Femtosekunden ( $10^{-15}$  Sekunden). Noch kürzere Blitze sind nötig, um Prozesse in der Elektronenhülle eines Atoms abzulichten, denn hier sausen die Elektronen noch tausend Mal schneller. Sie wechseln aus einem Energiezustand in einen ande- ▶



**Die Erzeugung hoher Harmonischer**

Das Elektron ist im Atom gefangen in einem elektrischen Potenzialtopf, aus dem es normalerweise nicht entweichen kann. Wird dieser Potenzialtopf durch das eingestrahlte Laserlicht (gelb) stark verbogen, so gelingt es einigen Elektronen, daraus „herauszutunneln“. Sie werden dann im elektrischen Feld des Laserlichts beschleunigt, erst in die eine Richtung und, sobald sich das Feld umkehrt, in die entgegengesetzte. So kehrt das Elektron mit höherer Energie als zuvor zum Atom zurück und fällt wieder in den Potenzialtopf. Die überschüssige Energie gibt es als Röntgenlicht (orange) ab.

Grafik: edlundsepp nach TUM; Foto rechts: Naeser

ren typischerweise in zehn bis tausend Attosekunden ( $10^{-18}$  Sekunden).

Schon bei seiner Doktorarbeit, die der in Graz geborene Forscher an der Technischen Universität Wien angefertigt hat, stieg er in das Gebiet ein. „Bereits in den 90er-Jahren, noch bevor ich mich damit beschäftigte, hat man versucht, Kurzpuls-Laserquellen zu entwickeln“, erinnert sich Kienberger. „Anfang der 90er-Jahre wurde der Prozess der Erzeugung hoher Harmonischer entdeckt. Es handelt sich dabei um eine Methode, wie man mit einem Laser im sichtbaren Licht extrem hochenergetische Photonen, also Lichtteilchen im Röntgenbereich, produzieren kann. Dass man das gleiche Verfahren auch für die Erzeugung extrem kurzer Pulse benutzen kann, erkannte man allerdings erst ein paar Jahre später.“ Hochenergetisch heißt mit anderen Worten: kurze Wellenlänge und hohe Frequenz.

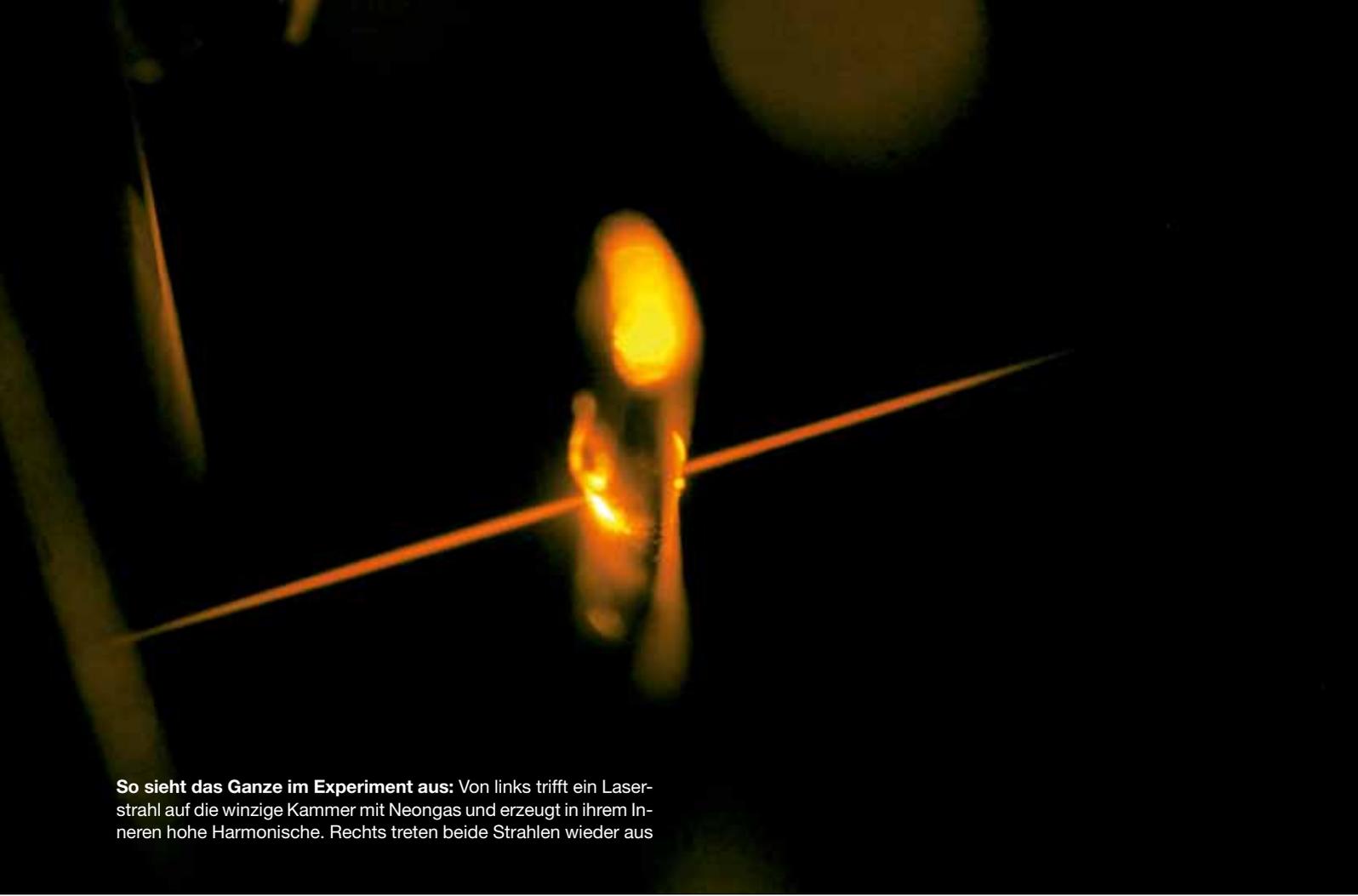
Warum möglichst kurze Wellenlängen nötig sind, hat seinen Grund in folgendem Umstand: Eine elektromagnetische Welle kann nur dann entstehen und sich ausbreiten, wenn mindestens eine Schwingung vorhanden ist. Dies bedeutet aber, dass eine bestimmte Zeit verstreichen muss, bis die Schwingung vollendet ist. Benutzt man beispielsweise Titan-Saphir, eines der

gebräuchlichsten Lasermedien für Kurzpuls-Festkörperlaser im sichtbaren Bereich, so emittiert dieser bei einer Wellenlänge von 750 Nanometern. Daraus ergibt sich eine Schwingungsdauer von 2,5 Femtosekunden. Heute schafft man mit den besten technischen Mitteln Pulse mit einer Dauer von 3,3 Femtosekunden und ist damit ganz knapp an dieser natürlichen Grenze. Will man noch kürzere Pulse erzeugen, benötigt man kürzere Wellenlängen, also Licht im fernen ultravioletten oder gar im Röntgenbereich (siehe Abbildung S. 24).

**Röntgenlaser sind zu groß**

„Das war also nun unsere Aufgabe“, schildert Kienberger das damalige Vorgehen. „Es gibt kein Material, das Röntgenlicht erzeugt, deshalb arbeiten alle Festkörperlaser im Sichtbaren. Überall auf der Welt unternimmt man in der Forschung große Anstrengungen, Röntgenlaser zu bauen, aber die meisten sind riesengroß und für unsere Zwecke deshalb nicht geeignet. Wir wandten eine andere Methode an, um zu Röntgenphotonen zu kommen, nämlich die Erzeugung sogenannter hoher Harmonischer.“

Harmonische Schwingungen bedeuten zum Beispiel bei einer Saite, dass ganzzahlige Vielfache einer



**So sieht das Ganze im Experiment aus:** Von links trifft ein Laserstrahl auf die winzige Kammer mit Neongas und erzeugt in ihrem Inneren hohe Harmonische. Rechts treten beide Strahlen wieder aus

Schwingung angeregt werden. In der Akustik entstehen so die verschiedenen Intervalle der Harmonielehre. In der Optik gibt es diese Harmonischen ebenfalls, so können manche Kristalle etwa rotes Licht in blaues verwandeln. „Hohe Harmonische“ heißt aber, man erzeugt Schwingungen nicht mit der Hälfte oder einem Drittel der Wellenlänge, sondern mit einem Hundertstel oder Tausendstel. Entsprechend viel höher ist dann auch die Energie des dazugehörigen Photons.

Im Experiment läuft das Ganze so ab: Man beschießt ein Edelgas mit Laserlicht. Unter den richtigen Bedingungen gelingt es, mit dem Laser einige Elektronen aus den Gasatomen herauszulösen und sie im elektromagnetischen Feld des Lichtstrahls stark zu beschleunigen, bevor sie wieder zu ihrem Atom zurückkehren. Die bei diesem Vorgang gewonnene Energie strahlen sie am Ende als Röntgenlicht wieder ab, dessen Photonen ein Vielfaches der Photonenenergie des eingestrahlt Lasers besitzen.

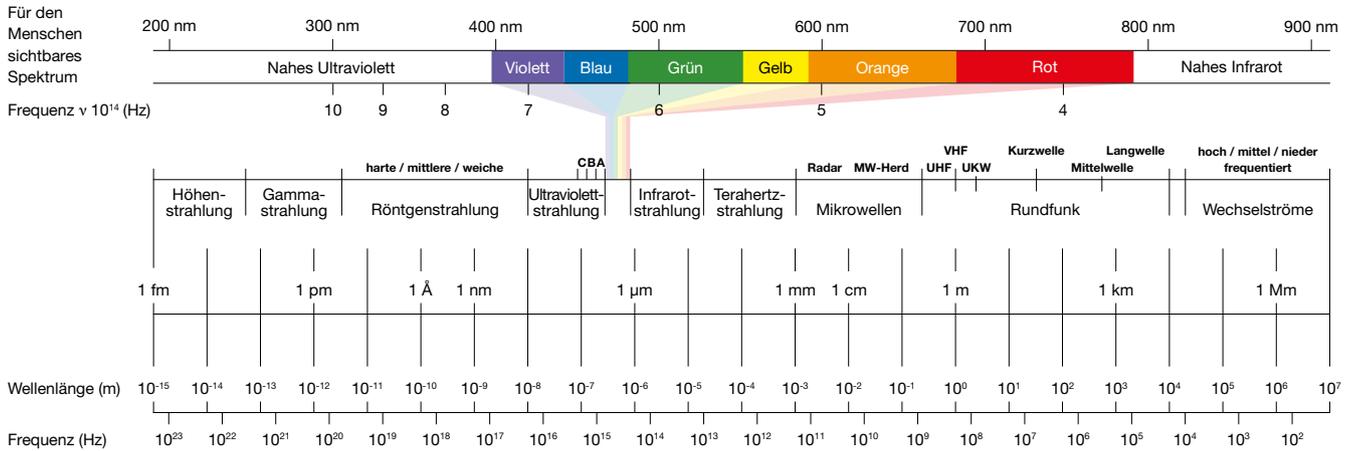
„Dass man damit dieses Verfahren auch dazu benutzen kann, um einzelne Attosekundenpulse zu machen, das haben wir vor neun Jahren geschafft“, sagt Reinhard Kienberger. „Zunächst erzeugten wir damit Impulse im weichen Röntgenbereich. Dann schnitten wir daraus ei-

nen einzelnen – jeweils den mit der höchsten Energie – heraus. Das schafften wir mit einem Spiegel, der in einer deutschen Kollaboration entwickelt wurde. Er reflektiert nur ganz bestimmte Wellenlängen, nämlich genau die, die wir herausschneiden wollten. So erzeugten wir Einzelpulse. Das haben wir als Erste und bisher fast Einzige geschafft, weltweit.“

#### **Hoher Leidensdruck**

Auch wenn sich das im Rückblick ganz einfach anhört, brachten die letzten 15 Jahre Kienberger neben Fortschritten auch Rückschläge und waren angefüllt mit dem typischen Freud und Leid eines Experimentators im Labor. Gleichwohl macht ihm der Beruf großen Spaß. „Glücklicherweise hatte ich noch nie den Fall, dass irgendetwas überhaupt nicht funktioniert hat. Andererseits hat man die wirklich guten Ergebnisse nur dann, wenn der Leidensdruck entsprechend hoch ist. Man steht oft viele Nächte im Labor und misst umsonst. Aber irgendwann funktioniert es plötzlich. Dann geht man auf ein Bier und feiert.“

Die ersten Attosekundenpulse gelangen dem begabten Experimentator noch in Wien, während seiner Doktorarbeit. „Wir lagen damals bei rund 800 Attosekunden.“ ▷



Von der Höhenstrahlung über sichtbares Licht bis hin zu Radiowellen handelt es sich immer um elektromagnetische Strahlung. Der Unterschied liegt in der Wellenlänge bzw. Frequenz. Je energiereicher die Strahlung, desto kürzer ist ihre Wellenlänge. Laser gibt es heute hauptsächlich im Infraroten und im Sichtbaren. Zur Erzeugung von Attosekundenpulsen benötigt man aber Laser im UV- oder Röntgenbereich

Grafik: edlundsepp

Als Postdoc schaffte Kienberger dann 650 Attosekunden, und jetzt liegt seine Gruppe bei 80: Das ist Weltrekord. Manchmal gingen die Fortschritte langsam voran, manchmal gab es aber auch Riesenschritte. „Man hat eine Idee, ändert etwas im Aufbau, und so erzielt man Verbesserungen. So haben wir es beispielsweise geschafft, durch experimentelle Modifikationen auf einen Schlag von 250 auf 80 Attosekunden runterzukommen. Manchmal sind das Änderungen, die ganz am Anfang der Kette stattfinden und sich bis zum Ende auswirken.“

**Maßgeschneiderte Teile**

So etwas läuft nicht von allein, darüber vergehen Monate. „Man muss erst einmal darauf kommen, wo der Grund für eine Einschränkung liegt, dann braucht man eine Idee für die Lösung, anschließend muss man die entsprechenden Teile bestellen oder maßschneidern lassen und sie einbauen“, beschreibt der Physiker, der inzwischen natürlich längst nicht mehr ständig im Labor steht, den Forscheralltag. „Und es funktioniert ja nie etwas beim ersten Mal. Dann überlegt man: Was hat man falsch gemacht, was kann man besser machen? Beim zweiten oder dritten Versuch funktioniert es dann viel-

leicht. Aber so gewinnt man viel Erfahrung.“ So kompliziert die Entwicklung der Attosekundenpulse ist, der experimentelle Aufbau der Messgeräte für das Auslesen der Ergebnisse der „Durchleuchtung“ ist keineswegs einfacher. Auch hier waren geniale Ideen nötig. Die Garchingener Physiker arbeiten nach der „Anregungs-Abfragemethode“, die sie englisch kurz pump-probe nennen: Man regt mit einem Laserpuls erst einen Prozess an und mit einem weiteren fragt man ab, was passiert ist. Kienberger und sein Team arbeiten hier mit einem Trick: Sie verwenden zur Messung denselben Laserpuls, der den Attosekundenpuls ursprünglich erst erzeugte. „Das Fantastische ist, dass die beiden eine genau definierte Zeitbeziehung zueinander haben, weil ja der eine aus dem anderen entstanden ist“, freut sich der Forscher. Der Attosekundenpuls wird also zum Herausschlagen des Elektrons benutzt. Dieses spürt dann, je nachdem, wann es „geboren“ wurde, das elektrische Feld des ursprünglichen Laserpulses und erhält dadurch einen zusätzlichen Kick. Aus dessen Größe können die Physiker dann den Zeitpunkt des Herausschlagens errechnen, denn wenn Elektronen zu einem bestimmten Zeitpunkt kommen, verlieren sie Energie, wenn sie später kommen, gewinnen sie welche.

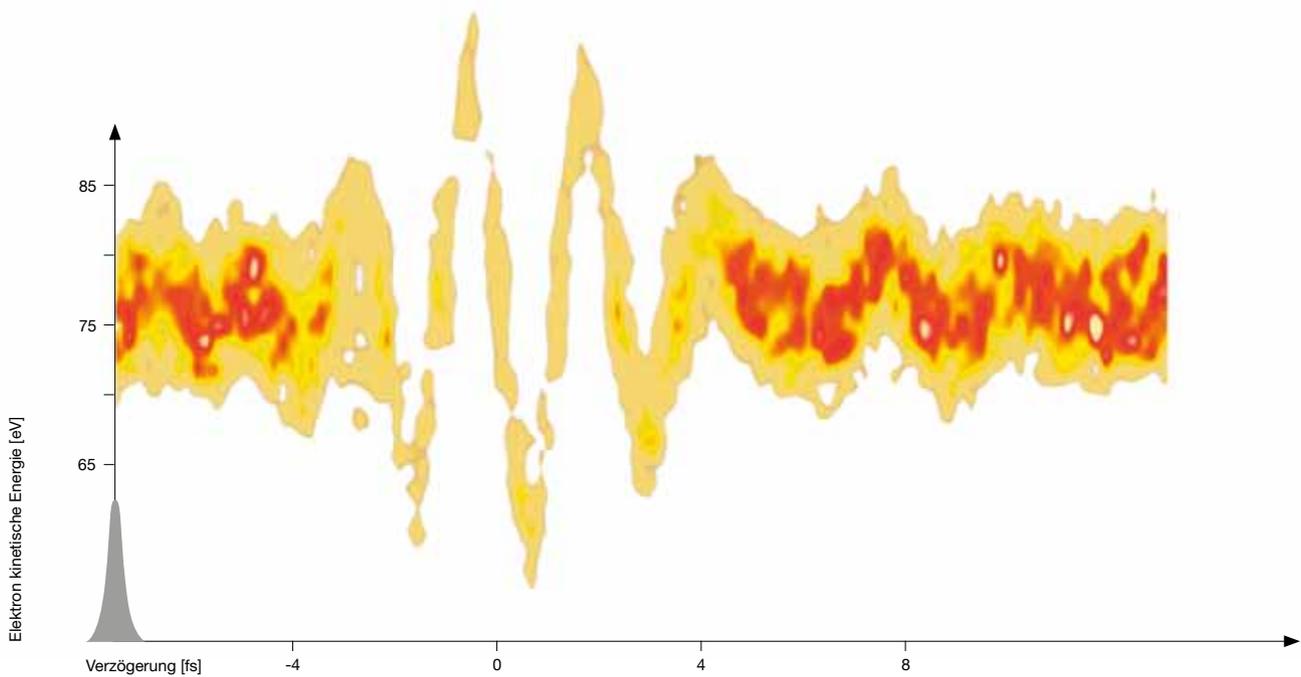


Bild: TUM

**Mithilfe der Elektronen**, die ein Attosekundenpuls (links unten in Grau) aus Gasatomen herausschlägt, lässt sich auch die Struktur des etwas langsameren Laserpulses vermessen, aus dem die Forscher den Attosekundenpuls ursprünglich erzeugten. Jedes Elektron spürt dessen elektrisches Feld unterschiedlich, je nachdem, wann es herausgeschlagen wurde. Manche verlieren, manche gewinnen Energie

Mit einer einzigen Messung ist es jedoch nicht getan. Trotz aller technischer Kniffe sind die Attosekunden-Laserimpulse recht schwach, das heißt, sie bestehen nur aus wenigen Photonen, rund einer Million pro Schuss. Deshalb wiederholen die Forscher jede Messung zigtausend Mal, um die Statistik zu verbessern. Denn von der Million Photonen treffen vielleicht nur 100 auf ein Atom und schlagen ein Elektron heraus. Diese fliegen aber in alle Richtungen davon, nicht nur in Richtung Messgerät. Dort kommt also im Durchschnitt nur ein Elektron pro Messung an, und das erlaubt noch keine zuverlässige Aussage. Deshalb lässt man das automatisierte Experiment ein paar Sekunden lang laufen und zeichnet etwa 80.000 Schüsse auf. „Damit habe ich 80.000 Treffer und kann sagen: So sieht es in diesem Augenblick aus“, erklärt Kienberger. „Das Gleiche machen wir dann für jeden späteren Zeitpunkt. Das heißt, jedes einzelne Bild besteht aus 80.000 Treffern, und aus diesen Bildern machen wir dann einen Film.“

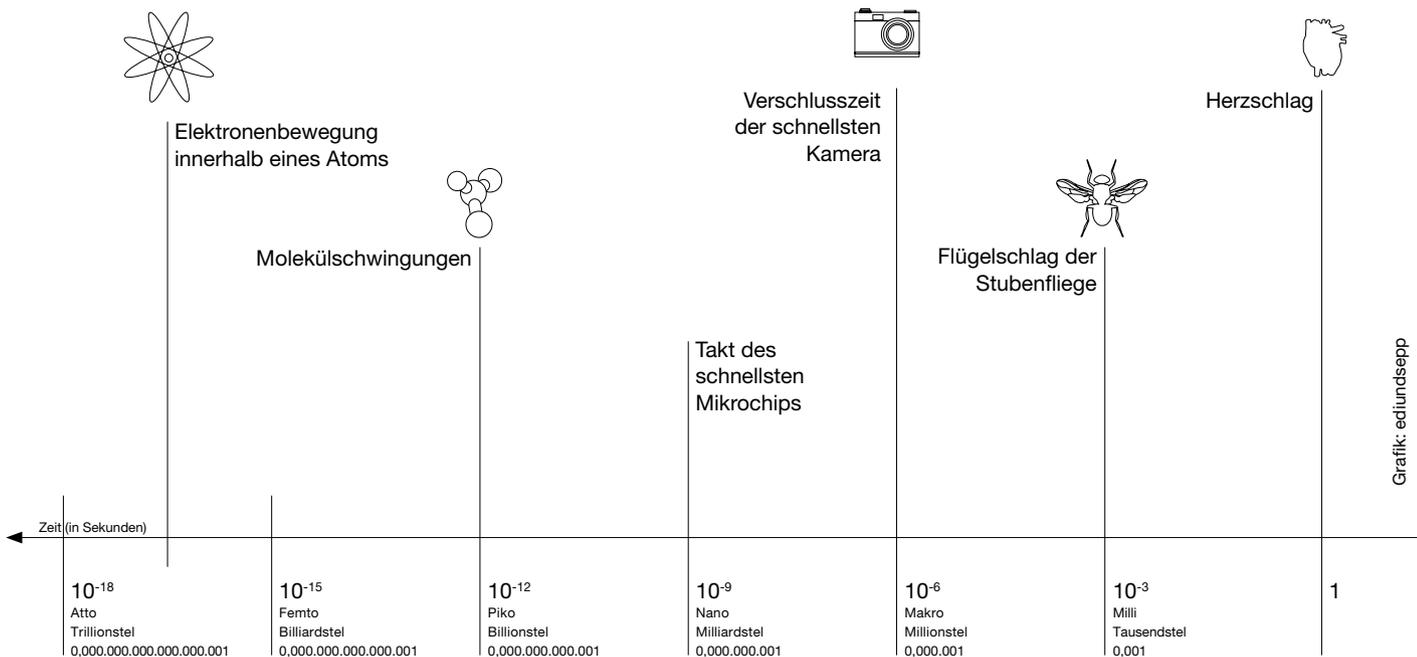
Aufgrund seiner großartigen Erfolge erhält Kienberger nun den ICO-Preis der International Commission for Optics und wird mit der Ernst-Abbe-Medaille der Carl-Zeiss-Stiftung ausgezeichnet. Der Preis wird einmal im Jahr vergeben an einen Forscher unter 40 Jahren, der

bemerkenswerte Beiträge zur Optik geleistet hat. „Das ist eine große Ehre für mich“, sagt er, „bisher haben nur drei deutsche Forscher und noch kein Österreicher diese Auszeichnung erhalten.“

### Neues Laserlabor an der TUM

Natürlich spielten bei den Erfolgen Kienbergers auch die besonders guten experimentellen Bedingungen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching eine Rolle, wo er nach einem USA-Aufenthalt in Stanford die letzten Jahre arbeitete. Nun aber hat er ein eigenes Laserlabor an der TUM aufgebaut, das vor Kurzem seinen Betrieb aufnahm. Denn während an großen Forschungszentren wie dem CERN in Genf Milliarden Euro verbraucht werden, um ins Innere der Materie zu schauen, kommen die Laserforscher mit wenigen Millionen Euro aus. Das kann sich auch eine Universität noch leisten.

Hier, im ersten Stock des TU-Physik-Departments, ist alles noch fabrikneu und blitzblank. Und hier sollen auch völlig neuartige Untersuchungen laufen, das Team steht gewissermaßen schon in den Startlöchern. „Das meiste, was wir hier betreiben, ist wirklich Hardcore-Grundlagenforschung, dafür hat man heute noch ▶



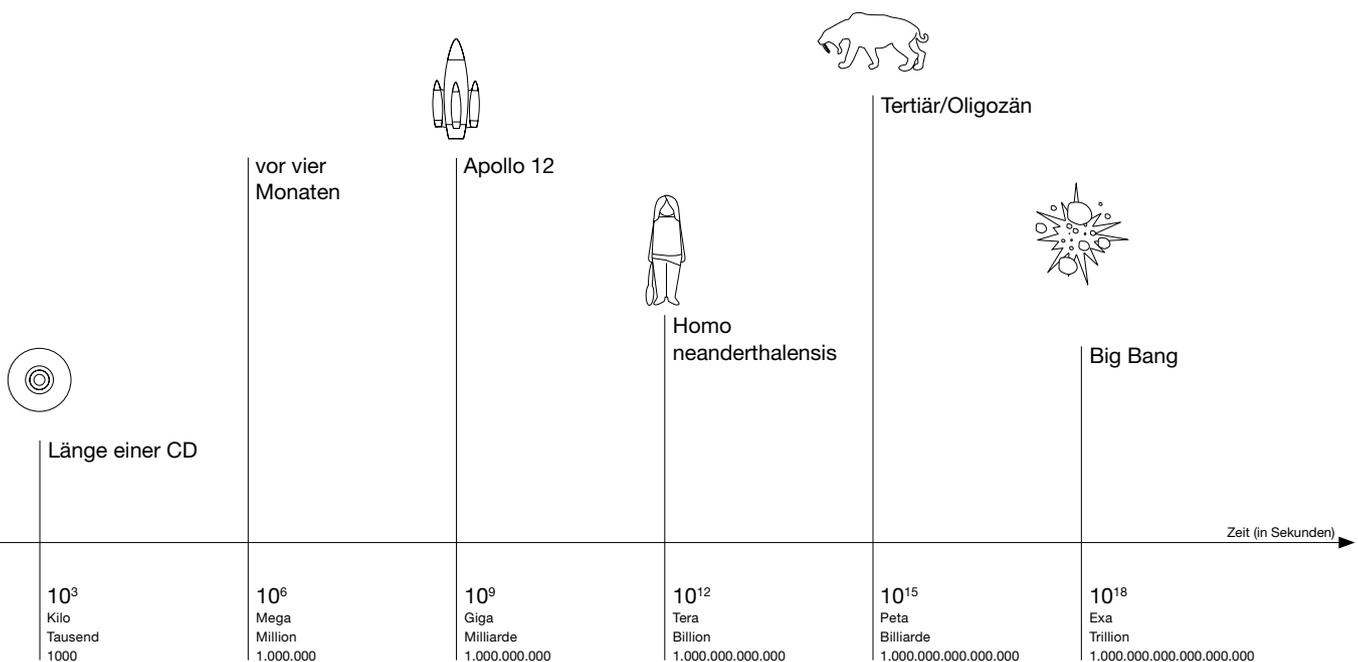
keine praktischen Anwendungen“, betont Kienberger. Dennoch gibt es auch jetzt schon ein paar sehr praxisrelevante Fragestellungen, etwa zur molekularen Elektronik. Dieses zurzeit stark boomende Fach beschäftigt sich damit, aus Molekülen elektronische Bauelemente zusammenzusetzen. Dazu muss man natürlich wissen, wie im Inneren die elektrischen Abläufe sind. Man will wissen, welches Elektron wann wo angeregt wird oder vom Zustand A nach B hüpf. Attosekundenpulse wären hier sehr hilfreich. „Das Erste, was wir untersuchen werden, ist Ozon, weil das einen sehr hohen Wirkungsquerschnitt im Ultravioletten hat“, sagt der Physiker. „Wir wollen uns mal ansehen, welche Elektronendynamik im Ozon stattfindet.“

**Ursachen herauskitzeln**

In der Regel wirft jedes Ergebnis gleich die nächste Frage auf, die man beantworten will. Zum Beispiel: Wenn man die Elektronendynamik in einem ganz einfachen Atom betrachtet hat, will man als Nächstes natürlich wissen, wie es in einem Molekül aussieht. Solche Fragen drängen sich automatisch auf. Auch der Schritt zu Festkörpern. Die Forscher haben schon viele Dinge systematisch in der Gasphase untersucht, weil ein

Edelgasatom am einfachsten gebaut ist. Aber die wirkliche Welt besteht eben aus festen Stoffen, und so fragt man dann, wie es dort läuft.

