

ISSN 16653022  
9 771865 302004

Schutz-  
gebühr  
9,- Euro

Das Wissenschaftsmagazin

Ausgabe 8 Juni 2011

Technische Universität München

TUM

# Faszination Forschung



## Der Terminator und Hilberts Würstchenfabrik

**Tuning für die Röntgenröhre:** Bessere Bilder für die Medizin

**Des Roboters neue Haut:** Sensoren verleihen Maschinen Gefühl

**Expedition zur Insel der Inversion:** Wie sind die Atomkerne aufgebaut?



SIEMENS

# Autos, die uns weiterbringen. Selbst wenn sie in der Garage stehen.

Siemens bereitet heute den Weg für Elektromobilität und die Stromnetze von morgen.

Das erste Elektroauto von Siemens hieß „Elektrische Viktoria“, hatte eine Reichweite von 80 km pro Batterie-ladung und fuhr bereits 1905 als elegantes Hoteltaxi durch die Straßen Berlins. Auch heute leisten wir wieder Pionierarbeit – mit nachhaltigen Lösungen für ein neues

Energiezeitalter. Denn das Auto der Zukunft tankt nicht nur Strom aus Wind und Sonne, es trägt auch als mobiler Energiespeicher zu einer umweltschonenden Energieversorgung bei. Und das sogar dann, wenn es mal nicht gefahren wird.

[siemens.com/answers](https://www.siemens.com/answers)

Liebe Leserinnen und Leser,

Wie sollen wir uns in Zukunft fortbewegen? Welche Mobilitätskonzepte brauchen die Megacities des 21. Jahrhunderts? Welche Energie soll unsere Fahrzeuge antreiben? Diese Fragen bewegen die Menschen in den zivilisatorisch fortgeschrittenen Gesellschaften. Ganzheitliche Lösungen liegen nicht einfach auf der Hand. Die Technische Universität München will mit Ihrem Projekt MUTE vorausdenken und helfen, Lösungen für die Zukunft zu entwickeln.



Das Elektrofahrzeug MUTE, das die TUM auf der diesjährigen Internationalen Automobilausstellung als Prototyp präsentiert, integriert die Forschungstätigkeit von 20 Lehrstühlen aus den Ingenieur- und Naturwissenschaften, der Betriebswirtschaft sowie von ihren Industriepartnern – und den Studierenden. Als unternehmerische Universität bildet die TUM Studenten für Managementpositionen in Wirtschaft und Forschung aus, wir betreiben Grundlagenforschung mit Anwendungsbezug.

In dieser Faszination Forschung beleuchten wir zwei Aspekte aus dem Gesamtkonzept von MUTE: Die Erforschung leistungsfähiger und auf die Anforderungen der Elektromobilität ausgelegter Energiespeicher sowie die Entwicklung eines Hochvolt-Bordnetzes, das statt schwerer und teurer Kupferleitungen Aluminium verwendet.

Weil es auch auf die individuelle Exzellenz ankommt, mit der Wissenschaftsnetzwerke beginnen, richtet Faszination Forschung den Blick auf „junge Exzellenzen“: Andrey Rybalchenko und Leibniz-Preisträger Franz Pfeiffer.

Und einmal mehr warten unsere Forschungs-Cluster Cotesys und Universe mit spannenden Themen auf. Zum einen entwickeln junge Wissenschaftler in einem internationalen Team eine sensible Haut für Roboter, die den Maschinen nicht nur Gefühl verleihen soll, sondern auch eine Vorstellung von ihrer eigenen Gestalt. Mit Materie weit jenseits unserer Alltagswelt befassen sich die Kernphysiker. Sie wollen mehr über den Aufbau der Atomkerne und die Entstehung schwerer chemischer Elemente bei Sternexplosionen erfahren. Medikamente gegen tödliche Krankheitserreger will Wolfgang Eisenreich finden. Dabei beschreitet er einen nachvollziehbaren Weg: Er erforscht den Stoffwechsel von Bakterien und sucht dort gezielt nach Angriffspunkten, um das Wachstum und die Vermehrung der Zellen zu stoppen.

Keine Faszination Forschung ohne Interview: Christoph Lütge, unser neu berufener Professor für Wirtschaftsethik, beantwortet Fragen nach dem Zusammenspiel von Moral und Marktwirtschaft.

Lassen Sie sich mitnehmen in das „Abenteuer Forschung“ der TUM!

W  
 Wolfgang A. Herrmann

Prof. Wolfgang A. Herrmann  
 Präsident

In dieser Ausgabe

Seite 6

## Expedition zur Insel der Inversion

Seite 56

## Ein Universalwerkstoff erobert die (Kabel-) Seelen

**TUM Forscher** entwickeln Aluminium-Steckverbindungen für Hochvolt-Bordnetze von E-Autos



Seite 80

## Die Moral in der Marktwirtschaft



Seite 62

## Nächster Halt: Aminosäure

**Einblicke in den Stoffwechsel** von Krankheitserregern helfen bei der Suche nach neuen Medikamenten

### Titelgeschichten

- Expedition zur Insel der Inversion**  
Physiker erforschen den Aufbau der Atomkerne . . . . . 6
- Der Terminator und Hilberts Würstchenfabrik**  
Analyse-Werkzeuge überprüfen Software . . . . . 20
- Des Roboters neue Haut**  
TUM Forscher bauen sensible Haut für Maschinen . . 36
- Tuning für die Röntgenröhre**  
Neue Röntgenmethode erzeugt bessere Bilder . . . . 44

### Forschung und Technik

- Neue Speicher braucht das Land**  
Akkus künftiger Elektroautos sollen klein und leicht, effizient und langlebig sein . . . . . 26
- Ein Universalwerkstoff erobert die (Kabel-)Seelen**  
Aluminium statt Kupfer in Bordnetzen von Autos . . . 56
- Nächster Halt: Aminosäure**  
Stoffwechsel-Forscher suchen „Stammstrecken“ . . . 62
- Wie lange schwingt eine Stimmgabel?**  
TUM Forscher sind dem Q-Faktor auf der Spur . . . . 73
- Die Rechenbeschleuniger**  
Höchstleistungsrechner eröffnen Wissenschaftlern neue Wege der Erkenntnis . . . . . 74

Fotos/Grafiken Reihe oben: edlundsepp; Heddergott, TUM; edlundsepp, Eckert und Heddergott, TUM; Fotos/Grafiken Reihe unten: G. K. - Fotolia; Heddergott, TUM; Wenzel Schürmann, TUM

**Ziel**  
5% < SOC < 10%

**Seite 26**

## Neue Speicher braucht das Land

*In dieser Ausgabe*

**Seite 20**

## Der Terminator und Hilberts Würstchenfabrik

**Seite 74**

## Die Rechenbeschleuniger

**Der dritte Lösungsweg:** Neben Theorie und Experiment eröffnen Simulationsrechnungen den Weg zu wissenschaftlicher Erkenntnis. TUM Wissenschaftler entwickeln fächerübergreifende Methoden für das Höchstleistungsrechnen

### Rubriken

Editorial .....	3
Autoren .....	55
Impressum .....	55
<b>Interview mit Christoph Lütge</b> Die Moral in der Marktwirtschaft .....	80
<b>Standpunkt: Prof. Dr. Herbert Henzler</b> Forschung tut not! .....	86

### Weise Worte der Wissenschaft

#### Teilhard de Chardin (1881 – 1955)

*Der Zweifel ist der Beginn der Wissenschaft. Wer nichts anzweifelt, prüft nichts. Wer nichts prüft, entdeckt nichts. Wer nichts entdeckt, ist blind und bleibt blind.*

#### Immanuel Kant (1724 – 1804)

*Wenn die Wissenschaft ihren Kreis durchlaufen hat, so gelangt sie natürlicher Weise zu dem Punkte eines bescheidenen Mißtrauens, und sagt, unwillig über sich selbst: Wie viele Dinge gibt es doch, die ich nicht einsehe.*

#### Isaac Newton (1643 – 1727)

*Unser Wissen ist ein Tropfen, was wir nicht wissen, ist ein Ozean.*

Link

[www.e12.physik.tu-muenchen.de/groups/index.html](http://www.e12.physik.tu-muenchen.de/groups/index.html)

Die Nuklidkarte, auf der alle Atomkerne als Kästchen eingetragen sind, ist hier wie eine Landschaft dargestellt. In der Mitte liegt das Tal der Stabilität mit den schwarz eingzeichneten stabilen Atomkernen, die Berge rechts und links stellen instabile Atome dar

### Zinn 100

50 Protonen,  
50 Neutronen  
doppelt magisch  
und instabil

### Kalzium 40

20 Protonen,  
20 Neutronen  
doppelt magisch  
und stabil

### Hafnium Hf 168

72 Protonen und  
96 Neutronen  
deformierter Kern

### Sauerstoff 16

8 Protonen,  
8 Neutronen  
doppelt magisch  
und stabil

### Blei 208

82 Protonen und  
126 Neutronen  
doppelt magisch  
und stabil

#### Lithium 11

3 Protonen und  
8 Neutronen  
Halo-Kern

#### Nickel 78

28 Protonen,  
50 Neutronen  
doppelt magisch  
und instabil

# Expedition zur Insel der Inversion

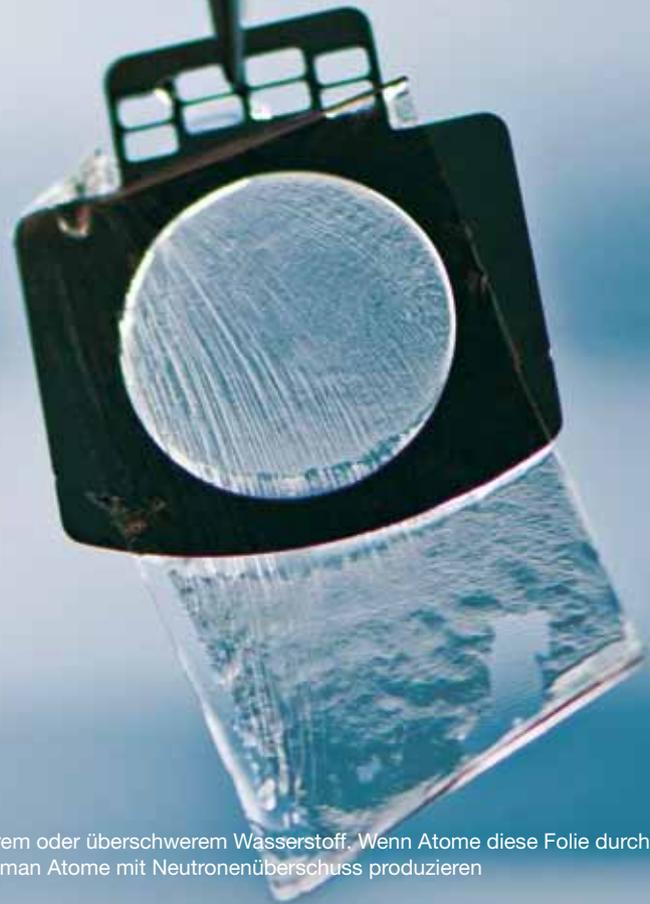
Materie weit jenseits unserer Alltagserfahrung herzustellen und zu untersuchen ist eine Kunst, die nur wenige Forscher auf der Welt beherrschen. Wissenschaftler der TUM gehören dazu. Sie gewinnen dabei Erkenntnisse über den Aufbau der Atomkerne und die Entstehung schwerer chemischer Elemente in Sternexplosionen



**Dünne Folien, sogenannte Targets,** spielen eine wichtige Rolle bei den Experimenten der Kernphysiker. Wenn schnelle Atomkerne auf diese Targets treffen, entstehen durch Kernreaktionen exotische Kerne, die man nachweisen und vermessen kann

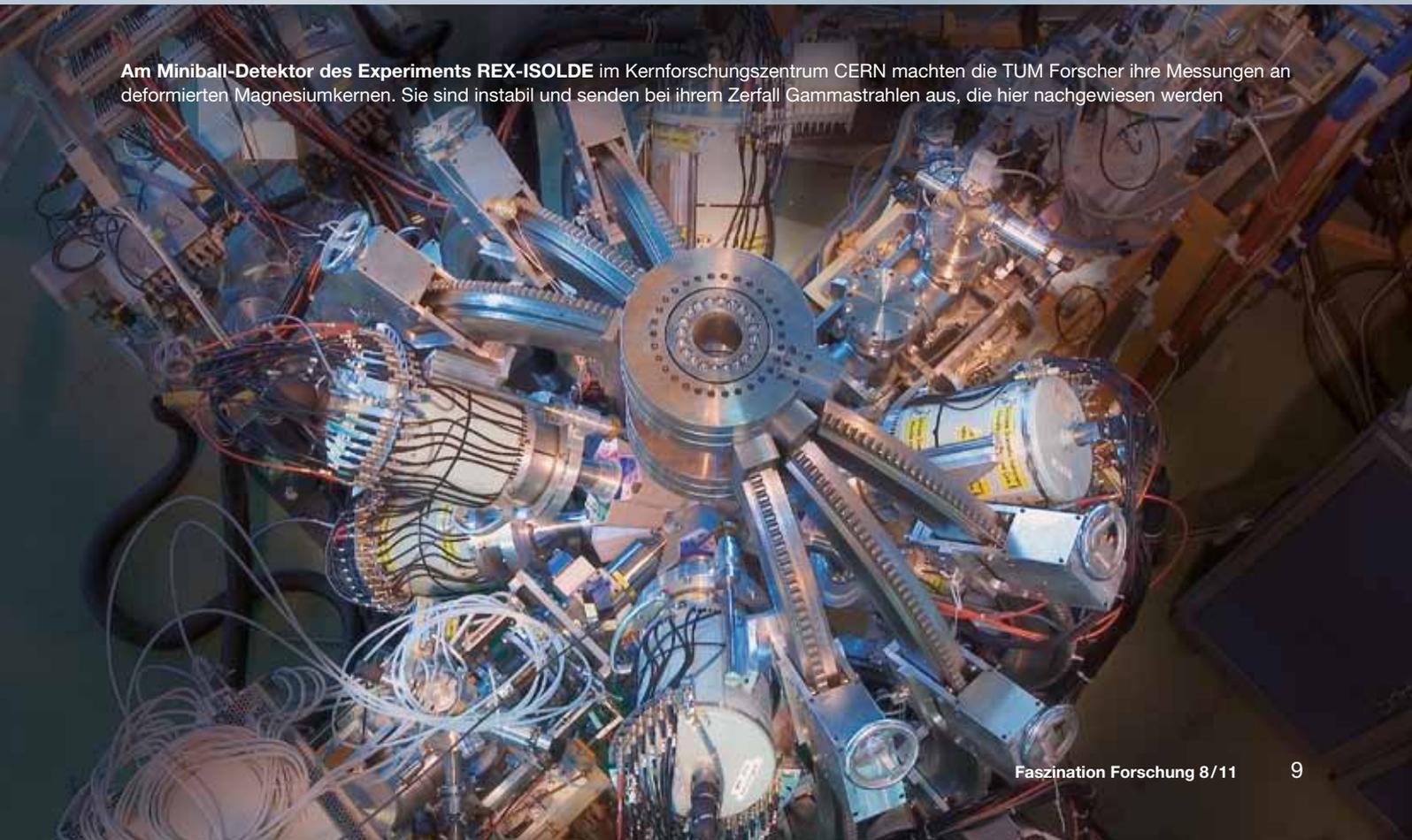


**Und so werden derartige Folien hergestellt:** Ein Säurebad löst die Trägerfolie aus Kupfer auf, auf der vorher eine dünne Kohlenstoffschicht aufgebracht wurde. Diese ist am Ende nur 20 tausendstel Millimeter dick und durchsichtig



Eine andere Art von Folien besteht aus Polyethylen mit schwerem oder überschwerem Wasserstoff. Wenn Atome diese Folie durchdringen, entreißen sie oft dem Wasserstoff seine Neutronen. So kann man Atome mit Neutronenüberschuss produzieren

Am Miniball-Detektor des Experiments REX-ISOLDE im Kernforschungszentrum CERN machten die TUM Forscher ihre Messungen an deformierten Magnesiumkernen. Sie sind instabil und senden bei ihrem Zerfall Gammastrahlen aus, die hier nachgewiesen werden



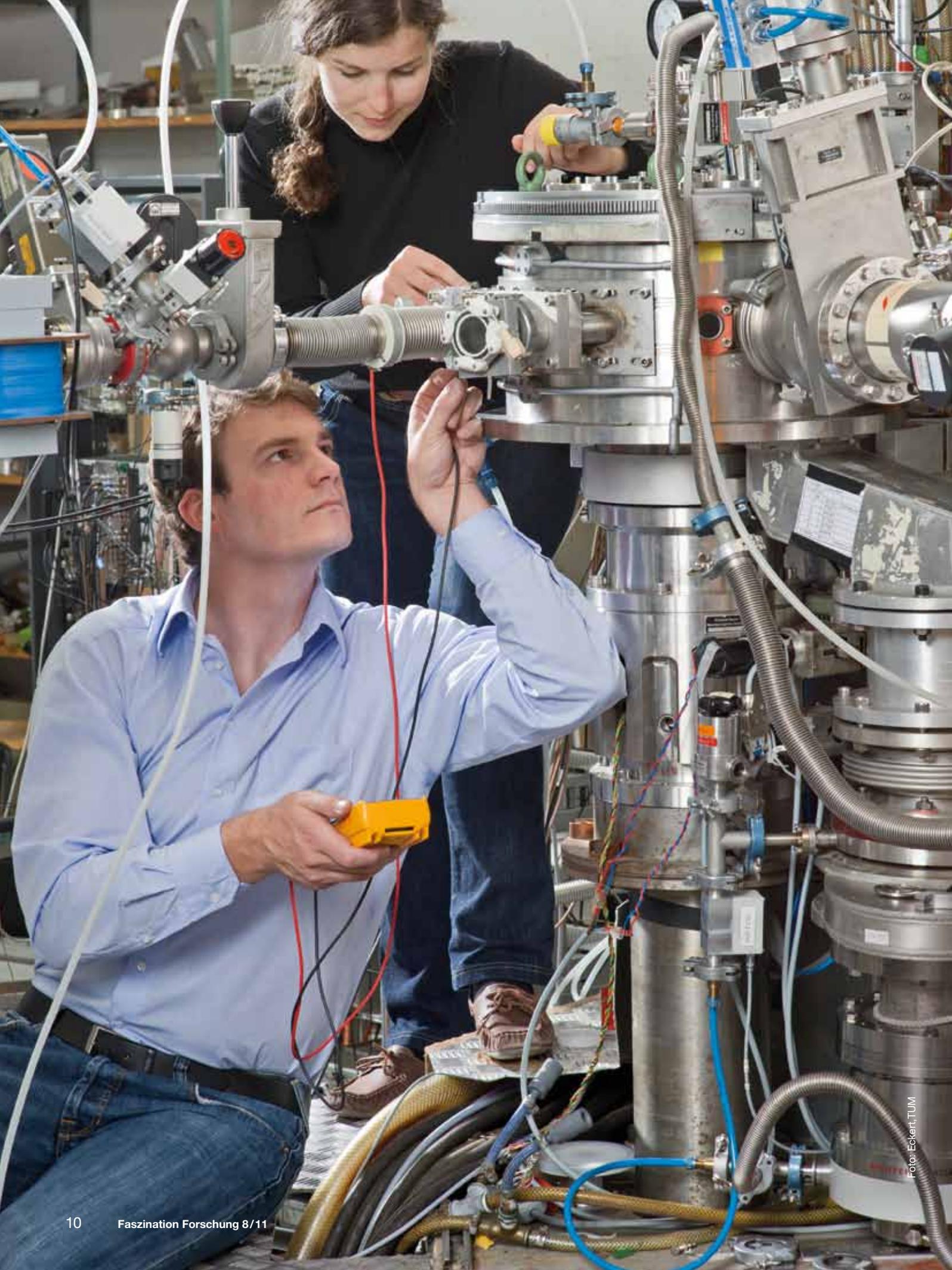
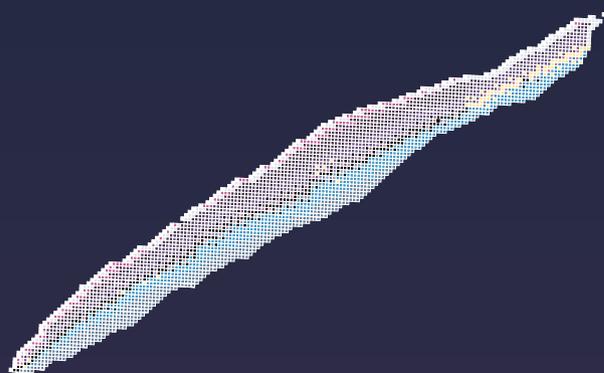


Foto: Eckert, TUM

**Dennis Mücher und Katharina Nowak bei Vorbereitungsarbeiten** an der Targetkammer des Q3D-Magnetspektrographen am Maier-Leibnitz-Beschleunigerlabor der TUM. Auch dort kann man Grundlagenforschung mit Atomkernen machen, ähnlich wie am Experiment REX-ISOLDE im CERN

### Die Nuklidkarte

Auf ihr sind alle bekannten, knapp 2500 Atomkerne nach der Zahl ihrer Protonen, die gleichzeitig die Ordnungszahl ist, und der Zahl ihrer Neutronen geordnet. Nur die schwarz markierten Kerne, die das „Tal der Stabilität“ bilden, sind in der Natur stabil vorhanden. Alle anderen werden durch Kernreaktionen erzeugt und zerfallen durch Beta- oder Alpha-Zerfall oder durch Spaltung. Die äußeren Linien markieren die Grenzen der Stabilität nach den heute gängigen Theorien, wobei die Atomkerne ganz kurz nach ihrer Bildung wieder ein Proton oder ein Neutron verlieren. Manche Forscher erwarten jenseits dieser Karte rechts oben noch eine „Insel der Stabilität“. Derartig schwere Atomkerne konnten aber bisher auf der Erde nicht erzeugt werden. Ob diese Elemente, deren  $Z$  bzw.  $N$  magische Zahlen betragen, existieren und stabil sind, weiß man heute noch nicht.