Auch aus Festkörpern schlägt ein Laserpuls verschiedene Elektronen heraus. Kienberger und sein Team haben das an Wolfram gemessen. Die Elektronen wandern an die Oberfläche, und zwar unterschiedlich schnell. „Wir wissen zwar noch nicht, warum es dabei Verzögerungen gibt, aber wir wissen, dass es passiert“, so das vorläufige Fazit. Hier sind nun die Theoretiker gefragt, Modelle zu finden, die das Verhalten der Teilchen erklären können. „Wenn es keine Übereinstimmung mit den Theorien gibt, so wie das bei uns momentan der Fall ist, dann muss man sich überlegen, wie kann ich experimentell herauskitzeln, was die Ursache ist“, fordert Kienberger. Die Forscher bringen nun beispielsweise eine Einzellege anderer Atome auf den Kristall auf und untersuchen, um wie viel später ein Elektron ankommt, wenn es noch durch diese zusätzliche Schicht hindurchmuss. Als Nächstes bringen sie eine zweite Schicht darüber usw. So kann man schon Hinweise finden, was die Ursache der Verzögerung sein könnte. Auch in Bezug auf Solarzellen gibt es Fragen, die mit der Bewegung der Elektronen zu tun haben: Manche



**Zeitmaßstäbe in der Natur:** Die hochgestellten Zahlen geben – wenn sie positiv sind – die Anzahl der Nullen an, also etwa  $10^3 = 1000$ . Hochgestellte Zahlen mit einem Minuszeichen geben die Anzahl der Stellen hinter dem Komma an, etwa  $10^{-3} = 0,001$ . Der Einfachheit halber hat aber jede Größenordnung auch noch einen eigenen Namen

Solarzellen beruhen auf Titandioxid, darauf sind Molekül-Metallkombinationen aufgebracht. Diese absorbieren das Sonnenlicht und geben ein Elektron weiter, was dann letztlich zum Erzeugen einer elektrischen Spannung führt. Man weiß aber noch nicht, was mit dem Elektron im Einzelnen passiert. Wie schnell wandert es beispielsweise vom Metall zum Molekül? „Wir wollen das herausfinden“, sagt Kienberger. „Wir wollen wissen: Wie schnell geht das und in welchen Schritten? Wenn man das weiß, kann man das System optimieren. Erst wenn man den Prozess verstanden hat, kann man überlegen, wie man die Effizienz erhöhen kann. Auf dieser fundamentalen Ebene hat das vor uns noch niemand gemacht.“

**Gesucht: hohe Frustrationsresistenz**

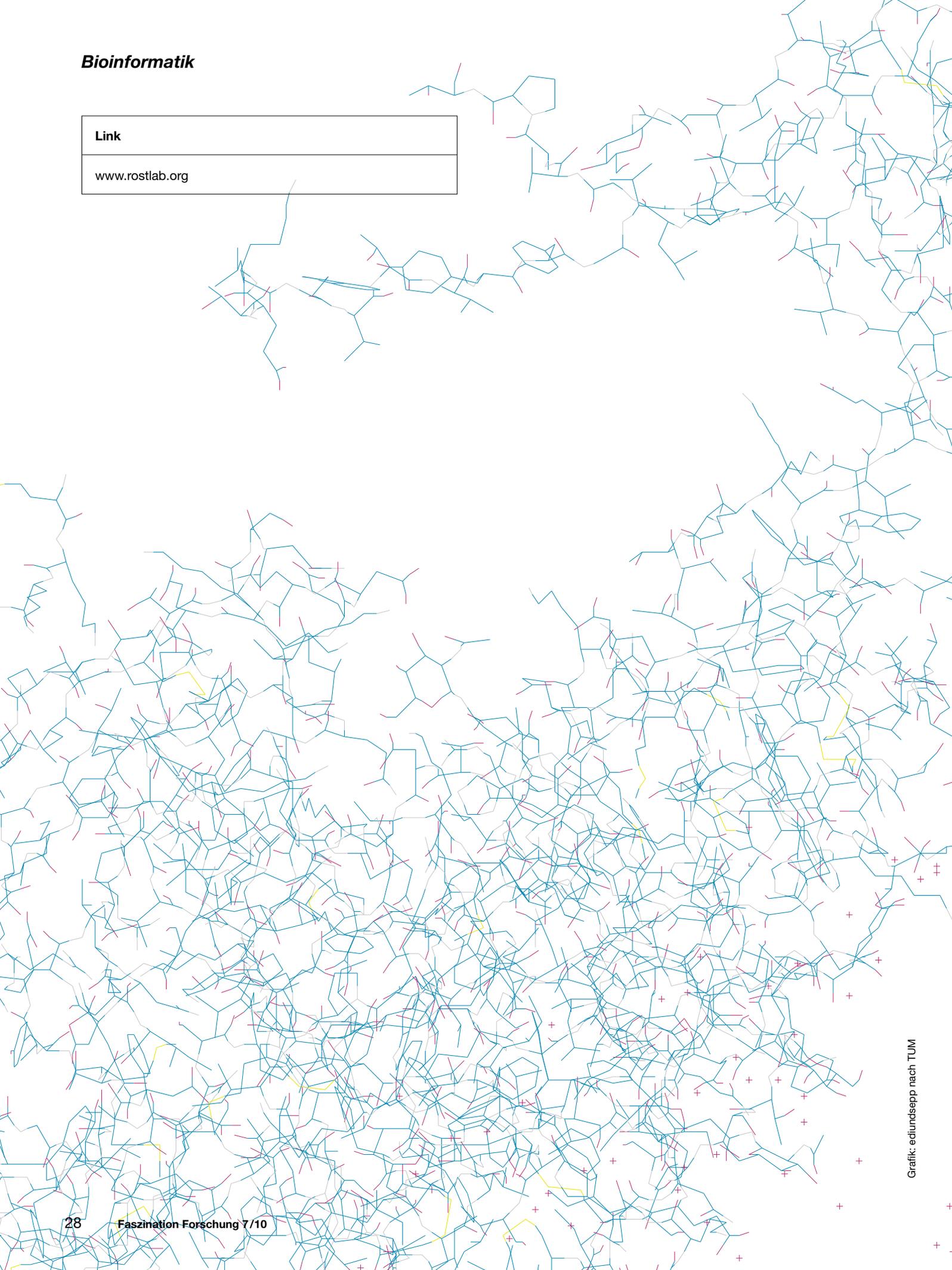
Nachwuchssorgen für sein Team hat der Forscher keine. „Fast jede Woche bewirbt sich ein Physikstudent um eine Stelle oder ein Praktikum“, sagt er. Bestimmte Charaktereigenschaften sind allerdings nötig, wenn man Erfolg haben will in der Spitzenforschung. „Man braucht einen langen Atem und viel Geduld. Man muss auch frustationsresistent sein. Der Schlüssel zum Erfolg ist, dass man Niederlagen wegsteckt und sagt:

Ich werfe nicht alles hin, sondern versuche, daraus zu lernen, und mache weiter. Ich glaube, dass man auch aus Misserfolgen sehr viel lernen kann, wie überall im Leben. Das muss man dann umsetzen und weitermachen.“ Wichtig ist auch, dass man teamfähig ist. Wirklich gute Forscher sind meist keine Einzelgänger. Man muss gemeinsam Ideen verwirklichen, denn die Wissenschaft ist heute schon viel zu komplex für den einzelnen Forscher.

So stellt sich Reinhard Kienberger sein Team zusammen, und es finden sich nicht nur Laserspezialisten darin. Mehr und mehr wird man auch interdisziplinär arbeiten, denn der Laser an sich ist für die Garchingler kein Selbstzweck. Auch nicht die kürzesten Attosekundenpulse. Die Forscher entwickeln diese nur, um damit Prozesse in der Natur zu untersuchen. „Wir dringen sehr weit auf Neuland vor, weil es diese Werkzeuge nicht kommerziell gibt“, betont Kienberger. „Es ist eine große Befriedigung, wenn man sagen kann: Ich habe die kürzesten Attosekundenpulse entwickelt, ich habe eine Messmethode entwickelt, wie man sie messen kann usw. Das freut einen, wenn man es geschafft hat. Der Antrieb war jedoch immer, dass wir elektronische Vorgänge messen wollten.“ *Brigitte Röthlein*

**Link**

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



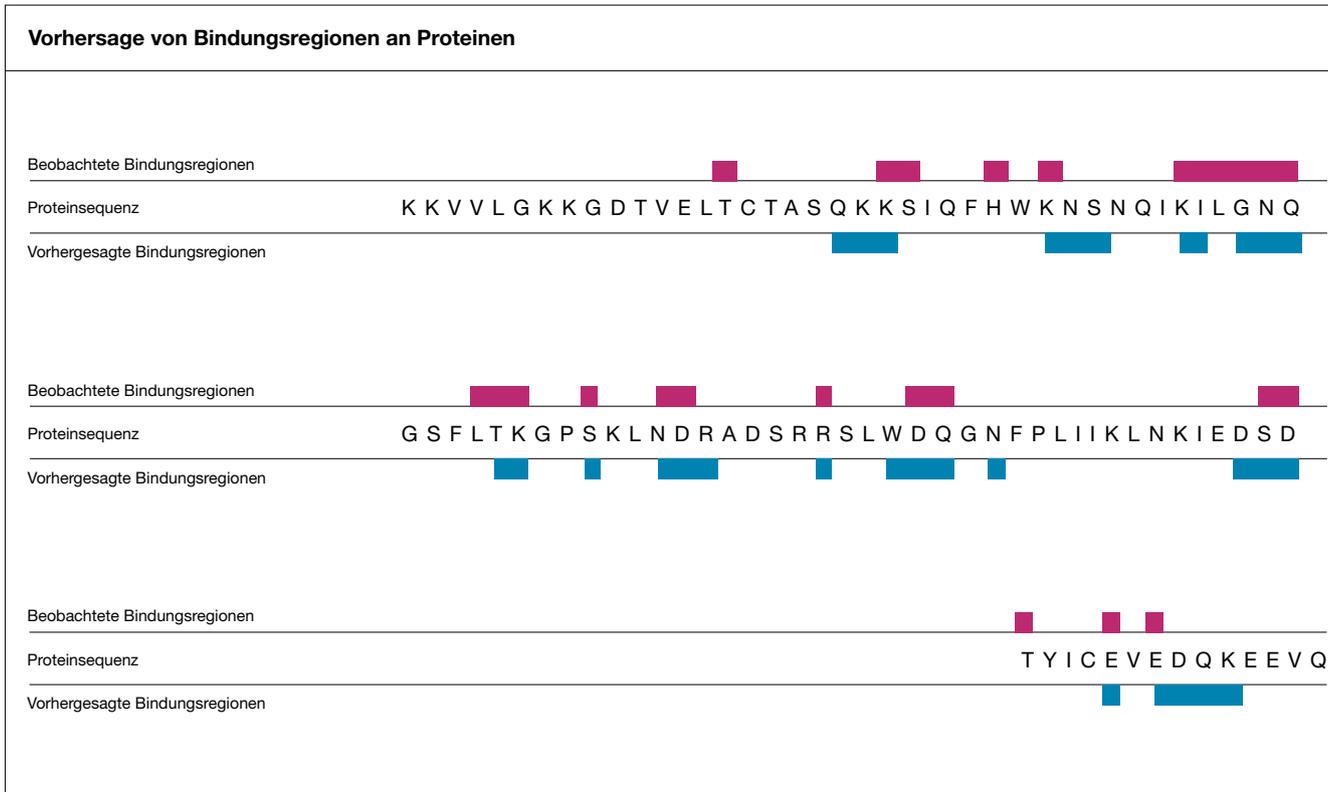


# Leben berechnen

**Bioinformatiker treffen mit Methoden des maschinellen Lernens und neuronalen Netzen Vorhersagen über die Strukturen von Proteinen und deren Funktion**

**D**ie Erwartungen waren hoch, als im Mai 2003 offiziell verkündet wurde, das menschliche Genom sei vollständig entschlüsselt. Endlich, so die Hoffnung, könne man Krankheitsursachen aufklären, die auf Gendefekten beruhen, und Therapien entwickeln. „Was bedeutet entschlüsselt? Wir kennen die genaue Abfolge der menschlichen DNA mit sechs Milliarden Bausteinen, also den Basen Adenin, Thymin, Cytosin und Guanin. Diese Erbgutkarte lässt sich

mit einem Benutzerhandbuch vergleichen. Ich habe die Erfahrung gemacht, dass ich in solchen Handbüchern selten das finde, was ich suche. Und wenn ich es finde, verstehe ich es nicht“, schildert Prof. Burkhard Rost vom TUM-Lehrstuhl für Bioinformatik, dessen Arbeitsgruppe sich mit der Speicherung, Analyse und Interpretation von Gen- und Proteindaten beschäftigt, das Problem. Von Therapien ist die Wissenschaft immer noch weit entfernt. Was die Forscher wissen: Das menschliche ▷



Grafik: edlundsapp nach TUM

Genom besteht aus 25.000 Genen und nicht wie ursprünglich gedacht aus 100.000. Diese Gene enthalten die Bauanweisung für die Proteine. Zum Vergleich: Die Reispflanze besitzt 50.000, ein Wurm 21.000 und Mycoplasma genitalium, der kleinste bekannte Organismus, 470 Gene.

**Regler für alle Lebensprozesse**

Ohne Proteine kann ein biologisches System nicht existieren. „Maschinerie des Lebens“ nennt Rost sie. Denn Proteine transportieren Substanzen, sorgen für die Blutgerinnung, agieren als Ionen-Pumpen, beschleunigen chemische Reaktionen oder erkennen Signalstoffe. Kurz: Sie regeln alle Lebensprozesse. Fehler in ihrem Aufbau oder in ihrer Funktion machen den Menschen krank.

In ihrer Ausgangsform liegen Proteine als kurze oder lange Aminosäure-Ketten vor (Primärstruktur). Abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung ordnen sich die Aminosäuren zu zweidimensionalen Gebilden (Sekundärstruktur) an. Je nach Kräfteverhältnissen und Bindungen falten sie sich weiter (Tertiärstruktur) – dann sehen sie aus wie ein Wollknäuel. Manche Proteine

müssen sich sogar zu Komplexen zusammenlagern (Quartärstruktur), um funktionieren zu können. So bestehen beispielsweise Antikörper (Immunglobuline) aus vier Proteinen. Ihre Funktion wird durch die dreidimensionale Anordnung ihrer Atome bestimmt.

Die Natur macht es den Forschern nicht leicht: „Wir wissen immer noch nicht genau, wie viele Proteine der Mensch hat. Wir glauben, es sind rund 25.000. Von mehr als der Hälfte ist die Funktion immer noch unbekannt. Das heißt, wir verstehen das Grundprinzip des Lebens noch nicht“, stellt der Bioinformatiker fest. Aber das ist noch nicht alles: Über 80 Prozent der menschlichen Proteine haben mehr als eine Funktion. Und mittlerweile ist auch bekannt, dass die meisten Proteine als Paare oder größere Komplexe auftreten.

Die Faltung der dreidimensionalen Strukturen hängt von vielen Faktoren ab: etwa vom pH-Wert oder vom Bindungspartner, ebenso kann das Binden selbst Funktion und Struktur verändern. „Proteine sind nicht statisch. Das macht das Ganze so kompliziert. Man kann zwar mit heutigen Techniken Proteine identifizieren und die atomare Struktur darstellen, nicht aber ihr dynamisches Verhalten“, erklärt Burkhard Rost.



Beobachtete Bindungsregionen



Vorhergesagte Bindungsregionen

Die Forscher nutzen computergestützte Methoden, um die Bindungsregionen (Hot Spots) eines Proteins mit einem Bindungspartner vorherzusagen. Dazu vergleichen sie Proteinsequenzen und suchen darin die Bindungsregionen. Das Beispiel veranschaulicht die vorhergesagten (blau) Bindungsregionen des Proteins CD4, das auf verschiedenen Zellen des menschlichen Immunsystems zu finden ist und vergleicht diese mit den Bindungsregionen (magenta), die in einem Komplex mit dem Protein GP120, das sich auf der Oberfläche von HI-Viren befindet, beobachtet werden. Die Forscher gewinnen durch diese Analysen der Struktur und Funktion der Proteinsequenzen wichtige Hinweise auf die Angriffspunkte, die HI-Viren an den Immunzellen nutzen, wenn sie diese infizieren.

Bilder: TUM

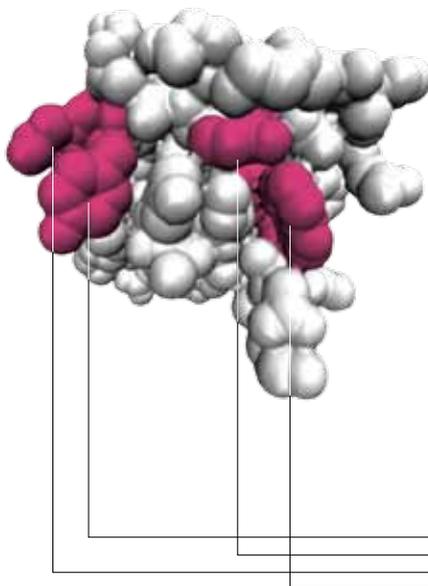
### Struktur und Funktion aufklären

In den vergangenen Jahren haben zahlreiche Forscher die Strukturen Tausender Proteine und Proteinkomplexe aufgeklärt und in Datenbanken gespeichert. Sie haben Rechenprogramme entwickelt, um die gesammelten Gen- oder Proteindaten zu vergleichen, und Programme, die Proteine mit ähnlicher Sequenz und biologischer Funktion zu „Familien“ zusammenstellen. Und sie haben herausgefunden, dass etwa ein Drittel aller derzeit in Datenbanken gespeicherten Proteinsequenzen Ähnlichkeiten mit der Sequenz von mindestens einer aufgeklärten Proteinstruktur aufweisen.

Um die Aufklärung zu beschleunigen, versuchen die Bioinformatiker mit computergestützten Methoden Bindungsregionen und physikalische Wechselwirkungen vorherzusagen. „Wir nutzen dazu die Informationen, die uns die Evolution gibt. Das heißt, ähnliche DNA-Sequenzen geben Hinweise auf Verwandtschaft und Abstammung von Organismen. Ist die Sequenz identisch, ist auch die Proteinstruktur gleich. Wenn wir wissen, welche Änderungen möglich sind, dann können wir auch Aussagen über die Struktur und Funktion treffen“, erklärt Burkhard Rost.

Maus und Mensch haben mehr als 97 Prozent ihrer Gene gemeinsam. Diesen Umstand nutzen die Forscher, um aus Übereinstimmungen mit den Maus-Daten auf Struktur und Funktion der menschlichen Proteine zu schließen. Würden die Forscher versuchen, Funktion und mögliche Bindungspartner experimentell herauszufinden, wären sie Jahrzehnte beschäftigt. Deshalb ist es notwendig, ein automatisiertes Verfahren zu entwickeln. „Können wir am Rechner vorhersagen, wie Protein A mit Protein B reagiert? Können wir vorhersagen, welche Regionen sogenannte Hot Spots sind, wie sie wechselwirken?“, lauten die Fragen, die Rost und seine Mitarbeiter beschäftigen.

Dazu nutzt der Lehrstuhl für Bioinformatik Methoden des maschinellen Lernens. Vereinfacht gesagt, „lernt“ der Computer aus vorgegebenen Beispielen, Muster zu erkennen. Dabei soll die Maschine automatisch bekannte Muster in neuen Datensätzen wiederfinden. Die Umsetzung geschieht mittels entsprechender Rechenanweisungen. Solche Algorithmen werden bereits bei Briefsortieranlagen eingesetzt, wenn es darum geht, automatisch Postleitzahlen auf Briefen zu erkennen. Mit dieser Methode sind auch Ärzte bei der ▶



fyn_human	VTLFVALYDY	EARTEDDLSF	HKGEKFQILN	SSEGDWWEAR	SLTTGETGYI
yrk_chick	VTLFIALYDY	EARTEDDLSF	QKGEKFHILN	NTEGDWWEAR	SLSSGATGYI
fgr_human	VTLFIALYDY	EARTEDDLSF	TKGEKFHILN	NTEGDWWEAR	SLSSGATGCI
yes_chick	VTFVVALYDY	EARTEDDLSF	KKGERFQILN	NTEGDWWEAR	SLATGKTGYI
src_avis2	VTFVVALYDY	ESRTETDLSF	KKGERLQIVN	NTEGDWWEAR	SLTTGQTGYI
src_avis	VTFVVALYDY	ESRTETDLSF	KKGERLQIVN	NTEGDWWEAR	SLTTGQTGYI
src_chick	VTFVVALYDY	ESRTETDLSF	KKGERLQIVN	NTEGDWWEAR	SLTTGQTGYI
stk_hydat	VTFVVALYDY	EARISEDLSF	KKGERLQIIN	TADGDWWEAR	SLITNSEGYI
src_1svpa	.....	ESRTEDLSF	KKGERLQIVN	NTEGDWWEAR	SLTTGQTGYI
hck_human	..IVVALYDY	EAIHHEDLSF	QKGDQMVVLE	ES.GEWWKAR	SLATKREGYI
blk_mouse	..FVVALYDY	AAVNRDLQV	LKGEKIQVLR	.STGDWWEAR	SLVTKREGYV
hck_mouse	..TVVALYDY	EAIHREDLSF	QKGDQMVVLE	.EAGEWWEAR	SLATKREGYI
lyn_human	..IVVALYDY	DGIHPDDLFS	KKGERKVVLE	.EHGEWWEAR	SLTTKKEGFI
lck_human	..LVIALBSY	BPSHDGDLGF	EKGEQLRILE	QS.GEWWKAR	SLTTGQEGFI
ssb1_yeast	....ALYDY	DADDDDELFS	EQNEILLQSD	.IEGRWWEAR	R.ANGETGII
abl_mouse	..LFVALYDY	VASGDNTLSI	TKGEKLRVLG	YnnGEWCEAO	..TKNGQGWV
abl1_human	..LFVALYDY	VASGDNTLSI	TKGEKLRVLG	YnnGEWCEAO	..TKNGQGWV
src1_drome	..VVSVALYDY	KSRDESDLSF	MKGDRMEVID	DTEGDWWEAR	SLTTTQEGLI
mysd_dicdi	....ALYDY	DAESSMELSF	KEGDILTVDL	QSSGDWWEAR	L..KGRRGKV
yFj4_yeast	....VALYSF	AGEESGDLFF	RKGDVITLTK	ksQNDWWTGR	V..NGREGIF
ab12_human	..LFVALYDY	VASGDNTLSI	TKGEKLRVLG	YNQNGEWEV	RSKNG.QGWV
tec_human	..EIVVAMYDF	QAAGEHDLRL	ERNGEYLILE	KNDVHWWEAR	D.KVNGEGYI
abl1_caeel	..LFVALYDY	HGVGEQLSL	RKGDQVRILG	YNKNNWECEA	R.IYLGEGIWV
txk_human	....ALYDY	LPREPCNLAL	RRAEYLILE	KYNPHWWEAR	D.RLNGEGLI
yha2_yeast	VRRVRALYDL	TNPEPDLFS	RKGDVITVLE	QVYRDWWEAR	L..RLNGMGIF
abpl_sacex	....AEYDY	EAGEDNELTF	AENDKIINTE	FVDDDWWEAR	LETTGQKGLF

Grafik: edlundsepp nach TUM

**Aminosäuren, die im Molekül nahe beieinanderliegen (magenta markierte Regionen), sind gekoppelt:** Verändert sich die eine Aminosäure, hat dies auch Auswirkungen auf die andere. So können die Forscher aus dem Vorhandensein einer bestimmten Aminosäure gewisse Rückschlüsse auf die Entwicklung des Proteins ziehen

Diagnose zu unterstützen oder Fahrzeugsysteme so zu entwerfen, dass sie die Strecke unter Berücksichtigung der zu erwartenden Auslastung optimieren.

### Neuronale Netze als Vorbilder

Rosts Mitarbeiter setzen ebenso „Trainingsmethoden“ nach dem Vorbild neuronaler Netze ein: Der Rechner soll durch Mustererkennung Bindungsbereiche auf den Proteinoberflächen vorhersagen. Nach Abschluss der Trainingsphase sollte es dem neuronalen Netzwerk möglich sein, die Bindungsstellen in zuvor nie gesehenen Proteinen zu identifizieren und zu klassifizieren. Rosts Labor geht noch einen Schritt weiter: Für die Veränderung von Proteinstruktur und -funktion genügt bereits eine Punktmutation, also der Austausch einer Base, auf der DNA. Seine Mitarbeiter entwickeln derzeit eine Methode, um die Effekte einer solchen Nukleotid-Veränderung (Single Nucleotide Polymorphism, SNP) vorherzusagen. „Wir versuchen dadurch, mehr über die Mobilität der Proteine zu erfahren. Und wir wollen auch wissen, welche Aminosäure-Reste auf welche Weise verändert werden können. Heute sind wir nicht in der Lage, das unter dem Mikroskop zu sehen. Aber wir

könnten es simulieren und versuchen, unsere Vorhersagen zu bestätigen“, erläutert Rost.

Es gäbe noch einen weiteren Vorteil: Wenn die Wissenschaftler herausfinden, wie die Proteine reagieren, ließen sich Medikamente entwickeln, welche an den Hot Spots wirken. Dies könnte in Zukunft die Behandlung von Krebspatienten erleichtern. Sie würden ein auf ihr individuelles DNA-Profil maßgeschneidertes Medikament erhalten. Denn gerade in der Tumorthherapie sprechen die Patienten sehr unterschiedlich auf Wirkstoffe an.

### Daten-Explosion in der Protein-Datenbank

Die Rost-Gruppe ist eines von vielen Teams, die weltweit daran arbeiten, computergestützte Vorhersagen zu entwickeln. Alle sind sie auf experimentelle Daten über Proteinstrukturen und -funktionen angewiesen. Die Zahl der experimentellen Daten wächst kontinuierlich. So enthält beispielsweise die frei zugängliche Protein Data Bank (PDB) mehr als 50.000 solche Strukturen. Drei Viertel davon wurden in den letzten fünf Jahren aufgeklärt.

Trotz dieser Steigerung entfallen auf eine ermittelte Proteinstruktur 50 bis 100 unbekannte Strukturen. Unge-



**Burkhard Rost hat die Entstehung der Bioinformatik als Wissenschaftszweig** maßgeblich mitgestaltet. 2008 kam er von der Columbia University an die TUM

achtet der enormen Daten-Explosion wird also die Kluft zwischen dem, was die Forscher wissen, und dem, was sie wissen möchten, immer größer. Ein typisches Beispiel ist die DNA-Sequenzierung von gesamten Organismen: Über zehn Jahre Arbeit investierte die Wissenschaft in das erste menschliche Genom, heute können große Institute die DNA von zehn Menschen an einem Tag sequenzieren.

### **Wegbereiter für die individuelle Medizin**

Diese Tatsache ist vor allem für das Gebiet der „individuellen“ Medizin relevant. „In fünf bis zehn Jahren liegen unsere Genomprofile dem behandelnden Arzt vor. Wir hoffen, dass wir aus den kleinen Unterschieden zwischen uns, den SNPs, lernen können, welche Medikamente am besten für jedes Individuum geeignet sind. Die SNP-Daten lassen sich schnell ermitteln, die Herausforderung besteht darin, dass Wissenschaft und Medizin mit dieser Datenflut fertigwerden müssen. Eines ist bereits heute klar: Zu Beginn werden Patienten nicht die bestmögliche Behandlung erhalten können, weil uns einfach die notwendigen Computer und Algorithmen im Moment fehlen“, befürchtet Burkhard Rost.

### **Geschichte**

Die Anfänge der Bioinformatik reichen bis zum „Atlas über Proteinsequenzen und -strukturen“ (erschien 1965) zurück. Dieser enthielt nicht mehr als zwei Dutzend Proteinsequenzen – darunter das Hormon Insulin – und war die erste Proteindatenbank. Heute existieren weit mehr als 500 biologische Datenbanken. Die drei wichtigsten Banken für DNA-Sequenzen finden sich in Europa, Japan und den USA.

Der Begriff Bioinformatik umfasste anfangs (Mitte der 1980er-Jahre) ursprünglich die Robotertechnik und künstliche Intelligenz. Heute versteht man darunter die Speicherung, Analyse und Interpretation von Gen- und Proteindaten. Das Fach vereinigt die Disziplinen Informatik, Mathematik, Statistik, Physik sowie Methoden aus den Ingenieurwissenschaften mit der Molekularbiologie.

Es sei bezeichnend, meint Rost, dass dies eines der ersten Felder in den Zukunftswissenschaften ist, in dem die typischen Trendsetter in Technik und Wissenschaft wie die USA, Großbritannien und Deutschland in mancher Hinsicht von Asien überholt worden seien. So wurde das Beijing Genomics Institute, ursprünglich als die weltweit größte Sequenzieranlage gebaut, nochmals sehr viel größer dimensioniert, indem es die Verantwortlichen nach Shenzhen (bei Hongkong) verlegte. Rost und seine Kollegen würden gerne entsprechende Anlagen in München etablieren. In solch einem Forschungszentrum könnten Mediziner, Biologen, Bioinformatiker und herausragende Wissenschaftler anderer Zukunftsfelder zusammenarbeiten, „damit Europa in der Forschung nicht zurückfällt“.

Können wir also – wenn die Voraussetzungen stimmen – bald Leben berechnen? Burkhard Rost muss nicht lange überlegen: „Nein, bis jetzt sind wir nicht dazu in der Lage. Zu viel ist noch unbekannt. Aber wir haben einen enormen Wissensstand erreicht, und wir finden jeden Tag mehr. Was wir jetzt schon berechnen können, hilft uns jeden Tag. Wir können hoffen.“

*Evdoxia Tsakiridou*

# Hochauflösende Nano-Computertomografie

**Ein Team von Forschern der TUM, des Paul Scherrer Instituts (PSI) und der ETH Zürich hat ein neues Nano-CT-Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, die Struktur- und Dichteänderungen von Knochen hochaufgelöst und in 3-D darzustellen**

Osteoporose, auch Knochenschwund genannt, ist eine der häufigsten Erkrankungen des alternden Knochens: In Deutschland ist etwa ein Viertel der Bevölkerung über 50 Jahre davon betroffen. Bei den Patienten schrumpft die Knochensubstanz übermäßig rasch, damit steigt das Risiko für Brüche deutlich. In der klinischen Forschung wird Osteoporose bisher fast ausschließlich über die Messung einer allgemein verringerten Knochendichte bestimmt. Diese sagt jedoch wenig über die damit verbundenen und ebenso wichtigen lokalen Struktur- und Knochendichteänderungen aus. Franz Pfeiffer, TUM-Professor für Biomedizinische Physik und Leiter des Forscherteams, hat das Dilemma gelöst: „Mit unserem neu entwickelten Nano-CT-Verfahren ist es jetzt möglich, die Struktur- und Dichteänderungen des Knochens hochaufgelöst und in 3-D darzustellen. Damit kann man die der Osteoporose zugrunde liegenden Strukturänderungen auf der Nanoskala erforschen und bessere Therapieansätze entwickeln.“

## **Wissenschaftler machen Nanostruktur sichtbar**

Pfeiffers Team hat bei der Entwicklung auf der Röntgen-Computertomografie (CT) aufgebaut. Hierbei wird der Körper mit Röntgenstrahlen durchleuchtet. Ein Detektor misst dabei unter verschiedenen Winkeln, wie

Link
<a href="http://www.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/E17">www.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/E17</a>

viel Röntgenstrahlung jeweils absorbiert wird. Im Prinzip werden einfach Röntgenbilder aus verschiedenen Richtungen aufgenommen. Aus einer Vielzahl solcher Aufnahmen können dann mittels Bildverarbeitung digitale 3-D-Bilder des Körperinneren erzeugt werden. Die neu entwickelte Methode misst nun für jeden Beleuchtungswinkel nicht nur die gesamte vom untersuchten Objekt absorbierte Intensität, sondern auch die Teile des Röntgenstrahls, die in verschiedene Richtungen abgelenkt – in Physikersprache „gestreut“ – werden. Diese erzeugen für jeden Punkt ein Streubild, das zusätzliche Informationen über die genaue Nanostruktur liefert, da die Röntgenstreuung gerade auf aller kleinste Strukturänderungen sensitiv ist. „Da wir dabei sehr viele Einzelbilder extrem präzise aufnehmen und verarbeiten müssen, war bei der Implementierung des neuen Verfahrens die Verwendung hochbrillanter Röntgenstrahlung und schneller, rauscharmer Pixel-Detektoren besonders wichtig – beides steht an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) zur Verfügung“.

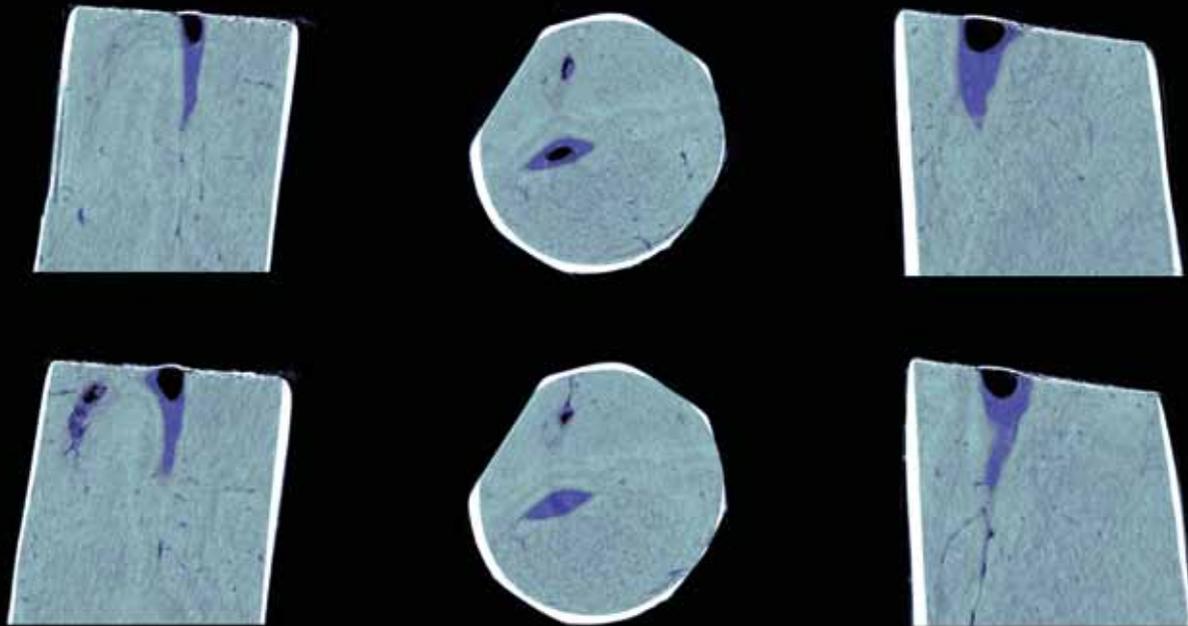


Bild: TUM

**Die ersten Nano-CT-Aufnahmen** einer Knochenprobe mit einem Durchmesser kleiner als ein menschliches Haar (ca. 25 Mikrometer). Deutlich zu sehen sind Querschnitte durch Osteozyt-Lakunen, also Hohlräume, in denen knochenerhaltende Zellen (Osteozyten) eingebettet sind (im Bild blau), und deren rund 100 Nanometer feines Verbindungsnetzwerk (Kanalikuli)

so Oliver Bunk, der an der vom schweizerischen PSI betriebenen Synchrotronlichtquelle den entsprechenden Experimentierplatz mit aufgebaut hat.

Die Streubilder werden anschließend mit einem Algorithmus verarbeitet, der von dem Team entwickelt wurde. TUM-Forscher Martin Dierolf erklärt: „Wir haben einen Bildrekonstruktionsalgorithmus entwickelt, der aus den über 100.000 Streubildern ein hochaufgelöstes dreidimensionales Bild der Probe errechnet. Dabei berücksichtigt der Algorithmus nicht nur die klassische Röntgenabsorption, sondern die wesentlich sensitivere Beeinflussung der Phase der Röntgenwellen.“ Exemplarisch wurde mit der neuen Technik die mit 25 Mikrometern härchenfeine Knochenprobe einer Labormaas untersucht – mit überraschend exakten Ergebnissen. Die sogenannten Phasenkontrast-CT-Aufnahmen stellen selbst kleinste Dichteunterschiede in der Knochenprobe extrem genau dar: Querschnitte durch Hohlräume, in denen Knochenzellen eingebettet sind, und deren rund 100 Nanometer feines Verbindungsnetzwerk sind gut erkennbar.

„Das neue Nano-CT-Verfahren erreicht zwar nicht die Ortsauflösung, die derzeit in der Elektronenmikroskopie möglich ist, kann aber aufgrund des hohen Durch-

dringungsvermögens von Röntgenstrahlung dreidimensionale Tomografiebilder von Knochenproben liefern“, kommentiert Roger Wepf, Leiter des Elektronenmikroskopiezentrums (EMEZ) an der ETH Zürich. „Darüber hinaus zeichnet sich das neue Nano-CT-Verfahren durch seine hohe Genauigkeit in der Knochendichtebestimmung aus, welche gerade für die Knochenforschung von entscheidender Bedeutung ist.“ Mithilfe des Verfahrens wird man insbesondere die Frühphase der Osteoporose-Erkrankung genauer studieren sowie Behandlungserfolge verschiedener Therapien in klinischen Studien evaluieren können.

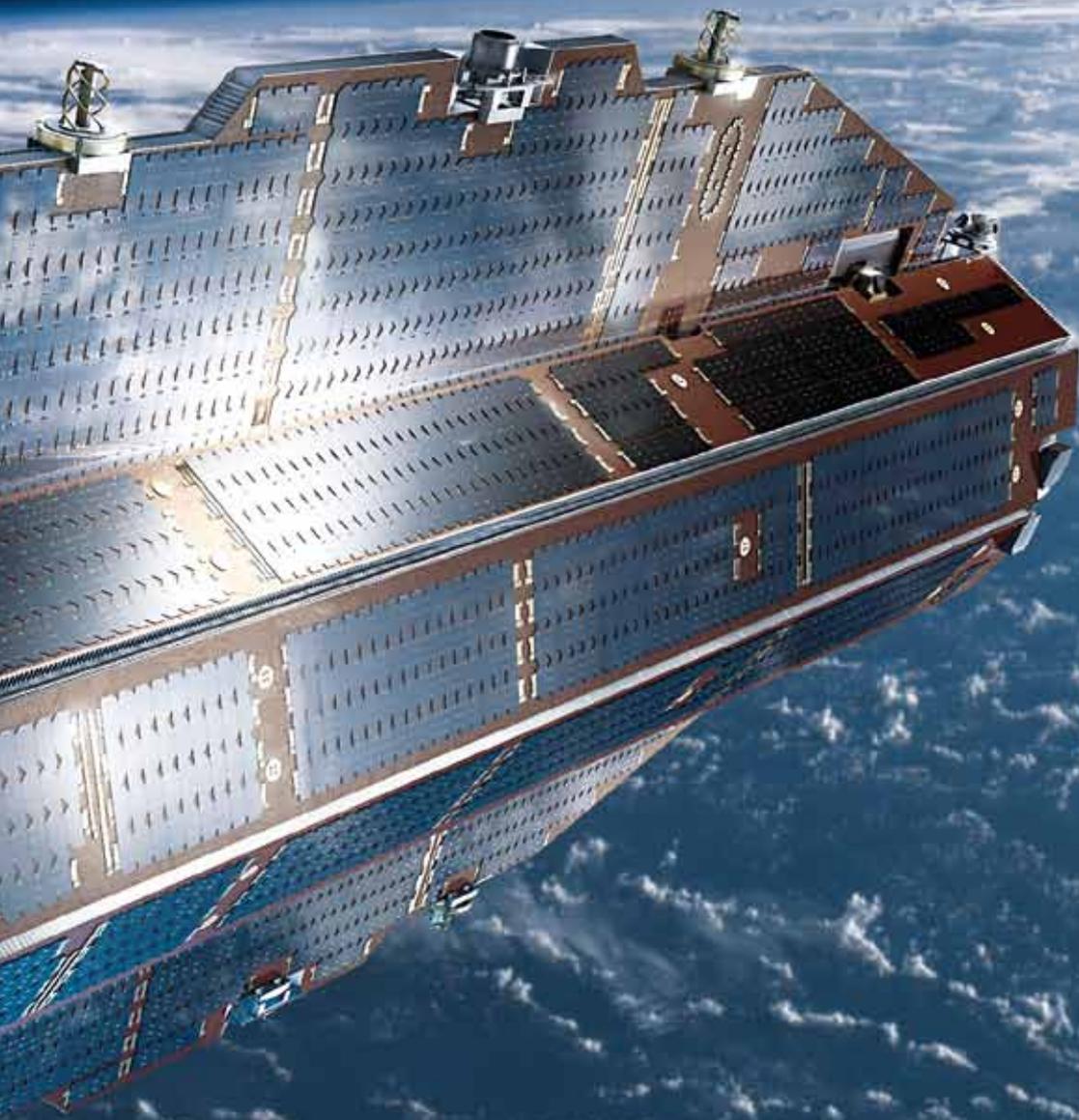
Aber die neue Technik ist auch außerhalb der Medizin sehr nützlich: Weitere Anwendungsfelder liegen in der Entwicklung neuer Werkstoffe in den Materialwissenschaften oder in der Charakterisierung von Halbleiterbauelementen. Schließlich lässt sich das Nano-CT-Verfahren auch auf neuartige, laserbasierte Röntgenquellen übertragen, so wie sie derzeit im Rahmen des Exzellenzclusters Munich-Centre for Advanced Photonics (MAP) und am neu bewilligten Großforschungsprojekt Centre for Advanced Laser Applications (CALA) auf dem TUM-Campus Garching bei München entwickelt werden. □

**GOCE umkreist in 90 Minuten die Erde**, und seine Bahn überstreicht innerhalb von zwei Monaten den gesamten Globus. So kann der Satellit lückenlos vom Weltraum aus die Gravitation vermessen

Link

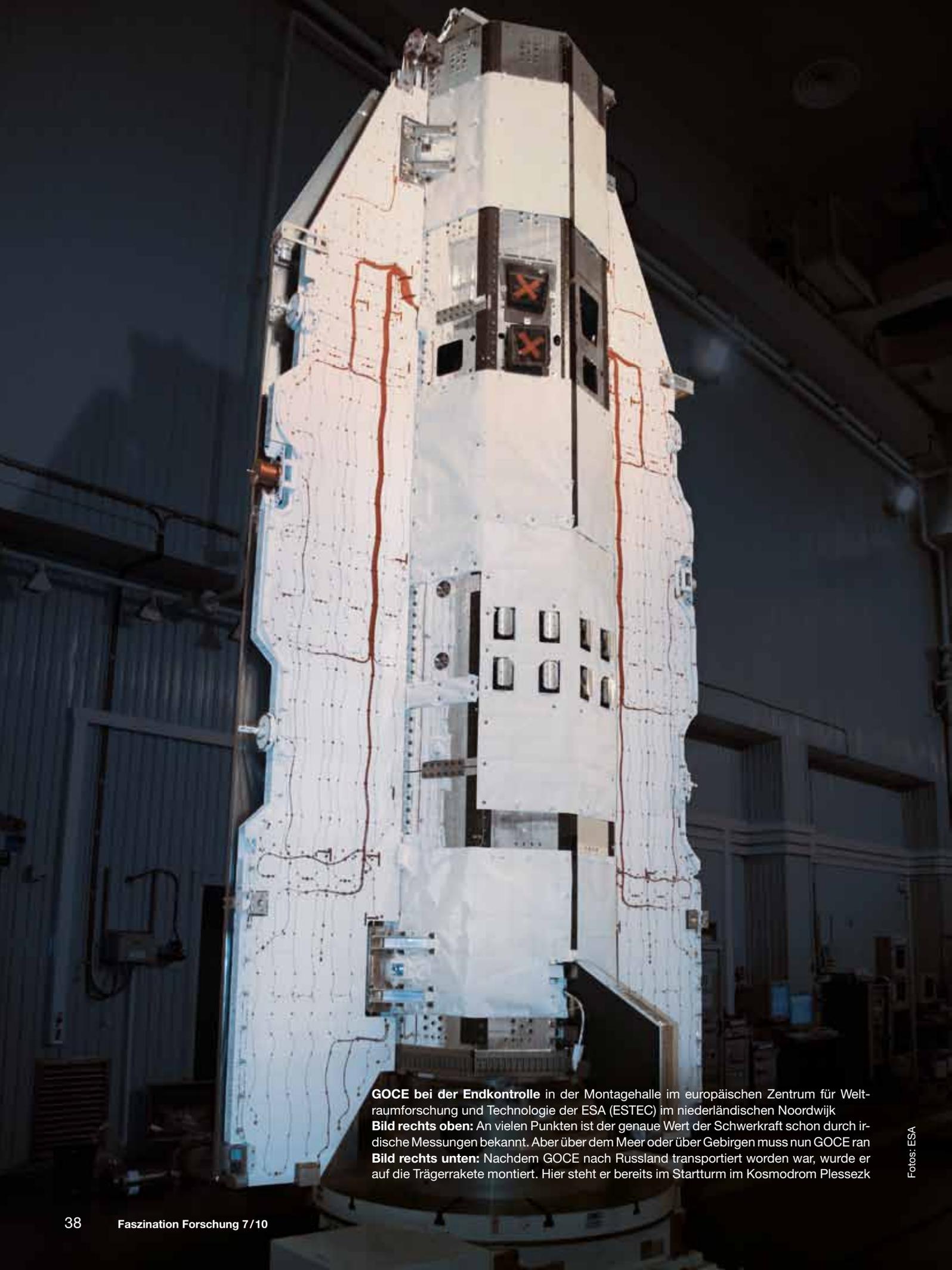
[www.goce-projektbuero.de](http://www.goce-projektbuero.de)





# Wie man ins Innere der Erde schaut

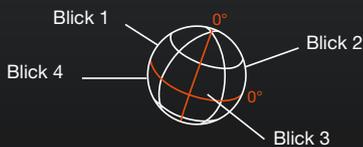
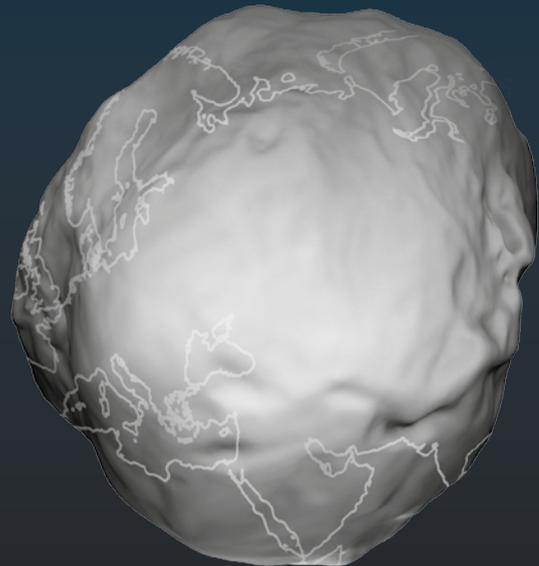
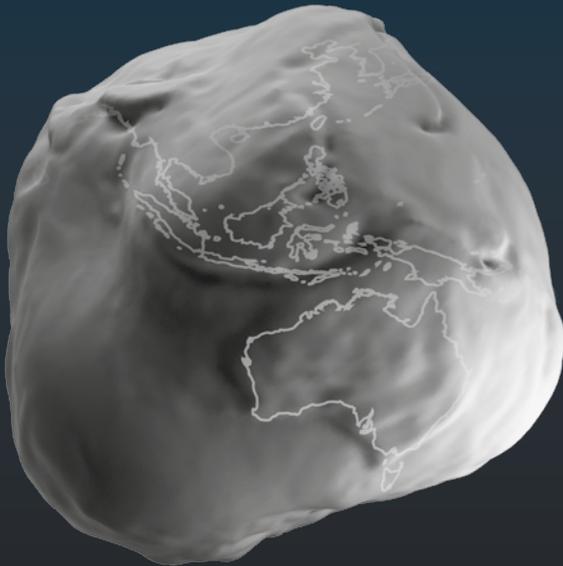
Unser Globus ist nicht so regelmäßig, wie er von der Ferne aussieht. In seinem Inneren wirken Kräfte, die sein Schwerfeld verbeulen, mit weitreichenden Folgen. Um dessen Form endlich exakt zu bestimmen, vermessen es europäische Forscher mit dem Satelliten GOCE nun mit nie gekannter Genauigkeit. Prof. Reiner Rummel von der TUM ist einer der Väter dieser ESA-Mission



**GOCE bei der Endkontrolle** in der Montagehalle im europäischen Zentrum für Welt-  
raumforschung und Technologie der ESA (ESTEC) im niederländischen Noordwijk  
**Bild rechts oben:** An vielen Punkten ist der genaue Wert der Schwerkraft schon durch ir-  
dische Messungen bekannt. Aber über dem Meer oder über Gebirgen muss nun GOCE ran  
**Bild rechts unten:** Nachdem GOCE nach Russland transportiert worden war, wurde er  
auf die Trägerrakete montiert. Hier steht er bereits im Startturm im Kosmodrom Plessezk

Fotos: ESA





**Das Geoid** ist eine dem mittleren Meeresspiegel entsprechende Äquipotentialfläche der Schwerkraft der Erde und weicht um bis zu 100 Meter von einem regelmäßigen Rotationsellipsoid ab. Hier sind die Abweichungen stark überhöht gezeigt, und so wirkt es wie eine Kartoffel

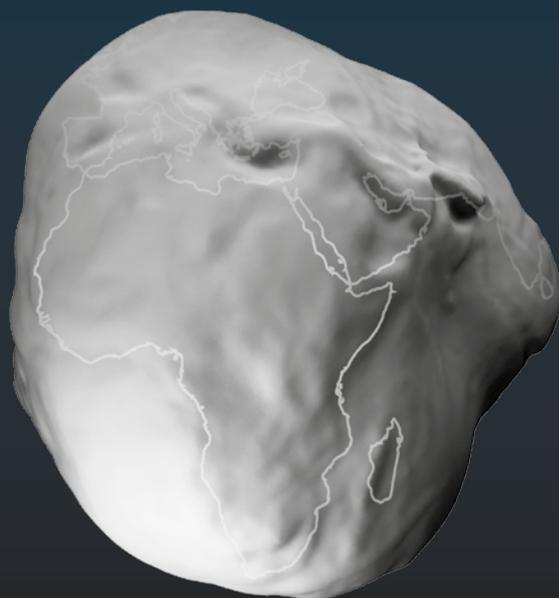
**E**s ist ein seltsames Missverhältnis: Während Google unsere Erde heute schon bis in den letzten Vorgarten hinein abbildet, weiß die Wissenschaft noch nicht einmal genau, wie hoch nun wirklich die Meereshöhe ist. Deutschland richtet sich dabei nach dem Meeresspiegel in Amsterdam, Frankreich nach dem in Marseille, Österreich nach dem in Triest. Und als man Anfang der neunziger Jahre den Tunnel unter dem Ärmelkanal baute und damit endlich eine Basis für Vergleichsmessungen zwischen Großbritannien und dem Kontinent schuf, stellten Geodäten mit Schrecken fest, dass die angenommene Meereshöhe zwischen den beiden Seiten um rund einen halben Meter differierte.

Mit solchen Fehlern wird es nun bald ein Ende haben. Denn seit dem 17. März 2009 umkreist GOCE, ein Satellit der Europäischen Weltraumbehörde ESA, die Erde und vermisst deren Schwerefeld mit noch nie dagewesener Genauigkeit. Seine Messungen sind untrennbar verbunden mit der Ermittlung der Erdfigur, und so wird

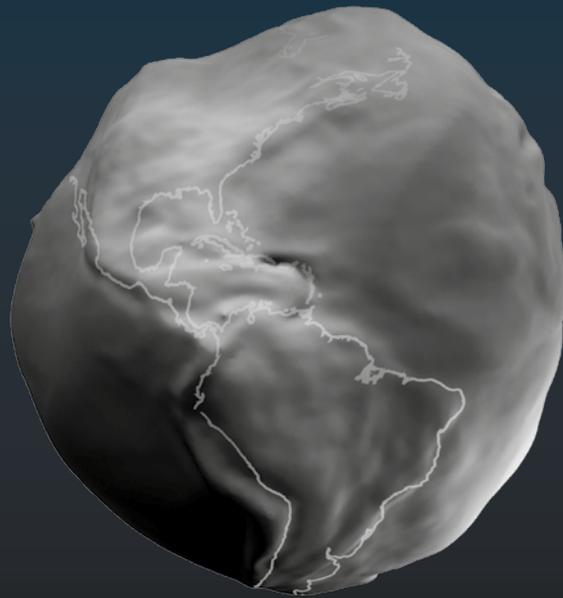
es auch bald möglich sein, die Meereshöhe überall auf ein bis zwei Zentimeter genau zu bestimmen, unabhängig von Hafenstädten oder Unterseetunneln.

### Eine riesige Wasserwaage

GOCE steht für Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, und in diesem Namen drücken sich bereits die beiden Hauptaufgaben des Satelliten aus: die Messung des Gravitationsfeldes der Erde und die Erkundung der Ozeanzirkulation. Beides hängt aufs Engste zusammen, und beides hat letztlich mit der Bestimmung des Geoids zu tun. Dieses Gebilde ist ein gedachter Körper, der die Oberfläche eines hypothetischen, die gesamte Erde vollständig bedeckenden Weltozeans darstellt. Dabei soll dieser in Ruhe sein, seine Form wäre ausschließlich durch die Schwerkraft festgelegt. „Es ist eine Fläche, die überall horizontal ist“, erklärt Prof. Reiner Rummel, Mitinitiator der GOCE-Mission und bis vor Kurzem Professor für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der



3



4

Seit seinem Start am 17. März 2009 vermisst GOCE mit großer Genauigkeit dieses Geoid, das hier von vier Seiten gezeigt wird. Die Unterschiede in der Schwerkraft ergeben sich aus den Dichtestrukturen in Erdkruste und -mantel, aus großen Eismassen und Meeresströmungen

TUM. „Das Geoid ist praktisch eine erdumspannende Wasserwaage. Egal, wo Sie auf seine Oberfläche eine Wasserwaage legen, sie wird überall perfekt horizontal sein.“ Das heißt jedoch noch lange nicht, dass es sich um eine Kugel handelt, sondern es hat in Wirklichkeit eher die Form einer Kartoffel, oder wissenschaftlicher ausgedrückt: Es gleicht einem Rotationsellipsoid, dessen Oberfläche sich an manchen Stellen bis zu 100 Meter aufwölbt oder eindellt. In der Erdvermessung dient das Geoid als Bezugshorizont für die Topografie der Ozeane und Kontinente.