**D**as Leben der Kerne war nach einer Drittel Sekunde schon wieder vorbei, aber in dieser kurzen Zeitspanne gaben sie den Forschern große Rätsel auf. Die Rede ist von exotischen Magnesium-Atomkernen, die TUM Physiker am Genfer Forschungszentrum CERN erzeugt und vermessen haben. Das Besondere an ihnen war, dass sie nicht die übliche kugelige, sondern längliche Gestalt hatten. Erst wenn man sie energetisch anregte, bekamen sie Kugelform. Das hatte man nach der Theorie so nicht erwartet. „Diese Erkenntnisse stellen uns vor neue Herausforderungen. Wir müssen den Mechanismus genauer verstehen, der die veränderte Struktur herbeiführt“, sagt Prof. Reiner Krücken, der bis vor Kurzem am Physik-Department der TUM den Lehrstuhl für Physik der Hadronen und Kerne leitete und Anfang März für drei Jahre als wissenschaftlicher Leiter des kanadischen Forschungszentrums Triumf nach Vancouver wechselte. Kernphysiker finden immer wieder seltsame

Phänomene, wenn sie neue, extreme Arten von Materie herstellen: Manchmal haben die Kerne Kugelform, manchmal sehen sie länglich aus wie eine Zigarre, manchmal flach wie ein Diskus. Und mitunter blähen sie sich gewaltig auf, etwa das Lithium-11, bei dem der Kern mit seinen nur elf Protonen und Neutronen so groß ist wie ein Bleikern mit 208 Protonen und Neutronen. Die Forscher suchen dann nach Theorien, die all diese Besonderheiten erklären können.

Denn während mit milliardenteuren Beschleunigern Forscher nach den winzigsten Bestandteilen der Elementarteilchen suchen, ist man noch nicht einmal sicher, nach welchen Gesetzmäßigkeiten die viel größeren Atomkerne aufgebaut sind, aus denen unsere Welt besteht. Zwar weiß man heute, dass sie aus einem Gewusel von positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen – die gemeinsam Nukleonen heißen – bestehen, und in den 1930er-Jahren haben Physiker Theorien über die sogenannte Kernkraft entwickelt ▶

## Ein kleiner Ausflug in die Geschichte

Anfang der 1930er-Jahre waren Protonen und Neutronen als Bestandteile der Atomkerne bekannt, und man konnte sich darüber Gedanken machen, was diese Gebilde eigentlich zusammenhält. Betrachtet man die Gesetze der Physik, ist es keineswegs ohne Weiteres einsehbar, warum eine Zusammenballung aus Protonen und Neutronen stabil sein soll. Immerhin tragen die Protonen eine positive Ladung, und gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich bekanntlich ab. Daran ändern auch die dazwischengeschobenen Neutronen nichts. Trotzdem lehrt die Erfahrung, dass Atomkerne im Allgemeinen sehr stabile Gebilde sind – unsere ganze Welt besteht daraus.

Im Jahr 1935 versuchte der Japaner Hideki Yukawa den Zusammenhalt der Nukleonen im Kern durch die Existenz besonderer Kernkräfte zu erklären, die nur auf den winzigen Entfernungen wirksam sein sollten, die den Abmessungen des Kerns entsprachen. Es gibt noch ein weiteres Beispiel in der Natur, bei dem starke Kräfte nur auf sehr kurze Distanzen wirksam sind: die Anziehungskräfte zwischen den Atomen oder Molekülen, die letztlich dafür sorgen, dass feste Körper zusammenhalten. Sie entstehen dadurch, dass die Atome sozusagen ihre äußeren Elektronen „miteinander teilen“ oder „gemeinsam benutzen“.

Diese Elektronen schwirren also ununterbrochen zwischen den Atomen hin und her und stellen so den Zusammenhalt her.

Diese Modellvorstellung übertrug Yukawa auf die Atomkerne. Warum, so fragte er, sollten nicht auch die Kernkräfte durch Teilchen erzeugt werden, die zwischen den Protonen und Neutronen des Kerns hin- und herschwirren? Er nannte diese Teilchen „Austauschteilchen“ und berechnete ihre Masse als etwa 300 Mal so schwer wie die des Elektrons. Als Bezeichnung für diese Bindepartikel bürgerte sich der Name „Pionen“ oder „Pi( $\pi$ )-Mesonen“ ein. In der Tat wurde dieses Teilchen später auch wirklich entdeckt. Bis es jedoch so weit war, vergingen noch zwölf Jahre. Physiker fanden es schließlich in der kosmischen Höhenstrahlung. Die von Yukawa postulierte und später experimentell nachgewiesene Kernkraft“ bis zum Ende tauschen gegen:

Die von Yukawa postulierte und später experimentell nachgewiesene Kernkraft wurde zunächst als dritte fundamentale Kraft neben die elektromagnetische Wechselwirkung und die Gravitation gestellt. Heute weiß man, dass die fundamentale starke Kraft zwischen den Quarks im Inneren der Protonen und Neutronen wirkt und die Kernkraft eine ausserhalb der Nukleonen spürbare Restkraft ist.

(siehe Kasten oben), die die Teilchen zusammenhält, aber die Modelle sind noch relativ grob. Besonders erfolgreich war bisher das sogenannte Schalenmodell. Man stellt sich dabei vor, dass sowohl Protonen als auch Neutronen im Kern in Schalen angeordnet sind. Analog zum Bohr'schen Atommodell, bei dem die Elektronen in der Atomhülle ähnlichen Bedingungen genügen, passt in jede Schale nur eine bestimmte Anzahl von Teilchen, die durch quantenmechanische Gesetze vorgeschrieben ist. Wenn eine Schale voll ist, bedeutet das in der Regel, dass ein Atomkern mit dieser Protonen- oder Neutronenzahl besonders stabil ist. Man spricht dann von „magischen Zahlen“.

Die Anzahl der Protonen im Kern, die sogenannte Ordnungszahl  $Z$ , bestimmt, um welches Element es sich handelt, und die Anzahl der Neutronen  $N$  entscheidet darüber, ob das Atom stabil ist oder bald wieder zerfällt, also radioaktiv ist. Während die meisten dieser Atomkerne auf der Erde gar nicht natürlich existieren,

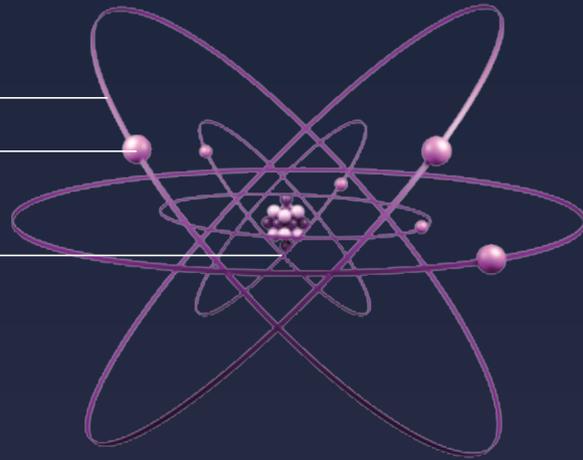
spielen sie eine große Rolle im Leben und Tod von Sternen. „Die Materie, wie wir sie kennen, ist nicht typisch für das, was sich im Inneren vieler Sterne befindet“, sagt TUM Kernphysiker Dr. Dennis Mücher. „Unter den dort herrschenden extremen Bedingungen gibt es vielleicht Atomkerne, die wir noch gar nicht kennen.“ Mit modernsten experimentellen Methoden wurde es aber in den letzten Jahren möglich, im Labor solch exotische Materie herzustellen und sie schnell genug zu untersuchen, bevor sie wieder zerfällt. Damit setzte eine Renaissance der Kernphysik ein.

Die Forscher können heute das Verhältnis von Protonen zu Neutronen in Atomkernen in weiten Grenzen künstlich ändern. Dafür ist allerdings ein gigantischer experimenteller Aufwand nötig. Die neuen Kerne produziert man beispielsweise aus anderen, stabilen Kernen, die man zerschmettert. Das geschieht, indem man die Ausgangskerne in einem großen Beschleuniger auf fast Lichtgeschwindigkeit bringt und sie dann auf eine Folie

Äußere Elektronenschale \_\_\_\_\_

Elektron \_\_\_\_\_

Innere Elektronenschale \_\_\_\_\_



**Atome bestehen aus einem Kern**, der von Elektronen umkreist wird. Diese bewegen sich auf bestimmten Schalen. Analog stellt man sich den Aufbau des Atomkerns vor

oder ein Materialstück, das sogenannte Target, schießt. Dort entstehen durch Kernreaktionen exotische Kerne, welche sich mit geeigneten Geräten nach Kernladung und Masse trennen, anschließend abbremsen, bündeln und erneut beschleunigen lassen und die dann sortenrein für die physikalischen Untersuchungen zur Verfügung stehen. Anlagen, wo all dies möglich ist, gibt es nur einige auf der Welt, etwa im GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt, am CERN in Genf, am RIKEN in Tokio sowie an einigen weiteren Zentren in Europa. Gerade werden auch in den USA und Kanada neue Anlagen gebaut, die bessere Experimentiermöglichkeiten bieten sollen.

### Urankerne zertrümmert

Die Messungen, die zu den mysteriösen Magnesiumkernen am CERN führten, fanden an der Anlage REX-ISOLDE statt. Ein internationales Forscherteam unter der Führung von Physikern des Exzellenzclusters Uni-

verse an der TU München hat sich dort Kerne in einem Bereich mit der magischen Neutronenzahl 20, der „Insel der Inversion“ genannt wird, genauer angesehen. Die Forscher ließen einen Strahl aus hochbeschleunigten Protonen auf Platten aus Urkarbid treffen. Die winzigen Geschosse zertrümmerten viele Urankerne, und es entstand eine Unzahl verschiedener Fragmente, darunter auch Magnesiumkerne mit 18 Neutronen und einem Atomgewicht von 30. „Normale“ Magnesiumkerne, wie sie auf der Erde häufig vorkommen, besitzen nur zwölf Neutronen. Wegen der großen Überzahl der Neutronen wird der Magnesium-30-Kern instabil, er ist radioaktiv und durchschnittlich nach gut einer dritten Sekunde schon wieder zerfallen.

Die Kunst der Experimentatoren bestand nun darin, innerhalb dieser kurzen Zeit die neu entstandenen Magnesiumkerne aus allen anderen Elementen herauszufiltern, zu präparieren und auf eine Titanfolie, die mit Tritium, schwerem Wasserstoff, beladen war, zu ▶

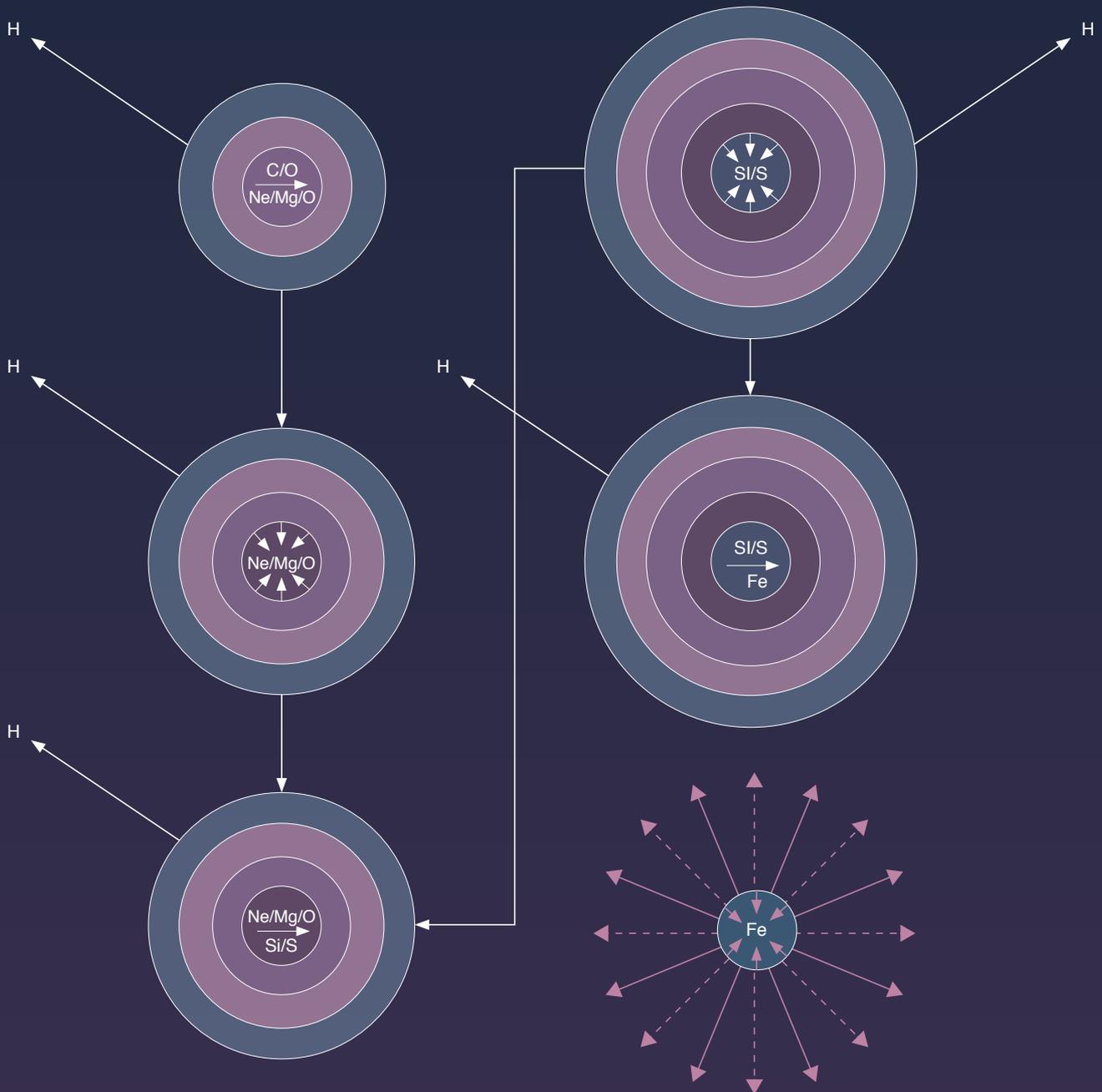


**Der Krebsnebel ist der heute noch sichtbare Überrest** einer Supernova. In derartigen Sternen entstehen unter extremem Druck und bei hohen Temperaturen Atomkerne, die auch schwerer sind als Eisen. Sie werden dann bei der Explosion ins Weltall hinausgeschleudert

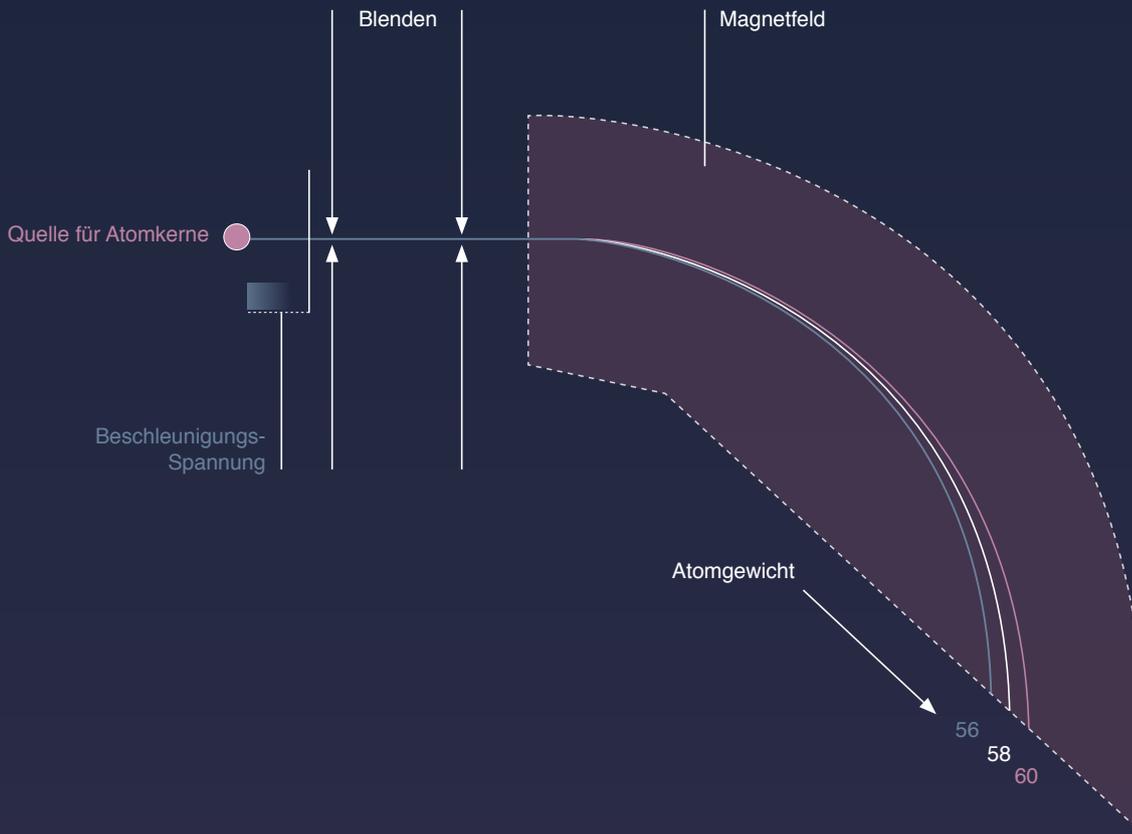
leiten. Dort streiften die Kerne bei Zusammenstößen je zwei Neutronen vom Tritium ab und nahmen sie auf – so entstanden Magnesium-32-Kerne. Und diese unterzogen die Forscher nun genauesten Messungen. Dabei stellten sie fest, dass es ovale und kugelförmige Exemplare gab. Doch deren Produktion gelang schon bei viel niedrigerer Energie, als theoretisch vorhergesagt. „Dieses Ergebnis stellt eine Herausforderung dar für die theoretische Beschreibung des Übergangs von einer Form in die andere“, resümiert Dr. Kathrin Wimmer in ihrer Veröffentlichung in den *Physical Review Letters*. Und ihr Doktorvater Reiner Krücken unterstreicht die Bedeutung dieser Entdeckung: „Die Freude war groß, dass es uns endlich gelungen ist, auch die sphärische Form dieses Magnesiumkerns nachweisen zu können.“ Man wird den neuen Kern und seine Eigenschaften nun auch in die Nuklidkarten eintragen. So heißen die farbigen Tableaus, die in vielen Physiklabors an der Wand hängen. Sie stellen eine Art Landkarte dar, denn sie zei-

gen die Landschaft der chemischen Elemente, geordnet nach der Zusammensetzung ihrer Atomkerne. Da gibt es das „Tal der Stabilität“, „Ozeane der Instabilität“, Küstenlinien (drip lines), „Inseln der Inversion“, und ganz in der Ferne ragt die „Insel der Stabilität“ auf, von der heute noch niemand weiß, ob es sich nur um ein Phantom oder doch um Realität handelt. Forscher versuchen, die Grenzen dieser Landschaft zu überschreiten und auf unbekanntes Terrain vorzustoßen. In ihrem ganz besonderen Fokus stehen dabei die magischen Zahlen. „Forschungsergebnisse der letzten Jahre legen nahe, dass sich magische Zahlen in manchen exotischen Kernen verschieben oder dass ganz neue magische Zahlen auftauchen können“, sagt Reiner Krücken. „Das könnte neue Erklärungsmöglichkeiten bieten für die Entstehung von schweren Elementen in den Sternen.“

So wollen die Physiker mit ihren irdischen Experimenten letztlich den Prozessen auf die Spur kommen, wie ▶