#### Dellen im Bauch der Erde

Die Abweichungen von der Form des Ellipsoids entstehen durch Massenunterschiede im Untergrund. „Idealerweise betrachtet man ja die Erde als Kugel mit einheitlicher Dichte“, erläutert Prof. Roland Pail, Rummels Lehrstuhl-Nachfolger, der sich intensiv bei der Auswertung der GOCE-Daten engagiert. „Wenn das so wäre, würde auch das Geoid eine Kugel sein, die erst durch

die Rotation an den Polen abgeplattet würde. Sobald man aber irgendwelche inhomogenen Massenverteilungen im Erdinneren hat, zeigt die Erde keine konstante Dichte mehr, und dementsprechend verändert sich auch die Schwerkraft und damit das Geoid.“ Der Bauch der Erde bekommt Dellen oder Buckel, je nachdem, was innen vor sich geht.

Die Form des Geoids soll GOCE also bestimmen. In der Praxis geschieht dies dadurch, dass der Satellit die Schwerkraft misst, die die Erde an jeder Stelle auf ihrer Oberfläche und im Weltraum ausübt. Für viele Punkte auf der Erdoberfläche ist der Wert schon bekannt, denn man kann ihn direkt mit Fallversuchen oder Federwaagen messen. Aber über dem Meer oder in unwegsamem Gelände, im Urwald oder in Wüsten war man bisher auf Schätzungen angewiesen. GOCE jedoch umkreist in 90 Minuten die Erde, und seine Bahn überstreicht innerhalb von zwei Monaten den gesamten Globus. So kann der Satellit lückenlos vom Weltraum aus die Gravitation vermessen. ▶



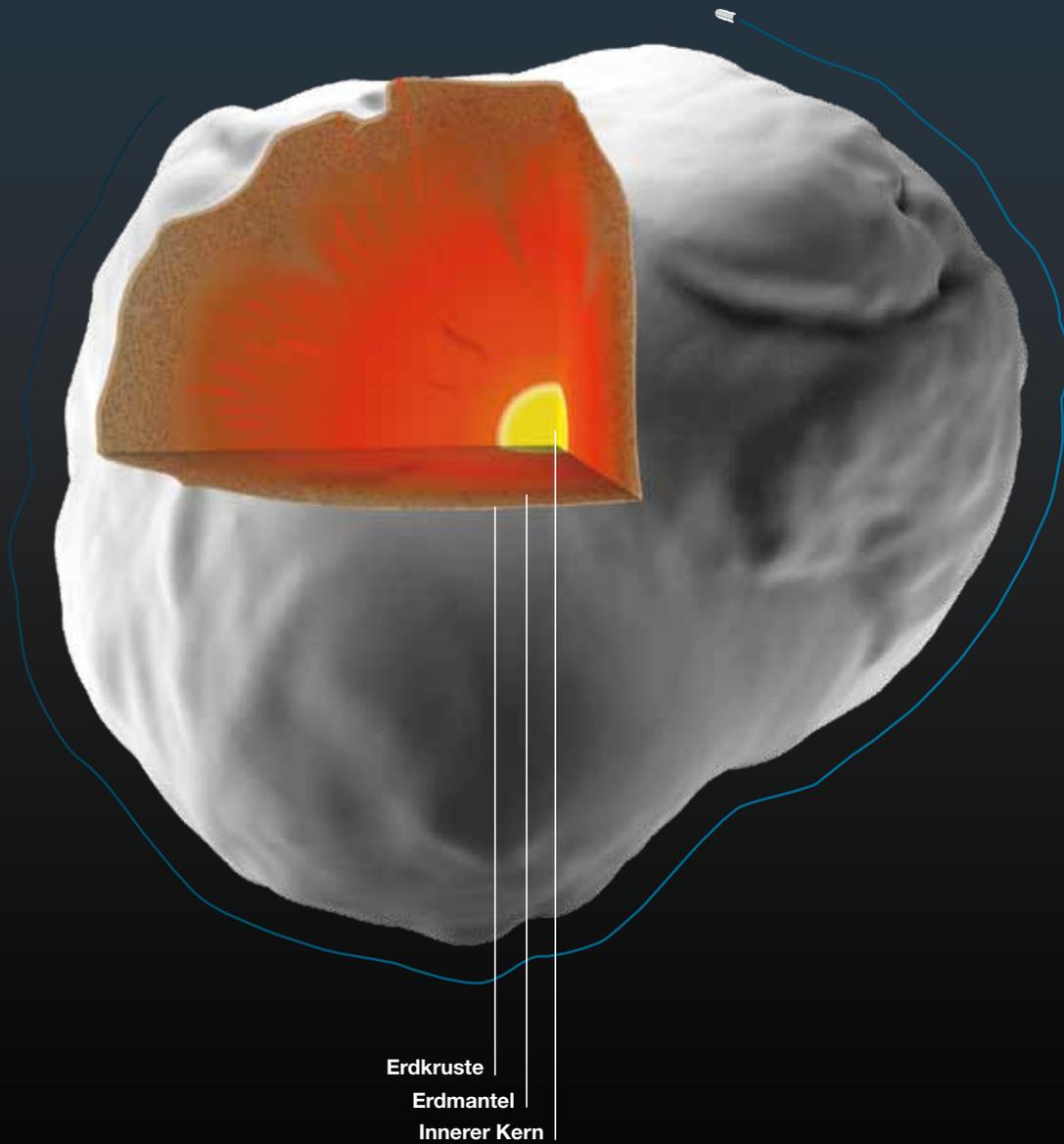
**Geophysikern eröffnet GOCE einen Blick in den Bauch der Erde.** Aus dem Gravitationsfeld ergeben sich wichtige Beiträge zum Verständnis von Gebirgsbildung, Plattentektonik, Vulkanismus bis hin zu Erkenntnissen über die Erdbebenentstehung

Grundsätzlich erscheint es beinahe paradox, das Schwerefeld der Erde vom Weltraum aus zu erfassen, denn die Signalstärke nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab. Die Umlaufbahn des Satelliten sollte daher möglichst niedrig sein, damit man ein möglichst großes Signal messen kann.

Andererseits gilt aber auch: Je niedriger der Satellit fliegt, desto mehr Luftwiderstand wirkt auf ihn. Dies verursacht wiederum Störungen in seiner Bewegung, die nicht auf die Gravitation zurückzuführen sind und die man kompensieren muss. Als Kompromiss zwischen den beiden Effekten hat man für GOCE eine Umlaufbahn in etwa 255 Kilometer Höhe gewählt, was beträchtlich niedriger ist als die Umlaufbahn anderer Fernerkundungssatelliten. Die ganz allmähliche Abbremsung durch die Restatmosphäre in dieser Höhe wird durch ein Ionentriebwerk kompensiert, das kontinuierlich arbeitet. So sind Satellit und Messgeräte nur unter Einfluss der Gravitation.

### **Super-GPS zur Bahnberechnung**

Bei der Ermittlung der Gravitationskraft spielen zwei Messsysteme zusammen: Einerseits bestimmt GOCE mithilfe von GPS-Signalen laufend seine Position, und zwar viel genauer, als dies Autofahrer auf der Erde tun. Aus diesen Messungen berechnet man die Umlaufbahn auf Zentimeter genau, die aufgrund der schwankenden Gravitation natürlich auch keine exakte Kreisbahn ist. Aus dieser unregelmäßigen Bahn wird auf die verursachende Gravitation zurückgeschlossen. Andererseits enthält der Satellit ein sogenanntes Gradiometer, das feinste Beschleunigungen messen kann. Es besteht aus drei Prüfmassenpaaren, die am Ende von drei zueinander senkrecht stehenden, ungefähr 50 Zentimeter langen Achsen positioniert sind. Auf jede Prüfmasse wirkt das Gravitationsfeld der Erde aufgrund ihrer unterschiedlichen Position im Schwerefeld etwas anders. Aus den Differenzen der Beschleunigungsmessungen kann man deshalb ein sehr detailliertes Abbild der räumlichen Variationen der Schwerkraft auf der ▶



**Die Erde ist in ihrem Inneren nicht völlig homogen.** Die Variationen in der Dichte des Materials sorgen dafür, dass das Geoid Dellen oder Buckel bekommt, je nachdem, was innen vor sich geht



**Das Herz des Satelliten:** Im oberen Teil befinden sich die drei Gradiometrie-Messgeräte, darunter die Computer

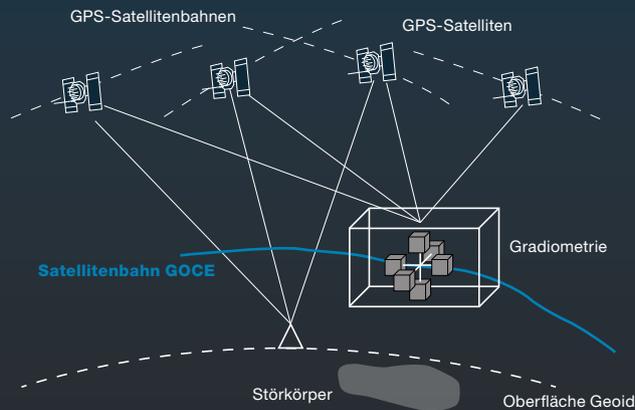
Erde berechnen. „Die Unterschiede in der Anziehung sind natürlich extrem klein“, betont Reiner Rummel. „Es ist eine Kunst, sie zu messen, denn es handelt sich nur um ein Millionstel der Erdanziehung, und diesen Wert können wir wiederum auf ein Millionstel genau messen.“

Überhaupt ist man beim Bau von GOCE an die Grenzen des technisch Machbaren gegangen, um höchste Präzision zu erzielen. Das Gradiometer wird beispielsweise auf ein zehntausendstel Grad temperaturstabil gehalten; extrem feste Kohlefaserstrukturen sorgen dafür, dass der Satellit sich nicht verformt. Solarzellen erzeugen die nötige Energie für den Betrieb, und vielfältige Positionierungs- und Peilgeräte halten den Satelliten auf Kurs. Wegen der irdischen Schwerkraft konnte man nicht alles auf der Erde erproben, auch wenn man einzelne Teile des Satelliten beispielsweise im Bremer Fallturm für einige Sekunden in Schwerelosigkeit getestet hat. „GOCE ist ein Prototyp“, betont Rummel, „der wird raufgeschickt, und alles muss auf Anhieb laufen. Dass

die Messsysteme, die wirklich heikel sind, alle funktionieren, finde ich grandios. Das ist eine fantastische Ingenieurleistung und ein echter Erfolg.“

Der Prototyp brachte allerdings auch unliebsame Überraschungen. So fiel schon im Februar 2010 wegen eines Chip-Problems der Hauptcomputer aus, und die Wissenschaftler mussten auf den Backup-Computer umschalten. Deshalb war das Entsetzen groß, als dieser am 8. Juli 2010 von einer Sekunde zur anderen schwieg und keine Daten mehr zur Bodenstation in Kiruna sendete. Zum Glück erhielt man wenigstens noch einige Telemetriedaten vom Satelliten, und so konnten sich die Spezialisten aus Industrie und Forschung langsam an das Problem herantasten. „Am Ende stellte sich heraus, dass der Computer offenbar zu kalt war“, sagt Rummel. „Als man seine Temperatur um sieben Grad erhöhte, begann er wieder zu arbeiten.“ Für den 64-jährigen Geodäten und seinen 38-jährigen Kollegen Roland Pail bedeutete dieses Missgeschick, dass ▶

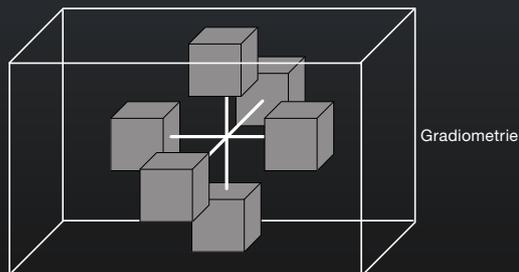
## So funktioniert das Messsystem:



1

### Die zwei Messkomponenten der GOCE-Mission:

Die unregelmäßige Massenverteilung in der Erde (symbolisiert durch den grauen Störkörper) führt zu einer unregelmäßigen Satellitenbahn. Diese wird mittels GPS gemessen. Aus den Bahnabweichungen zu einer idealen Kreisbahn kann man dann bereits auf das zugrunde liegende Schwerefeld schließen.



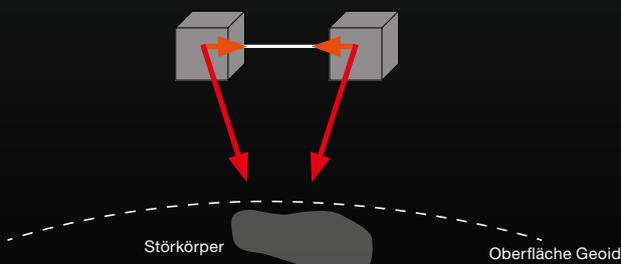
2

Noch weitaus feinere Abweichungen misst das Gradiometer-Messgerät in GOCE. Es besteht aus 6 Probmassen (als graue Würfel dargestellt), die paarweise am Ende von drei zueinander senkrecht stehenden Achsen angeordnet sind. Auf diese wirkt die Schwerebeschleunigung aufgrund der Störkörper unterschiedlich. Daraus kann das Schwerefeld berechnet werden.



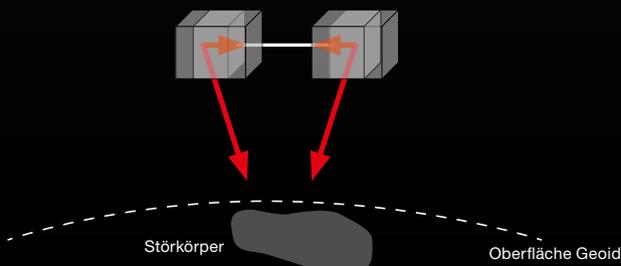
3

Zur Veranschaulichung wird der Effekt nur für eine Achse betrachtet. Sensoren messen die Beschleunigung jeder der beiden Massen.



4

Da die Gravitation an jeder Stelle etwas unterschiedlich ist, wirkt auf jede der Probmassen eine andere Kraft, sie werden deshalb ganz minimal in unterschiedliche Richtungen bewegt. Dies resultiert letztlich in einer winzigen Bewegung der Massen entlang ihrer Verbindungsachse. Für die beiden anderen Achsen funktioniert das analog.





- Kalter und salziger Tiefstrom
- Warmer Flachstrom
- Golfstrom

**Ozeanografen hoffen, dass sie mit den GOCE-Daten** die großen Meeresströmungen sehr viel genauer berechnen können als bisher. Denn diese sind sowohl von der Erdrotation als auch von den Schwereverhältnissen auf der Erde abhängig

Grafik: edunsepp

sie zusammen mit vielen anderen auf ihren Sommerurlaub verzichten und sich um ihr „Baby“ GOCE kümmern mussten; erst im September war der Schaden behoben.

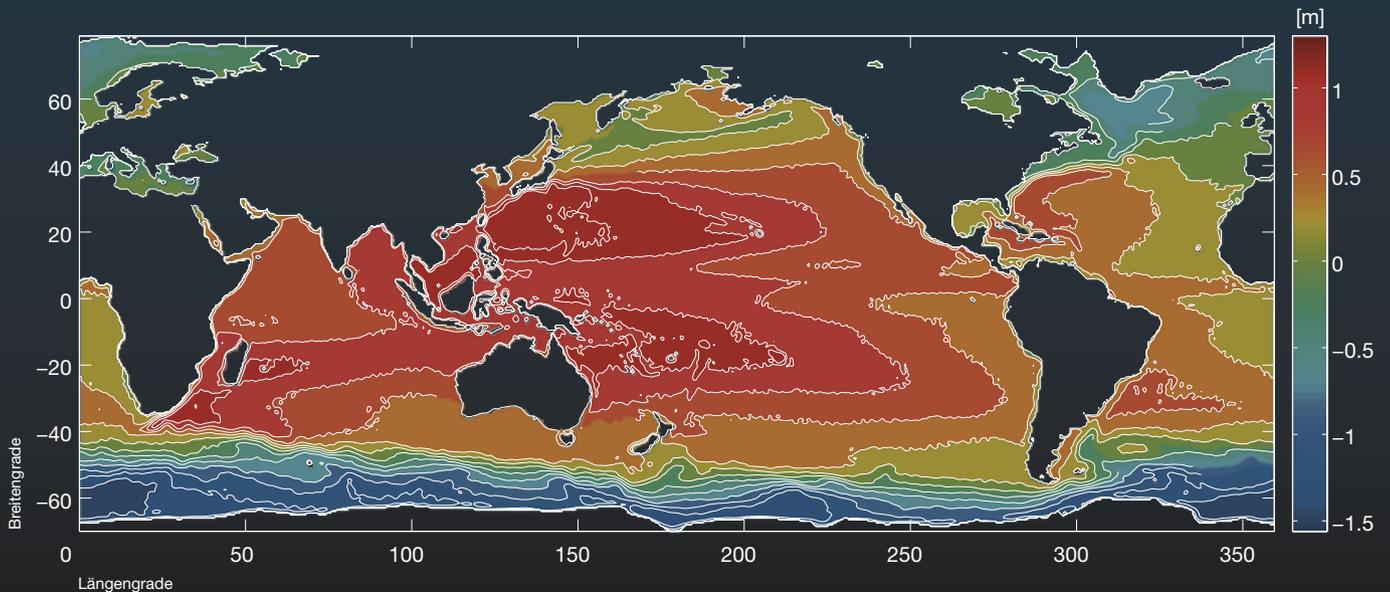
### Keine Schlafphasen

Abgesehen von diesen Ausfällen arbeitet GOCE jedoch besser als erwartet, selbst die vorher eingeplanten „Schlafphasen“ waren nicht nötig. Nach der Einschalt- und Eichphase, die bis September 2009 dauerte, nahmen die Messgeräte ihren Betrieb auf, und seither sind die Wissenschaftler mit der Auswertung der gelieferten Daten beschäftigt und damit, daraus das Gravitationsfeld der Erde zu rekonstruieren. Das ist ein äußerst anspruchsvolles Unterfangen: „Es ist im Prinzip die Lösung eines großen Gleichungssystems“, schildert Roland Pail das Vorgehen. „Wir versuchen, das Geoid durch ein mathematisches Modell zu beschreiben, das 50.000 bis 60.000 Parameter hat. Wir haben etwa 100 Millionen Beobachtungsdaten in einem halben Jahr. Daraus berechnen wir diese Parameter. Wir lösen die-

se Aufgabe zum Teil mit Clustersystemen und paralleler Prozessierung, also mit eigens dafür zugeschnittenen Computern.“ Außerdem sind etliche Kunstgriffe der Mathematik und eine Vielzahl speziell entwickelter Software-Programme nötig, um die einzelnen Effekte, die auf die Messgeräte wirken, zu identifizieren und deren Beiträge voneinander zu trennen.

### Strömungen im Ozean

Forschergruppen auf der ganzen Welt warten schon auf die Ergebnisse. Da sind zum einen die Ozeanografen, die sich für die großen Meeresströmungen interessieren. Diese sind sowohl von der Erdrotation als auch von den Schwereverhältnissen abhängig. „Die große Badewanne Ozean stellt sich im Idealfall so ein wie das Geoid“, erläutert der wissenschaftliche Projektleiter Reiner Rummel. Idealfall heißt hier, dass man sich Wind und Wellen wegdenkt. In der Realität aber zeigen die Ozeane Abweichungen vom Geoid. Dieser Zustand gibt im Wesentlichen Ozeanströmungen wieder, also Trans-



Grafik: eichundsepp nach TUM

**Die Auslenkung der tatsächlichen Meeresoberfläche** gegenüber dem GOCE-Geoid (in Metern). Man erkennt im Nordatlantik das Golfstromsystem und am Südpol den sehr starken Zirkumpolarstrom, der sich dort ungehindert von Kontinenten um die Erde bewegen kann

porte von großen Wassermassen durch die Weltmeere. Auf diese Weise können die Ozeanografen Strömungen ableiten. Daraus ergeben sich wesentliche Inputs, um langfristige Klimavorhersagen zu erstellen, denn beispielsweise der Golfstrom befördert ständig warmes Wasser nach Europa. Ihm ist zu verdanken, dass das Küstenwasser Europas etwa vier Grad Celsius wärmer ist als das Wasser in Gebieten gleichen Breitengrades im Nordpazifik. „Solche Fragen kann man natürlich nur untersuchen, wenn man das Geoid genau kennt“, sagt Rummel. „Wir messen also den wirklichen Ozean mit einem anderen Satellitenverfahren und parallel dazu das Geoid mit GOCE auf zwei Zentimeter genau in der Höhe. Dann nehmen wir die Differenz. Es ist das erste Mal, dass man global, also nicht aus numerischen Modellen, Ozeanzirkulationen erfassen kann. Das ist es, was die Ozeanografen von uns wollen.“

Die anderen Hauptabnehmer der GOCE-Daten sind neben den Geodäten die Geophysiker, die sich für die Massenverteilung und die Prozesse im Inneren der

Erde interessieren. So eröffnet GOCE sozusagen einen Blick in den Bauch der Erde. Denn dort, bereits wenige Hundert Kilometer unter der Erdkruste, geht es recht dynamisch zu, wenn auch die Prozesse nach unseren Zeitmaßstäben sehr langsam ablaufen. Aber wenn man das Gravitationsfeld und seine Anomalien kennt, ergeben sich daraus wichtige Beiträge zum Verständnis von Gebirgsbildung, Plattentektonik, Massengleichgewicht und Konvektion im Erdmantel bis hin zu Erkenntnissen über die Erdbebenentstehung.

Ursprünglich sollte die GOCE-Mission im April 2011 beendet sein. Nun aber, seit sich zeigt, dass die Genauigkeit der Schwerefeldmodelle mit jedem Umlauf besser wird, wollen die beteiligten Forscher gern eine Verlängerung der Mission erreichen, zunächst bis 2012, vielleicht sogar bis 2014. Aber irgendwann ist der Treibstoff des Ionentriebwerks aufgebraucht, und GOCE wird den Weg aller Satelliten gehen: Er wird sich der Erde immer weiter nähern und schließlich in der Atmosphäre verglühen.

*Brigitte Röthlein*

# Hart am Wind

**Nachwuchswissenschaftler der TUM haben jetzt haarfeine Sensoren entwickelt, um die Belastungen von Rotorblättern exakt zu messen. Windräder könnten so auch bei steiferen Brisen hart am Wind bleiben und selbst winzige Schäden sofort melden**

Bild: edlundsepp

Mehr als 21.000 Windkraftanlagen gibt es in Deutschland, und mit dem Ausbau der erneuerbaren Energie wird ihre Zahl noch weiter steigen. Damit die Anlagen noch etwas mehr Strom erzeugen können als bisher, werden künftig Glasfasersensoren auf und in den Rotorblättern die lokalen Belastungen durch den Wind messen, um die Leistungsfähigkeit der Windräder optimal auszunutzen – jedenfalls wenn es nach vier Nachwuchswissenschaftlern der TUM geht. Denn die Fasern, kaum dicker als ein Haar, können exakt feststellen, wie und wo das Material der Rotorblätter vibriert, sich dehnt oder winzige Schäden nimmt.

Dazu nutzen die Wissenschaftler Glasfasern, wie sie auch in der Telekommunikation verwendet werden – mit einem Unterschied: In gewissen Abständen sind die Glasfasern mit Lasern bearbeitet, sodass an diesen Stellen jeweils eine Art Spiegel entsteht, ein Faser-Bragg-Gitter. Schicken die Messtechniker nun Infrarotlicht durch die Faser, so wird es vom Gitter reflektiert. Bei Dehnung oder Stauchung der Faser verändert sich die Wellenlänge des reflektierten Lichts. Da jedes Gitter nur Licht einer bestimmten Wellenlänge zurückwirft und

die anderen Wellenlängen ungehindert passieren lässt, können die Wissenschaftler Dehnungen und Stauchungen an vielen Stellen der Faser gleichzeitig messen.

„Die größte Herausforderung war es, auch hohe Frequenzen von Vibrationen noch genau zu messen“, erklärt Dr. Mathias Müller, einer der vier künftigen Firmengründer. „In verschiedenen Projekten haben wir die Sensortechnik weiterentwickelt. Als wir unsere Messtechnik so weit optimiert hatten, dass wir die Vibrationen messen konnten, wie sie bei einer Ariane-Rakete beim Start entstehen, war das der Durchbruch für unser dynamisches Messverfahren.“

Zusammen mit dem Physiker Thorbjörn Buck hat er insgesamt zweieinhalb Jahre an der Technologie gearbeitet, zur Firmengründung stießen noch der Informatiker Rolf Wojtech und der Wirtschaftsingenieur Dr. Lars Hoffmann dazu. Mit ihrer Erfindung wollen die vier Jungforscher eine Firma gründen.

Hoffmann sieht neben den Windrädern noch weitere Anwendungsgebiete für den neuen Sensor, etwa bei Flugzeugen oder Autos, die – wie die Windradrotoren – ebenfalls aus faserverstärkten Kunststoffen hergestellt werden. Der Wirtschaftsingenieur erläutert: „Die moderne Metallverarbeitung kann auf eine 200-jährige Erfahrung zurückblicken. Faserverstärkte Kunststoffe dagegen werden erst seit 20 Jahren in größerem Umfang verwandt. Unsere Messtechnik wird dazu beitragen, das Anwendungspotenzial dieser neuen Materialien beträchtlich zu erweitern.“ □

Link

[www.fos4x.de](http://www.fos4x.de)

# Visionäre mit Weitblick gesucht



Innovative Köpfe legen Wert auf eine gute Ausbildung. Carl Zeiss auch.  
Bildung ist der erste Schritt zu einer erfolgreichen Bewerbung.  
[www.zeiss.de/karriere](http://www.zeiss.de/karriere)



We make it visible.



Fotos: Heddergott / TUM

# „Unser Gehirn besteht aus Memristoren“

**Diese provozierende These vertritt Leon Chua, der zurzeit am TUM-IAS als Fellow tätig ist, und er kann sie eindrucksvoll belegen**

Links

[www.tum-ias.de](http://www.tum-ias.de)  
[www.cvl-a.de](http://www.cvl-a.de)



Klaus Mainzer (l.), Leon O. Chua (M.), Patrick Dewilde (r.)

**M**anchmal sind Querdenker nötig, um frischen Wind in festgefahrene Diskussionen zu bringen. Leon Chua ist einer von ihnen. Schon 1971 hat der heute 74-jährige Professor an der University of California in Berkeley das noch fehlende vierte Schaltelement der passiven Schaltungstechnik vorhergesagt, den Memristor. Erst kürzlich wurde seine Prognose großartig bestätigt, als Hewlett Packard einen solchen Memristor erstmals baute. Chuas Komplexitätstheorie, die die Welt als Rechenmaschine erklärt, die auf einfachsten Prinzipien aufbaut, konnte sich bisher jedoch noch nicht allgemein durchsetzen. Bei seinem Besuch am Institute for Advanced Study der TU München (TUM-IAS) sprach Faszination Forschung mit dem Wissenschaftler, mit IAS-Direktor Professor Patrick Dewilde und Professor Klaus Mainzer, Direktor der Carl von Linde-Akademie.

**Herr Professor Chua, fühlen Sie sich mehr als Ingenieur, als Physiker, als Biologe oder als Philosoph?**

**Chua:** Eigentlich von allem ein bisschen. Ich betätige mich auf all diesen Feldern, und ich finde alle gleich wichtig. Die Zukunft wird interdisziplinär sein. Man sollte keine Mauern um sich aufbauen, indem man sagt, ich mache nur Elektrotechnik oder Physik oder Biologie. Wenn es nicht gelingt, die Probleme anderer Fachrichtungen zu verstehen, wird es keinen Fortschritt geben.