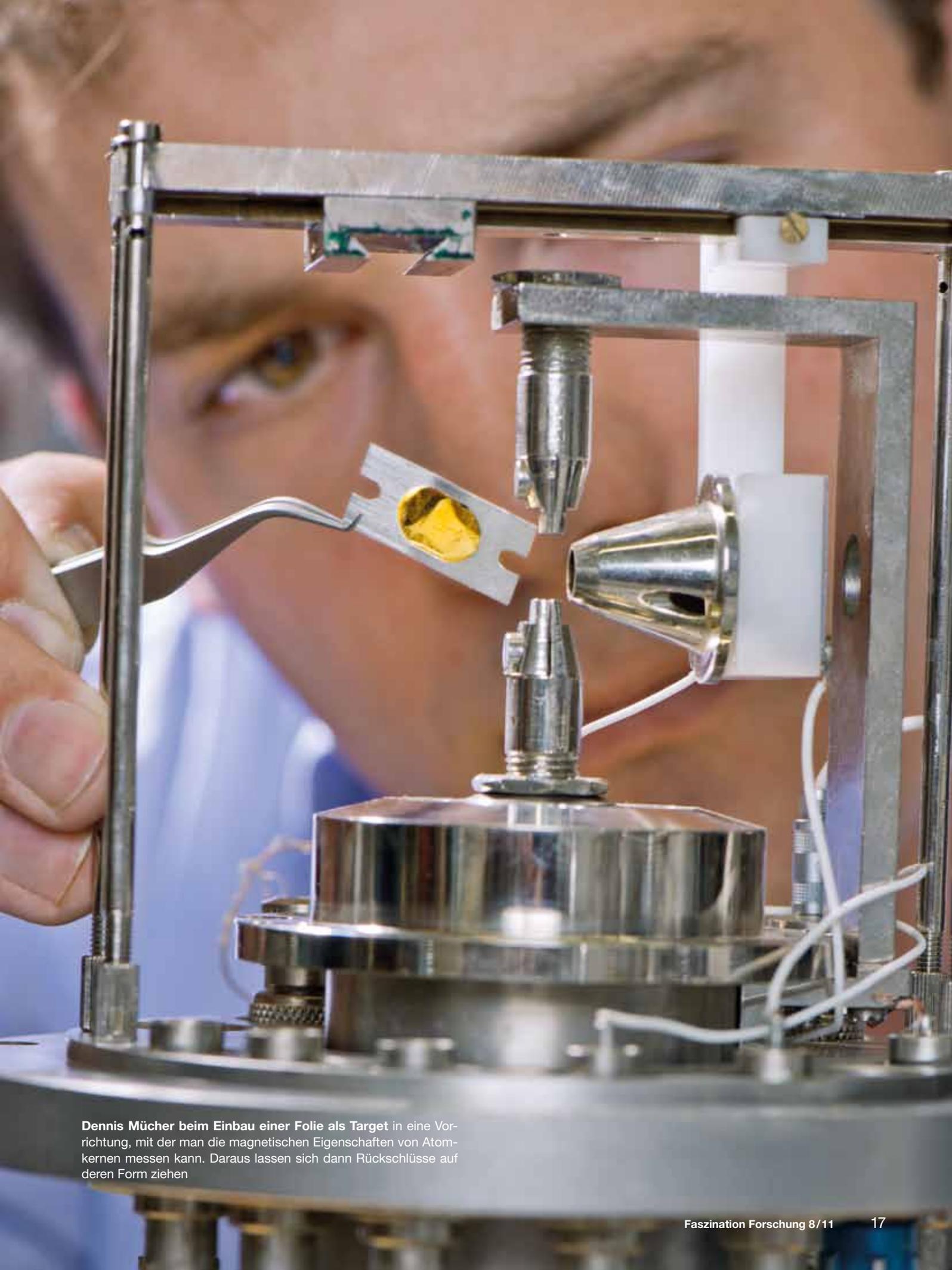
**Die Entstehung schwerer Elemente** nach heutigen Theorien: Schwere Sterne mit mehr als zehn Sonnenmassen brennen in Schalen weiter. Je weiter innen die Schalen liegen, desto schwerer sind die Elemente, die dort entstehen. Am Ende explodiert der innerste Kern



**So kann man Atomkerne mit unterschiedlichem Atomgewicht** und gleicher Protonenzahl voneinander trennen: Die beschleunigten Atomkerne, die durch die Löcher in den Blenden fliegen, werden vom Magnetfeld unterschiedlich abgelenkt, je nach ihrem Gewicht

unsere Materie draußen im All überhaupt entstanden ist. Denn gerade über die Bildung der schwereren Elemente hat man heute nur Vermutungen, aber noch keine klaren Beweise. Die häufigsten Elemente im Universum, Wasserstoff und Helium, bildeten sich bereits kurz nach dem Urknall. Andere Elemente wie Kohlenstoff oder Sauerstoff entstanden später durch die Fusion von Atomkernen im Inneren von Sternen. Elemente, die schwerer sind als Eisen, können dort jedoch nicht mehr entstehen. Sie verdanken ihre Existenz vermutlich gigantischen Sternexplosionen, auch Supernovä genannt, in denen unter extremem Druck und bei hohen Temperaturen schwere Kerne „gebacken“ und dann ins Weltall hinausgeschleudert wurden. Dazu zählen beispielsweise die Edelmetalle Gold und Silber oder das radioaktive Uran. Bei der Klärung der offenen Fragen arbeiten Kernphysik und Astrophysik eng zusammen. Denn in der Hexenküche einer Supernova entsteht offenbar eine Vielzahl massereicher Atomkerne, die über

verschiedene kurzlebige Zwischenstadien zu stabilen Elementen zerfallen. „Dass dabei auch exotische Materie entsteht, wissen wir, denn wir fanden Überreste einer solchen Explosion in der Tiefsee, wo sie sich vor rund drei Millionen Jahren ablagerten“, sagt Reiner Krücken. Dr. Thomas Faestermann, dem mit seinem Team vor einigen Jahren diese Entdeckung glückte, erklärt die Einzelheiten: „Wenn man Überreste exotischer Kerne finden will, darf man natürlich nicht nach Atomen suchen, die es auch sonst auf der Erde gibt. Wir spezialisierten uns auf radioaktives Eisen-60. Dieses Radionuklid mit einer Halbwertszeit von 2,6 Millionen Jahren wird innerhalb unseres Sonnensystems praktisch nicht erzeugt, während in einer einzigen Supernova aber eine Menge mit der zehnfachen Erdmasse davon entstehen kann.“ Die Wucht der Explosion schleudert alle neu gebildeten Elemente hinaus ins Weltall, und so können sie auch die Erde erreichen. Faestermanns Messproben stammen aus einer sogenannten Tiefsee-Mangankruste. ▷



**Dennis Muecher** beim Einbau einer Folie als Target in eine Vorrichtung, mit der man die magnetischen Eigenschaften von Atomkernen messen kann. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf deren Form ziehen



Foto: Eckert, TUM

**In solchen Vakuumkammern** wie hier am Maier-Leibnitz-Beschleunigerlabor der TUM laufen die Experimente in der Realität ab. Die Atomkerne werden darin beschleunigt, gebündelt, auf Targets geschossen und anschließend werden ihre Eigenschaften detailliert vermessen

Sie wurden aus einer Tiefe von knapp 5000 Metern vom Grund des Pazifischen Ozeans geborgen. Dort wuchsen die Schichten über mehrere Millionen Jahre lang mit einer Geschwindigkeit von lediglich 2,5 Millimetern pro Million Jahre. Jeder Schicht kann also nach ihrer Tiefe ein Alter zugeordnet werden. In einer etwa drei Millionen Jahre alten Schicht wurde eine deutliche Eisen-60-Überhöhung gemessen, ein Wert, der genau mit dem erwarteten Eisen-60-Niederschlag durch eine Supernova in einem Abstand von 100 Lichtjahren übereinstimmt.

### **Medizinische Anwendungen**

Um dies herauszufinden, benötigten die Forscher unvorstellbar empfindliche Geräte. Der Versuchsaufbau ähnelt dem von REX-ISOLDE: Auch hier wurden die Kerne separiert, beschleunigt, abgelenkt, auf Folien geschossen, wieder gebündelt und erneut gefiltert, bevor sie im Detektor anhand ihrer Flugzeit zweifelsfrei

nachgewiesen werden konnten. Am Ende erzielte man eine Empfindlichkeit von einem Eisen-60-Kern auf zehn Milliarden Eisen-Atome, das entspricht in etwa dem Nachweis von zwei Fingerhut voll Schnaps, gut verrührt im Bodensee.

All diese Arbeiten gehören natürlich zur reinsten Grundlagenforschung. Dennoch gibt es auch praktische Anwendungen, so Reiner Krücken: „Wir können mit unseren Anlagen neue Isotope für medizinische Anwendungen finden, etwa für das PET(Positronen-Emissions-Tomographie)-Verfahren, aber auch Alpha-Strahler für eine bessere Tumorbehandlung. Hinzu kommt, dass wir für unsere Zwecke so empfindliche Analysemethoden entwickelt haben, wie sie niemand sonst hat.“ So brächten die exotischen Atomkerne einen Gewinn für alle: den Kern- und Astrophysikern die Befriedigung ihrer Neugier und gleichzeitig der Materialforschung und Medizin einen Fortschritt bei ihren Verfahren.

*Brigitte Röthlein*

# 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.

## Porträt

Link

[www7.in.tum.de/~rybal](http://www7.in.tum.de/~rybal)



# Der Terminator und Hilberts Würstchenfabrik

Am Lehrstuhl für Theoretische Informatik entwickelt der Forscher Andrey Rybalchenko Analysewerkzeuge, um die Qualität von Software automatisch überprüfen zu können

**M**„Möchten Sie eine Weißwurst essen?“, begrüßt Andrey Rybalchenko seine Besucherin, kaum dass sie in seinem Garchingener Büro am TUM Campus Platz genommen hat. Eine legitime Frage in Bayern, schließlich ist es elf Uhr morgens, und freitags gibt es am Lehrstuhl immer Weißwürste zum Frühstück. Vor etwas mehr als einem Jahr wurde er zum Professor am Lehrstuhl für Theoretische Informatik an der TUM berufen, und man merkt, der Akademiker russischer Herkunft ist längst in Bayern angekommen. Von den Biergärten in der Landeshauptstadt schwärmt er und er hofft, bald einem seiner Hobbys frönen zu können: dem Windsurfen, vielleicht am Starnberger See. Wenn er sich denn losreißen kann. Zu interessant, zu spannend ist das, womit er sich beschäftigt: Compu-

terwissenschaften. Seine Vorliebe dafür und für die Naturwissenschaften hat Andrey Rybalchenko als Schüler entdeckt. Mathematik und Physik wurden seine Lieblingsfächer. In seiner Heimatstadt Woronesch, rund 600 Kilometer südlich von Moskau, stand zwar das Fach Informatik auf dem Lehrplan, aber damals gab es nicht für jeden Schüler einen Rechner. Und Privathaushalte besaßen erst recht keine Personal Computer. Also einigt sich der junge Andrey mit seinem Lehrer, der dann nachmittags immer den Computerraum für ihn aufsperrt. So kam er dann zur Programmierung. „Man macht etwas, und es funktioniert – oder auch nicht. Das Schöne daran ist, man kann es sofort überprüfen“, begeistert er sich. Bereits als Student hat er programmiert, damals fand er es interessant, Steuerungsprogramme ▶

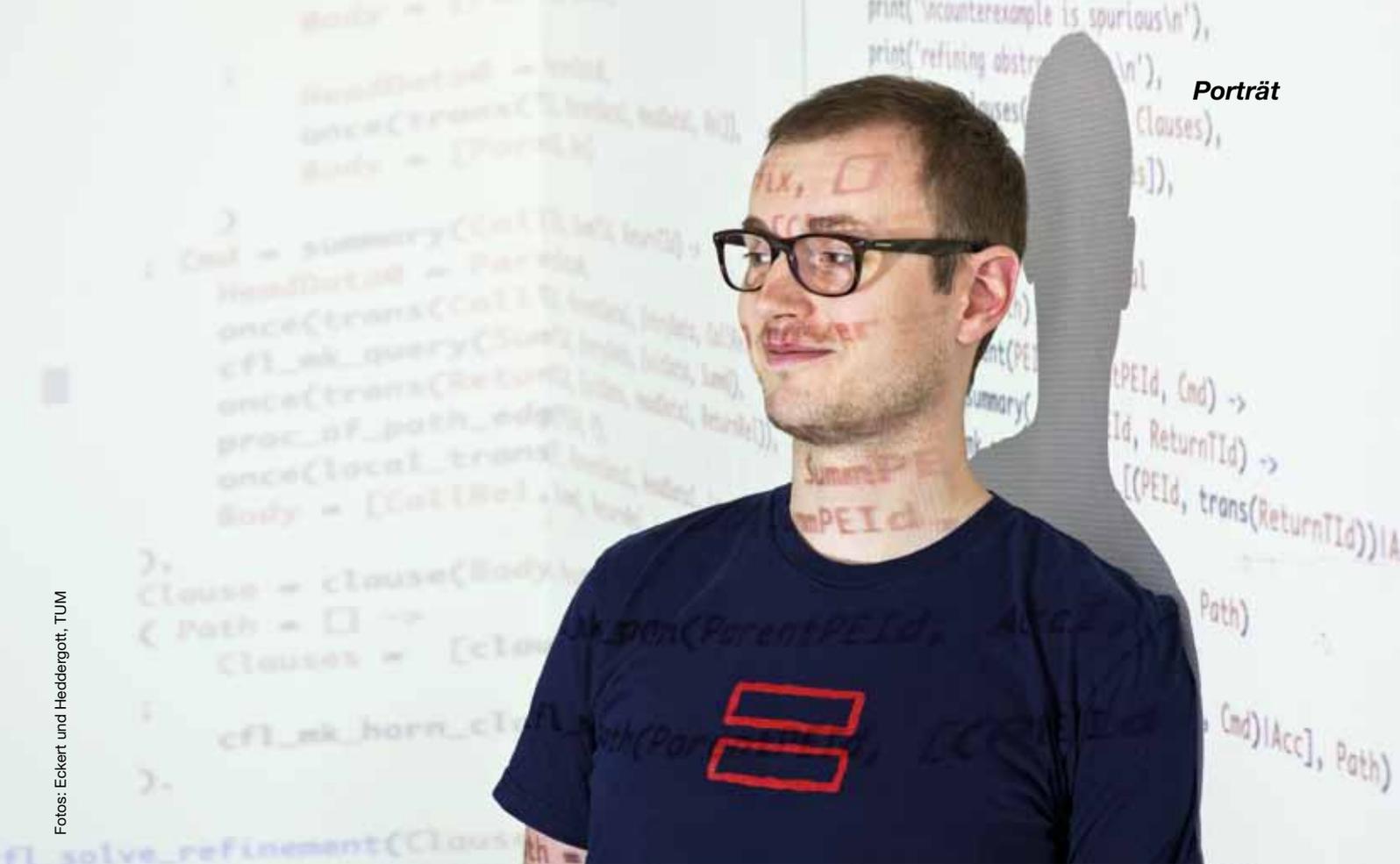


***„Wir müssen unbedingt Raum für Zweifel lassen, sonst gibt es keinen Fortschritt, kein Dazulernen. Man kann nichts Neues herausfinden, wenn man nicht vorher eine Frage stellt. Und um zu fragen, bedarf es des Zweifelns“***

**Richard P. Feynman (1918 – 1988)**

zu schreiben. Rybalchenkos Leidenschaft gilt nach wie vor der Software, doch heute geht es ihm nicht darum, selbst ein Programm zu schreiben. Viel interessanter findet er es, die Fehler im Code zu finden. Und zwar mithilfe von: Programmen. Gemeinsam mit seinem vierköpfigen Team an der TUM entwickelt Rybalchenko Software-Werkzeuge, die automatisch die Programmierung überprüfen und optimieren. „Wir sind umgeben von Computern in unserem Alltag, auch wenn wir uns dessen nicht bewusst sind. Für mich ist es faszinierend, mit wissenschaftlichen Methoden über die Programmierung nachzudenken und dann Programme zu entwickeln, die automatisch nach Fehlern suchen“, beschreibt er seine Arbeit. Ingenieure haben es jedenfalls einfacher als Informatiker: Wenn erstere beispielsweise eine Brücke

planen, berechnen sie deren maximale Belastung. Doch was ist bei Software der Extremfall? Bislang behelfen sich die Entwickler damit, die Reaktion eines Programms mit einer Reihe von Eingaben zu simulieren. „Sie können aber nicht alle möglichen Situationen testen, da wären sie sehr, sehr lange beschäftigt“, schmunzelt Rybalchenko und illustriert dies mit einem Vergleich, der eine Ahnung davon gibt, was Ewigkeit bedeuten könnte: Die Anzahl der Atome im Universum beträgt etwa  $10^{80}$ . Bei einem 10-MB-Cache (dieser schnelle Arbeitsspeicher eines Computers erlaubt die Zwischenspeicherung von Daten, die statistisch gesehen voraussichtlich benötigt werden) gibt es  $10^{20.000.000}$  Möglichkeiten, mit „An“ oder „Aus“ beziehungsweise mit „0“ oder „1“ zu operieren.



### Lebendigkeitseigenschaften von Computern

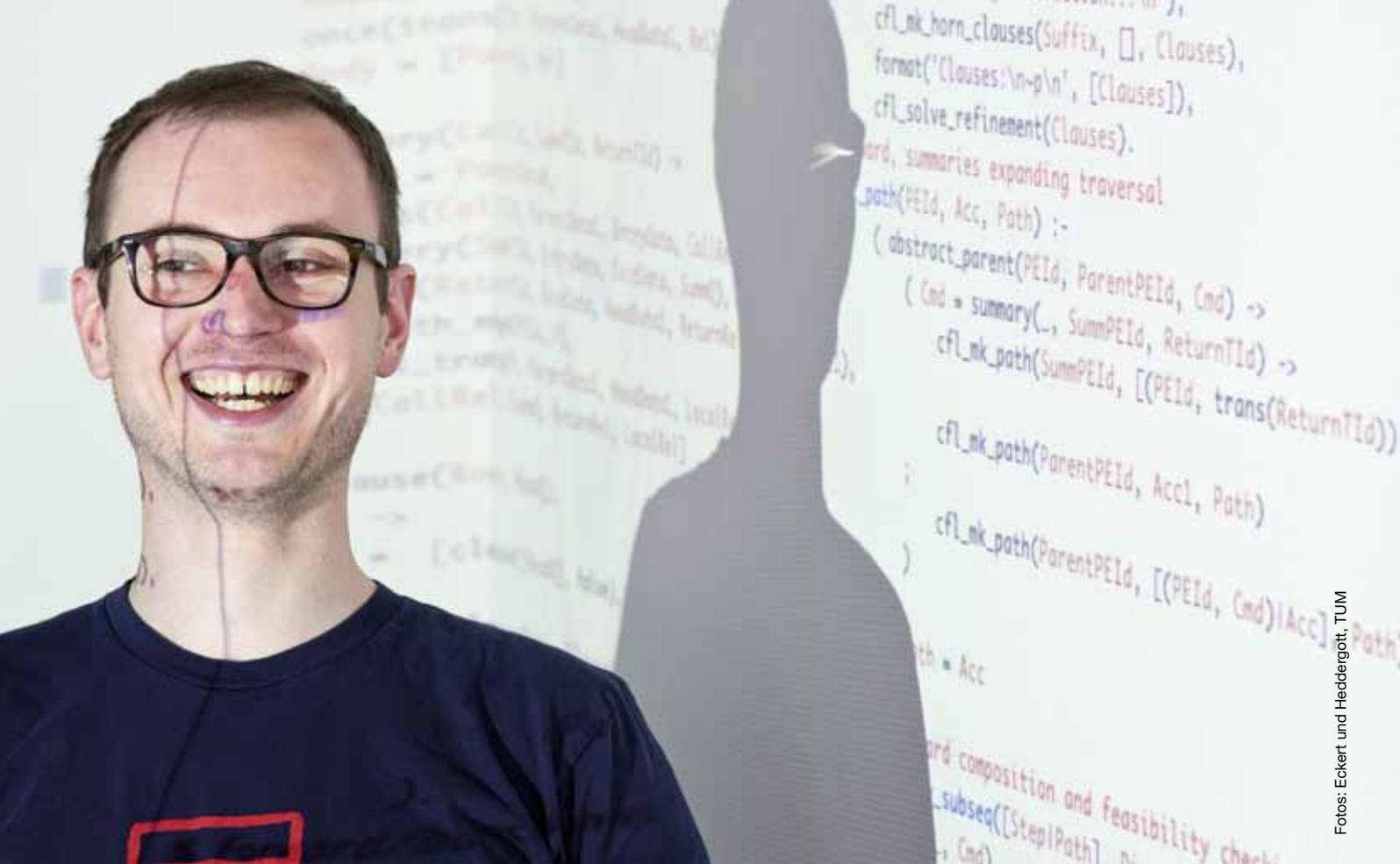
Computersysteme sind nie perfekt, entweder ist der Systementwurf fehlerhaft oder beim Programmieren hat sich ein Fehler eingeschlichen. Jeder Nutzer wird irgendwann einmal damit konfrontiert: wenn etwa am Windows-Rechner die Sanduhr einfriert oder sich das Windrad am Mac dreht und dreht und kein Ende findet. Das Programm läuft zwar weiter, aber es lässt sich nicht mehr steuern, beziehungsweise es reagiert nicht mehr auf Eingaben. Die Informatiker nennen dies „Verletzung der Lebendigkeitseigenschaften“. Diese Eigenschaften garantieren, dass das Programm bestimmte Befehle ausführt oder eine Berechnung in akzeptabler Zeit beendet (sogenannte Terminierung).

Versagt einmal ein Textverarbeitungsprogramm, ist das nicht so tragisch. Viel schwerer wiegen Software-Fehler in komplexen und kritischen Anwendungen. Der Absturz der Ariane 5 im Jahr 1996 ist beispielsweise darauf zurückzuführen ebenso wie der Ausfall des Stromnetzes in den USA im Jahr 2004. Nun ist es so, dass Programme nicht komplett überprüft werden können. Um die Komplexität zu reduzieren, lassen die Tester vermeintlich unwichtige Details weg. Doch wie weit kann die Abstraktion gehen? Es ist nicht auszuschließen, dass wichtige Programmeigenschaften verloren gehen. Glücklicher-

weise gibt es Alternativen: Die Informatiker bedienen sich der philosophischen Modallogik, um Betriebssysteme zu analysieren und deren Qualität zu prüfen. Und so kann man sich, wie Andrey Rybalchenko in seiner Doktorarbeit bewiesen hat, mit Hilfsaussagen, sogenannten „Transitionsinvarianten“, behelfen. Dabei wird die Aufgabe in viele kleine Teilbereiche zerlegt und quasi Stück für Stück überprüft. Das von Rybalchenko entwickelte Analysewerkzeug generiert die Transitionsinvarianten automatisch und führt die Teilresultate zu einem Gesamtergebnis wieder zusammen.

### Mit Jobs das Studium finanziert

Die erwähnte Dissertation hat der sportbegeisterte Wissenschaftler, der die rund 15 Kilometer von der Münchner Innenstadt zum Garching Campus mit dem Fahrrad fährt, nicht in Russland, sondern am Max-Planck-Institut (MPI) für Informatik in Saarbrücken angefertigt. Das Studium des Maschinenbaus mit Schwerpunkt Informatik hatte er zunächst in seiner Heimatstadt Woronesch begonnen. Gerne hätte er im Ausland oder wenigstens in Moskau studiert, doch die Studiengebühren in der russischen Hauptstadt konnte die Familie nicht aufbringen. Zwei Jahre nach Studienbeginn trifft er zufällig einen alten Schulfreund wieder. Als dieser ▶



Fotos: Eckert und Heddergött, TUM

ihm erzählt, dass er in Saarbrücken studiere und dass man das Studium mit einem Hiwi-Job finanzieren könne, beschließt er, nach Deutschland umzuziehen. Diesen Entschluss hat der 32-Jährige nicht bereut. Ebenso wenig, dass er nicht zum berühmten Massachusetts Institute of Technology (MIT) nach Boston gegangen ist: „Gute Forschung gibt es nicht nur in den USA“, meint er und grinst jugenhaft. So hat er also sein Studium in Deutschland fortgesetzt und sich unter anderem mit Software-Verifikation befasst. Dabei traf Rybalchenko auf Andreas Podelski, der am MPI für Informatik in Saarbrücken eine Forschungsgruppe leitete und später sein Doktorvater wurde.

### **Einer der einflussreichsten Forscher unter 35**

Ins Ausland ist er dann doch gekommen, und zwar im Anschluss an seine Doktorarbeit. In den Forschungslaboren von Microsoft hat er als Gastwissenschaftler zunächst in Redmond (USA) und dann in Cambridge (Großbritannien) an den Lebendigkeitseigenschaften geforscht. Dort entstand in Kooperation mit seinem Microsoft-Kollegen Byron Cook ein Analysewerkzeug, das bei Windows-Gerätetreibern Terminierungsfehler entdeckt und ausmerzt. Der Name des Programms: Terminator. Es ist auch ein kleines bisschen Rybalchenkos Verdienst,

wenn die heute gängigen Microsoft-Gerätetreiber das tun, was der Nutzer will, statt sich in den Labyrinthen der Programmcodes zu verirren. So ist denn Byron Cook, wissenschaftlicher Leiter in Microsofts Labor an der Cambridge University (Großbritannien) und Lehrstuhlinhaber Informatik an der Queen Mary University von London, voll des Lobes über den Kollegen. „Andrey blickt auch durch vertrackteste Konzepte und Ideen durch, er sieht sofort die Zusammenhänge bei einem Problem. Er akzeptiert nur mathematisch abgesicherte Argumente. Gleichzeitig treibt ihn sein Optimismus dazu, Lösungen für alte und tiefgründige Probleme zu finden.“

Dieser Meinung ist auch die Redaktion der Technology Review. Das Magazin des MIT hat den TUM Wissenschaftler vergangenes Jahr zu einem der 35 einflussreichsten Forscher unter 35 Jahren gekürt. So manch ein Gesprächspartner lässt sich durch das Äußere des jugendlich wirkenden Professors täuschen. Wie er an seinem Schreibtisch vor seinem iMac dasitzt, mit Jeans und T-Shirt bekleidet, könnte man ihn für einen Studenten in den ersten Semestern halten und ihn womöglich unterschätzen. Bei Byron Cook ist das Gegenteil der Fall, seine Wertschätzung ist immens: „Andrey ist die intelligenteste Person, die ich je getroffen habe. Sehr schöpferisch, aber auch wirklich sehr witzig, was



die Arbeit mit ihm zu einem großen Vergnügen macht. In ihm ist eine seltene Brillanz mit Hartnäckigkeit und einer unstillbaren Lust am Unruhestiften vereint. Er ist voller Erkenntnisse und Energie.“

### **Hilbert'sche Würstchenfabrik**

Diese Energie mündet aktuell in die sehr produktive „Hilbert'sche Würstchenfabrik“, das neueste Projekt von Andrey Rybalchenko, der nicht etwa in die Herstellung von Wurstwaren eingestiegen ist. Vielmehr beschäftigt er sich mit der Entwicklung einer Software, die Werkzeuge liefert, um Programme verifizieren zu können. „Es ist wie beim Kochen: Ich gebe das Rezept vor, darin sind die Zutaten aufgelistet, in dem Fall die mathematischen Gleichungen, welche die Verifikationsalgorithmen beschreiben. Am Ende kommt statt eines Gerichts ein passendes Analysewerkzeug für den Programmierer heraus. Damit kann dieser die Qualität seines Programms überprüfen“, erläutert der Informatiker. Der Name der „Würstchenfabrik“ ist eine Hommage an David Hilbert, einen der bedeutendsten Mathematiker des 20. Jahrhunderts.

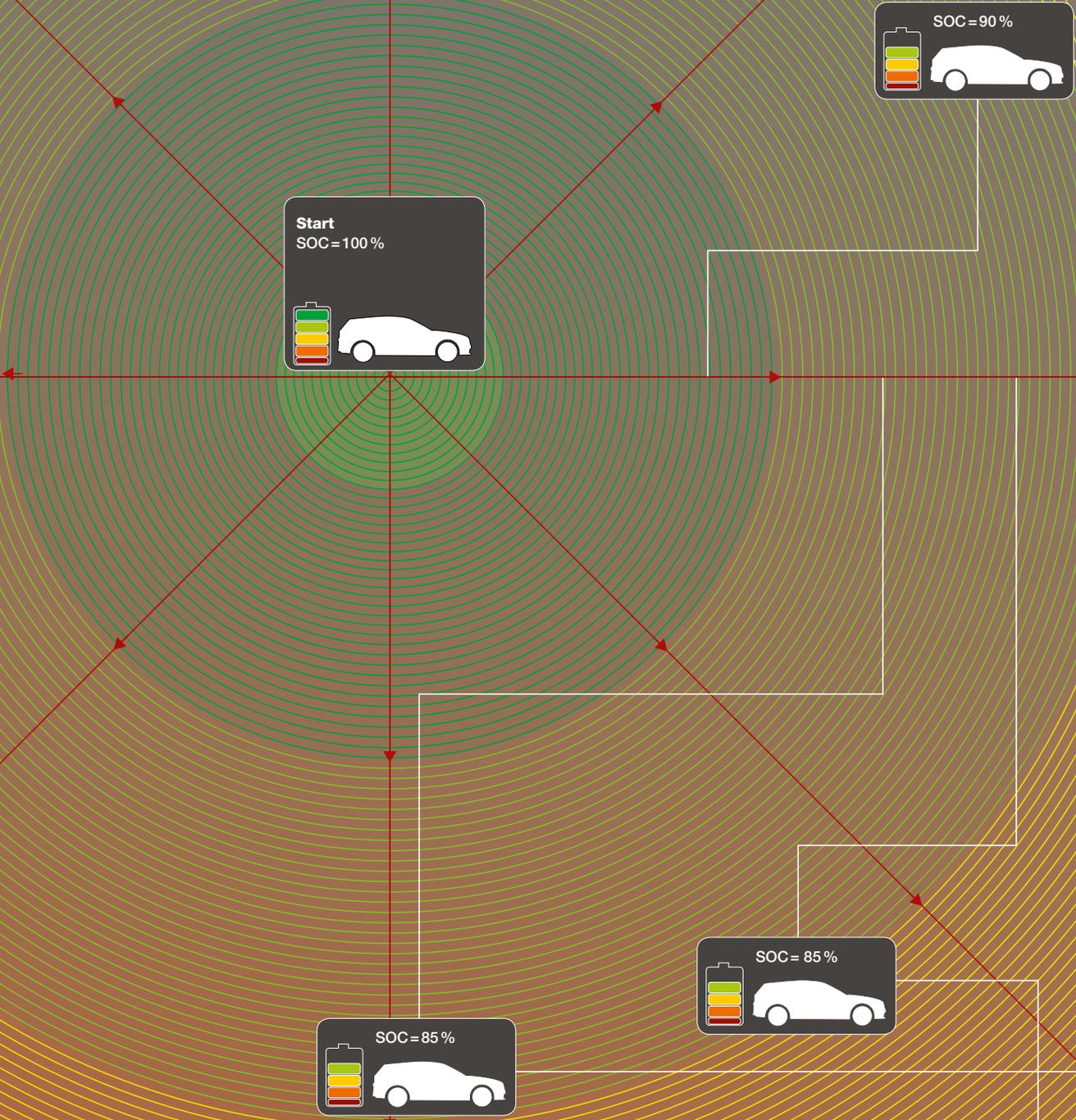
Wer den Menschen hinter dem Informatiker verstehen will, sollte sich eines seiner Lieblingsvideos (auf YouTube) anschauen. Es zeigt ein Interview mit dem Physiker

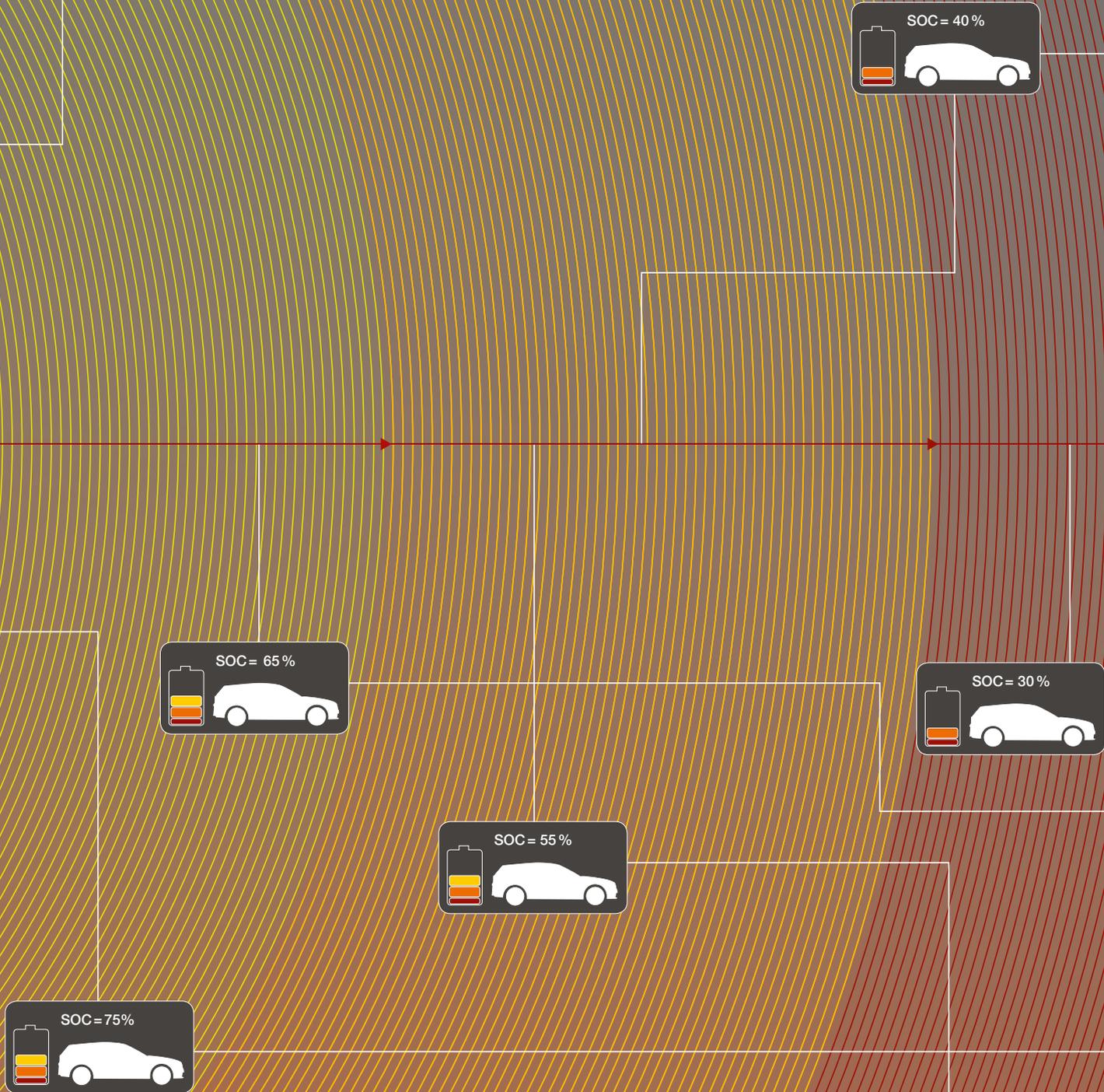
Richard Feynman, der im Laufe der knapp achtminütigen Sequenz einen Journalisten zunehmend zur Verzweiflung treibt. Eigentlich geht es um die Wirkungsweise von Magneten. Der Reporter beschreibt die Abstoßung beziehungsweise die Anziehung der Magneten und fragt nach dem „feeling“ zwischen den beiden. Feynman: „Was genau möchten Sie wissen?“ Der Reporter präzisiert die Frage: „Was passiert zwischen den Magneten?“ Feynman: „Die Magneten stoßen sich ab.“ Reporter: „Warum tun sie das?“ Feynman schaut sein Gegenüber ruhig und sehr intensiv an. Daraufhin der Reporter genervt: „Das ist doch eine ganz vernünftige Frage!“ Feynman: „Selbstverständlich. Das ist eine ganz exzellente Frage.“

Worauf der Nobelpreisträger in dem Exkurs hinauswollte, ist, dass eine vermeintlich einfache Frage nicht eindeutig beantwortet werden kann. Es kommt auf den Kontext, auf das gemeinsame Verständnis und auf gewisse Sachverhalte an, von denen die Beteiligten ausgehen, dass sie wahr sind. Es geht also um mehr als um Messen und Beobachten, um Dinge, die wir wahrnehmen, aber noch nicht erklären können.

Was Andrey Rybalchenko bewegt, ist eigentlich ganz einfach: den Dingen, auf den Grund gehen. Raum für Fragen und Raum für Zweifel lassen – um weiterzukommen.

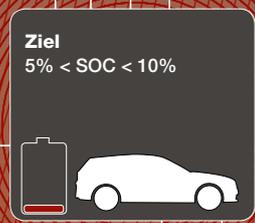
*Evdoxia Tsakiridou*





# Neue Speicher braucht das Land

Die Akkus zukünftiger Elektroautos sollen klein und leicht, effizient und langlebig sein – tauglich für den Masseneinsatz. Forscher der TU München treiben mit ihrer Arbeit an neuen Batterien die Entwicklung der Elektromobilität voran



**SOC = State of charge:**  
Maßeinheit für den Ladezustand der Batterie  
in Prozent der maximalen Kapazität

Link

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

**B**ald ist der Tank leer. Immer mehr Menschen wollen mobil sein und die Zahl der Autos auf unserem Planeten wächst rasant. Doch mit den herkömmlichen Verbrennungsmotoren wird das nicht mehr lange funktionieren. Massenhaft betrieben, schädigen sie zunehmend Umwelt und Gesundheit. Außerdem ist ihr Brennstoff endlich – die weltweiten Reserven von fossilen Primärenergieträgern wie Erdöl und Erdgas, so schätzen Experten, werden nur noch 40 bis 80 Jahre reichen.

Forschung, Wirtschaft und Politik sind sich inzwischen weitgehend einig: Die Zukunft gehört der Elektromobilität, dem Einsatz von Elektrofahrzeugen im Individualverkehr. Die deutsche Bundesregierung verknüpft seit dem Jahr 2009 mit ihrem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ Klimaschutz und Industriepolitik. Das Ursprungsland des Automobils soll auch Leitmarkt für

die E-Mobilität werden – mit mindestens einer Million Elektrofahrzeugen auf deutschen Straßen bis 2020. Doch der Weg dahin ist schwierig. „Es reicht nicht, einfach den Antrieb auszutauschen“, sagt Andreas Jossen, Professor für Elektrische Energiespeichertechnik (EES) an der Technischen Universität München (TUM). „Alle Komponenten des Fahrzeugs und seiner Infrastruktur müssen überdacht werden.“ Weltweit gebe es noch kein ganzheitliches Konzept für wirtschaftlich und technologisch sinnvolle Elektrofahrzeuge, die mit den heute genutzten Autos in Fahrleistung und Verfügbarkeit mithalten können.

#### **Wissenschaftszentrum Elektromobilität**

An einem solchen Konzept arbeitet das 2010 gegründete Wissenschaftszentrum Elektromobilität (WZE) der TUM. Es bündelt die Forschungsaktivitäten zu Fragen der Elektromobilität von über 50 Lehrstühlen an acht ▶



**Auf der Suche nach der optimalen Ladestrategie** hilft eine Klimakammer, in der das Verhalten von bis zu 32 einzelnen Batteriezellen bei Temperaturen zwischen - 20 °C bis 50 °C untersucht wird

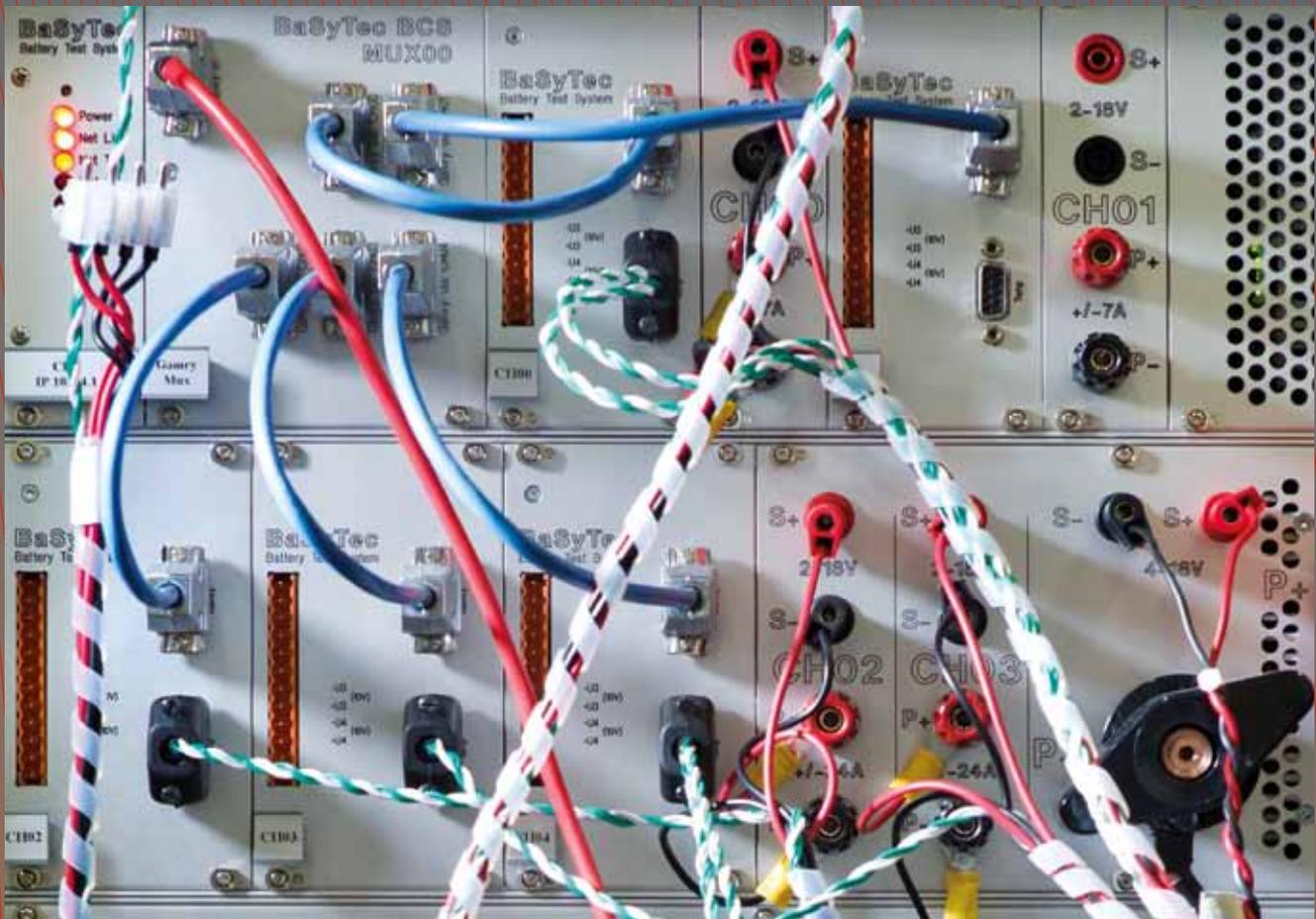
Fakultäten und fördert die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Das WZE fasst die relevante Infrastruktur der Lehrstühle zusammen und schafft Möglichkeiten für nationale und internationale Kooperationen. Eingebunden ist das WZE in die Munich School of Engineering, eine neue Fakultät, die den Schwerpunkt Energie mit den drei Säulen Elektromobilität, Erneuerbare Energien und Energieeffizienz hat.

Über das WZE ist die TUM seit Oktober 2010 am Campus for Research Excellence and Technological Enterprise (CREATE) in Singapur beteiligt. Gemeinsam mit internationalen Partnern arbeiten ihre Wissenschaftler an dem von Singapur finanzierten Projekt „Electromobility in Megacities“. Hier werden neben neuen Verkehrskonzepten für Ballungsräume auch die speziellen klimatischen und kulturellen Anforderungen an die Elektromobilität in Asien untersucht. In Deutschland will das WZE mit seinem Pilotprojekt MUTE zeigen, dass

Elektromobilität bald für den Individualverkehr eine bezahlbare Alternative sein kann. Zum ersten Mal werden hier in einem umfassenden Forschungsansatz technische Herausforderungen an ein Elektrofahrzeug mit sozioökonomischen Rahmenbedingungen verknüpft. Das innovative Fahrzeugkonzept für den Einsatz im städtischen Großraum soll mit einem fahrbaren Prototyp in diesem September auf der Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA) in Frankfurt vorgestellt werden.