**Dewilde:** Seine Vielseitigkeit ist einer der Gründe, warum wir Professor Leon Chua ans IAS eingeladen haben. Wir bemühen uns, eine interdisziplinäre Sicht der Dinge zu fördern. Jeder gute Forscher informiert sich über seine Fachgrenzen hinaus; er sollte immer ▶

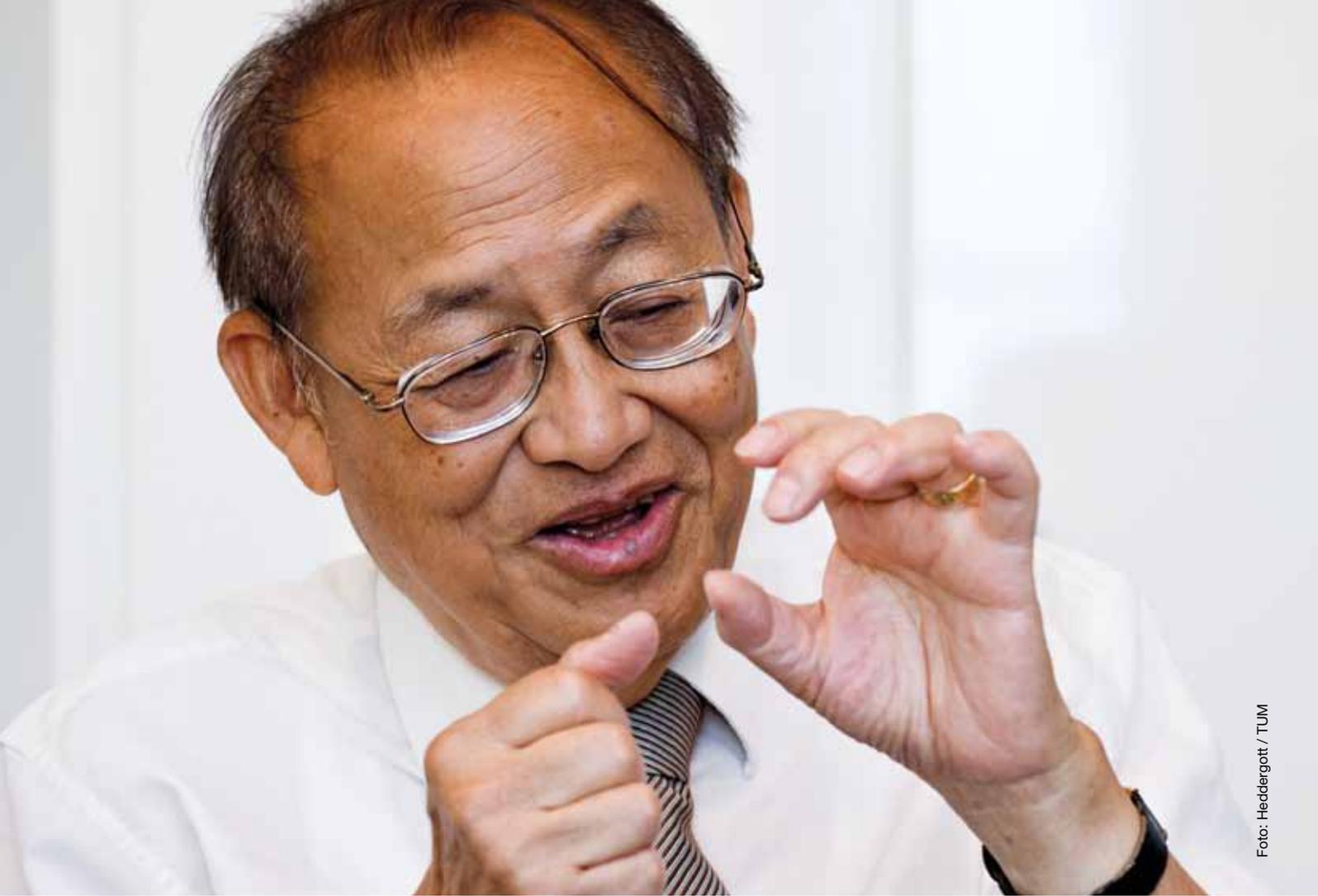


Foto: Heddergott / TUM

auch wissen, was außerhalb seines Gebiets vor sich geht. Außerdem hat Leon so beeindruckende Arbeiten aufzuweisen, dass jede technisch orientierte Universität daran interessiert sein muss. Was er macht, ist extrem wichtig für die Grundlagen der Technik. Und für mich persönlich lag die Hauptmotivation, ihn einzuladen, darin, dass er grundlegende Modelle erarbeitet hat, sei es für mechanische oder elektrische Phänomene, sei es für Nerven, das Gehirn, Biologie oder Kosmologie. Und ich finde, gute Modelle sind das Wichtigste überhaupt.

**Chua:** In der Tat beruht ja alles, was wir machen, auf Modellen. Die Wirklichkeit ist so komplex, dass wir zwangsweise darauf zurückgreifen müssen. Die Kunst liegt darin: Wie führe ich einen komplizierten Sachverhalt auf einfache Prinzipien zurück? Wie kann ich Gleichungen formulieren, deren Lösung schließlich das richtige Ergebnis für mein Problem ergibt? Ich suche immer das einfachste Modell, die einfachste Gleichung, die alles erklären kann, was man bei Experimenten beobachtet. Ich nenne sie auch „Stammzellen-Gleichung“, weil sich alles aus ihr entwickeln kann. In meiner Komplexitätstheorie sind es die Rechenvorschriften für einen zellulären Automaten.

**Mainzer:** Um Leons Arbeit zu verstehen, müssen wir in der Geschichte zurückgehen. Dass das Universum eine Art Rechenmaschine sei, faszinierte Wissenschaftler schon seit den Tagen des Universalgelehrten Gottfried Wilhelm Leibniz im 17. Jahrhundert. Er stellte sich alle Abläufe der Natur wie ineinandergreifende Zahnräder vor, die im Prinzip vollständig berechenbar seien. Konrad Zuse griff 1945/46 diesen Gedanken von Leibniz auf und postulierte, der Kosmos selbst lasse sich als gigantische Rechenmaschine auffassen. Zuse baute diesen Einfall zur Idee des „Rechnenden Raums“ aus und schrieb 1969 unter diesem Titel ein Buch, in dem er sein Konzept rechnender Module auf die Kosmologie anwandte. Bemerkenswert ist, dass sein großer Rivale John von Neumann, der an der Entwicklung des ersten amerikanischen programmgesteuerten Computers beteiligt war, Ende der 1950er-Jahre die Theorie zellulärer Automaten begründete.

#### **Was kann man sich darunter vorstellen?**

**Mainzer:** Einen zellulären Automaten können wir uns wie ein Schachbrett vorstellen, dessen Felder („Zellen“)

<b>Kurzbiografie</b>	<b>Prof. Dr. Leon O. Chua</b>
<p>Prof. Dr. Leon O. Chua wurde am 28. Juni 1936 auf den Philippinen geboren. 1959 erlangte er am Mapua Institute of Technology in Manila seinen Bachelor of Engineering, 1961 am MIT seinen Master und 1964 seinen Ph. D. an der University of Illinois, Urbana-Champaign. Danach war er Assistenzprofessor an der Purdue University, wo er 1967 zum Dozenten ernannt wurde. 1970 ging er an die University of California in Berkeley, wo er seither als Professor tätig ist. 1971 postulierte er den Memristor. 1983 beschrieb er den Chua's Circuit. 1988 führte er Zellulare Nichtlineare Netzwerke (CNN) ein. Er ist international bekannt für seine Beiträge zur Chaostheorie, zu Zellularen Nichtlinearen Netzwerken und zur Komplexitätstheorie.</p>	

*„In den nächsten Jahren wird es große Fortschritte in der Hirnforschung und beim Bau von hirnähnlichen Computern geben“*

Leon O. Chua

ihre Zustände – die zum Beispiel durch unterschiedliche Färbung charakterisiert sind – nach einfachen Regeln verändern. So entstehen Muster, die wie zelluläre Organismen wachsen und sich sogar reproduzieren können. John Conway entwickelte daraus eine Simulation der biologischen Evolution – er nannte sie Game of Life –, von der sich mathematisch beweisen lässt, dass sie auf einer sogenannten universellen Turing-Maschine verwirklicht werden kann, die erdacht wurde von dem britischen Logiker und Mathematiker Alan M. Turing. Sie ist der theoretische Prototyp eines universell programmierbaren Computers und der Ausgangspunkt für Leons Theorie.

**Chua:** Das ist richtig. Es ist mir gelungen, mithilfe dieses Modells Regeln zu entwickeln, die viele Phänomene unserer Welt erklären, etwa Regeln der Symmetrie oder des Chaos. Alles ergibt sich aus den ursprünglichen, einfachsten Rechenschritten eines solchen Automaten. 90 Prozent von dem, was ich erzähle, verstehen sogar Schüler. Ein neues Konzept muss nicht unbedingt kompliziert sein. Und ich sage voraus, dass in 30 Jahren Schulkinder aus ihren Büchern das lernen werden, was

ich heute erzähle. Mit meiner Theorie kann ich erklären, was ein Attraktor ist, wie Dynamik, Oszillation oder Chaos entstehen. Man kann das alles verstehen, auch ohne fortgeschrittene Mathematik.

### **Könnten Sie das etwas genauer erklären?**

**Chua:** Stellen Sie sich vor, unser zellulärer Automat besteht aus einem Band mit Zellen, die entweder rot oder blau sein können. Jede Zelle verändert sich nun gemäß vorher festgelegter Regeln, die durch die Farbe der Nachbarzellen bestimmt werden. Je nachdem, welche Farbe diese haben, ändert sich die mittlere Zelle oder bleibt gleich. Für die drei Zellen gibt es also acht verschiedene Möglichkeiten. Das ergibt genau  $2^3$ , also 256 mögliche Regeln, nach denen sich die Zellen verändern können. Nun kann man diese Regeln in vielen Schritten hintereinander immer wieder anwenden, und so entstehen im Lauf der Zeit Muster. Je nach Regel sind sie ganz unterschiedlich: So gibt es Fälle, wo sich die Farben nach und nach völlig durchmischen. In anderen Fällen kann es sein, dass Symmetrien entstehen. Und wieder in anderen Fällen kann es passieren, dass sich das Ergebnis einem ganz bestimmten Wert annähert, der dann konstant bleibt. Man spricht dann von einem Attraktor. Dies ist eine Weiterentwicklung der Arbeiten von Stephen Wolfram, die er 2002 in seinem großartigen Buch „A New Kind of Science“ dargestellt hat.

### **Inwiefern kann dieses Modell die Welt abbilden?**

**Chua:** Wir finden viele Analogien zwischen dem Verhalten des zellulären Automaten und den physikalischen Phänomenen. So entsprechen bestimmte Regeln sehr genau den Symmetrien, die wir in der Teilchenphysik und in der Kosmologie finden. Die Theorie zeigt auch, wo eine Zeitumkehr möglich ist und wo nicht. Überall dort nämlich, wo die Rechenregeln eine Erhöhung der Unordnung – die wir Entropie nennen – verursachen, überall dort ist eine Zeitumkehr nicht möglich. Das entspricht genau unseren Beobachtungen in der Physik. Ein weiteres Beispiel ist die Vernichtung von Materie mit Antimaterie unter Entstehung von Energie. Auch das lässt sich mit den Rechenregeln in zellulären Automaten nachbilden. Und ich will sogar so weit gehen zu behaupten, dass man selbst den Urknall durch eine passende Regel nachahmen kann. Aus einem einzigen Punkt entsteht mit dieser Regel alles, und es wiederholt sich nie.

**Mainzer:** Die Abbildung der physikalischen Welt in zellulären Automaten ist aber nicht bloß eine Metapher. Sie setzt voraus, dass wir zelluläre Automaten wie in der Physik als dynamische Systeme durch Differenzial- ▷

**Wie ein Memristor funktioniert**

Im Jahr 2008 bauten Forscher des Computerherstellers Hewlett Packard in Kalifornien zum ersten Mal einen Memristor, wie ihn Leon Chua schon 1971 vorhergesagt hatte. Sie realisierten das „Gedächtnis“ mithilfe eines Bauelements aus Titan-Dioxid. Dazu packten sie zwei Schichten des Materials übereinander, die unterschiedlich mit Sauerstoff-Fehlstellen besetzt sind. Je nach Richtung und Höhe der Spannung, die man anlegt, breiten sich diese Sauerstoff-Fehlstellen im gesamten Material aus oder konzentrieren sich in der Nähe der Oberfläche. Dort bleiben sie und verändern den Widerstand des Materials, auch wenn der Strom nicht mehr fließt.

Analogie mit einer Flüssigkeit: Je nach Durchflussmenge erweitert oder verengt sich die Dicke des Rohrs, damit ändert sich auch der Widerstand, den das Rohr der Flüssigkeit entgegensetzt.

<b>Kurzbiografie</b>	<b>Prof. Dr. Patrick Dewilde</b>
<p>Prof. Dr. Patrick Dewilde ist einer der weltweit führenden Ingenieure auf den Gebieten System-Netzwerktheorie, Signalverarbeitung und Elektronische Designautomation. Mit zahlreichen Gastprofessuren (u. a. an der Stanford University, in Berkeley und am Weizmann Institute in Israel) hat Dewilde sein internationales Netzwerk gekräftigt und kam 2003 als Preisträger der Alexander von Humboldt-Stiftung an die Technische Universität München. Seit 2008 ist er Direktor des Institute for Advanced Study der TUM. Bis 2007 war Professor Dewilde Chef der niederländischen Technologiestiftung STW und Direktor des Delft Institute for Microelectronics and Submicrotechnologies an der Universität Delft. Seit 1981 ist Dewilde IEEE Fellow, seit 1995 ordentliches Mitglied der Königlichen Niederländischen Akademie der Wissenschaften, 2006 wurde er „Knight of the Order of the Dutch Lion“.</p>	

*„Naturwissenschaftler versuchen zu verstehen, Ingenieure versuchen, nützlich zu sein. Das TUM-IAS will beides gleichzeitig ermöglichen“*  
 Patrick Dewilde

gleichungen beschreiben. So werden exakte Prognosen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede deutlich. Daran arbeiten wir derzeit in gemeinsamen Publikationen.

**Sie haben 1971 den Memristor vorhergesagt. Haben Sie auch für ihn ein einfaches Modell?**

**Chua:** Ja. Er lässt sich berechnen aus den Elementen Widerstand, Induktionsspule und Kondensator. Mir wurde 1971 klar: Im Raum der vier Größen Strom, Spannung, Ladung und magnetischer Fluss fehlte bislang bei den sechs möglichen Zweierbeziehungen ein passives Element, das Ladung und magnetischen Fluss verknüpft. Deshalb postulierte ich ein weiteres Element, das ich Memristor nannte. Es handelt sich dabei um Komponenten, die einen variablen Widerstandswert besitzen und gleichzeitig die Fähigkeit, diesen Widerstandswert zu behalten, auch wenn der Strom ausgeschaltet wird – eine Art Widerstand mit Gedächtnis. Das ist im Grunde ein ganz einfaches Modell.

**Dewilde:** Ich glaube, da gibt es noch mehr. Das Modell besteht aus Differenzialgleichungen, aber auch aus der



Foto: Heddergott / TUM

Wechselwirkung zwischen den Einzelteilen und dem Austausch von Erhaltungsgrößen wie Energie. Natürlich sind die Einschränkungen und Randbedingungen für die Gleichungen in verschiedenen Gebieten unterschiedlich, aber es gibt gemeinsame Schemata. Und ich denke, das sind die Leitideen der Wissenschaftler. In diesem Sinne mag der Memristor ein Leitmotiv auch für andere Disziplinen sein.

#### **Kann Ihr revolutionäres Memristormodell die wissenschaftliche Welt verändern?**

**Chua:** So weit würde ich nicht gehen. Aber wie schon Max Planck gesagt hat: „Die Wahrheit triumphiert nie, ihre Gegner sterben nur aus.“ Deshalb dauert es oft so lange, bis sich neue Ideen durchsetzen. Die Studenten der nächsten Generation werden dieses Modell schon in ihren Lehrbüchern finden; für sie wird es bald selbstverständlich sein. Das wird noch Jahre dauern, aber ich glaube, es ist einfach wichtig, Fortschritte zu machen. Wir haben nun schon genug Zeit verloren, weil wir dieses Modell zum Beispiel nicht zur Erklärung biologischer Sachverhalte herangezogen haben.

#### **Was hat es damit auf sich?**

**Chua:** Sogar primitive Lebewesen wie eine Amöbe funktionieren danach. So lässt sich beispielsweise das Verhalten der Amöbe, wenn man sie wiederholten Temperaturänderungen aussetzt, durch das Memristormodell erklären. Aber auch das menschliche Gehirn. Der Memristor ist das Missing Link, um molekulares Gedächtnis und Lernen zu verstehen.

**Dewilde:** Es gab unter Forschern eine lange Diskussion darüber, wie viel Erinnerung tatsächlich in der neuronalen Zelle steckt. Man schätzte 20.000 bis 100.000 Bits. Aber keiner konnte sagen, wo diese Bits stecken sollten. Jetzt hingegen, mit dem Memristormodell, wissen wir, wo die Bits stecken: in den Synapsen. Denn sie sind der einzige Teil, der sich ändern kann. Das ist schon eine sehr praktische Art, die Dinge zu betrachten.

**Chua:** Das ist völlig richtig. Wenn man etwas lernt, muss sich etwas verändern. Und in der Synapse ist es ein Protein, das wächst oder verschwindet. Das ist reine Chemie. ▶



Foto: Heddergott / TUM

**Dewilde:** Das gibt uns ein sehr genaues Modell, wo das Gedächtnis im Gehirn sitzt, und nicht nur da, sondern sogar in der Amöbe, die gar kein Gehirn besitzt.

**Mainzer:** Heute Morgen benutzten Sie einen wunderbaren Satz. Sie sagten: Die Amöbe hat kein Gehirn, aber sie hat „mind“, das was wir etwas unzulänglich mit „Geist“ ins Deutsche übersetzen. Das ist doch die Idee von Turing. „Mind“ beruht nicht auf dem menschlichen Gehirn, dieser biologisch-chemischen Maschinerie, sondern kann sich durch unterschiedliche Mechanismen äußern. Warum also nicht auch bei einer Amöbe? Ich finde, das ist eine großartige Idee.

**Dewilde:** Ich möchte noch ein anderes Beispiel nennen, das zeigt, was innovative wissenschaftliche Ideen bewirken können: Der große industrielle Durchbruch der Mikroelektronik kam doch mit den Arbeiten der amerikanischen Computerwissenschaftler Carver Mead und Lynn Conway, die Anfang der 80er-Jahre einfache Modelle für das Design hochintegrierter Schaltkreise entwickelten. Sie revolutionierten damit den Bau komplizierter Chips und führten deren Design auf einfache

Prinzipien zurück. Daran kann man sehen, wie erstaunlich mächtig Modelle wirken können. Denn eines kann man mit Sicherheit behaupten: Die Computer, die daraufhin entstanden, haben die Welt verändert.

**Mainzer:** Mir erscheint eines typisch für führende Forscher: Sie sind nicht nur an der technischen Konstruktion von Maschinen interessiert, sondern sie haben auch Modelle dafür. Und sie haben Visionen. Ich glaube, das trifft auch auf Leon Chua zu. Auf der einen Seite ist er Elektrotechniker, und der Transistor ist ein elektrotechnisches Gerät, das zweifellos die Welt verändert hat. Aber auf der anderen Seite steckt dahinter ein Modell, das sich auch noch auf viele andere Felder der Wissenschaft anwenden lässt und für andere Forscher fruchtbar werden kann.

**Der Memristor stellt ja sozusagen das Gedächtnis eines Computers dar. Wird er zur Entstehung neuer Qualitäten führen, die man noch nicht kennt?**

**Chua:** In gewissem Sinne schon. Es wird künstliche intelligente Maschinen geben. Die künstliche Intelligenz

„Führende Forscher sind nicht nur an der technischen Konstruktion von Maschinen interessiert, sondern sie haben auch Modelle dafür“

Klaus Mainzer

Kurzbiografie	Prof. Dr. Klaus Mainzer
<p>Prof. Dr. Klaus Mainzer ist Lehrstuhlinhaber für Philosophie und Wissenschaftstheorie und Direktor der Carl von Linde-Akademie an der Technischen Universität München (TUM). Er ist Principal Investigator und Mitglied des Boards des TUM Exzellenz-Forschungsclusters CoTeSys (Cognition for Technical Systems). Seine Forschungsschwerpunkte sind u. a. Grundlagen von Wissenschaft und Technik, künstliche Intelligenz, komplexe dynamische Systeme in Natur und Gesellschaft.</p> <p>Aktuelle Buchpublikationen: „Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz“ (Mentis, 2010), „Komplexität“ (UTB, 2008), „Der kreative Zufall: Wie das Neue in die Welt kommt“ (C. H. Beck, 2007), „Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind“ (Springer, 5. Aufl. 2007).</p> <p>Ein weiteres Interview mit Prof. Mainzer wurde in Faszination Forschung 4 (Mai 2009) veröffentlicht. Darin diskutiert er mit dem Ingenieur Prof. Dr. Martin Buss die Chancen und Grenzen des Verhältnisses von Mensch und Maschine.</p>	

begann ja vor rund 50 Jahren am MIT und war nie so richtig erfolgreich. Das kommt daher, dass sie auf Programmen beruht. Dadurch wird sie zu kompliziert und zu langsam. Aber ein Memristor benötigt keine Software. Er macht alles von alleine. Um etwas zum Funktionieren zu bringen, benötigt man immer die richtigen Mittel. Lassen Sie mich ein Beispiel geben: Wenn Sie versuchen, ein Quadrat durch runde Figuren darzustellen, wird das nicht gelingen, weil Sie nicht die richtigen Mittel haben. Wenn Sie aber Quadrate dazu nehmen, dann gelingt das ganz einfach. Es kommt also immer darauf an, die richtigen Mittel zu verwenden. Und für intelligente Computer benötigen Sie eben auch Memristoren.

**Die künstliche Intelligenz (KI) ist also nicht tot, sondern man verwendete bisher die falschen Mittel?**

**Dewilde:** KI ist überhaupt nicht tot! Sie ist nur nach wie vor ungelöst, und das ist ein großer Unterschied.

**Chua:** KI wird immer noch als Software verstanden im Sinne von sehr klugen Programmen. Aber wenn man die Gedanken programmieren will, wird die Sache sehr

langsam, wenn man sie auf dem Computer laufen lässt. Es ist etwas ganz anderes, wenn die Intelligenz bereits in der Hardware selbst steckt. Die Synapsen im Gehirn sind diese Art von Hardware. Da gibt es niemanden, der Programme schreibt für die Nervenzellen. Wenn man das so betrachtet, wird es in den nächsten Jahren große Fortschritte geben in der Hirnforschung und beim Bau von hirnähnlichen Computern.

**Oft wird beklagt, dass sich Wissenschaftler aus unterschiedlichen Fachrichtungen gar nicht mehr verstehen. Wäre es nicht eine lohnende Aufgabe für das IAS, hier Brücken zu schlagen?**

**Dewilde:** Genau das versuchen wir. Wir versuchen, Leute zusammenzubringen. Aber es gibt keine absolute Wahrheit. Wir arbeiten mit Modellen, und die sind immer Vereinfachungen. Sie stellen nie die ganze Wahrheit dar. Und wir regen darüber Diskussionen an. Ein Beitrag wie der von Leon ist sehr wichtig in vielen Bereichen der Wissenschaft, deshalb versuchen wir, seine Ideen zu verbreiten.

**Mainzer:** Es ist ja eine der Visionen der TUM, Natur- und Ingenieurwissenschaften zusammenzubringen. Das ist auch hier im IAS und in der Carl von Linde-Akademie, die ich vertrete, eine der Hauptideen. Die Arbeit von Leon Chua zeigt, dass die technische Realisation und die Arbeit der Ingenieure verbunden ist mit breiten wissenschaftlichen Visionen und interdisziplinären Modellen. Und das liegt genau auf der Linie unserer Hochschule.

**Dewilde:** Die Kommunikation mit Forschern wie Leon dient nicht nur dem Verständnis, sondern ist extrem nützlich auch im praktischen Sinne. Der Unterschied zwischen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren ist ja der: Naturwissenschaftler versuchen zu verstehen, und Ingenieure versuchen, nützlich zu sein. Und hier kann man beides gleichzeitig tun. Der Nutzen des Verstehens.

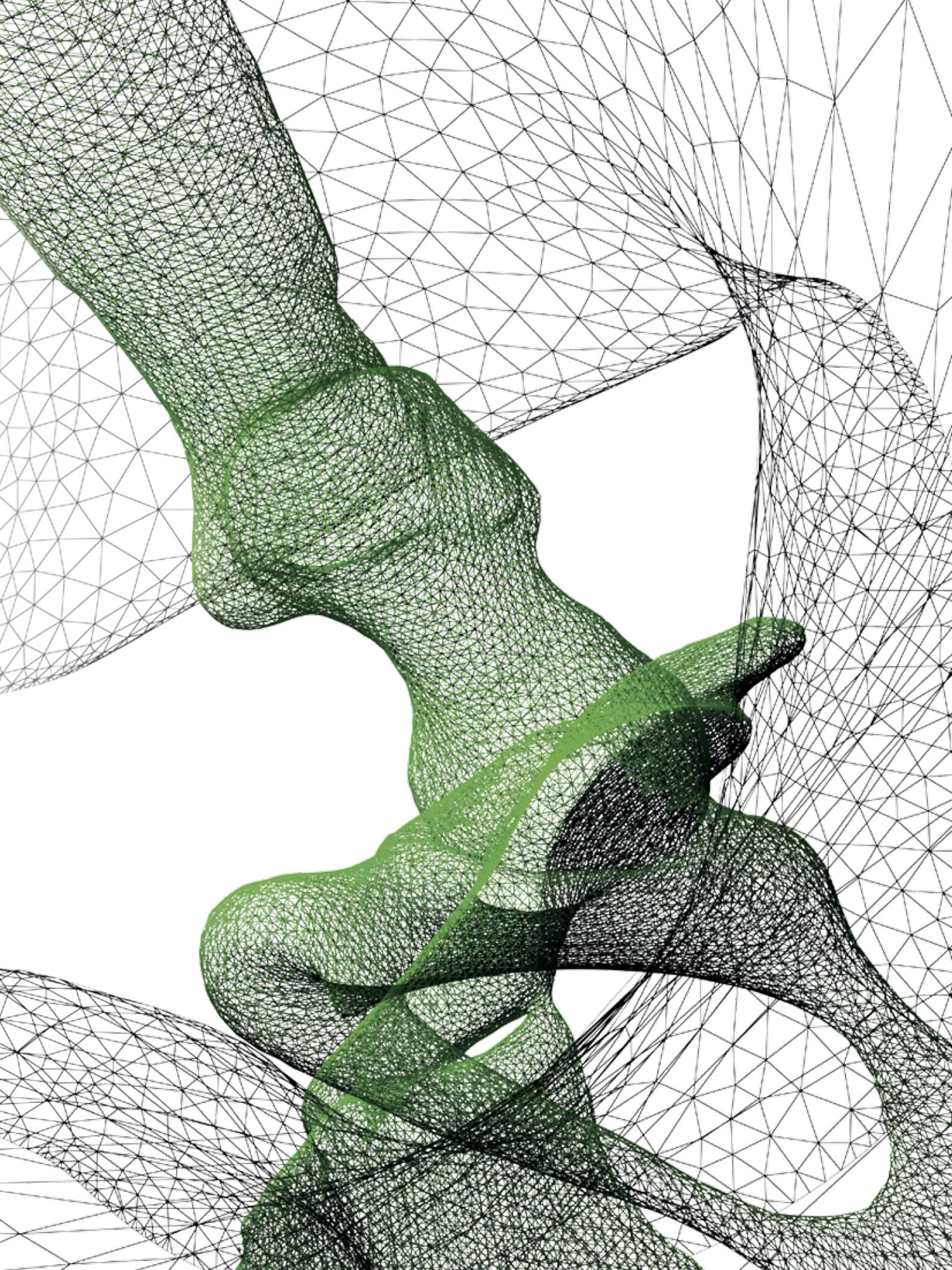
**Chua:** Ich zitiere da gerne Maxwell. Er hat gesagt: „Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie.“

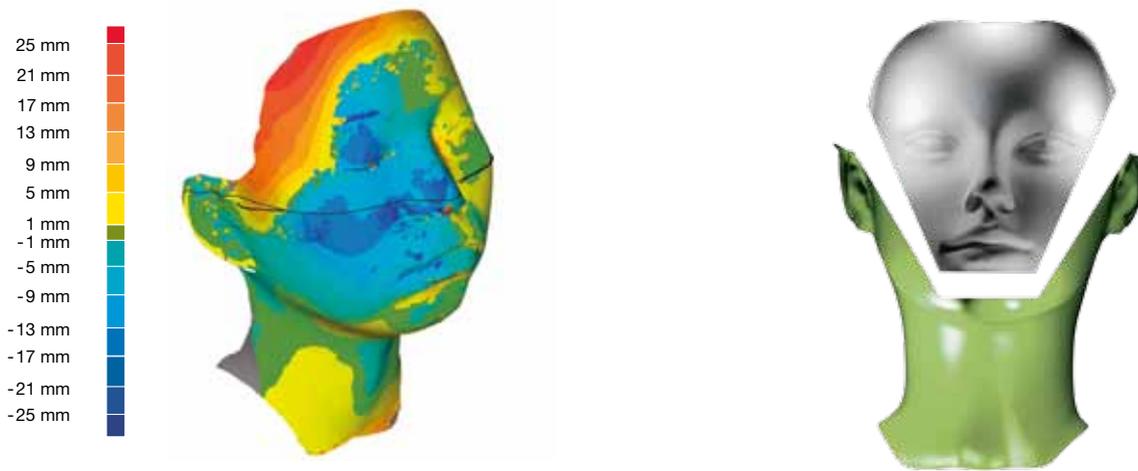
Das Interview führte Brigitte Röthlein

# 3-D im OP – von der Industrie in die Medizin

Ein Team aus Medizinern, Informatikern, Ingenieuren, Physikern und Computerspezialisten am Klinikum rechts der Isar entwickelt eine Methode, die Plastischen Chirurgen die 3-D-Simulation von Körperoberflächen und Weichteilgewebe erlaubt

Bild: edlundsepp nach CAPS





**Die Mediziner machen sich vor der Operation** ein genaues Bild von der betroffenen Gesichtsregion und visualisieren die Rekonstruktion. Im Bild links verdeutlicht das Farbschema – ähnlich den Erhebungen und Vertiefungen auf einer Landkarte – die Abweichungen der betroffenen Gesichtshälfte von der gespiegelten gesunden Hälfte. Die virtuelle 3-D-Rekonstruktion (rechts) zeigt die Gesichtsform anhand des eingescannten Gesichts der Mutter der Patientin

Bild links: CAPS; Bild rechts: edlundsepp nach CAPS

**D**ie Nase besteht nur noch aus zwei Löchern, die rechte Kieferhöhle ist zerstört, dort, wo vorher ein Auge war, klafft ein Loch. Xiao Liewen aus Schanghai ist 14 Jahre alt, als sie im Bad ohnmächtig wird und mit dem Gesicht auf einen Heizstrahler fällt. Eine halbe Stunde vergeht, bis die Familie das Mädchen findet und ins Krankenhaus bringt. Die Ärzte retten Xiao Liewens Leben. Mehr konnten sie für die Schülerin nicht tun. Ihre Augenhöhle ist immer noch offen, der Kopf deformiert. Das war 2003, für eine plastische Operation fehlten das Geld und die Spezialisten. Dank einer Spendenaktion kommt Xiao Liewen drei Jahre später nach München ans TUM-Klinikum rechts der Isar und wird mehrmals operiert. Heute hat die junge Frau wieder ein Gesicht.