#### **Guter Speicher ist teuer**

Die Forschungsarbeiten verdeutlichen, wie die Elektromobilität den Straßenverkehr verändern wird, aber auch, dass Autofahrer umdenken müssen, wenn diese sich durchsetzen soll. Jonny Dambrowski, Post-Doktorand am EES, erläutert: „Ein Elektrofahrzeug ist etwas völlig anderes als das Auto, das wir kennen. Das liegt vor allem am Energiespeicher. Es wäre viel



Fotos: Eckert, TUM

**Bild oben:** Auf dem Prüfstand: Frontansicht eines Testsystems der Firma BaSyTec, mit dem TUM Forscher Batterien analysieren  
**Bild unten:** Dieser an der TUM entwickelte E-Mobil-Prototyp fährt zur Messe IAA



Bild: TUM

zu teuer, sich einen auf den Mehrzweckeneinsatz ausgelegten Speicher einzubauen.“ Autofahrer müssen sich fragen: Wie setze ich das Fahrzeug hauptsächlich ein? Für Gelegenheitsfahrer lohnt sich ein Elektroauto nicht. Großes Potenzial hat das E-Mobil dagegen im regelmäßigen Kurzstreckeneinsatz. Der Energieversorger E.ON hat ermittelt, dass derzeit in Deutschland 50 Prozent aller Autos im Straßenverkehr täglich nicht weiter als 50 Kilometer und 80 Prozent nicht weiter als 70 Kilometer bewegt werden. Elektrofahrzeuge sind gut geeignet für sich wiederholende Fahrten auf festen Routen, wie sie etwa zwischen Wohnung und Arbeitsplatz oder im Einsatz von Dienstleistungs- und Logistikflotten vorkommen. Hier ist sowohl der Energieverbrauch planbar als auch die Möglichkeit zur Einrichtung von Ladestationen gegeben. Auf den Münchner Wissenschaftstagen 2010 schätzte Dr. Jörg Kruhl, Leiter Neue Technologien bei E.ON, das Gesamtpotenzial dieses Bereichs auf >

**Batterien-Puzzle:** In den Laboren der TUM warten Lithium-Ionen-Batterien auf den nächsten Testeinsatz

über 20 Millionen Fahrzeuge. Mehr als die Hälfte der laut Kraftfahrt-Bundesamt hierzulande zugelassenen rund 42 Millionen Autos sind Klein- oder Kompaktwagen.

### **Gefragte Batteriemanager**

Das MUTE-Mobil soll durch sein geringes Gewicht, wenig Rollwiderstand und eine gute Aerodynamik Vorbild für ein vergleichsweise günstiges Auto sein. Mit Akkus betriebene Fahrzeuge haben freilich derzeit noch eine wesentlich schlechtere Energieausbeute als Benzinmotoren und das „Tanken“ dauert viel länger. Nicht zuletzt diese beiden zentralen Probleme gilt es bei der Entwicklung der Elektromobilität zu lösen. Die unter anderem an CREATE und MUTE beteiligten 18 Forscher und Studenten des im Mai 2010 gegründeten Lehrstuhls EES wollen deshalb das Batteriemangement effizienter machen. Hierbei spielen neben den vielversprechenden Lithium-Ionen-Batterien auch klassische Bleibatterien und alkalische Systeme eine Rolle. Geforscht wird ebenso an Systemen, die auf Metall-Luft, Redox Flow und Hochtemperaturbatterien basieren. Ein Ziel ist dabei stets, Akkus kleiner, leichter und robuster zu machen. MUTE nutzt als Energiespeicher einen Lithium-Ionen-Akkumulator mit neu entwickeltem Batteriemangement, Sicherheits- und Kühlsystem.

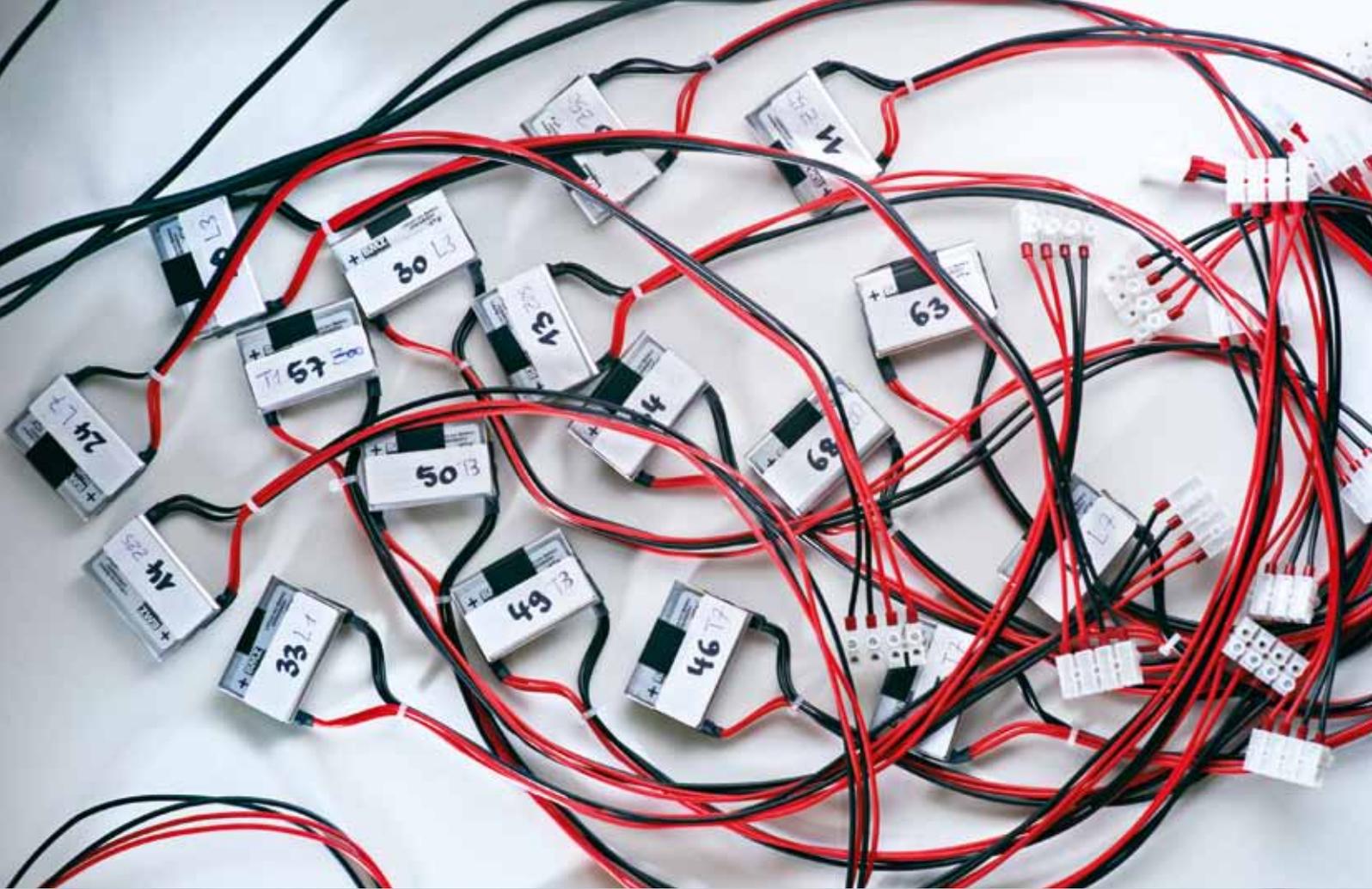
### **Vorhersagen mit Algorithmen**

Wer Batterien effizienter machen will, muss viel rechnen und experimentieren. Zum Beispiel helfen Dam-

browskis Algorithmen, Vorhersagen über die Leistungsfähigkeit von Speichern zu verbessern oder zu berechnen, wie Speicher bei unterschiedlicher Belastung und verschiedenen Temperatureinflüssen altern. Der promovierte Mathematiker setzt komplexe Modelle ein, die Stromfluss, Temperatur und Ladezustand berücksichtigen. Derartige Berechnungen eröffnen auch Wege, die Lebensdauer von Akkus besser zu bestimmen. Hier führt die Kombination von Kalendermodellen, basierend auf über längere Zeit mit bestimmtem Ladezustand stehenden Speichern, und zyklischen Modellen von Auflade- und Entladevorgängen zum Ziel. 3-D- und 2-D-Modelle geben Aufschluss über die Strom- und Temperaturverteilung im Speicher und deren Auswirkungen auf die Qualität der Leistung und der Sicherheit.

### **Batterien im Stresstest**

Auch Stressfaktoren müssen berücksichtigt werden. „Steht ein Wagen in der Kälte, ändern sich die Qualitätsmerkmale des Speichers im Vergleich zu einem, der im Warmen steht“, erläutert Dambrowski. „In unserem Batterielabor testen wir solche Dinge auch in Klimakammern. Eine weitere interessante Frage ist die Auswirkung einer Belastung der Akkus durch Höhenunterschiede, wenn Sie etwa am Fuß der Schwäbischen Alb wohnen und oft die Berge hinauf- und hinunterfahren.“ Wirkungsgrad und Lebensdauer von Batterien lassen sich durch optimierte Ladeverfahren verbessern. ▶



### Glossar

**Batteriemanagement** überwacht und steuert Ladung und Entladung von Batterien in Energiespeichersystemen (vermeidet z. B. Überladung und Tiefenentladung), sorgt für den effizienten Einsatz und verlängert die Lebensdauer elektrischer Energiespeicher.

**Energiedichte** bezeichnet in der Physik den auf ein Volumen bezogenen Energieinhalt. Von großem praktischem Interesse ist sie bei den in der Technik verwendeten Energiespeichern wie Kraftstoffen und Batterien. Im Fahrzeugbau ist die Energiedichte des verwendeten Energiespeichers entscheidend für die erzielbare Reichweite.

**Lithium-Ionen-Akkumulator** hat kurze Ladezeiten, weist eine hohe Energiedichte auf, ist thermisch stabil und unterliegt keinem Memory-Effekt. Li-Ionen-Akkus versorgen tragbare Geräte mit hohem Energiebedarf, für die herkömmliche Nickel-Cadmium- oder Nickel-Metallhydrid-Akkus zu schwer oder zu groß

wären (Mobiltelefone, Digitalkameras, Notebooks). Sie werden auch in der Elektromobilität eine Schlüsselrolle spielen.

**Nickel-Metallhydrid-Akkumulator** verdrängte die giftigen Nickel-Cadmium-Akkus, kommt dort zum Einsatz, wo hoher Strombedarf besteht und hohe Batteriekosten vermieden werden sollen (Fernsteuerungen, Elektrowerkzeuge). Gehört zu den Batterien, die für leistungsfähige Elektroautos und Hybridfahrzeuge entwickelt werden. Geringere Energiedichte als der Lithium-Ionen-Akku.

**Vehicle to Grid (V2G)** ist ein Konzept zur Speicherung und Abgabe von elektrischem Strom aus dem öffentlichen Stromnetz. Im Unterschied zu reinen E-Autos sollen hierbei Fahrzeuge nicht nur Strom aus dem Netz entnehmen, sondern in Zeiten großer Netzlast auch wieder einspeisen. Dies würde den Bedarf an Spitzenlastkraftwerken senken und einen gleichmäßigeren Betrieb von Grund- und Mittellastkraftwerken ermöglichen.

Lithium-Ionen-Akkus sollen ein Autoleben lang halten und damit wirtschaftlicher werden. Sie haben den Vorteil, dass sie sich ohne größeren Verschleiß tiefer entladen lassen als die zum Beispiel im Hybridmodell Prius von Toyota eingebauten Nickel-Metallhydrid-Akkus. Auf der Suche nach der optimalen Ladestrategie hängt zunächst viel von der richtigen Batteriediagnose ab, der genauen Determinierung des Lade- und des Alterungszustands. Darauf aufbauend kann eine smarte Ladestrategie entwickelt werden. „Bei Batterien geht es nicht nur ums Vollladen, sondern auch darum, deren Alterung zu bremsen. Wir arbeiten an Ladeverfahren, die effizient, schnell, schonend und sicher sind. Dazu gehören neue Schnellladeverfahren und Vehicle-to-Grid-Konzepte“, erklärt Dambrowski.

### Interdisziplinäre Arbeit am Verkehrsstrom

Auch die Elektrische Energiespeichertechnik arbeitet

eng mit anderen Fakultäten der TUM wie der Chemie, der Physik und dem Maschinenwesen zusammen. Ihr Ansatz ist es, die gesamte Wertschöpfungskette von Speichersystemen zu verbessern, ausgehend von der Materialwissenschaft über systemtechnische Fragen bis hin zur Integration und Applikation in Fahrzeugen und Verkehrssystemen. Dabei untersuchen die Forscher verschiedene Anwendungen in reinen Elektrofahrzeugen, Hybridfahrzeugen und Fahrzeugen mit Brennstoffzellen. Zwar steht die E-Mobilität derzeit im Vordergrund, der Lehrstuhl EES beschäftigt sich aber auch intensiv mit Speichern für erneuerbare Energiesysteme, mit stationären und portablen Speichersystemen. Nach dem Flottenversuch des E-Mobils der TUM in München sollen bis 2015 Industriepartner das Fahrzeugkonzept zu einer marktfähigen Lösung weiterentwickeln und damit die Voraussetzungen für eine Serienproduktion schaffen. *Karsten Werth*

# Are you auto-motivated? Welcome!



Der Continental-Konzern gehört mit einem Umsatz von mehr als 26 Mrd Euro im Jahr 2010 weltweit zu den führenden Automobilzulieferern und beschäftigt derzeit rund 150.000 Mitarbeiter in 46 Ländern.

Die Division **Powertrain** integriert innovative und effiziente Systemlösungen rund um den Antriebsstrang. Das Produktportfolio reicht von Benzin- und Dieseleinspritzsystemen über Motor- und Getriebesteuerungen inklusive Sensoren und Aktuatoren sowie Kraftstoff-fördersysteme bis hin zu Komponenten und Systemen für Hybrid- und Elektroantriebe.

Die Business Unit Engine Systems baut das Industrial Engineering neu auf.

**Für unseren Standort Regensburg suchen wir Sie.**

## Manager Manufacturing Efficiency (m/w)

### Ihr Aufgabengebiet

Unter Ihrer fachlichen Leitung erarbeitet Ihr Team:

- ▶ Standarddesign und Prüfung der Arbeitspläne der Business Unit (BU)
- ▶ Standarddesigns und Implementierung für Ergonomie und Arbeitsplatzgestaltung
- ▶ Standarddesigns und Implementierung der Produktdatensysteme (PDM)
- ▶ Standarddesigns und Implementierung von Fertigungsprozessen
- ▶ Layouts- und Materialfluo-optimierungen aller Werke der BU
- ▶ Koordination des strategischen Footprints, inkl. der Kapazitätsplanung und Bewilligung aller Werke der BU
- ▶ Aufbereitung und Bewilligung von Kapazitätserhöhungen und Transfers aller Werke der BU
- ▶ Aufbereitung und Bewilligung von Investitionsbudgets aller Werke der BU

### Ihre Qualifikationen

Ein überdurchschnittlich abgeschlossenes Studium und Berufserfahrung im technischen Bereich, bevorzugt in einer Führungsfunktion im Bereich der IE eines Werkes, setzen wir voraus.

Hohe Eigeninitiative, Durchsetzungsfähigkeit und Beharrlichkeit zeichnen Sie nicht nur aus, Sie möchten diese endlich eigenverantwortlich in einem der führenden Unternehmen der Automobil-Zulieferindustrie ausleben.

## Spezialist Lean-Methoden und Kennzahlensysteme (m/w)

### Ihr Aufgabengebiet

Sie sind der Methodenkompetenzträger in Ihrem spezifischen Bereich (Technisches System oder Mindset, Behaviour, Capabilities), entwickeln relevante Methoden Ihres Bereichs kontinuierlich weiter und reflektieren den Erfolg Ihrer Methoden auch durch die von Ihnen entwickelten Kennzahlensysteme, die durch Ihre Unterstützung in unseren Werken implementiert werden.

Dazu gehört unter anderem:

- Unterstützung der Analyse vorhandener Lean Tools, Prinzipien und Herangehensweisen im Rahmen der Lean Performance Transformation und anderer Lean Ansätze im Unternehmen, Zulieferern und der Industrie
- Unterstützung der Auswahl und Definition der Best Practice
- Unterstützung Etablierung der Best Practice bei Kriseneinsatzteams und einzelnen Werken mit Hilfe geeigneter Tools
- Unterstützung der Pflege und Weiterentwicklung bestehender KPIs und produktionsnaher Reportingkonzepte, inkl. der operativen Fortführung bestehender Reportingsysteme

### Ihre Qualifikationen

Ein überdurchschnittlich abgeschlossenes Studium und erste Berufserfahrung im technischen oder kaufmännischen Bereich (für den Teilbereich Operating System) oder im kaufmännischen oder geisteswissenschaftlichen Bereich (für den Teilbereich Mindset, Behaviour, Capabilities) gepaart mit dem Willen sich weiterzuentwickeln, setzen wir voraus.

Hohe Eigeninitiative, Durchsetzungsfähigkeit und Beharrlichkeit zeichnen Sie nicht nur aus, Sie möchten diese endlich eigenverantwortlich in einem der führenden Unternehmen der Automobil-Zulieferindustrie ausleben.

Sie wollen mit uns Gas geben? So starten Sie durch:  
Bewerben Sie sich mit unserem Onlinebewerbungsbogen  
unter [www.careers-continental.com](http://www.careers-continental.com)

Ihr Ansprechpartner: Continental Automotive GmbH,  
Division Powertrain • Frau Claudia Tries • Human Resources

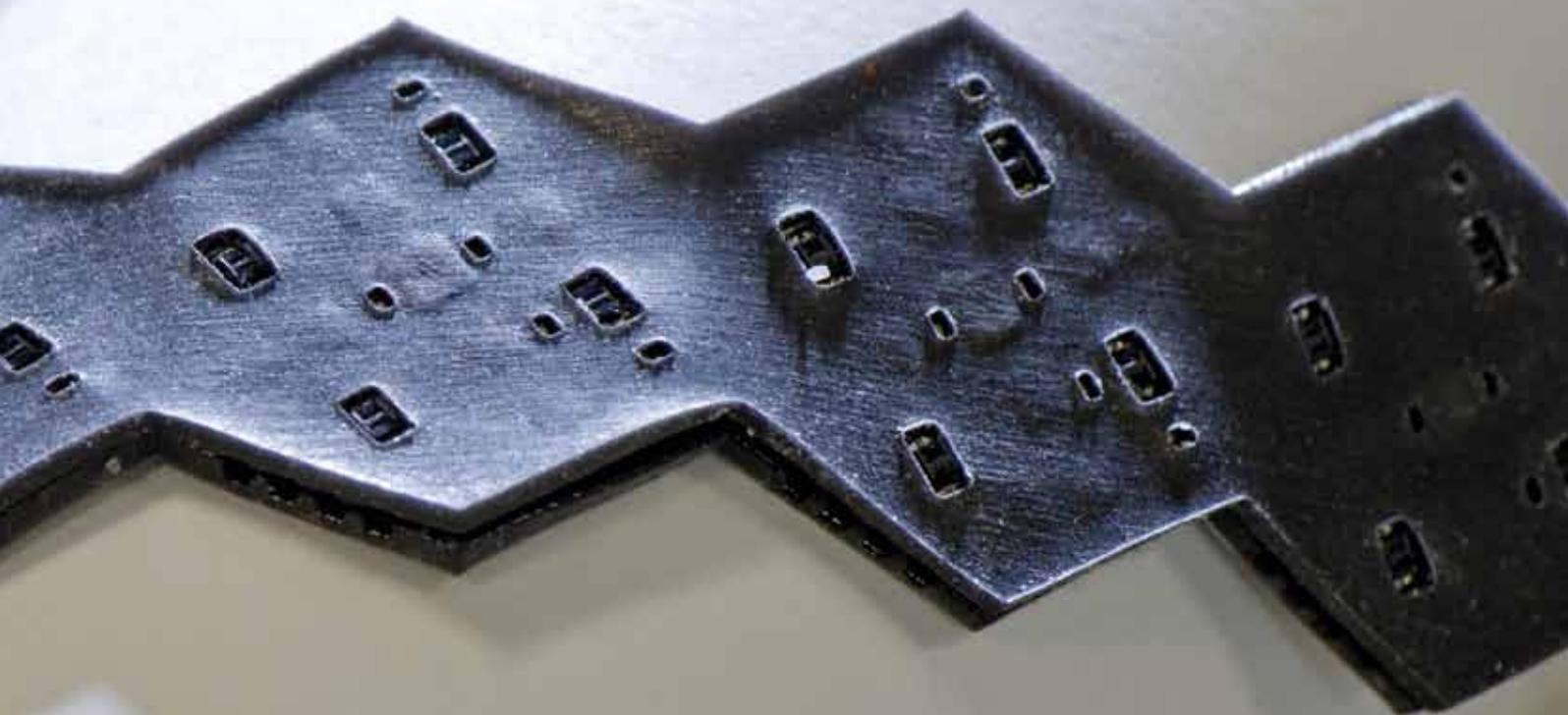


## Links

[www.ics.ei.tum.de](http://www.ics.ei.tum.de)  
[www.cotesys.org](http://www.cotesys.org)

Dank ihrer Hülle aus Elastomer schmiegen sich die Sensorplättchen wie eine zweite Haut an. Hier testen die Forscher die Biegsamkeit auf einer Papierrolle





# Des Roboters neue Haut

Hitze, Vibration oder sanfte Streicheleinheiten werden Roboter bald mit ihrer Oberfläche fühlen können. Forscher des Exzellenzclusters CoTeSys stellen aus sechseckigen Plättchen eine sensible Haut für die Maschinen her. Die wird ihnen nicht nur helfen, sich besser in ihrer Umgebung zurechtzufinden. Sie wird Robotern auch erstmals erlauben, eine Vorstellung von ihrer äußeren Gestalt zu bekommen

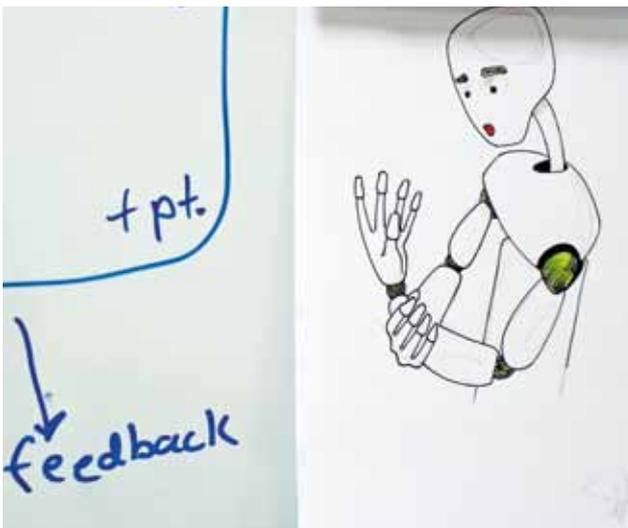
**P**ower on, ein Surren, ein Schwenken, der imposante grüne Roboterarm ruckelt, dreht und verbiegt seine Gelenke mal hierhin, mal dorthin – und schon vorbei. Kurze Stille im großen Labor, dann wirft Philipp Mittendorfer einen prüfenden Blick auf den Monitor: „Na also, hat doch geklappt, alle Segmente richtig zugeordnet“, sagt der Ingenieur am Institute for Cognitive Systems (ICS) der TU München – einem der Projektpartner des Exzellenzclusters CoTeSys (Cognition for Technical Systems). Na schön, denkt der Laie – kennt man aus jeder Produktionsanlage für Automobile, wo solche eisernen Schwenkarme tagein, tagaus schweißen, hämmern oder Schraubchen eindrehen. Und doch trägt der Anschein. Denn während die konventionellen „Kollegen“ auf fest einprogrammierten Bahnen agieren, übt sich Mittendorfers Kunstarm in einer autonomen Lebensweise. Denn die Maschine hat sich gerade selbstständig eine Vorstellung eines kleinen Teils ihrer äußeren Gestalt verschafft. Das sekundenkurze Gezappel diente quasi der Selbstfindung des Roboters. Unverzichtbares Bauteil dafür: Mittendorfer baut den Maschinen nichts Geringeres als eine Haut. Auf jedem Segment des derzeit achtgliedrigen Roboterarms sitzt dafür mindestens ein ausgetüfteltes Sensorelement, das dem Zentralrechner der Maschine die

lokalen Beschleunigungskräfte meldet, sobald es bewegt wird. Indem die Maschine – das ist ihr noch zuvor programmiert worden – der Reihe nach Segment um Segment dreht und bewegt, kann sie blitzschnell identifizieren, welcher der Sensoren gerade bewegt wird. Dabei hat sie zu Beginn keine Ahnung, wie viele Sensoren sie wo trägt. Beides aber errechnet sie danach blitzschnell selber: Es ist ein Rudiment einer Gestaltwahrnehmung. „Wir wollen schließlich eine Maschine, die selber erkennt, woher sie gerade welche Informationen bekommt, und der wir eben nicht mehr mühsam einprogrammieren müssen – hier sitzt Sensor eins, da Nummer zwei und so fort“, erklärt Mittendorfer. Das Fernziel: der Humanoid – ein Roboter, der sich „kennt“, der ertastet, wo er gerade an einem Gegenstand angestoßen ist und dann auch bitteschön selber dafür sorgt, dass er den geordneten Rückwärtsgang einlegt. So weit ist es noch nicht. Aber Mittendorfers Maschine macht einen Entwicklungssprung in diese Richtung.

**Tastsinn? Fehlanzeige!**

Lange Jahre galt bei Robotern eher die Devise: In deren „Haut“ möchte man nicht stecken. In aller Regel, so Mittendorfer, hat die Oberfläche der Maschinen heute so viel Gefühl wie eine Ritterrüstung. Bestenfalls hie und da, vielleicht an der Spitze eines Greifarms oder ▷

Fotos: Heddergott, TUM



**Ideensammlung:** Auf einem Whiteboard sammeln die Wissenschaftler Ideen und neue Lösungsansätze für ihre Forschung

**Auf der gewölbten Segment-Oberfläche** des Roboterarms im Versuchslabor haben die Forscher vier Sensormodule angebracht



an dessen Gelenken, platzieren die Entwickler einige Sensoren. Im Rest der stählernen Überzüge herrscht Funkstille. Tastsinn? Fehlanzeige!

Der russische Forscher Vladimir Lumelsky, heute an der University of Wisconsin-Madison in den USA, prägte bereits Anfang der 1990er-Jahre unter dem Begriff „Sensitive Skin“ ein neues Konzept.

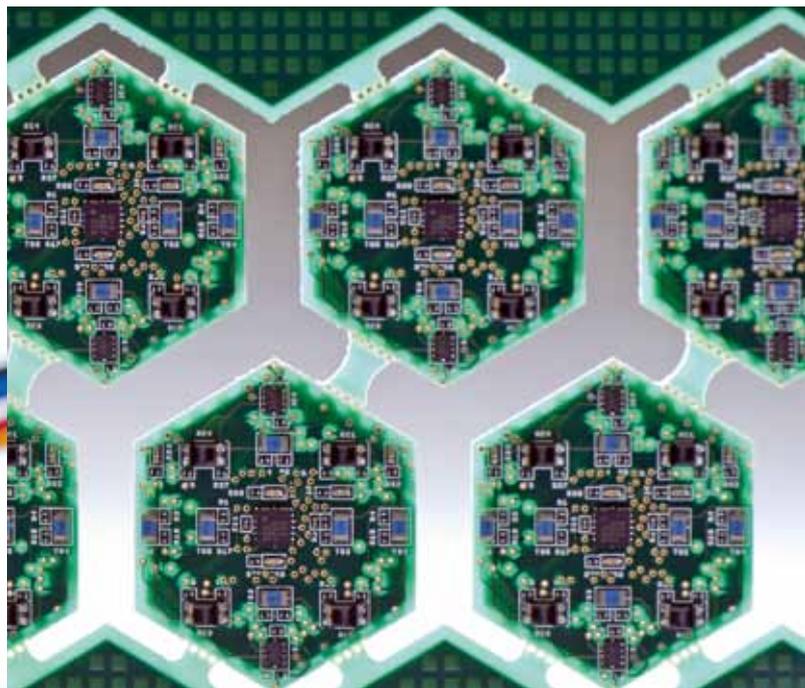
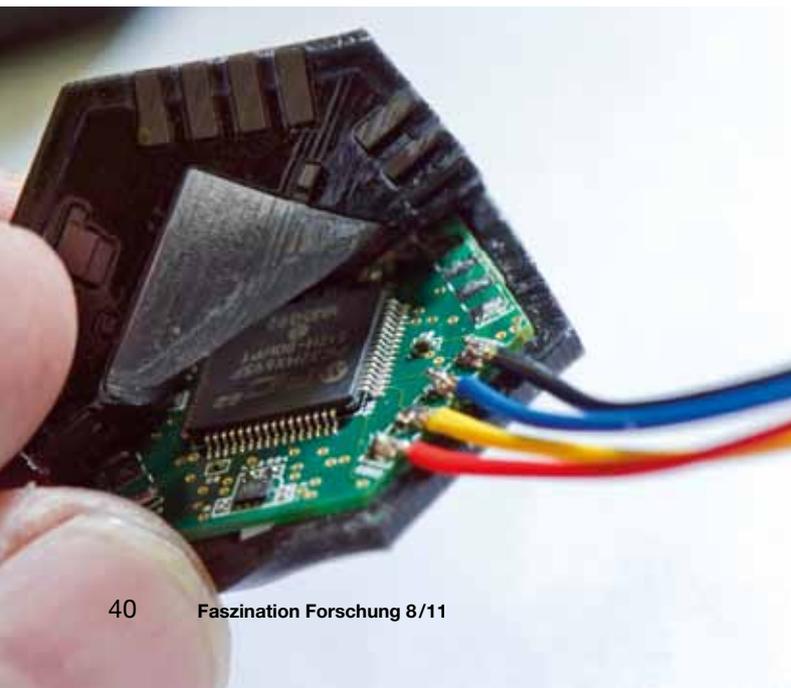
Vorbild ist der Mensch. In unseren zweieinhalb Quadratmetern Haut vermitteln uns an die fünf Millionen freie Nervenendigungen und Endkörperchen Berührung, Druck, Temperatur, feinsten Lufthauch, Vibrationen, Kitzeln oder auch Schmerz. Zugleich ist die Haut das entscheidende Organ, mit dem wir uns von der Umwelt abgrenzen. „Ohne sie keine Unterscheidung von Fremd und Eigen, von Umwelt und Körper – eine fühlende Hülle ist dafür universelles biologisches Prinzip, schon eine einzelne Zelle grenzt sich durch eine sensible Membran voller chemischer Sensoren gegen die Umwelt ab“, argumentiert Mittendorfer. „Wollen wir eine lernende Maschine, die sich selber versteht, braucht sie ein möglichst ebenbürtiges Organ.“ Der 25-jährige Doktorand gehört als Mitglied einer Gruppe um Professor Gordon Cheng am Institute for Cognitive Systems zu einer von über einem Dutzend Arbeitsgruppen weltweit, die an der praktischen Realisierung des Konzepts „Sensitive Skin“ arbeiten.

### **Einzigartiges Sensorsystem**

Herzstück seiner neuen Roboterhaut ist ein gut fünf Quadratzentimeter großes, hexagonales Plättchen HEX-O-SKIN, das die Forscher mit einem IEEE-Journal-Paper (2011) der wissenschaftlichen Öffentlichkeit präsentierten. Auf der kleinen Platine stecken vier „Berührungssensoren“, die durch Infrarotmessung alles registrieren, was einen Abstand von einem Zentimeter unterschreitet. „Wir emulieren damit leichte Berührungen“, erklärt Mittendorfer, „das entspricht der Wahrnehmung, die Sie haben, wenn Sie mit Ihrer Hand vorsichtig die Haare auf dem Arm berühren.“ Hinzu kommen sechs Temperatursensoren sowie ein besonders wichtiger Beschleunigungssensor – er erlaubt es der Maschine, die Bewegungen ihrer einzelnen Segmente genau zu registrieren, damit auch zu lernen, welche Körperteile sie gerade bewegt. Außerdem registriert der Sensor Vibrationen, die beispielweise entstehen, wenn der Roboter an einen Gegenstand stößt. Allein die Kombination der verschiedenen Sensortypen in solch einem Modul macht die neue Maschine einzigartig. „Wir versuchen hier, besonders viele verschiedene Sinnesmodalitäten auf kleinsten Raum zu packen und können jederzeit neue Sensoren in unser System einfügen“, erklärt der Ingenieur. Noch ist die Produktion Handarbeit. Jedes fertige Sensorelement steckt Mit-

Fotos: Heddergott, TUM

**Noch finden viele Produktionsschritte in Handarbeit statt:** Wenn die fertig bestückten Sensormodule (rechts) aus der Produktion kommen, werden die einzelnen Plättchen von Hand in eine Elastomerschale gesteckt (links)



tendorfer am Ende vorsichtig in eine Tasche aus einem gummiartigen Elastomer. Plättchen für Plättchen aneinandergesteckt – jedes HEX-O-SKIN hat auf vier seiner sechs Seiten Verbindungspunkte, um Kommunikation und Energieversorgung zu Nachbarelementen zu realisieren –, gibt das Ganze ein bienenwabenartiges, flächiges Gebilde: des Roboters neue Haut. Der Elastomerüberzug soll seinen Träger nicht nur schmücken, sondern ihm auch Schutz bieten. „Schließlich“, prophezeit Mittendorfer lachend, „soll so ein Roboter vielleicht auch einmal im Regen laufen können, zumindest muss er es aushalten, wenn ein Forscher versehentlich über ihm die Tasse Kaffee ausleert.“

### **Großes elektronisches Netzwerk**

Damit die Maschine allerdings überhaupt etwas merkt, müssen die Signale der Sensoren in einem Zentralrechner, dem Gehirn der Maschine, verarbeitet werden – und diesen überhaupt erst einmal erreichen. Auch hier setzt die Maschine auf ein neues Konzept. „Die Biologie braucht prinzipiell über weite Strecken eine direkte Verdrahtung. Von jedem Hautsensor führt quasi eine Nervenleitung in die Vermittlungsstationen des Gehirns“, erläutert Mittendorfer. In technischen Systemen macht diese Verschaltung aber Probleme. Eine Einzelverdrahtung von jedem Sensor zum Zentralprozessor würde

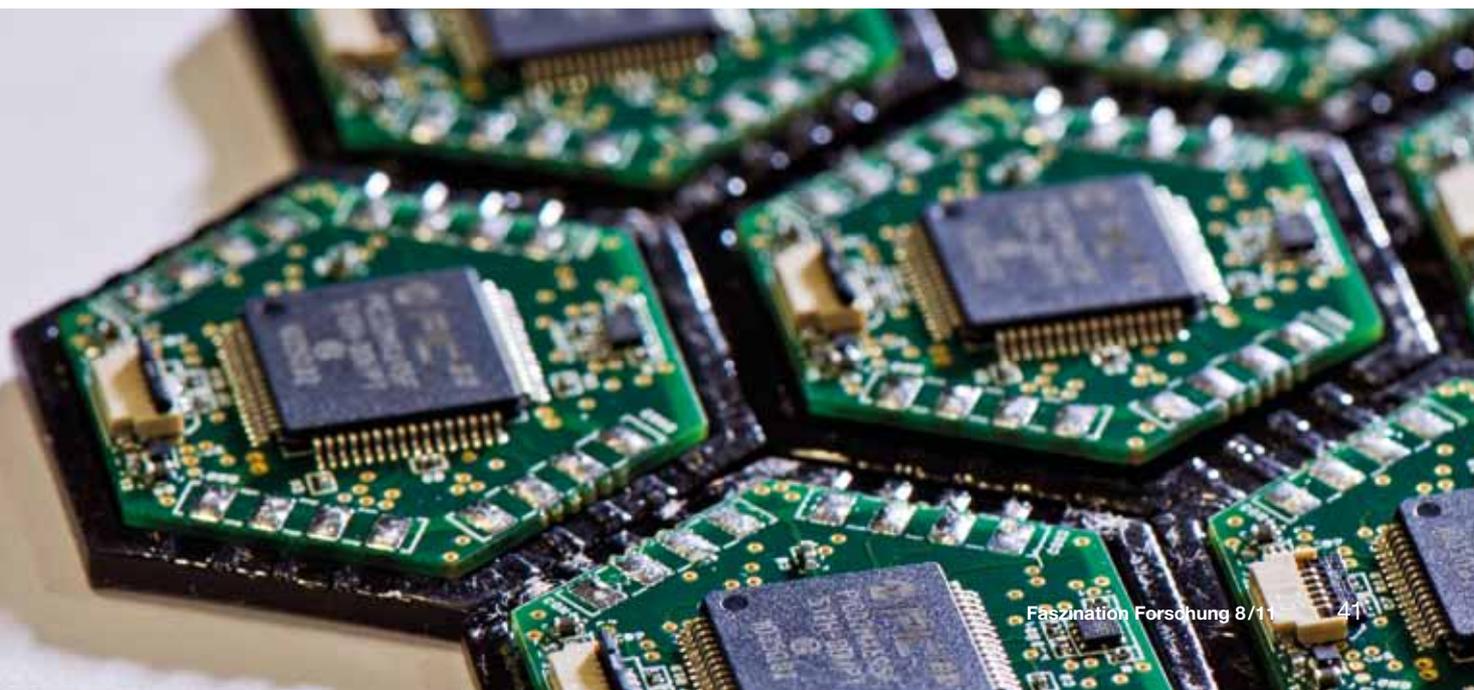
rasch Kabelbäume erfordern, die zu dick, kaum herstellbar oder zumindest sehr teuer gerieten. In der wabenartigen Netzstruktur des CoTeSys-Prototypen leitet hingegen jedes Sensormodul nicht nur eigene, sondern als Knotenpunkt auch Daten anderer Sensorelemente durch. Die Haut ist ein großer Riesensensor und Kabel in einem. Obendrein kann das Netzwerk den Ausfall von Einzelkomponenten gut verkraften. Denn der große Rest an Information umgeht notfalls auf alternativen Bahnen eine defekte Stelle: von großem Vorteil für einen späteren praktischen Einsatz solch einer Maschine, denn Roboter können sich derzeit nicht selbst heilen.

Obendrein, ein ganz besonderer Clou der Verschaltung, arbeitet in jedem HEX-O-SKIN ein eigener Mikroprozessor. Zusammen ergibt dies ein großes elektronisches Netzwerk, das nur noch an ausgewählten Stellen mit dem Computer verbunden werden muss.

### **Jedes leichte Tätscheln wird wahrgenommen**

Der Rest ist Rechenroutine: Mit einem entsprechenden Setup programmiert, sorgt der schlichte Druck auf den Power-on-Schalter dafür, dass das System für jede Sensoreinheit eine Identifikationsnummer festlegt: Sie erlaubt dem zentralen Prozessor die Zuordnung, woher er gerade Sensorinput erhält. Wenige Millisekunden nach einem Neustart hat der Zentralprozessor ge- ▷

**Jedes Sensorplättchen hat Verbindungspunkte an vier seiner sechs Seiten.** So können die wabenartig verbundenen Elemente Informationen weiterleiten. Auch die Energieversorgung wird über diese Verbindungsstellen sichergestellt



klärt, mit wie vielen Sensoren er im Netzwerk rechnen kann und wie die Signalwege verlaufen. Noch ist allerdings gerade mal ein allererstes kleines Hautstückchen fertig. 15 Sensoren prangen auf dem ersten derart ausgestaffierten Roboterarm. Das reicht bereits für den Proof of Concept: Schon ein leichtes Tätscheln oder Pusten sorgt dafür, dass der Arm eilends in die andere Richtung ausweicht.

„Wir werden die Haut schließen, einen Prototypen generieren, der völlig mit diesen Sensoren umschlossen ist und ganz neu mit seiner Umwelt interagieren kann“, gibt sich Mittendorfers Doktorvater Gordon Cheng überzeugt. „Eine Maschine, die selbst im Dunkeln merkt, wenn man ihr auf den Rücken tippt.“

### Eine Vorstellung von sich selber gewinnen

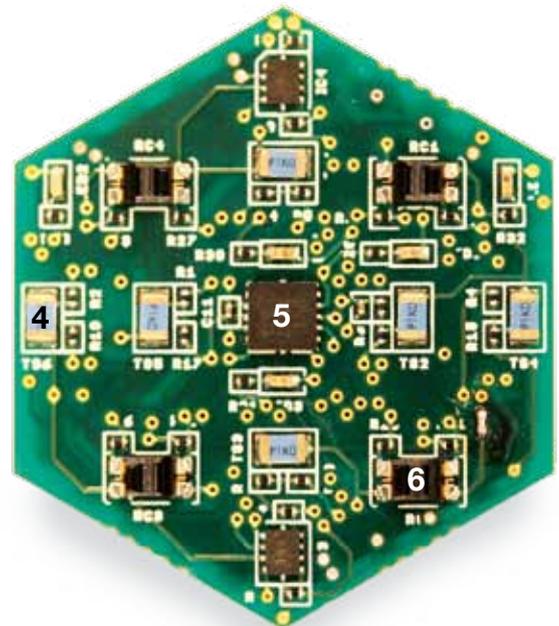
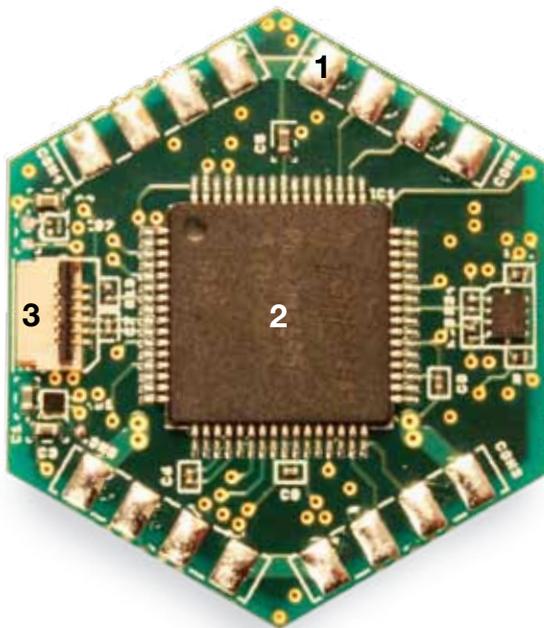
In manchen Leistungen ist das neue System schon heute dem Menschen überlegen. Bei einer Update-Rate von 1000 Hertz landen differenzierte Informationen aus den Sensoren im Abstand von weniger als einer Millisekunde im Zentralrechner der Maschine. Der Mensch ist mit 50 Hertz und 25 bis 250 Millisekunden bei Tasteindrücken mit diskreten Signalen deutlich langsamer. Temperaturunterschiede von 0,06 Grad Celsius könnte

solch ein Humanoid registrieren, der Mensch spürt erst Differenzen von etwa 0,1 Grad. Doch es sind eben nicht die besseren „Sinnesleistungen“ im Detail. Zukunftsweisend am Konzept ist, dass solche Maschinen es einmal mit einer unserer ureigensten neurobiologischen Fähigkeiten aufnehmen könnten: eine Vorstellung von sich selber zu gewinnen.

Endlose Statistik betreibt unser Gehirn bereits im Mutterleib, damit wir uns und unsere Umwelt ertasten und kennenlernen. Der werdende Säugling zappelt herum, stößt an, zappelt erneut. Aus Tausenden solcher taktilen Reize baut sich das Gehirn Karten, lernt, die Lage der Tastsensoren in der Haut zuzuordnen, sortiert, wie weit weg Arme und Beine vom Kopf sind und wie groß Bauch, Arme und Kopf sind.