<b>Link</b>
<a href="http://www.caps.me.tum.de">www.caps.me.tum.de</a>

Geholfen hat eine Technik, mit der Köperteile dreidimensional dargestellt werden. Bei Xiao Liewen wurde zunächst die intakte linke Gesichtshälfte gespiegelt und die Nase ihrer Mutter eingescannt. Anschließend fertigte der Plastische Chirurg Laszlo Kovacs das entsprechende 3-D-Modell an – als Vorlage für den Operateur. Xiaos Nase formt Letzterer aus einem Hautlappen aus ihrem Unterbauch, er setzt Knorpel ein, modelliert

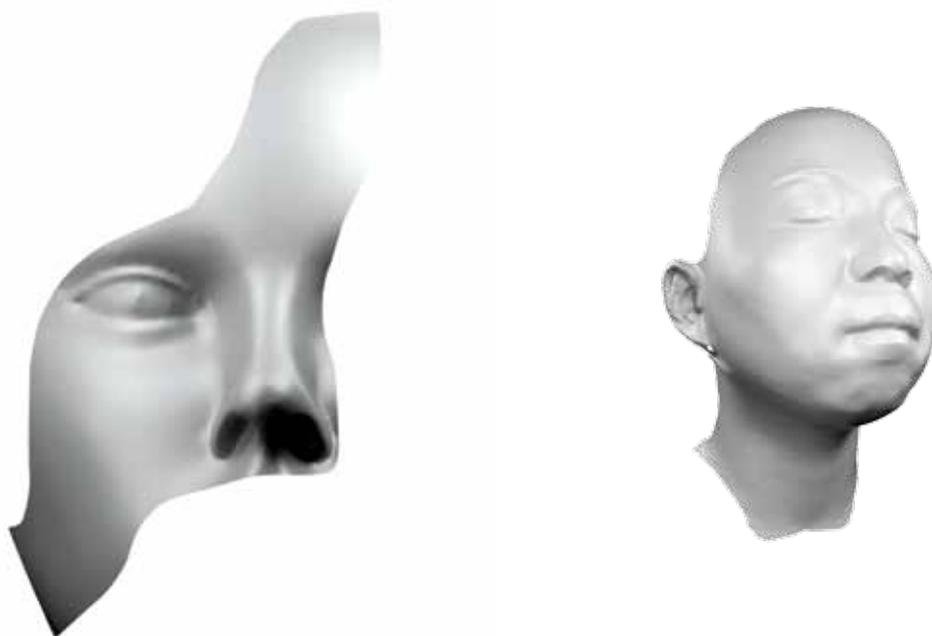


Bild links: edlundsepp nach CAPS; Bild rechts: CAPS

**Schon vor der Operation haben die Ärzte** ein genaues Modell des Patientengesichtes, das sie wiederherstellen möchten. Dazu gestalten sie ein dreidimensionales Volumenmodell der zerstörten Gesichtregion (linkes Bild). Zusammen mit dem eingescannten Gesicht der Patientin erstellen die Forscher daraus das virtuelle 3-D-Rekonstruktionsmodell des anzustrebenden Patientengesichtes, so wie es nach der Operation aussehen soll (rechts)

die Nasenlöcher. Dann heißt es warten, bis sich Blutgefäße bilden. Nach vier Wochen wird schließlich die neue Nase transplantiert. Als Nächstes ist das zerstörte Augenlid an der Reihe, später werden noch Kieferhöhle und Wange rekonstruiert.

### Dreidimensionale OP-Planung

„Wir beschäftigen uns seit rund zehn Jahren mit 3-D-Technologien, um Körperoberflächen und Weichteilgewebe zu erfassen. Das war der große Pluspunkt für diese Operation. Üblicherweise nutzt der Chirurg bei plastischen Operationen zweidimensionale Vorher-Nachher-Fotos als Grundlage für seine Arbeit, aber das ist zu ungenau“, berichtet Laszlo Kovacs. Der stellvertretende Klinikdirektor für Plastische Chirurgie ►

### Forschungsprojekt Sinus

Das Projekt Sinus wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie mit dem Programm „Förderung von innovativen Netzwerken“ (InnoNet) unterstützt. Dafür stehen 750.000 Euro zur Verfügung. Das Netzwerk bei Sinus besteht aus drei Forschungseinrichtungen und vier Industrieunternehmen: Das ist neben der federführenden Forschungsgruppe CAPS (Computer Aided Plastic Surgery) der Klinik für Plastische Chirurgie und Handchirurgie der TU München auch die Fakultät für Informatik (Computer Graphik & Visualisierung). Ein weiterer Partner ist die Fakultät Life Sciences der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Die industrielle Unterstützung kommt von den Firmen Steinbichler Optotechnik GmbH, CADFEM GmbH, PolyDimensions GmbH und VRLOGIC GmbH. Die Projektkosten übernimmt zu 90 Prozent das Wirtschaftsministerium, die restlichen 10 Prozent finanzieren die Industriepartner.



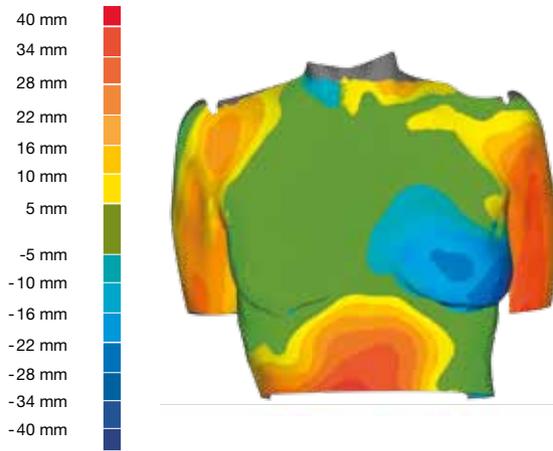
**Mit einem 3-D-Laserscanner** erfassen die Mediziner die weibliche Brustregion – hier gezeigt am Beispiel einer gesunden Frau. Aus den Daten erstellen sie ein Modell. Es dient zur Operationsplanung, etwa bei einer Wiederherstellungsoperation nach einer Krebserkrankung, vermittelt aber auch der Patientin bereits vor dem Eingriff einen Eindruck vom geplanten Operationsergebnis

und Handchirurgie am Klinikum rechts der Isar hat die Forschungsgruppe Computer Aided Plastic Surgery (CAPS) ins Leben gerufen: Rund zwölf Wissenschaftler aus drei Forschungszentren arbeiten am Projekt Sinus (siehe Kasten), dessen Schwerpunkt eine exakte patientenspezifische 3-D-Operationsplanung und -simulation auf dem Gebiet der Brustchirurgie ist.

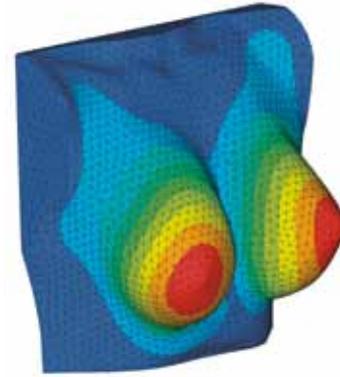
### **Von der Industrie in den OP**

„Die Industrie nutzt 3-D-Technologien seit längerer Zeit für die Produktentwicklung. Dieses Prinzip wollen wir auf den menschlichen Körper übertragen. Die Schwierigkeit für uns besteht unter anderem darin, die menschlichen Körperteile in ihrer Komplexität fehlerfrei wiederzugeben. Ein Knochen kennt keine rechten Winkel, keine

Ebenen, keine Symmetrien. Der Kotflügel eines Autos hat dagegen eine recht einfache statische Geometrie. Den können Sie in die Ecke stellen, er wird nie seine Position verändern. Der menschliche Körper atmet, er ist immer in Bewegung“, veranschaulicht der Mediziner. Die äußere Form erfassen die Wissenschaftler zunächst mit einer Art Laserlicht-Fotografie. In Sekundenschnelle entsteht dann im Computer ein individuelles, digitales Abbild des Körperteils eines Patienten. Für die Simulation des Gewebes haben die Mediziner gemeinsam mit ihren Kooperationspartnern eine Methodik entwickelt, mit der aus Ultraschall-, CT-, MRT-Bildern und 3-D-Scanaufnahmen je nach Geschlecht, Größe, Gewicht und Alter virtuelle, anatomische 3-D-Patientenmodelle entstehen.



**Das Farbschema** verdeutlicht die abweichende Brustform einer Patientin vor einer Brustwiederherstellungsoperation (links). Die Visualisierung dient der individuellen Planung der Operation



**Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode** berechnen die Forscher Patientenmodelle, die das physikalische Verhalten von Weichteilgewebe - hier der weiblichen Brustregion - simulieren

### 3-D-Patientenmodelle

„Wenn wir beispielsweise nach einer Krebserkrankung eine weibliche Brust rekonstruieren, können wir anhand der Modelle das Brustvolumen und die Hautoberfläche messen und die Symmetrie vergleichen. Der Chirurg kann bereits vor der Operation berechnen, wie groß das Gewebetransplantat für die Brustwiederherstellung sein sollte“, erläutert Laszlo Kovacs. Auch für die Patientinnen sei die 3-D-Visualisierung ein großes Plus, weil sie bereits vor dem Eingriff einen Eindruck vom operativen Ergebnis erhalten können.

Für die CAPS-Forschungsgruppe ist die 3-D-Visualisierung aber nur ein Etappenziel. Denn damit ist das physikalische Verhalten des biologischen Systems mit seinem Fett- und Drüsengewebe noch nicht erfasst,

geschweige denn simuliert. Lebendes Gewebe ist elastisch: Es reagiert auf Druck und verändert seine Form. Die Forscher wollten wissen, wie sich Weichteile unter Belastung verhalten, um ihre Reaktion mathematisch-physikalisch präzise und möglichst realistisch vorauszubestimmen. Die Technologie ihrer Wahl kommt aus dem Ingenieurwesen: die sogenannte Finite-Elemente-Methode (FEM), mit der die Experten das Verhalten von Festkörpern unter Alltagsbelastung vorhersagen. Das numerische Verfahren baut auf der Lösung von Differenzialgleichungen auf, die das Verhalten von Strukturen mathematisch beschreiben.

In der Industrie hat sich FEM schon lange bewährt. Besonders die Produktentwicklung profitiert davon: Entwicklungszeiten und späterer Änderungsaufwand ▶

werden reduziert, die Qualität wird verbessert. Damit lassen sich nicht nur Industrieprodukte, bevor sie gebaut werden, am Bildschirm auf ihre Tauglichkeit überprüfen. Auch in der Plastischen Chirurgie sollen deformierbare FEM-Modelle entstehen, mit denen biomechanische Veränderungen des Gewebes überprüft und simuliert werden. Für einen Patienten, der etwa eine Unterschenkelprothese benötigt, wäre eine vorherige Kontrolle seiner Gehhilfe ein Segen: In der Vergangenheit entstand zunächst ein Modell des Schafts aus Gips, bevor die Prothese hergestellt wurde. Hinterher lässt sich nicht mehr viel anpassen, mit der Folge, dass viele Betroffene unter Gelenkverschleiß, Rückenschäden oder schlecht heilenden Wunden leiden. In einem Verbundprojekt namens C.O.P.K.O. (Computerunterstützte Optimierung

der Prothesenschaftkonstruktion in der Orthopädiertechnik, siehe Kasten) entwerfen die Wissenschaftler patientenspezifische 3-D-Modelle von Oberschenkelstumpf und Prothesenschaft und überprüfen die Druckverhältnisse mittels FEM. Ist der Druck zu groß, kann die Form des Prothesenschafts noch vor der Herstellung optimiert werden.

### Planungswerkzeuge für Chirurgen

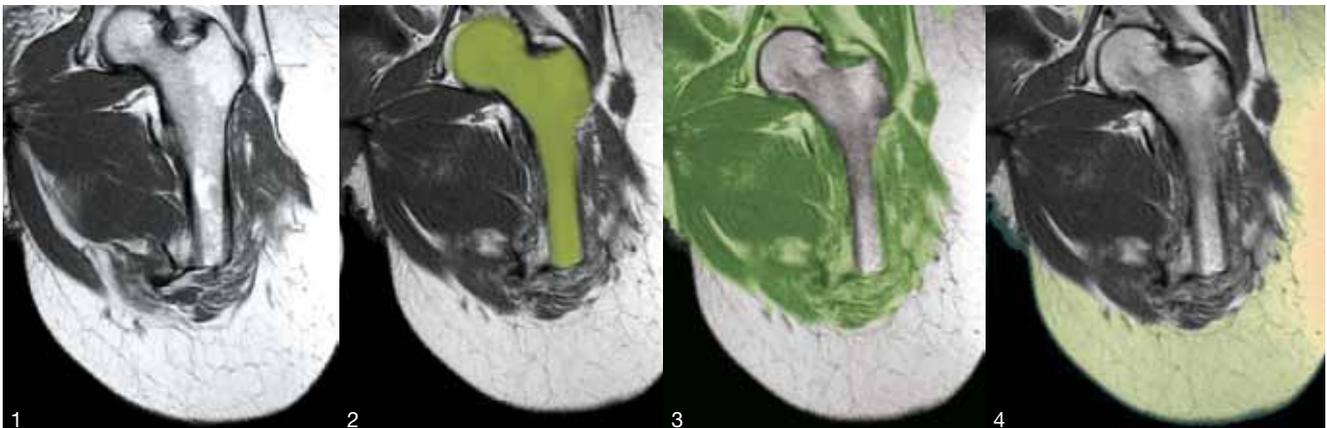
Bis dahin ist es noch ein langer Weg. Für die Forscher heißt es jetzt erst einmal: Ist die Modellierung präzise? Ist sie realistisch? Kann sich der Operateur wirklich damit vorbereiten? Langfristiges Ziel bei CAPS ist es, künftig den Medizinern Planungswerkzeuge an die Hand zu geben. Der Plastische Chirurg kann sich ▶

#### Forschungsprojekt C.O.P.K.O.

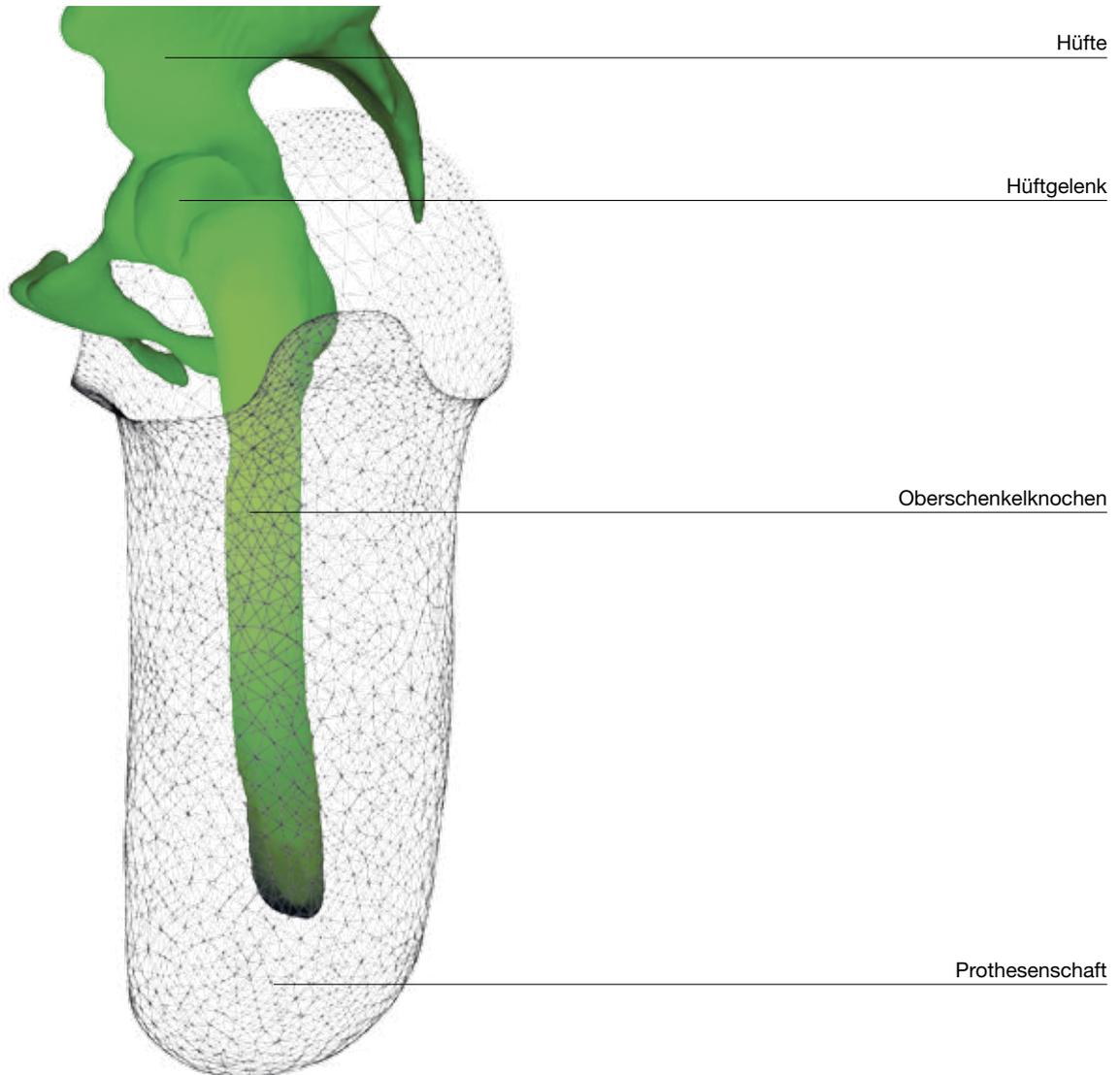
An C.O.P.K.O. (Computerunterstützte Optimierung der Prothesenschaftkonstruktion in der Orthopädiertechnik) sind neben der Klinik für Plastische Chirurgie und der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie die Firmen Gottinger Orthopädiertechnik GmbH, die CADFEM GmbH und die Materialise GmbH beteiligt. Ziel der

Projektpartner ist, die Versorgung mit Prothesen mithilfe moderner Bildgebungsverfahren und computerunterstützter Technologie zu verbessern und die individuellen Besonderheiten der Patienten zu berücksichtigen. Das Projekt wird von der Bayerischen Forschungstiftung gefördert.

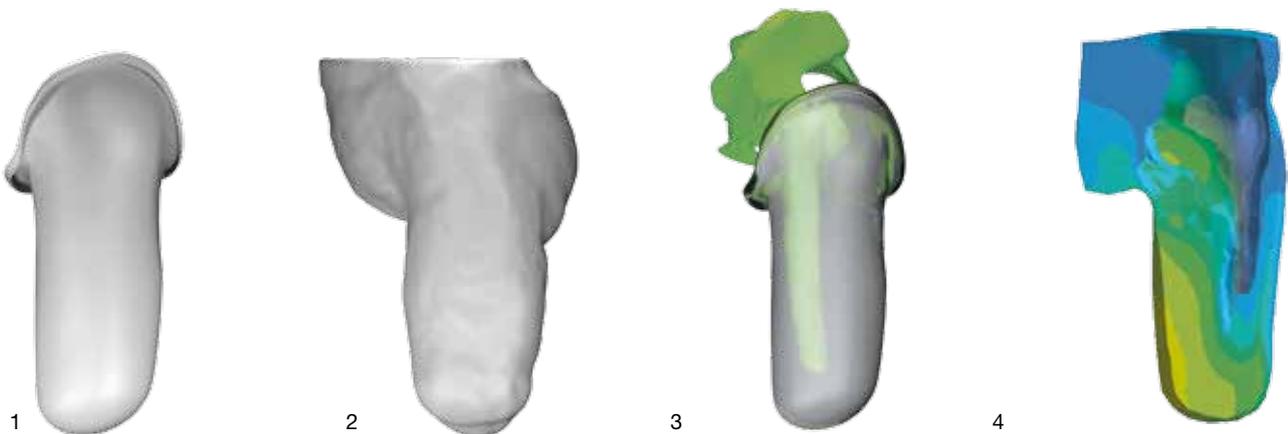
**Die Bilder aus dem Kernspintomografen** zeigen die anatomischen Bestandteile, hier am Beispiel eines Oberschenkelstumpfes (1). Am Computer markieren die Mediziner Knochen (2), Muskel (3) sowie Fett und Haut (4) einzeln und fügen dann die Daten zu 3-D-Modellen zusammen

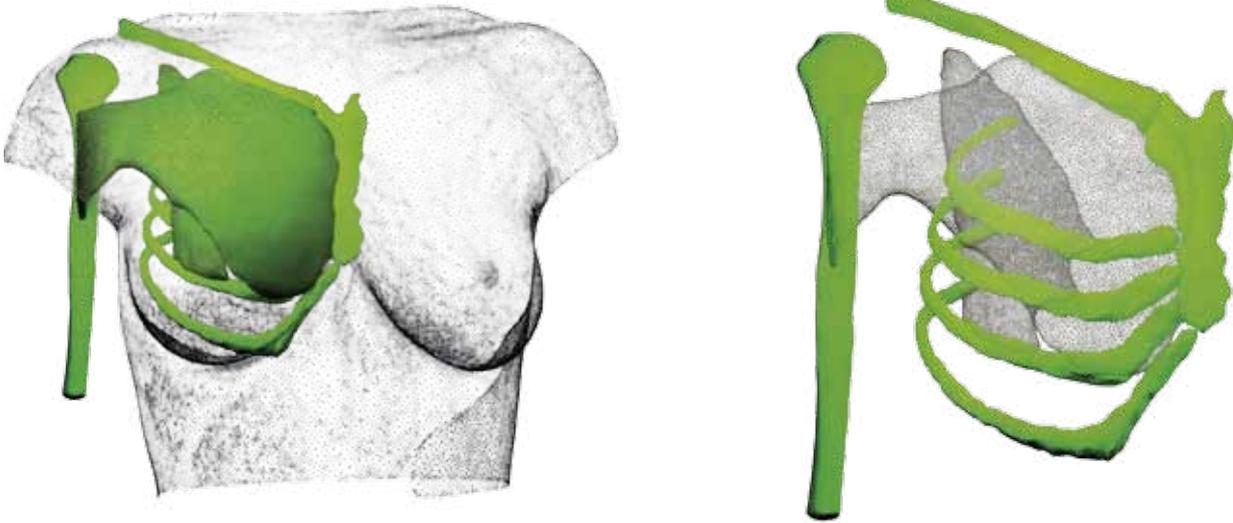


Bilder links: CAPS; Bilder rechts: edlundsepp nach CAPS



**Virtuelle Planung einer Oberschenkelprothese** anhand patientenspezifischer 3-D-Modelle: Eine neue Prothesenform wird vor der Herstellung auf ihren passgenauen Sitz überprüft. Hierzu wird die Prothese (1) virtuell an den individuellen Oberschenkelstumpf angepasst (2 und 3) und die Druckverhältnisse werden mithilfe der Finite-Elemente-Methode überprüft (4). So kann der Tragekomfort der Prothese optimiert werden





Anhand von Daten aus Kernspin- und Computertomografie erstellen die Mediziner virtuelle Rekonstruktionen komplexer anatomischer Regionen – hier des Oberkörpers. Dies ermöglicht beispielsweise eine bessere Visualisierung von Lagebeziehungen der Weichteilgewebe zum knöchernen Brustkorb

am FEM-Modell auf die Operation vorbereiten und möglichst viele Schritte virtuell durchgehen. Mit dieser Vorbereitung, die ebenso für die Ausbildung der Ärzte geeignet ist, kann er sich während des Eingriffs besser orientieren. Und: Der Erfolg lässt sich dann anhand objektiv messbarer Kriterien bewerten.

Die größte Herausforderung für die CAPS-Forschungsgruppe liegt in der anfallenden Datenmenge. Sie zu verarbeiten, entsprechende Algorithmen zu entwickeln, Optimierungsschleifen zu „fahren“ – dieser Aufwand ist auch für Hochgeschwindigkeitsrechner nicht zu unterschätzen. Und schließlich sollen die einzelnen OP-Planungsschritte in einen klassischen Arbeitsablauf (Workflow) eingebunden werden, um eine patientenspezifische 3-D-Operationsplanung und -simulation zu

ermöglichen. Das TUM-Klinikum setzt auf eine Kooperation mit Industriepartnern. Die Beteiligten entwickeln eine Software-Plattform, in der Patientendaten, virtuelle Modelle und Planungswerkzeuge gebündelt werden. Sie soll selbsterklärend und einfach zu handhaben sein. Wenn alles gut geht, ist die erste Version 2011 fertig. Davon profitieren neben der Plastischen Chirurgie auch Orthopäden und Unfallchirurgen.