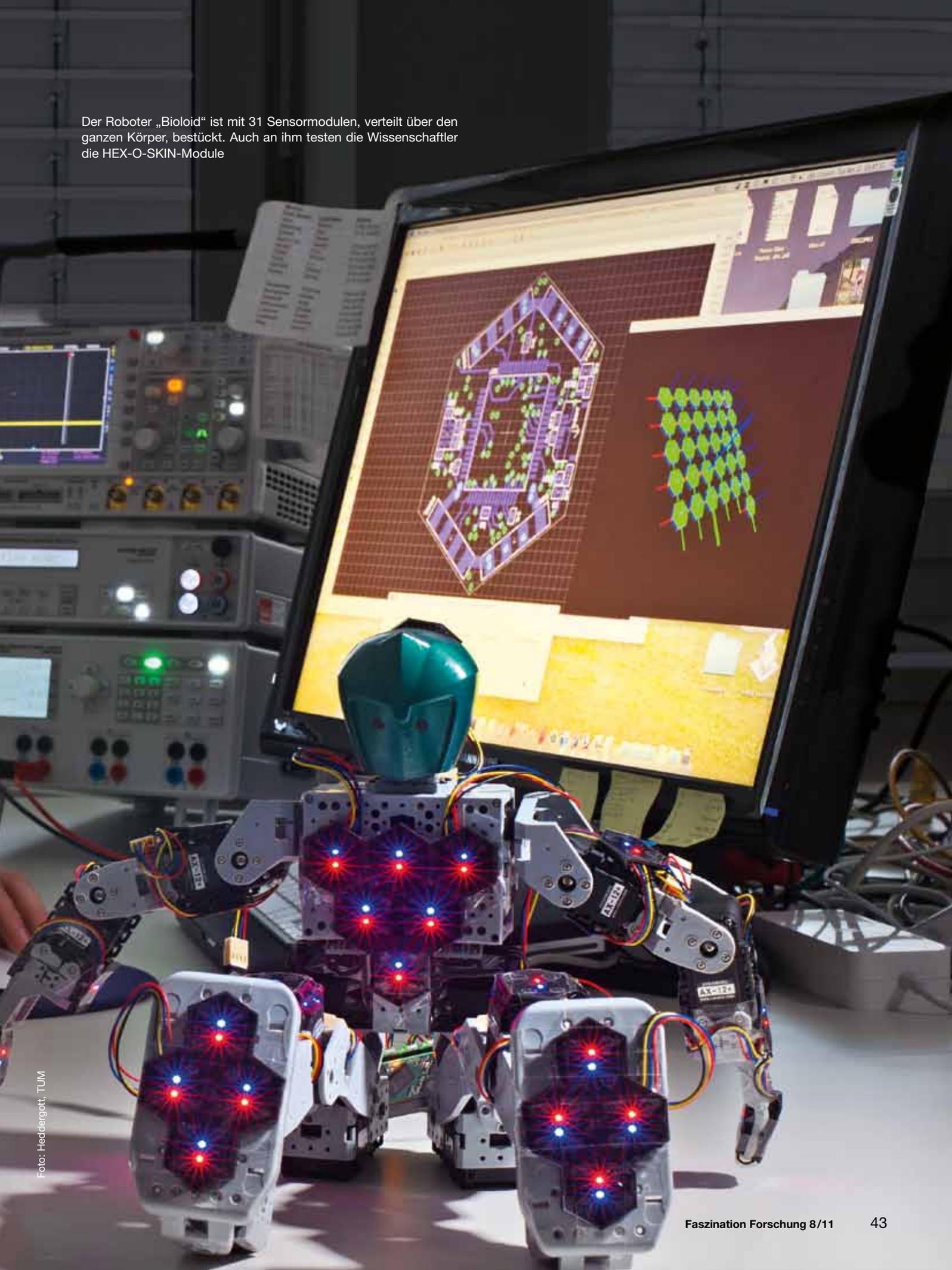
Ihre so einfache wie raffinierte Architektur erlaubt der neuen Maschine in naher Zukunft etwas Vergleichbares. Binnen weniger Sekunden – das ist jedenfalls das Ziel – soll auch sie sich so eine Karte erstellen. Eine Vorstellung der eigenen Gestalt – noch rudimentär, aber mit jedem Sensormodul mehr, das Mittendorfer hinzufügt, wird sie engmaschiger und präziser. Sein Roboter ist damit ein Stück weiter an den Menschen herangerückt.

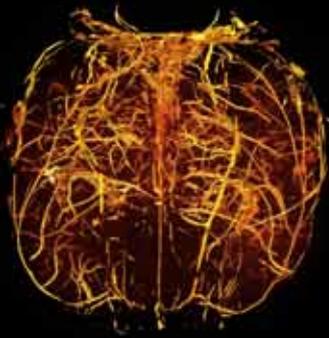
*Bernhard Epping*



- 1 Verbindungsports zwischen den Modulen zur Kommunikation und Energieversorgung (16 Stück)
- 2 Mikrocontroller
- 3 Programmierport
- 4 Temperatursensoren (6 Stück)
- 5 Beschleunigungssensor
- 6 Infrarotsensoren (4 Stück)

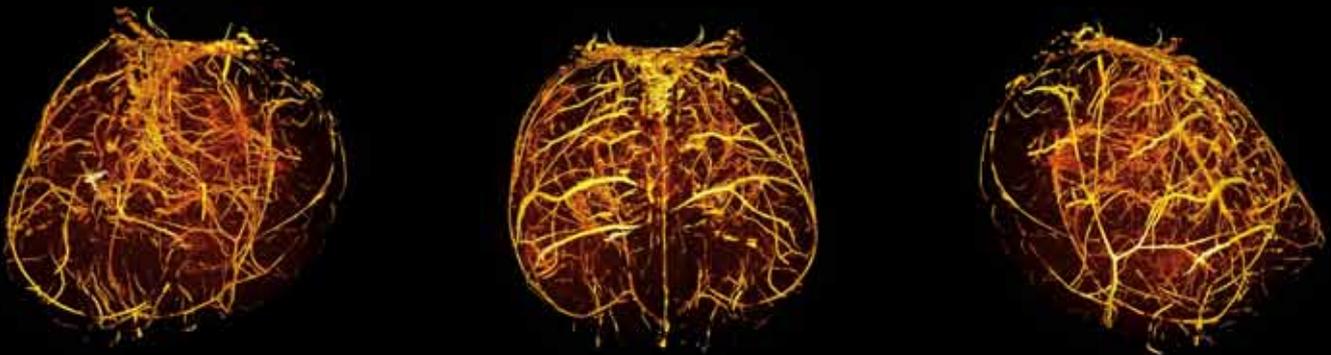
Der Roboter „Bioid“ ist mit 31 Sensormodulen, verteilt über den ganzen Körper, bestückt. Auch an ihm testen die Wissenschaftler die HEX-O-SKIN-Module





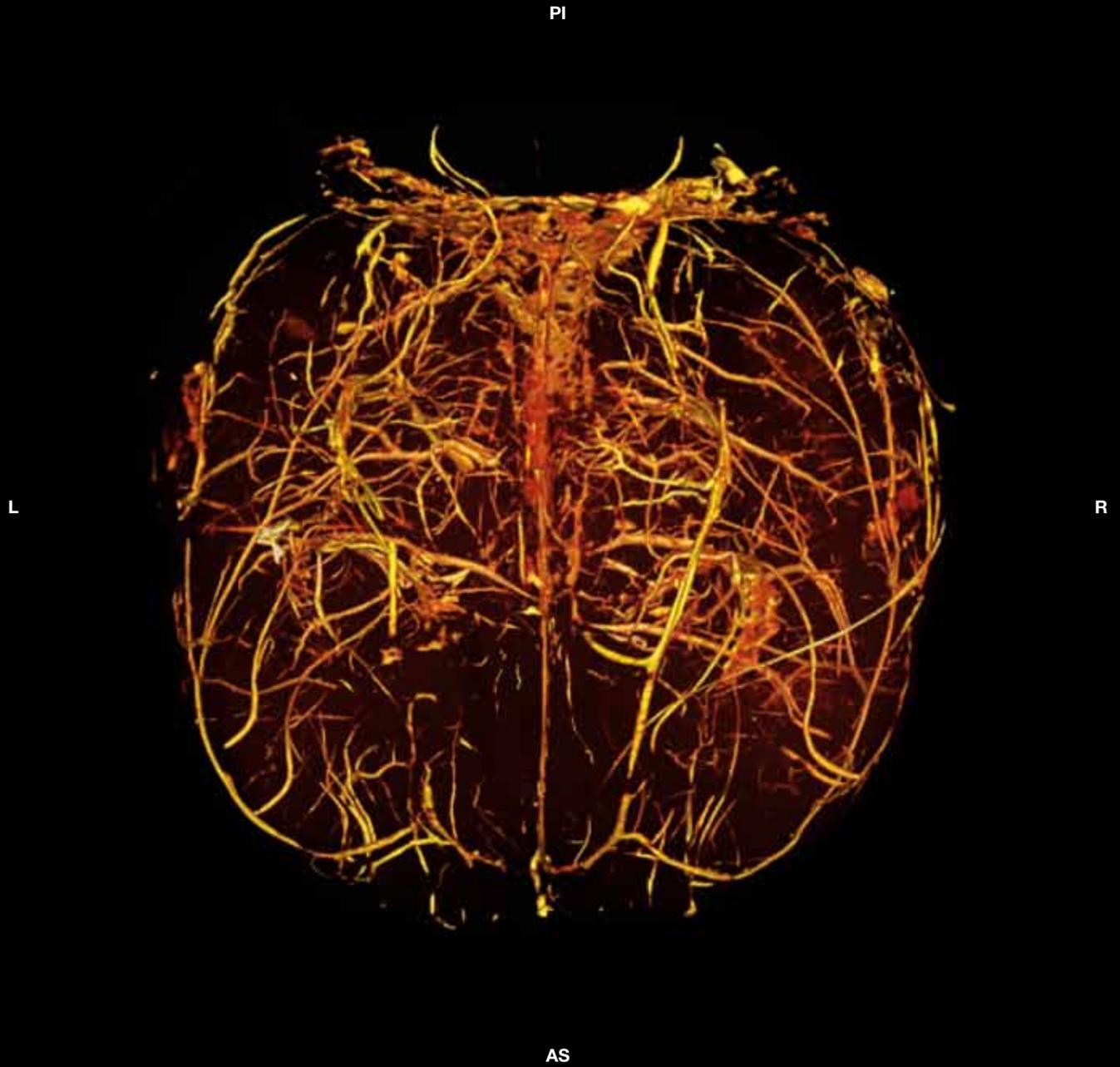
Link

[www.e17.ph.tum.de/](http://www.e17.ph.tum.de/)



# Tuning für die Röntgenröhre

Zielstrebig, hartnäckig und sehr überzeugt von einer Sache muss man sein, um sie gegen alle Widerstände weiterzuverfolgen. Franz Pfeiffer setzt diese Eigenschaften ein bei der Entwicklung einer neuen Röntgenmethode, mit der die Forscher andere und gleichzeitig bessere Bilder erzielen. Inzwischen ist das Verfahren auf dem Weg in die medizinische Praxis. Pfeiffer erhielt für seine Arbeiten den Leibniz-Preis



Dieses Bild und die Fotos auf den Seiten zuvor zeigen die Blutgefäße in einem Rattenhirn, das mit Phasenkontrast-Röntgentomografie an einem Synchrotron aufgenommen wurde. So gelang es, hochaufgelöste 3-D-Bilder der Blutgefäße zu erzeugen. Wollte man entsprechende Bilder mit konventioneller Röntgentomografie aufnehmen, müsste man in die Adern ein Kontrastmittel spritzen

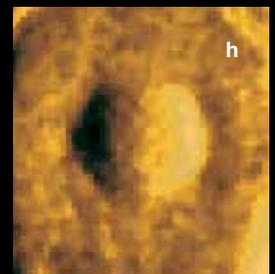
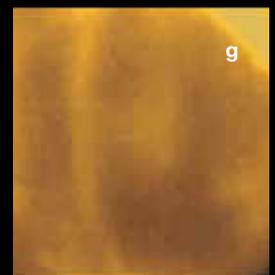
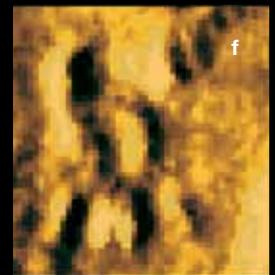
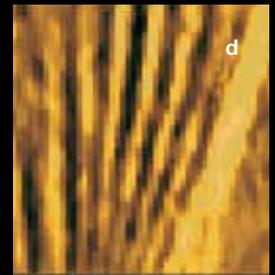
**E**s ist 116 Jahre her, seit der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen erkannte, dass man mit den inzwischen nach ihm benannten Strahlen ins Innere des Menschen blicken kann. Das „Durchleuchten“ revolutionierte die medizinische Diagnostik und bildet bis heute ein unverzichtbares Hilfsmittel für den Arzt, zumal es durch das Verfahren der Computertomografie (CT) sogar dreidimensionale Einblicke ermöglicht. Trotzdem haben Röntgenstrahlen ihre Schwachstellen: Sie bilden in erster Linie Knochen gut ab, Weichteile – sofern sie nicht mit einem Kontrastmittel eingefärbt sind – werden allenfalls noch als Schatten sichtbar. Das kommt daher, dass das Bild lediglich die Strahlung zeigt, die das Gewebe durchdrungen hat. So sieht man also nur die Abweichungen in der Absorption – gleich dichtes Gewebe zeigt keine Unterschiede. Gerade für die Diagnose von Tumoren ist das ein Problem.

Es dauerte Jahrzehnte, bis jemand auf die Idee kam, dass sich die Röntgendiagnostik entscheidend verbessern lässt, wenn man nicht nur diese Absorption betrachtet, sondern auch noch andere Veränderungen, die mit den Strahlen bei ihrem Durchgang durch das Objekt geschehen. Der niederländische Physiker Frits Zernike hatte diesen Gedanken in den 1930er-Jahren bereits für die Mikroskopie mit sichtbarem Licht realisiert, 1953 erhielt er dafür den Nobelpreis. 1965 stellten Ulrich Bonse und Michael Hart Versuche im Röntgenbereich an, die aber zu keiner praktischen Anwendung führten. 2002 griff der deutsche Physi-

ker Dr. Christian David das Gebiet auf und experimentierte erfolgreich mit Röntgenstrahlen am Paul Scherrer Institut im schweizerischen Villigen; im Jahr darauf veröffentlichte auch der Japaner Atsushi Momose zusammen mit seinem Team einen Artikel dazu. Prof. Dr. Franz Pfeiffer, der damals 30 Jahre alt war, arbeitete mit dem acht Jahre älteren David zusammen und war fasziniert von der Idee. Sie beruht darauf, dass ein Lichtstrahl – und Röntgen ist im Grunde nichts anderes als hochenergetisches Licht – nicht nur geschwächt wird, wenn er einen Körper durchquert, sondern gleichzeitig gebeugt. Physikalisch betrachtet bedeutet das, dass die Lichtwellen an jedem Hindernis abgelenkt werden, ihre Phase – die Abfolge von Schwingungstal und Schwingungsberg – wird verändert. Dahinter breiten sie sich wieder kugelförmig aus und überlagern sich gegenseitig. So entsteht ein charakteristisches Muster, das Auskunft gibt über die Geometrie des Hindernisses. Wenn es also gelingt, die Beugung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch ein Präparat irgendwie zu messen oder sichtbar zu machen, könnte man dies zur Herstellung besserer Bilder nutzen.

### **Verräterische Streifenmuster**

Wie kann das in der Praxis geschehen? Heute, anders als noch zu Wilhelm Conrad Röntgens Zeiten, ermöglichen Nanotechnologien, die Phasenverschiebung der Strahlung zu messen. Dazu verwendet man mikrometerfeine Gitter, die in den Strahl gestellt werden. Hinter dem Objekt überlagern sich die gebeugten Licht- ▷



**Ganze 1,5 Zentimeter lang ist dieser Fisch**, den Franz Pfeiffer und seine Kollegen mit einer gewöhnlichen Röntgenröhre durchleuchtet haben. Links die konventionelle Darstellung, die kaum Details erkennen lässt. Rechts das Phasenkontrast-Bild, das auch Weichteile in hoher Auflösung zeigt. Die kleinen Bilder rechts vergleichen die links angedeuteten Ausschnitte: Schwanzflosse (c, d), Ohrsteine (e, f), Auge (g, h)

wellen und man erhält ein Streifenmuster, das sich aus der Interferenz ergibt. Es entsteht, weil sich gegeneinander verschobene Wellen an bestimmten Stellen verstärken, an anderen Stellen gegenseitig auslöschen. Mit diesem Instrumentarium „durchleuchteten“ schon Anfang 2002 verschiedene Forschergruppen kleine Polystyrol-Kügelchen und konnten so zeigen, dass das Prinzip funktionierte. Ein Name für das Grundprinzip war auch schnell gefunden: Man nennt die Methode heute Phasenkontrast-Röntgen.

Die Forscher am Paul Scherrer Institut verfeinerten das Verfahren. „Ich war mehr der Tüftler und Franz Pfeiffer derjenige, der mit Weitsicht in die Zukunft blickte und schnell künftige Anwendungen anpeilte“, sagt Christian David, der auch heute noch mit dem „physikalisch sehr hellen Kopf“ Pfeiffer gut befreundet ist. Schließlich konnten die beiden Forscher die Methode dazu benutzen, an einer Synchrotronstrahlenquelle, die sehr starkes, gleichmäßiges und paralleles (kohärentes) Röntgenlicht aussendet, Objekte zu durchleuchten. An der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble entstanden auf diese Weise bald frappierende Bilder – beispielsweise von einem Rattenherz, das in nie gekannter Klarheit nun auch die weichen Gewebeteile zeigte.

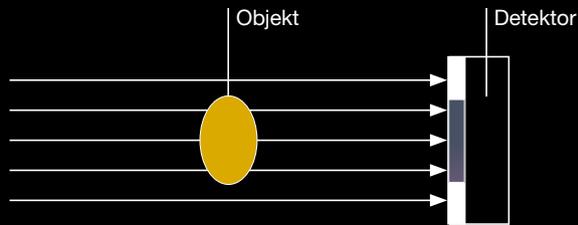
### **Nicht geeignet für die Praxis**

Ein Synchrotron ist jedoch eine Riesenmaschine mit einem Hundert Metern Umfang, in der Elektronen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. So

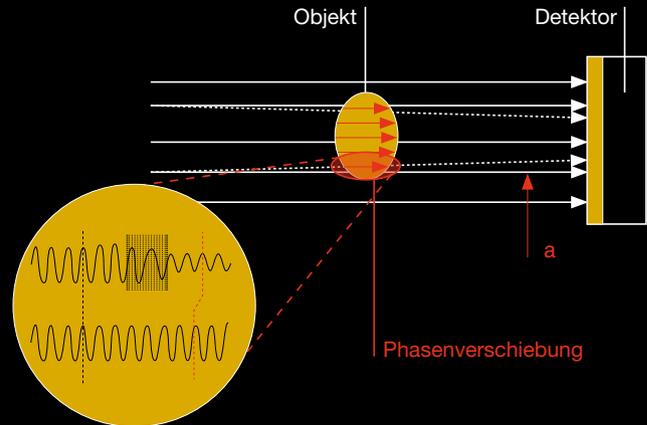
etwas ist natürlich nicht geeignet für die Verwendung in einer Klinik oder gar Arztpraxis. Dort benutzen die Ärzte handliche Röntgenröhren, die ihre Strahlung dadurch erzeugen, dass Elektronen auf eine Metalloberfläche treffen und abgebremst werden. Dabei senden sie Röntgenstrahlung aus, jedoch mit unterschiedlichen Wellenlängen und in alle Richtungen. Wollte man daraus nur die kohärenten Anteile herausfiltern, um sie für das Phasenkontrast-Röntgen zu verwenden, bliebe viel zu wenig Strahlung übrig. Die Wissenschaftler müssen sich dieser Herausforderung stellen und einen anderen Weg finden, wie das Verfahren auch für den medizinischen Alltag zugänglich gemacht werden kann.