Laszlo Kovacs erinnert sich noch gut an die Operationen von Xiao Liewen vor vier Jahren. „Mit der neuen FEM-Methode hätten wir die Eingriffe noch präziser planen können“, meint er. Die inzwischen 20-jährige Patientin aber, die ihm immer noch ab und zu schreibt, ist dankbar und zufrieden: „Ich fühle mich glücklich, mir geht es gut!“  
*Evdoxía Tsakiridou*

## Comneon

### Innovative Power in Mobile Communications



Comneon hat sich als junges und hoch innovatives Unternehmen auf die Entwicklung von Kommunikationstechnologien spezialisiert. Seit mehr als 20 Jahren ist das Unternehmen ein führender Anbieter von Softwareprodukten für die Mobile Kommunikation.

Mit dieser Geschichte gehört das Unternehmen zu den Pionieren im Mobilfunk. An verschiedenen Standorten in Europa, Asien und den USA arbeiten Soft- und Hardwareingenieure sowie Projektleiter an den Kommunikationstechnologien von morgen. Hinter hochmoderner Mobilfunktechnologie steckt nicht selten eine Software von Comneon. Zum Portfolio gehören folgende Anwendungen und Dienstleistungen:

- Comneon Protocol Stack Software für GSM, UMTS und LTE
- Comneon IMS Device Framework
- System Hardware

Die Produkte sind in allen bedeutsamen Märkten etabliert und Comneon lizenziert die Software an eine breite Kundenbasis. Dazu gehören internationale Halbleiterunternehmen, weltweite Netzbetreiber und namhafte Hersteller von Mobiltelefonen. Die Kunden können sich auf eine hohe Produktqualität verlassen, denn in der Software-Entwicklung und im Projektgeschäft kommen unterstützende Management-Tools wie u.a. ClearCase, ClearQuest oder RequisitePro zum Einsatz. Darüber hinaus arbeiten die Ingenieure von Comneon mit ihrem fundierten Know-how aktiv in den relevanten Standardisierungsgremien der Mobilfunkbranche (3GPP, OMA oder GSMA) mit. Der Hauptsitz des Unternehmens ist in Nürnberg. Die globale Präsenz unterstützt nicht nur die multi-kulturelle Unternehmensphilosophie, sondern auch den effektiven, regionalen Support vor Ort. Mit der internationalen Ausrichtung wächst auch das Unternehmen seit Jahren.

Comneon ist eine 100-prozentige Tochtergesellschaft der Infineon Technologies AG, einem internationalen Halbleiterhersteller. Als ein Teil des Infineon-Konzerns bieten wir eine breite Reihe von interessanten Einstiegs- und Aufstiegsmöglichkeiten an. Als engagierter Absolvent können Sie mit ehrgeizigen Plänen bei uns die Theorie in die Praxis umsetzen oder Sie bereichern mit fundierter Berufserfahrung unsere Kernkompetenzen. Ob Berufseinsteiger, Young Professional oder berufserfahrener Expert – bei Comneon gibt es für Direkteinsteiger mit technischem Hintergrund viele spannende Aufgaben. Die vielfältigen Einsatzgebiete geben unseren Bewerbern hervorragende Perspektiven in der Telekommunikationsbranche. Entscheiden Sie sich für ein Unternehmen mit besten Entwicklungschancen.



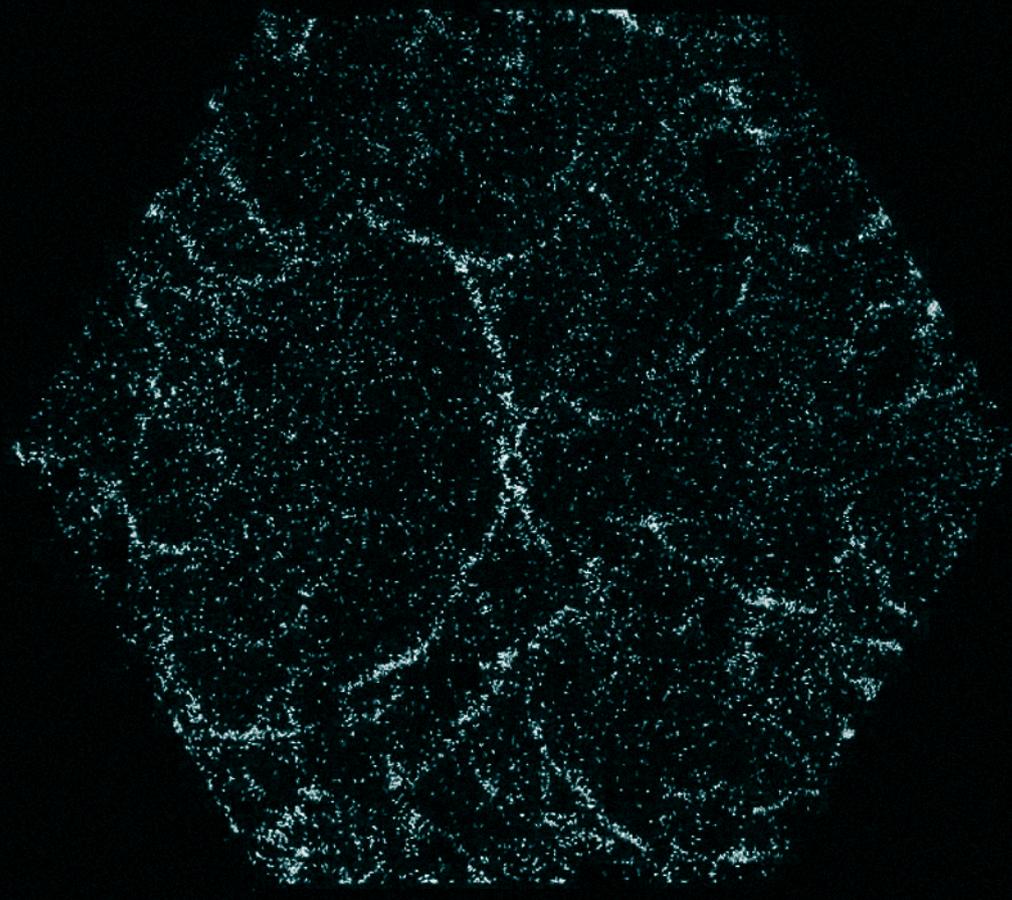
Das ist Ihre Chance, die Zukunft der Mobilien Kommunikation zu gestalten – mit Ihren Visionen, mit Ihrem Know-how und mit Ihrer Begeisterung. Wir freuen uns darauf, Sie kennenzulernen.

Alles Weitere erfahren Sie unter:  
[www.comneon.com](http://www.comneon.com) (Bereich: Careers)  
[www.infineon.com](http://www.infineon.com) (Bereich: Careers)

**Comneon and You – A Winning Team**



An Infineon Technologies Company



# Für Muster schwärmen

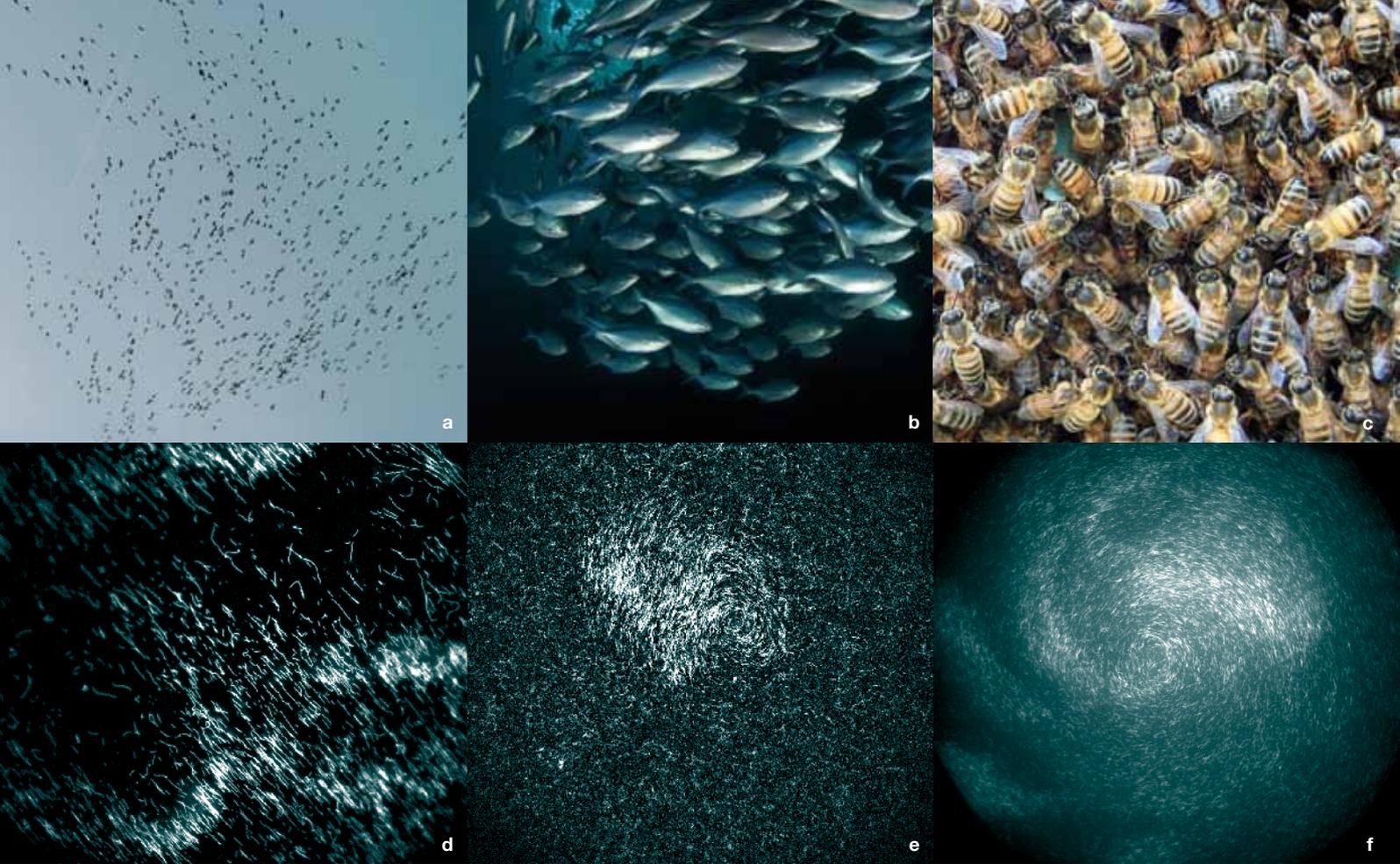
**Für den menschlichen Betrachter ist die geordnete, scheinbar choreografierte Bewegung von Hunderten von Fischen, Vögeln oder Insekten faszinierend. Ein Physiker-Team der TUM und der LMU untersucht die Entstehung und die vielfältigen Bewegungsmuster derartiger Schwärme, um grundlegende Fragen zum Verständnis komplexer Systeme aufzuklären**

Link
<a href="http://www.bio.ph.tum.de">www.bio.ph.tum.de</a>

„Alles bewegt sich fort, und nichts bleibt“ ist ein Satz, der auf den griechischen Philosophen Heraklit zurückgeführt wird. Das einzelne Individuum muss sich als Teil eines großen Ganzen, etwa eines Schwarms oder

einer Menschenmenge, zwangsläufig eigenen Gesetzmäßigkeiten unterordnen: Vogelschwärme bewegen sich auch ohne Dirigent wie choreografiert durch die Luft, und Fischeschwärme ändern blitzartig ihre Richtung, wenn ein Hai auftaucht. Doch die Wissenschaft rätselt noch: Gehorchen all diese Systeme denselben Gesetzen? Entsteht komplexes Gruppenverhalten aus individuellen Interaktionen von selbst und zwangsläufig? Ein Forscherteam um Professor Andreas Bausch, Lehrstuhl für Biophysik der TU München, und Professor Erwin Frey, Lehrstuhl für Statistische und Biologische Physik der LMU München, ist den Antworten auf der Spur.

Die Münchner Wissenschaftler haben nun ein biophysikalisches Modellsystem entwickelt, das es erlaubt, gezielt Experimente unter kontrollierten Bedingungen und in hoher Präzision durchzuführen. Volker Schaller vom TUM-Lehrstuhl für Biophysik verankerte dazu auf einer Oberfläche biologische Motorproteine, die lose darüberliegende Fasern des Muskelproteins Aktin in beliebige Richtungen transportieren können. Die Fasern haben einen Durchmesser von etwa sieben Nanometern, also sieben Millionstel Millimetern, und eine Länge von



**Selbstorganisation auf der Nanoskala:** Wie aus dem Nichts organisieren sich Aktinfilamente in Strukturen, wie etwa Wellen (d), geordnete Cluster (e) oder Spiralen (f). Auch in der Natur lassen sich bei Vögeln (a), Fischen (b) und Bienen (c) solche Phänomene beobachten

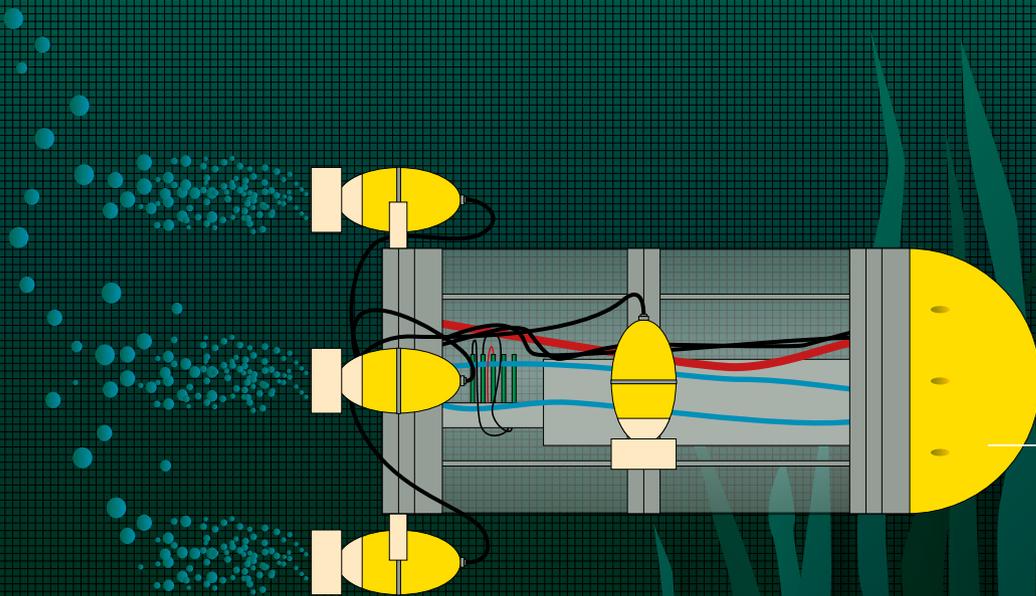
etwa zehn Mikrometern, also zehn Tausendstel Millimetern. Die Bewegung der Fasern wurde mit hochauflösender Mikroskopie sichtbar gemacht.

Im Experiment begannen die Aktinfasern sich zu bewegen, sobald ATP – der Treibstoff für Motorproteine – zugegeben wurde. Bei niedrigen Konzentrationen der Aktinfasern ist die Bewegung noch völlig chaotisch. Erst ab einer Dichte von mehr als fünf Aktinfasern pro Quadratmikrometer begannen sich die Fasern kollektiv in größeren Verbänden zu bewegen – in verblüffender Übereinstimmung zu Vogel- oder Fischschwärmen. „Wir können in diesem System alle relevanten Parameter einstellen und beobachten“, so Schaller. „Damit lassen sich auch die Aussagen verschiedener Theorien zur Selbstorganisation experimentell überprüfen – und zwar auf einer winzigen Längenskala mit Nanomaschinen.“ Wie aus dem Nichts bildeten sich im Versuch Strukturen, etwa Wellen, Spiralen oder geordnete Cluster. Manche dieser Strukturen erreichten eine Größe von fast einem Millimeter und blieben bis zu mehreren Minuten stabil, bevor sie sich wieder auflösten. Ausgehend von diesen Beobachtungen entwickelte Frey zusammen mit seinem Doktoranden Christoph Weber

theoretische Modelle, um die experimentellen Ergebnisse zu beschreiben. Mithilfe dieser Kombination aus erweiterbaren theoretischen Modellen und einer experimentellen Plattform wollen die Physiker nun schwierigere Probleme angehen und deren physikalische Gesetzmäßigkeiten aufdecken.

„Phänomene der Selbstorganisation begleiten uns auf allen Ebenen unseres Lebens,“ sagt Bausch. „Das fängt bei Verkehrsstaus und der Bewegung von Menschenmassen sowie Schwärmen von Tieren an und reicht bis zur Organisation biologischer Prozesse. Wichtige Beispiele sind hier der Aufbau des zellulären Zytoskeletts oder der Proteintransport in der Zelle durch Motorproteine.“ Die zugrunde liegenden Prinzipien – ob nun in ökonomischen, biologischen oder physikalischen Systemen – gehören aber noch zu den großen offenen Fragen der Theoretischen Physik. „Auch für unser Naturverständnis gibt es hier noch viele fundamentale Gesetzmäßigkeiten zu entdecken“, betont Frey. „Prognosen sollten aber nicht vorschnell auf die Dynamik von Menschenmassen übertragen werden – deren Komplexität lässt sich bislang kaum in theoretischen Modellen erfassen.“ □

# Ein Sinnesorgan für Snookie



**Biophysiker und Ingenieure des Exzellenzclusters CoTeSys statten ein kleines U-Boot mit Sensoren aus, die merken, wenn sich Snookie – so der Name des U-Bootes – auf Kollisionskurs befindet. Das System haben sich die Forscher von einem kleinen blinden Höhlenfisch aus Mexiko abgeschaut. Die Technik ermöglicht dem U-Boot, auf eigene Faust auch ohne Sicht in trübem Gewässer zu manövrieren**

#### Snookie – technische Daten

Form:	zylindrisch
Abmessungen:	74 cm Gesamtlänge, 25 cm Durchmesser
Einsatzgewicht:	32 kg unter Wasser
Antrieb:	6 Motoren mit je 7 Newton Vortriebskraft
Sensoren:	Wasserdruck, 3-D-Lasersensoren, 3-D-Beschleunigungssensoren, 3-D-Kompass
Geplant:	biomimetisches Seitenliniensystem

#### Herausforderungen

- Stark begrenzte Sicht unter Wasser
- Infrarotdetektoren, die bei Landrobotern neben Kameras oft verwendet werden, funktionieren unter Wasser nicht
- Drahtlose Kommunikation ist unter Wasser durch die schlechten Ausbreitungsbedingungen eingeschränkt
- Der Energievorrat ist begrenzt auf die Kapazität der Batterien, daher müssen alle Systeme äußerst effizient arbeiten
- Höchste Zuverlässigkeit ist gefragt, denn ein Unterwasserroboter ist schnell für immer verloren



**Letzter Feinschliff vor dem Gang ins Wasser:** Bevor Snookie ins Becken darf, überprüft der Physiker Moritz Franosch die Technik. Unter Wasser orientiert sich das wendige Mini-U-Boot mittels einer Sensorik, die dem Seitenlinienorgan der Fische nachempfunden ist

Jules Verne wäre begeistert gewesen. Der berühmte französische Schriftsteller überlegte sich in seinen Romanen so manche technische Raffinesse, die ihrer Zeit weit voraus war. So verfügte etwa das U-Boot Nautilus im Roman „Zwanzigtausend Meilen unter dem Meer“ über einen innovativen elektrischen Antrieb und zahlreiche weitere Erfindungen, die erst lange nach Vernes Buch das Licht der Welt erblickten. Doch ein eigener Tastsinn fehlte dem legendären Nautilus, mit dem Kapitän Nemo und Professor Aronnax durch die Tiefen der Weltmeere streiften.

Wie ein solches Sinnesorgan für ein U-Boot aussehen könnte, hätte sich Jules Verne sicher liebend gern in diesen Tagen im Labor von Prof. Leo van Hemmen, Dr. Moritz Franosch und Stefan Sosnowski im Herzen Münchens angeschaut. Dort testeten die Wissenschaftler einen Unterwasser-Roboter mit dem Namen „Snookie“. Snookie ist ein kleines, ca. 60 Zentimeter langes U-Boot, das an eine gestutzte Zigarre erinnert. Besonders markant ist Snookies runde Schnauze. Sie leuchtet in einem intensiven Gelb. Am hinteren Teil des Bootes

strahlen – ebenfalls tiefgelb – vier Propeller, die das Boot in jede erdenkliche Richtung bugsieren können. Snookies kompakter durchsichtiger Plexiglas Körper lässt keine Zweifel aufkommen: Das Mini-U-Boot macht einen wendigen Eindruck.

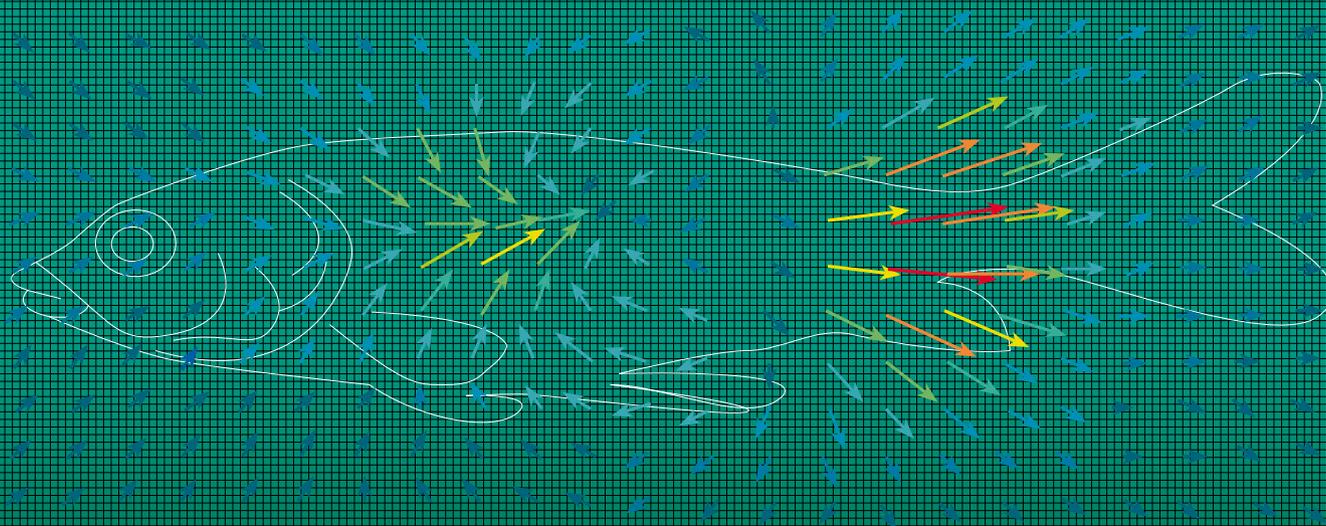
„Wendigkeit ist für unser Boot besonders wichtig“, erklärt Dr. Moritz Franosch. Franosch ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an van Hemmens Lehrstuhl für Theoretische Biophysik in Garching und, wie van Hemmen, Mitglied im Münchner Bernsteinzentrum für Computational Neuroscience. „Snookie soll an besonders engen, unübersichtlichen, trüben Stellen in Gewässern zum Einsatz kommen und sich dort selbstständig zurechtfinden“, erläutert Franosch weiter und streicht über den schnittigen Schwimmkörper des Bootes. Der Physiker und seine Kollegen haben ihr Labor in der ehemaligen großen Rechnerhalle des Leibniz-Rechenzentrums eingerichtet. Um die Forscher herum herrscht emsiges Treiben. Überall wird geschraubt, experimentiert und gerechnet. Mitten in dem Getümmel und unbeeindruckt von dem Treiben steht Snookie, festgezurret auf einem kleinen Podest.

Link

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

### Als Vorbild dient die Natur

Um sich unter schwierigen Bedingungen im Wasser zu orientieren, haben die Wissenschaftler des Exzellenzclusters CoTeSys (Cognition for Technical Systems)



**Fische „hören“ Strömungen:** Diese Strömungssimulation zeigt, wie Fische ihre Umgebung wahrnehmen. Strömungen (hier dargestellt durch Pfeile), die von anderen Tieren oder Gegenständen im Wasser ausgehen, erfassen Fische mit dem Seitenlinienorgan. Es besteht aus feinen Härchen, die sich auf den Schuppen und in winzigen Kanälen unter der Haut der Tiere befinden

Snookie mit einer komplett neuartigen Technologie ausgerüstet. Im Bug von Snookie befinden sich Sensoren, welche die Strömungsgeschwindigkeit rund um den Schwimmkörper analysieren. Sie geben damit Aufschluss, in welcher Umgebung sich das Fahrzeug gerade befindet und ob Hindernisse einer freien Fahrt im Weg stehen. „Mit unserer Technik kann sich der Roboter alleine anhand der Wassergeschwindigkeit zurechtfinden“, sagt Stefan Sosnowski, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der TUM unter der Leitung von Prof. Sandra Hirche. „Gerade bei schlechten Sichtbedingungen, wie sie etwa in trüben Kanälen oder Tanks, aber auch in offenen Gewässern anzutreffen sind, ist das ein entscheidender Vorteil bei der Orientierung.“

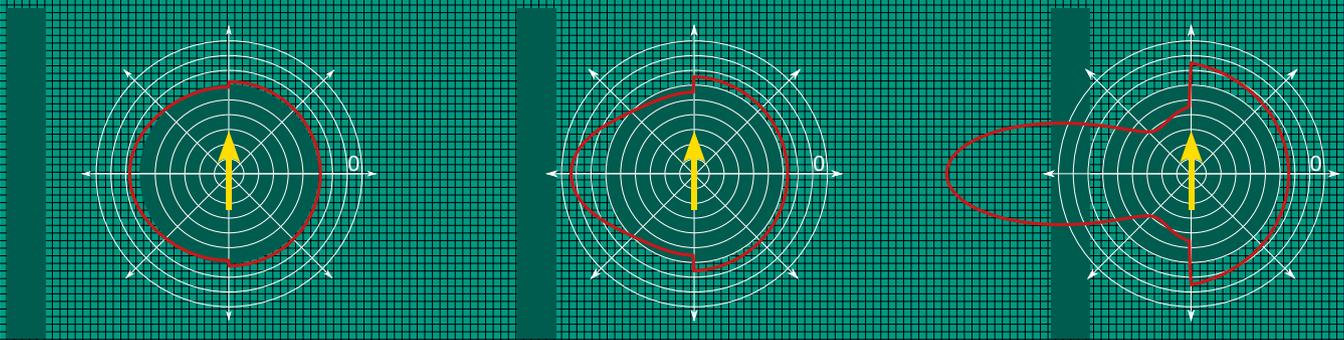
Abgeschaut haben sich die Wissenschaftler das System von der Natur. Als Vorbild diente den Forschern der blinde mexikanische Höhlenfisch *Astyanax mexicanus*. Irgendwann vor noch nicht einmal 20.000 Jahren hat sich dieser Fisch in dunkle Höhlen zurückgezogen. Seine Sehfähigkeit wurde damit überflüssig und er verlor sein Augenlicht komplett. Trotzdem navigiert das Tier wieselnd und sicher durch enge Höhlensysteme und reagiert blitzschnell auf Hindernisse.

Verantwortlich für diesen feinen Wahrnehmungssinn ist das sogenannte Seitenlinienorgan des Fisches. Die-

ses Organ besteht aus vielen Tausend feinen Härchen, die auf den Schuppen und in winzigen Kanälen unter der Haut angebracht sind. Sobald diese von einer Strömungsänderung erfasst werden, registriert *Astyanax* die Abweichung. Das System funktioniert bis etwa in eine Entfernung, die der Länge des Fisches entspricht. Auch viele im Wasser lebende Reptilien haben ein Seitenlinienorgan. So ist der Krallenfrosch *Xenopus laevis* damit sogar in der Lage, zwischen fressbaren und ungenießbaren Insekten zu unterscheiden. Der Mensch verfügt leider nicht über eine solch feine Wahrnehmungsfähigkeit. In unserem Innenohr jedoch gibt es ein vergleichbares System von Haarzellen. Hier steuern Hunderttausende feine Härchen die exakte Aufnahme und Ortung von Geräuschen. Aus dem neuronalen Zusammenwirken dieser Haarzellen im linken und rechten Ohr können wir sehr genau lokalisieren, aus welcher Richtung ein Ton kommt.

### Von der Natur in die Technik

Das Seitenlinienorgan von *Astyanax* hat Prof. Leo van Hemmen akribisch studiert. Der Inhaber des Lehrstuhls für Theoretische Biophysik der TUM beschäftigt sich seit langer Zeit mit Fragestellungen, wie Menschen und Tiere ihre Umwelt wahrnehmen und ihre Sinneseindrücke neuronal verarbeiten. Anschließend überträgt van Hemmens Team die Ergebnisse auf technische Anwendungen. „Die Natur strukturiert Wahrnehmungs- ▷



**Oben:** Navigieren wie ein Fisch. Nähert sich ein Objekt im Wasser einer Wand, ändern sich die Strömungsgeschwindigkeiten auf der Körperoberfläche, noch bevor es das Hindernis berührt

**Rechts:** Erste Schwimmversuche hat Snookie schon im Schwimmbad absolviert. Allerdings wurde dort bis jetzt nur die Antriebs- und Manövrierfähigkeit getestet. Als Nächstes wird Snookies Sensorsystem geprüft

Grafik: edlundsepp

systeme bei Organismen möglichst einfach“, erklärt van Hemmen. „Dem Menschen reichen zum Beispiel zwei Augen, um dreidimensional zu sehen, genauso wie zwei Ohren genügen, um Geräusche zu lokalisieren. Und wenn die beiden Sinnessysteme ‚multimodal‘ zusammenwirken, wird es echt spannend.“ Im Fall des blinden mexikanischen Höhlenfisches hat die Natur sogar die Sehfähigkeit als überflüssig erachtet und sie einfach abgeschafft.

Will man nun die genialen Erfindungen der Natur in die Technik übertragen, braucht man zuerst eine Menge Mathematik. „Wir mussten unter Verwendung eines geeigneten mathematischen Modells numerisch darstellen, was passiert, wenn eine Strömung auf das Seitenlinienorgan trifft, und vor allem was passiert, wenn eine Veränderung des Wasserflusses den Fisch erfasst“, erläutert Moritz Franosch. Das genau ist der interessanteste Teil des Projekts: Nähert sich nämlich ein Höhlenfisch einem Hindernis, verändert sich das Strömungsbild rund um seinen Körper. Somit merkt das Tier, wenn es eng wird oder andere Tiere um es herumkreisen. Die Höhlenfische stoßen so niemals an Steine oder an Artgenossen. Die Wissenschaftler haben nun zuerst anhand eines Kugelmodells berechnet, wie sich die Strömungsgeschwindigkeit um den Körper verändert, wenn er sich einer Wand nähert. Die Kugel ist eine mathematisch gut darzustellende Form und entspricht in etwa dem runden

Kopf des U-Bootes Snookie. Im gelben Bug des Bootes befinden sich damit auch die Sensoren für die Strömungsanalyse. „Wir mussten also die Biologie erst einmal in die Mathematik übertragen und dann die Formeln als Software in einer technischen Anwendung verpacken“, sagt Moritz Franosch. Herausgekommen ist damit ein sogenanntes biomimetisches Seitenliniensystem.

### Tastsinn aus 20 Sensoren

Die feinen Härchen des Fisches werden bei Snookie durch Hitze-Thermistoren ersetzt. Die nur ein Drittel Millimeter großen Sensoren sind so im Bug des Fahrzeugs angebracht, dass sie die Wassergeschwindigkeit von allen Seiten erfassen. Sie werden durch einen Strom erhitzt, der die Temperatur infolge einer Regulierung der Leistungsabgabe konstant hält. Erhöht sich nun die Strömungsgeschwindigkeit, steigt auch die elektrische Spannung in den Thermistoren. Die Thermistoren sind extrem sensibel und erbringen wahre Höchstleistungen. So reagieren sie auf Geschwindigkeitsschwankungen von weniger als einem Prozent und das jede tausendstel Sekunde. „Dazu verbrauchen unsere Sensoren wenig Energie, sodass wir viele davon einbauen können“, erläutert Stefan Sosnowski. Mit bis zu 20 Sensoren wollen die Forscher im ersten Schritt Snookie ausstatten und ihm damit einen Tastsinn mit auf große Fahrt geben. Das künstliche „Seitenliniensystem“ wird Snookie eine

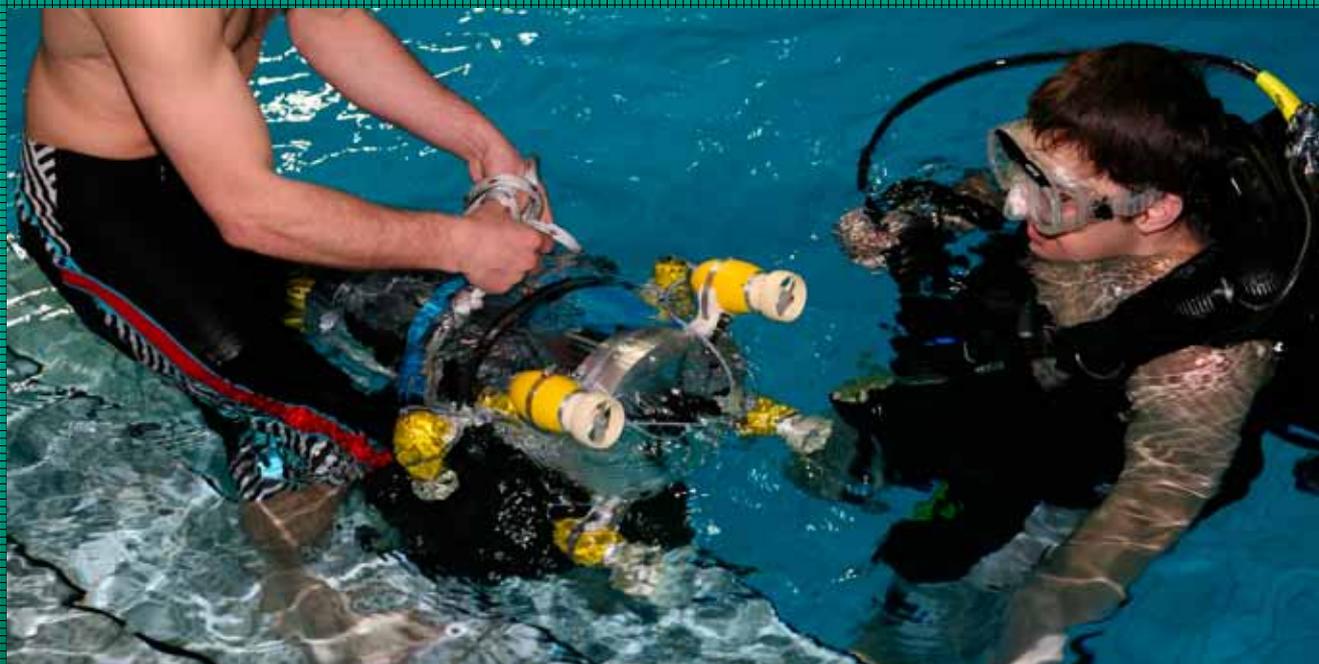


Foto: CoTeSys

enorme Selbstständigkeit unter Wasser bescheren, davon sind die Forscher überzeugt. Denn gerade unter Wasser sind die Kommunikationsmöglichkeiten durch schlechte Ausbreitungsbedingungen von Funkwellen beschränkt. Snookie könnte dann auch ohne externe Steuerung autark seinen Weg finden. Eine Herausforderung für die Ingenieure ist noch die Energieversorgung. Sie wird durch die Batteriekapazität stark begrenzt. Hier will das Team in nächster Zeit eine höhere Effizienz erreichen.

### **Alleskönner unter Wasser**

Wenn Snookie fit ist für den Außendienst, werden sich viele Einsatzmöglichkeiten ergeben, glaubt das Forscherteam. Der Unterwasserroboter kann etwa bei der Suche nach Schiffswracks oder verunglückten Flugzeugen helfen. „Denn fast in jedem europäischen Gewässer herrschen schlechte Sichtbedingungen“, sagt van Hemmen. Der Physiker sieht aber auch zahlreiche weitere Chancen für die Erfindung. „Luft lässt sich genauso schlecht wie Wasser zusammendrücken und hat damit ähnliche Strömungseigenschaften“, erläutert van Hemmen. „Damit ergeben sich für die Sensortechnik auch an Land viele Einsatzmöglichkeiten in Robotern“, ist er überzeugt. Schließlich werden Roboter auch dort eingesetzt, wo Staub oder Rauch die Sicht behindern. Doch ein Orientierungssystem, wie es nun für Snookie entwickelt wird, soll für Leo van Hemmen erst der

Anfang sein. „Eine effiziente Sensorik bei Organismen beruht meistens auf mehreren Sinneseindrücken, die gleichzeitig im Gehirn zusammengefügt und verarbeitet werden“, sagt der Biophysiker. So spielen etwa beim Menschen permanent optische Reize gepaart mit akustischen Signalen zusammen und vermitteln das Bild seiner Umgebung. „Das nennen wir multimodale Integration“, ergänzt van Hemmen. So ein Konstrukt mathematisch und anschließend technisch umzusetzen, würde den Rechenaufwand, aber damit auch das sensorische Potenzial enorm steigern. Ebenso würden die Fertigkeiten der Ingenieure um ein Vielfaches stärker gefordert. „Die Natur kann das mühelos“, sagt van Hemmen bewundernd.

Zunächst ist der unimodale Tastsinn von Snookie im Fokus des Wissenschaftlerteams. Die Sensorik des U-Bootes wird derzeit vor allem in einem kleinen Aquarium im CoTeSys-Labor getestet. Das Becken ist nicht viel größer als das Fahrzeug selbst. Lückenlos überwacht werden Snookies Tastsinn-Aktivitäten von Computern. Snookies Bewegungs-Spielraum ist im kleinen Wasserbecken noch etwas eingengt. Doch erste Tests des Sensorsystems im Schwimmbad stehen kurz bevor. Dann wird Snookie selbstständig schwimmen lernen wie ein blinder Höhlenfisch. Und auch Jules Verne hätte so Stoff für ein weiteres visionäres wissenschaftliches Detail für seine Romane erhalten. *Thorsten Naeser*

## Autoren / Impressum

### Impressum

#### **Faszination Forschung**

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

#### **Herausgeber:**

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

#### **Chefredakteurin:**

Tina Heun, Technische Universität München,  
Corporate Communications Center

#### **Lektorat:**

Angela Obermaier

#### **Gestaltung:**

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

#### **Autoren dieser Ausgabe:**

Sibylle Kettembeil, Thorsten Naeser, Dr. Brigitte Röthlein,  
Dr. Evdoxía Tsakiridou

#### **Redaktionsanschrift:**

Technische Universität München,  
Corporate Communications Center, 80290 München

#### **E-Mail:**

faszination-forschung@zv.tum.de

#### **Druck:**

Druckerei Joh. Walch GmbH & Co. KG, Im Gries 6, 86179 Augsburg

#### **Auflage:**

35.000

#### **ISSN:**

1865-3022

#### **Erscheinungsweise:**

zweimal jährlich

#### **Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:**

Tina Heun

#### **Verantwortlich für die Anzeigen:**

Tina Heun

#### **Titelbild:**

ESA



© 2010 für alle Beiträge Technische Universität München, Corporate Communications Center, 80290 München. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Aufnahme in Onlinedienste und Internet, Vervielfältigung auf Datenträgern nur mit ausdrücklicher Nennung der Quelle: „Faszination Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München.“ Anmerkungen zu den Bildnachweisen: Wir haben uns bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte zu ermitteln. Sollte der Redaktion gegenüber dennoch nachgewiesen werden, dass eine Rechtsinhaberschaft besteht, entrichten wir das branchenübliche Honorar nachträglich.

### Die Autoren

**Sibylle Kettembeil** studierte in Hohenheim Biologie und arbeitete einige Jahre als Biologin; seit einem Aufbaustudium Journalistik ist sie nebenberuflich als freie Wissenschaftsjournalistin tätig für Zeitschriften, Zeitungen, Informationsdienste, Internet. Im Hauptberuf ist sie Redakteurin des Hochschulmagazins TUMcampus der Technischen Universität München.

**Thorsten Naeser** studierte in München Geografie und arbeitete anschließend als freier Wissenschaftsjournalist und Fotograf in München. Seine Auftraggeber waren Tageszeitungen, Magazine und internationale Forschungseinrichtungen. Seit 2008 ist er Referent für Presse- und Öffentlichkeit in der Arbeitsgruppe Attosekunden- und Hochfeldphysik von Prof. Ferenc Krausz am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching.

**Dr. Brigitte Röthlein** arbeitet seit 1973 als Wissenschaftsautorin bei verschiedenen Zeitschriften, bei Fernsehen, Rundfunk

und für Zeitungen. Sie ist Diplom-Physikerin und wurde in Kommunikationswissenschaft, Pädagogik und Geschichte der Naturwissenschaften promoviert. Von 1993 bis 1996 leitete sie neben ihrer freien publizistischen Tätigkeit das Geschichtsmagazin Damals, 2004/2005 das Forschungs- und Technologiema-gazin Innovate. Sie veröffentlichte Sachbücher unter anderem über Hirnforschung, Atomphysik und Quantenphysik.

**Dr. Evdoxía Tsakiridou** hat in der Neurophysiologie promoviert und bei einer Tageszeitung ein zweijähriges Volontariat absolviert. Die Biologin lebt und arbeitet seit 1998 als freie Wissenschaftsjournalistin in München und schreibt für Tageszeitungen, Magazine, Mediendienste und Internetseiten. Von 1999 bis 2001 war sie als Pressereferentin für Technologie und Innovationen bei einem internationalen Industrie-Unternehmen tätig. Ein weiteres Standbein ist die Autorenschaft und Produktion von Wissenschafts-Podcasts.



Die Technische Universität München dankt  
den Gründungstiftern der

# TUM UNIVERSITÄTSSTIFTUNG

– Gemeinnützige Stiftung des Bürgerlichen Rechts –

für das tatkräftige finanzielle Engagement, mit dem sie als Alumni  
und Förderer aus bürgergesellschaftlicher Verantwortung ihren Beitrag zur  
Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der TUM leisten.

## Stiftungsvorstand:

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang A. Herrmann, Präsident  
Albert Berger, Kanzler

Senator E.h. Gerhard Hess, Hauptgeschäftsführer des Bayerischen Bauindustrieverbands  
S.D. Albrecht Fürst zu Oettingen-Spielberg

## Stiftungsrat:

Dr. Christian Kohlpaintner, Mitglied des Vorstands der Clariant International AG  
Dipl.-Ing. Christian Leicher, Geschäftsführer der Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG  
Prof. Dr. Arnulf Melzer, Bevollmächtigter des Präsidenten für Fundraising an der TU München  
Prof. Dr. Hermann Requardt, Mitglied des Vorstands der Siemens AG  
Dipl.-Kfm. Johannes Winklhofer, Geschäftsführer der iwis - Joh. Winklhofer Beteiligungs GmbH & Co. KG  
Dr. Matthias L. Wolfgruber, Vorstandsvorsitzender der Altana AG

## Die Gründungstifter:

Dipl.-Ing. Max Aicher  
Dr. Hermann Balle  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel  
Prof. Thomas Bauer und Familie  
Senator E.h. Prof. Dr.-Ing. Ernst Denert  
Dipl.-Ing. Carl-Peter Forster  
Prof. Dr. med. Reiner Gradinger  
Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang A. Herrmann  
Prof. Dr. med. Heinz Höfler  
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn  
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann  
Dipl.-Ing. Bodo Friedrich Holz  
Dr.-Ing. E.h. Hans Georg Huber  
Architekt Helmut Jahn  
Dr.-Ing. Hermann Kinkeldey  
Dr. Christian Kohlpaintner  
Dr.-Ing. Gerd Krick

Dr. Jürgen Kulpe  
Prof. Dr.-Ing. Herbert Kupfer  
Dipl.-Ing. Roland Lacher  
Gertrud Obermeyer  
Dr.-Ing. Leonhard Obermeyer  
S.D. Albrecht Fürst zu Oettingen-Spielberg  
Dr. Matthias Ottmann  
Ingeborg Pohl  
Prof. Dr. Gallus Rehm  
Prof. Dr. Dr. Johannes Ring  
Prof. Randolph Rodenstock  
Christina S. Rohde, MBA  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Ulrich L. Rohde  
Dr. Helmut Röschinger  
Dipl.-Kfm. Peter Rösner  
Prof. Dr. Ernst J. Rummeny  
Prof. Dr. Norbert Schmitz

Dipl.-Ing. Heinz-Peter Scholz  
Prof. Dr. med. Albert Schömig  
Prof. Rolf Martin Sennwald  
Senator E.h. Peter von Siemens  
Senator E.h. Hubert Stärker  
Prof. Dr. Rudolf Staudigl  
Dr. Manfred Stefener  
Prof. Dr. Dieter H. Vogel  
Dr. Karl Wamsler  
Dipl.-Ing. Hanns W. Weidinger  
Senator E.h. Dr. h.c. Horst Weitzmann  
Hans Wilden  
Dipl.-Kfm. Johannes Winklhofer  
Dr. Wilhelm Winterstein  
Dr. Matthias L. Wolfgruber  
Prof. Dr. Mark Wössner

ALTANA AG  
AUDI AG  
Bayerischer Bauindustrieverband e.V  
BMW AG  
Robert Bosch GmbH

Clariant International AG  
Evonik Industries AG  
Linde AG  
Nestlé AG  
Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

SGL CARBON SE  
Siemens AG  
Süd-Chemie AG  
TÜV SÜD AG  
Wacker Chemie AG





## Stefan Marcinowski

### Sind wir schon zu satt?

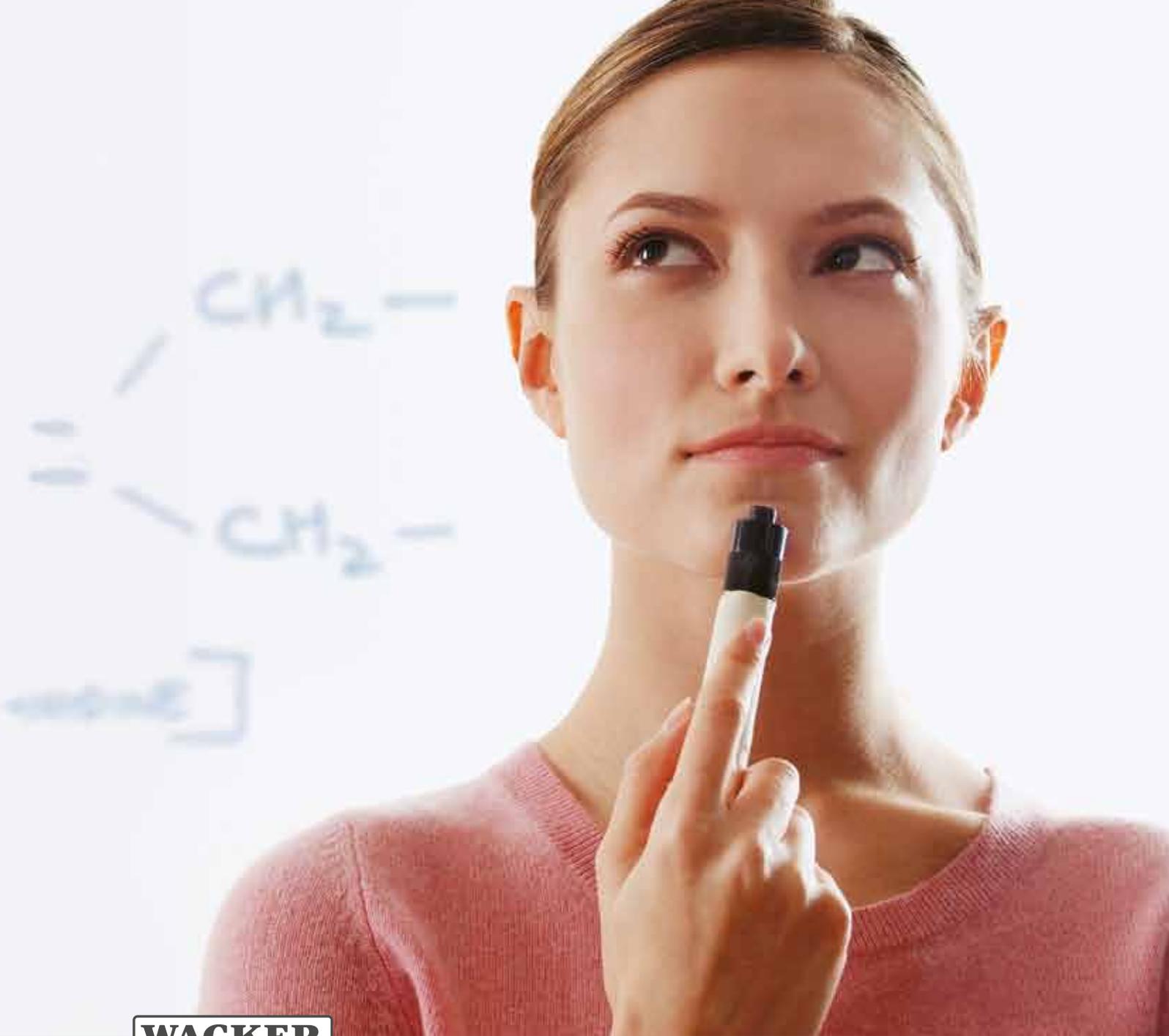
„Ein voller Bauch studiert nicht gern“, sagt eine alte Lebensweisheit. Hinsichtlich der Gefühlslage in Deutschland zur Landwirtschaft würde ich es umformen in: „Ein voller Bauch innoviert nicht gern.“ Angesichts der Herausforderung, eine global wachsende Bevölkerung mit begrenzten Anbauflächen zu ernähren, sollten wir beginnen, neue Methoden wie die Pflanzenbiotechnologie ideologiefrei zu betrachten.

**Dr. Stefan Marcinowski** (Jahrgang 1953) ist seit 1997 Mitglied des Vorstands der BASF SE. Er studierte Chemie an den Universitäten Stuttgart und Freiburg/Breisgau, wo er 1978 bei Prof. Grisebach an der Fakultät für Biologie promovierte. Nach einem Jahr als Assistent am Biochemischen Institut in Freiburg trat er in das BASF Hauptlaboratorium (Forschungsgebiet Biotechnologie) ein. 1988 wurde er zum Leiter der Zentralabteilung Öffentlichkeitsarbeit bestellt. Ab 1992 leitete er die BASF Brasileira in Brasilien. Als Mitglied des Vorstands der BASF war er elf Jahre lang Sprecher der Forschung. Derzeitige Verantwortung im Vorstand u. a. für Pflanzenschutz, Pflanzenbiotechnologie und Coatings. Seit 2002 ist er Mitglied des Verwaltungsrats und Senats und seit 2008 Vizepräsident der Max-Planck-Gesellschaft. Seit 2008 er auch Vorsitzender des Vorstands der Deutschen Industrievereinigung Biotechnologie. Seit Februar 2010 gehört Marcinowski dem BioÖkonomieRat an.

Wer in Not lebt, ist eher offen für Innovationen. In Deutschland haben wir – Gott sei Dank! – viele Jahre keinen Hunger, keine Seuchen, keinen Krieg erlebt. Nie war das Nahrungsangebot so vielfältig, gesund und kostengünstig wie heute. Mussten vor 50 Jahren durchschnittlich 33 Prozent des Einkommens für Nahrungsmittel aufgewandt werden, ist dieser Anteil auf heute 11 Prozent gesunken. So gut sich die hiesige Ernährungssituation entwickelt hat: Wir dürfen nicht ausblenden, wie es in anderen Teilen der Welt aussieht. Noch immer sind in den Entwicklungsländern eine Milliarde Menschen chronisch unterernährt. Weitere zwei Milliarden sind mangelernährt und somit anfällig für Krankheiten; insbesondere kleinen Kindern drohen Entwicklungsstörungen. Das ist die Realität, wie die Studie „The Global Food Equation“ der Deutschen Bank zeigt. Realität ist auch, dass die Weltbevölkerung von derzeit knapp sieben auf neun Milliarden im Jahr 2050 anwachsen wird. Noch 1960 ernährte ein Hektar Anbaufläche durchschnittlich 2,4 Menschen. Vor fünf Jahren lag die Zahl bei 4,5. 2050, so die Studie, muss ein Hektar 6 Erdbewohner ernähren. Die gleiche Ackerfläche soll mehr Menschen ernähren und gleichzeitig noch nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie liefern. Eine gewaltige Herausforderung. Zwar konnte die Agrarwirtschaft in den letzten 50 Jahren dank der Innovationen bei Saatzucht, Düngung, Pflanzenschutz, Bewässerung, Lagerung und Maschineneinsatz enorme Wachstumsraten verzeichnen. Diese Wachstumskurven flachen jedoch ab. Innovative Produkte und Technologien sind vonnöten, um

die Schere zwischen Nahrungsangebot und -nachfrage zu schließen. Einen wichtigen Beitrag kann dabei die Pflanzenbiotechnologie leisten: So lassen sich zum Beispiel die Gene von Pflanzensorten, die zwar wenig Ertrag liefern, die aber gegen bestimmte Krankheitserreger resistent sind, auf ertragreiche Pflanzen übertragen. Diese gezielte Verbesserung bestimmter Eigenschaften ist mit klassischer Pflanzenzüchtung nicht möglich. Ein anderes Beispiel ist, die Gene von Pflanzen, die Trockenperioden gut überstehen, auf andere Pflanzen zu übertragen. In Afrika unterstützen BASF und Monsanto das Projekt Water Efficient Maize for Africa (WEMA). Ziel ist es, eigene trockenolerante Maissorten zu entwickeln, die dann Kleinbauern lizenzfrei zur Verfügung stehen.

Angesichts der wachsenden Weltbevölkerung und der globalen Herausforderungen für die Landwirtschaft spielt die Pflanzenbiotechnologie für die künftige Ernährung eine wichtige Rolle. Bereits heute werden 10 Prozent der weltweiten Ackerfläche mit gentechnisch verbesserten Pflanzen bewirtschaftet. Die Erzeuger sind zu 90 Prozent Bauern in der Dritten Welt. Europa importiert inzwischen über 30 Millionen Tonnen gentechnisch veränderte Futtermittel jedes Jahr, pro EU-Bürger also 60 Kilo. Die Gentechnologie in der Landwirtschaft ist wichtig und sie ist auch bei uns angekommen. Wir brauchen ihre Innovationskraft, um künftigen Anforderungen gerecht zu werden. So satt wir auch sein mögen hier in Deutschland: Es ist Zeit, über den eigenen Tellerrand hinauszuschauen und zu sehen, was in der Welt passiert. □



**WACKER**

## FÜR FORSCHER, DIE DIE PRODUKTE VON MORGEN ENTWICKELN

Die Experten von morgen sind die Studenten und Doktoranden von heute. Deshalb unterstützen wir die Forschung an Universitäten – durch die Stiftung des WACKER-Lehrstuhls für Makromolekulare Chemie an der TU München, durch Kooperationen mit über 60 Universitäten und durch Praktika und Werkführungen.

CREATING TOMORROW'S SOLUTIONS

# Karriere bei der BMW Group. Werden auch Sie Teil des Erfolgs.



Mit welchem Antrieb fährt das Automobil von morgen?  
Wie ist es mit seiner Umgebung vernetzt?  
Und wie bewegt es sich klimaneutral von A nach B?  
Entwickeln Sie gemeinsam mit uns die besten Antworten!

Informationen und interessante Stellenangebote zu Themen wie  
Elektromobilität, CFK, Softwareentwicklung und Business IT  
finden Sie auf: **[www.bmwgroup.jobs](http://www.bmwgroup.jobs)**.

**BMW Group**