### **Freitagabend-Freizeitvergnügen**

Franz Pfeiffer ließ die Idee nicht mehr los. „Mein Traum ist es, das, was wir mit der Synchrotronstrahlung machen, in die Röntgenpraxis einer Klinik zu übertragen“, sagt er. Zunächst arbeitete er zusammen mit Christian David am Paul Scherrer Institut daran, mithilfe geeigneter Gitter aus Silizium die Strahlen aus der Röntgenröhre sozusagen parallel zu schalten. Da zunächst keine Mittel zur Verfügung standen, organisierten die Forscher die Experimente auf eigene Faust: Sie beschafften sich eine ausrangierte Röntgenröhre und arbeiteten im Keller des Instituts weiter – neben ihrer offiziellen Tätigkeit. „Die Arbeiten an herkömmlichen Röntgenröhren gehörten nicht zu den offiziellen Aufgaben von Franz Pfeiffer und mir“, erinnert sich Christian David. „So bauten wir die Versuche neben unserem ▶



**Konventionelles Röntgenverfahren (links)** : Die Strahlung wird beim Durchlauf durch das Objekt geschwächt. Dies zeigt sich auf dem Detektor



**Phasenkontrast-Bildgebung (rechts)**: Das Objekt wirkt wie eine Linse und die Strahlung wird beim Durchgang durch das Objekt um den Winkel  $a$  abgelenkt, der dann gemessen wird

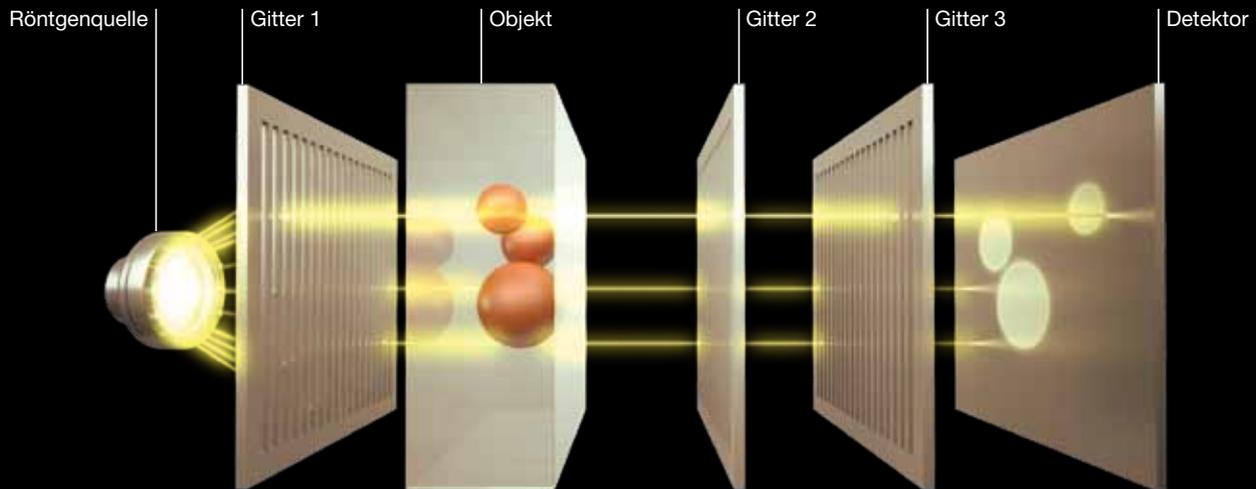
eigentlichen Job auf eigene Initiative auf, ohne offiziellen Projektstatus und ordentliches Projektbudget, und experimentierten auch außerhalb der normalen Arbeitszeiten.“ Sein Kollege Pfeiffer hat die Zeit ebenfalls noch gut in Erinnerung: „Das war oft unser Freitagabend-Freizeitvergnügen“, meint er leicht ironisch. Ihre Hartnäckigkeit wurde schließlich belohnt: Im März 2006 veröffentlichten sie in Nature Physics einen Aufsatz, in dem zum ersten Mal detaillierte Bilder gezeigt wurden, die sie mit einer normalen Röntgenröhre mit der Phasenkontrast-Methode aufgenommen hatten: Ein kleiner Fisch ist da zu sehen, mit fein ziselierten Flossen, der Luftblase, dem Auge sowie den Strukturen im Innenohr. Auf dem Vergleichsfoto, das sie mit der konventionellen Röntgen-Absorptionsmethode angefertigt hatten, erkennt man kaum die Umrisse des Fisches; Einzelheiten sind nur zu erahnen. An der schlechteren Qualität der Röntgenquellen in der Radiologie hatten sich Forschungsgruppen weltweit jahrelang die Zähne ausgebissen. Ihr Erfolg war deshalb eine glänzende Bestätigung für die beiden Forscher, die nicht lockergelassen hatten. „Ich bilde mir gern meine eigene Meinung“, sagt Pfeiffer und begründet damit, warum er immer an der Sache dranblieb, auch als die Experten von Siemens sie zunächst als aussichtslos bewerteten.

**Neue Wege zur Darstellung von Gewebe**

Mit der Nature-Physics-Veröffentlichung kam der Ruhm. Plötzlich fand auch die einschlägige Industrie das Verfahren wieder interessant und wollte investieren.

Pfeiffer erhielt renommierte Wissenschaftspreise, und die Hochschulen rissen sich um ihn. 2009 entschied er sich, ein Angebot der TU München anzunehmen, und seither hat er dort den Lehrstuhl für Biomedizinische Physik inne. „Ein Glücksfall für beide Seiten, wie es scheint“, betont Prof. Matthias Kleiner, Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG. „Franz Pfeiffer war zu dieser Zeit bereits so anerkannt, dass er auch verschiedene andere Angebote hätte wahrnehmen können. Wir freuen uns natürlich insbesondere, dass er in seiner biografischen Heimat Bayern auch sein akademisches Zuhause gefunden hat und nicht beispielsweise in die USA entschwinden ist, wie manch anderer, dem alle Türen offenstehen.“ Seine Organisation hat dem jungen Professor im März den mit 2,5 Millionen Euro dotierten Leibniz-Preis verliehen, mit der Begründung: „Pfeiffers Arbeiten haben der Röntgenforschung neue Wege zur Visualisierung von Gewebe eröffnet.“

Das Verfahren, das Franz Pfeiffer und seine inzwischen rund 30 Mitarbeiter entwickelt haben, beruht auf dem Einsatz von drei Gittern. „Es handelt sich dabei um Siliziumwafer, ganz dünne Plättchen, in die als zweidimensionale Strukturen Stege mit wenigen Mikrometern Dicke geätzt werden“, erklärt seine Mitarbeiterin Dr. Julia Herzen. „Die Lücken werden mit Gold aufgefüllt.“ Das erste Gitter dient dazu, aus der wirren Strahlung der Röntgenröhre nur die parallelen Wellen herauszufiltern. Da die Strahlung nur an den Stellen durchge-



**Drei Gitter machen es möglich:** Gitter 1 produziert aus der großen Röntgenquelle viele kleine, fast parallele Linienquellen. Gitter 2 sorgt dafür, dass sich die durch das Objekt verschobenen Röntgenwellen überlagern. Gitter 3 verfeinert die Auflösung des Bildes auf dem Detektor

lassen wird, wo Silizium ist, an den Goldstegen jedoch geblockt wird, entstehen sozusagen viele winzige Röntgenquellen, die alle im Takt strahlen. Das zweite Gitter steht hinter dem Objekt und sorgt dafür, dass sich die Röntgenwellen gegenseitig überlagern; so entsteht das Interferenzbild. Es ist charakteristisch für das Objekt, das man betrachtet. Das heißt, wenn man dieses Muster einmal ohne und einmal mit Objekt aufnimmt und dann beide Aufnahmen vergleicht, wird deutlich, was das Objekt genau mit der Wellenfront macht; man kann dann die Informationen als Kontrast-Mechanismus benutzen. Solche superfeinen Gitter herzustellen ist sehr schwierig, und nur wenige Experten beherrschen diese Kunst. Die besten Gitter für Pfeiffers Experimente entstehen mittlerweile im Institut für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

„Der Rest funktioniert wie bei einer normalen Computertomografie“, so Herzen. „Wir nehmen Projektionen aus vielen verschiedenen Richtungen auf und rekonstruieren das Bild in 3-D, allerdings nicht mit dem Absorptions-, sondern mit dem Phasenkontrast. Das Tolle an diesem Verfahren ist, dass man es von den brillanten Synchrotronquellen ins Labor verlagern kann.“

Ganz ohne Schwierigkeiten gelingt dies aber nicht. „Die Periode unseres Interferenzmusters liegt im Bereich von zwei bis vier Mikrometern“, sagt Julia Herzen. „Die Pixelgröße, also die Größe der Bildpunkte in normalen Tomografiegeräten, ist jedoch viel größer, sie liegt bei knapp einem Millimeter.“ Der Grund dafür: Große Pixel sparen Intensität und verringern damit die Strah-

lenbelastung. In der Digitalfotografie ist das so ähnlich: Wenn man kleine Pixel hat, muss man länger belichten. In der Computertomografie begnügt sich die Medizin mit einer gröberen Auslösung, um mit einer möglichst geringen Dosis für den Patienten auszukommen. „Aber mit einem so groben Detektor kann man natürlich nicht unser feines Interferenzmuster auflösen“, so Herzen. Deshalb setzen die Forscher ein drittes Gitter vor den Detektor. Damit rastern sie das grobe Bild ab und verfeinern die Auflösung. „Wir untersuchen, wie sich über die Pixel hinweg die Intensität verändert. Wenn man sie entsprechend der Position aufträgt, entsteht eine sinusförmige Kurve, und wenn wir diese kennen, haben wir gewonnen.“

### Bilder aus dem Computer

Hier kommt nun die zweite Herausforderung ins Spiel: die numerische Aufarbeitung der Signale. Denn anders als beim herkömmlichen Röntgenbild entstehen die Bilder beim Phasenkontrast-Röntgen erst im Computer. „Ähnlich wie bei der Computertomografie gibt es bei unserem Verfahren keine rohen Bilder mehr“, sagt Franz Pfeiffer. „Die Bildprozessierung ist fundamental wichtig, und sie ist verschränkt mit der Aufnahme der Daten. Das heißt, ohne Nachbearbeitung der physikalischen Signale gibt es kein Bild und umgekehrt.“ Der Forscher rekonstruiert also mit seinem Team am Rechner aus den Hell- und Dunkel-Verteilungen den Weg, den die Röntgenstrahlen genommen, und die Veränderungen, die sie unterwegs erfahren haben. Erst da- ▶

**Wie gut die Phasenkontrast-Methode auch Weichteile darstellen kann**, zeigt dieser Querschnitt durch eine Maus. Oben die konventionelle Durchleuchtung mit Röntgenstrahlen, auf der lediglich das Rückgrat deutlich zu erkennen ist. Darunter das Phasenkontrast-Bild, das zusätzlich auch noch die inneren Organe zeigt: Nieren, Leber, Magen und Darm

raus entsteht das Bild des Objekts. Es kann dann durch weitere Algorithmen noch verfeinert werden. „Man kann unendlich viel Zeit verbringen mit der Auswertung“, lächelt Julia Herzen. „Wenn wir bestimmte quantitative Auswertungen machen, etwa über die Qualität des Gewebes, dann dauert das seine Zeit. Aber für normale Bilder sind wir nicht deutlich langsamer als bei einer normalen Computertomografie; wir haben in wenigen Sekunden das Bild.“

Die Algorithmen für die Auswertung werden von den Wissenschaftlern am Lehrstuhl selbst geschrieben, und mittlerweile gibt es sogar schon eine kleine Datenbank mit eigener Software. Wichtig ist auch die Kombination der unterschiedlichen Verfahren, denn manches sieht man in der Absorption besser, manches im Phasenkontrast. So unterscheiden sich Materialien mit unterschiedlicher Dichte stark im Absorptionbild – etwa Wasser und Glycerin –, während beim Kontrast im Phasendiagramm beispielsweise die Salzkonzentration eine Rolle spielt – so zeigen Wasser und eine Salzlösung sehr unterschiedliche Signale.

### **Die Analyse der Dunkelheit**

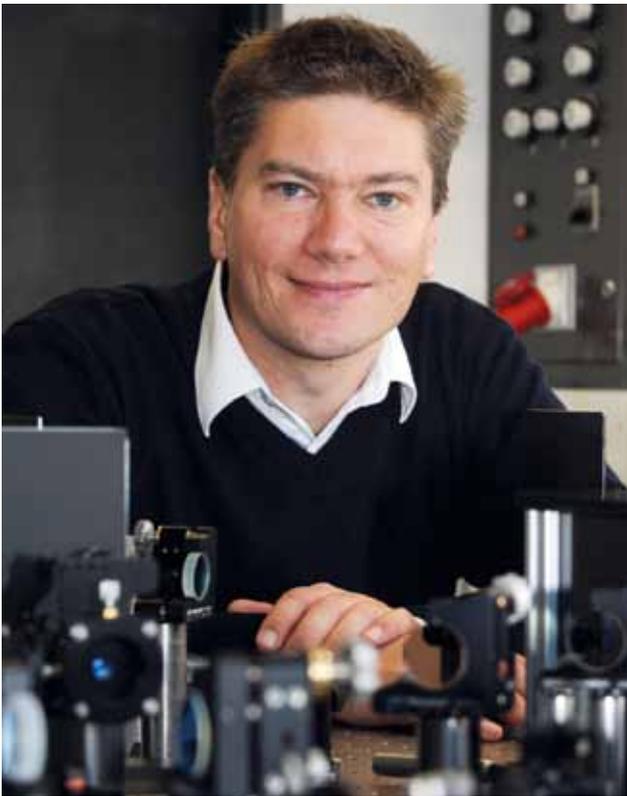
Die Fülle der Informationen, die in den Detektoren ankommt, lässt sich auch noch für ein weiteres Verfahren ausnutzen, für die Dunkelfeld-Diagnostik. Denn die extrem feine Auflösung durch die Gitter und die Berechnung der Sinuskurven geben auch Auskunft darüber, wie viel Kontrast verloren geht, oder mit anderen Worten, wie viel Röntgenlicht nach der Seite weggestreut

wird, wenn es das Präparat durchdringt. „Und daraus können wir Rückschlüsse auf dessen innere Strukturen ziehen“, sagt Julia Herzen, die diese Methode für die Untersuchung millimeterdünner Schweißnähte angewandt hat. In der Medizin bietet sich die Dunkelfeld-Bildgebung beispielsweise für die Untersuchung von Knochen an, die durch Osteoporose geschädigt sind. Bisher war es nicht gelungen, das feine Gefüge im Inneren der Knochen mit herkömmlichen Laborquellen abzubilden. Inzwischen hält Franz Pfeiffer 25 Patente für seine Erfindungen. Und die Arbeitsgruppen an seinem Lehrstuhl bearbeiten weitere Problemfelder in Zusammenhang mit der praktischen Anwendung. Gemeinsam ist allen, dass sie die klinische Anwendung der neuen Methode im Blick haben. Deshalb ist auch die Zusammenarbeit mit den Münchner Universitätsklinken sehr eng. „Zwar fördern einige große Firmen unsere Arbeiten, aber die Industrie ist erst dann ernsthaft an unserem Verfahren interessiert, wenn die Kliniken derartige Geräte fordern“, hat Pfeiffer inzwischen erkannt. „Deshalb ist es für uns lebensnotwendig, mit den Medizinern sehr eng zu kooperieren und praktische Anwendungen zu entwickeln, die einen echten Fortschritt in der Diagnostik zeigen.“

### **Kooperation mit TUM Klinikum**

Vor Kurzem vereinbarte Franz Pfeiffer vorklinische Projekte mit Prof. Ernst J. Rummeny, Chef des Instituts für Radiologie am Klinikum rechts der Isar, die auf die Entwicklung eines später auch in der Klinik einsetz- ▶





**Oben das erste Röntgen-CT-Gerät**, das mit der Phasenkontrast-Methode arbeitet. Es ist ein Kleintier-Scanner, der nach den Vorgaben von **Franz Pfeiffer (unten)** gebaut wurde. Daran messen die Wissenschaftler die Strahlendosis und optimieren die Abbildung

baren Phasenkontrast-CT abzielen. „Hierfür wünschen wir uns die enge Kooperation mit einer großen medizintechnischen Firma, die auch bereit wäre, sich an der Entwicklung zu beteiligen“, sagt Rummeny. „Ich glaube daran, dass diese neue Technik eine bessere und frühere Diagnose von Weichteiltumoren wie etwa Lebertumoren ermöglicht, gleichzeitig bleibt uns das bekannte CT-Bild erhalten, sodass beide Informatio-

nen genutzt werden können. Darüber hinaus könnten sich auch völlig neue Entwicklungen und Anwendungen ergeben, die zu weiteren Verbesserungen der medizinischen Versorgung und zu einer individuellen Betreuung der Patienten beitragen könnten“. Sein Institut wird die klinische Entwicklung zumindest teilweise übernehmen, der Lehrstuhl von Franz Pfeiffer erledigt den technischen Part. Beide Forscher gehen von einem Zeitraum von fünf Jahren aus, bis ein derartiger Computertomograf zur Verfügung steht.

### **Prototyp für die Untersuchung von Kleintieren**

Bei der Mammografie, in der nur je zwei Bilder aus verschiedenen Winkeln nötig sind, könnte die Entwicklung eines klinikfähigen Geräts schon früher gelingen. „In zwei bis drei Jahren gibt es dafür einen Prototyp“, glaubt Pfeiffer, „aber die Implementierung auf breiter Ebene dauert natürlich länger. Das neue Verfahren muss erst zertifiziert und zugelassen werden, und dann ist immer noch nicht sicher, wie hoch die Akzeptanz der Ärzte dafür ist.“ Angesichts der wesentlich besseren Diagnosemöglichkeiten für bereits kleine Tumoren in der weiblichen Brust sollte dies aber kein Problem sein. Seit Kurzem steht im Garching Labor immerhin schon ein Computertomograf für Kleintiere, den die belgische Firma Skyscan als Prototyp nach den Wünschen der Forscher gebaut und mit den entsprechenden Gittern ausgestattet hat. Es ist der erste Scanner, bei dem sich die Röntgenröhre und der Detektor um das Objekt drehen – vergleichbar zum CT in der Medizin. Bei allen anderen Geräten rotiert die Probe in der fest montierten Anlage. Dieses Gerät ermöglicht damit eine Untersuchung von lebenden Mäusen. Daran messen die Wissenschaftler nun, wie hoch die Strahlendosis ist und wie sie die Abbildung optimieren können. Für die medizinische Forschung ist dies durchaus interessant, denn vieles wird an Tiermodellen getestet, bevor man es am Patienten anwendet, etwa die medikamentöse Behandlung von Tumoren.

### **Neuartige Röntgenlaser**

Franz Pfeiffer denkt aber auch über die normalen Röntgenröhren hinaus. Er engagiert sich für die Entwicklung und den Bau neuartiger Röntgenlaser und kleiner, aber brillanter Synchrotrons, sowohl für die Grundlagenforschung, aber auch, um damit vielleicht künftig Quellen für kohärentes Röntgenlicht in die Klinik holen zu können. Zusammen mit Kollegen von der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik arbeitet er im 2010 gegründeten Centre for Advanced Laser Applications (CALA). Für ihn ist dies eine Investition in die Zukunft, die den Ruf des Garching Campus als exzellenten Wissenschaftsort weiter festigen kann. *Brigitte Röthlein*

## 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:** Dr. Bernhard Epping,  
 Birgit Fenzel, Sibylle Kettembeil, Dr. Brigitte Röthlein,  
 Dr. Christine RÜth, Dr. Evdoxia Tsakiridou,  
 Dr. Karsten Werth

**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:** 36.000

**ISSN:** 1865-3022

**Erscheinungsweise:** zweimal jährlich

**Verantwortlich für den**

**redaktionellen Inhalt:** Tina Heun

**Verantwortlich für die Anzeigen:** Tina Heun

**Titelbild:**

Astrid Eckert und Andreas Heddergott, TUM

© 2011 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**

**Dr. Bernhard Epping** (Jahrgang 1962) arbeitet freiberuflich als Wissenschaftsjournalist, Buch- und PR-Autor sowie seit Kurzem in der Technologietransferstelle der Universität Tübingen. Zwischen 1984 und 1989 studierte er Biologie in Mainz, Tübingen und São Paulo. 1993 erhielt er seinen Dokortitel für eine Arbeit über Stickstofffixierung bei Leguminosen. Thematische Schwerpunkte sind heute Forschung in Medizin und Biologie sowie Gesundheitspolitik.

**Birgit Fenzel** studierte zunächst Germanistik, Philosophie und Erziehungswissenschaften, bevor sie die journalistische Laufbahn einschlug. Nach Uniabschluss und Volontariat arbeitete sie als Tageszeitungsredakteurin, als Freie für verschiedene Redaktionen des öffentlich-rechtlichen Rundfunks, als Wissenschaftsredakteurin bei der ddp-Nachrichtenagentur und zuletzt als Redakteurin bei der Max-Planck-Gesellschaft.

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

**Dr. Brigitte Röthlein** arbeitet seit 1973 als Wissenschaftsautorin bei verschiedenen Zeitschriften, bei Fernsehen, Rundfunk und für Zeitungen. Sie ist Diplomphysikerin und promovierte in Kommunikationswissenschaft, Pädagogik und Geschichte der Naturwissenschaften. Von 1993 bis 1996 leitete sie neben ihrer freien publizistischen Tätigkeit das Geschichtsmagazin „Dahm“, 2004/2005 das Forschungs- und Technologiema-  
 „Innovate“. Sie veröffentlichte Sachbücher unter anderem über

Hirnforschung, Atomphysik und Quantenphysik. 2008 erschien ihr Buch „Der Mond“.

**Dr. Christine RÜth** ist Physikerin und betreibt ein Büro für Wissenschaftskommunikation in Regensburg. Als Fachjournalistin schreibt sie für Technologie-Unternehmen und Forschungsinstitute. Außerdem ist sie Redakteurin des Newsletters „Fusion News“, einer Publikation des European Fusion Development Agreement (EFDA) in Garching. Zuvor war sie in der Elektronikindustrie in Marketing und Öffentlichkeitsarbeit tätig. Ein Masterstudium Wissenschaftskommunikation führte zu ihrer heutigen Tätigkeit.

**Dr. Evdoxia 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.

**Dr. Karsten Werth** ist freier Wissenschaftsjournalist in München. Er studierte in Tübingen Geschichte und Amerikanistik. Er promovierte mit einer Arbeit über das US-Raumfahrtprogramm der 1960er-Jahre. Erfahrung in Wirtschaft und Journalismus sammelte er unter anderem bei JBI Localization in Los Angeles, VW Canada in Toronto, Deutsche Welle-TV in Berlin, Deutsche Fernseh Nachrichten Agentur in Düsseldorf und beim Schwäbischen Tagblatt in Tübingen. Als Textchef war er für die Stuttgarter Agentur WortFreunde Kommunikation tätig.

**Links**

[www.pe.mw.tum.de/forschung/projekte/leiko](http://www.pe.mw.tum.de/forschung/projekte/leiko)  
[www.utg.mw.tum.de](http://www.utg.mw.tum.de)  
[www.hsa.ei.tum.de](http://www.hsa.ei.tum.de)

# Ein Universalwerkstoff erobert die (Kabel-)Seelen

**Ein interdisziplinäres Team aus TUM Forschern und Industrie entwickelt eine Aluminium-Steckverbindung für die Hochvolt-Bordnetze künftiger Elektroautos**

Gäbe es einen Preis für den erfolgreichsten Stoff auf der Welt, müsste er an Aluminium vergeben werden: Es ist das dritthäufigste Element nach Sauerstoff und Silizium und das häufigste Metall in der Erdkruste noch vor Eisen und weit vor Kupfer. Außerdem kommt Aluminium als Spurenelement sowohl in menschlichen als auch in pflanzlichen Zellen vor und ist ebenso Bestandteil von Trinkwasser.

Längst hat sich das silberweiße Metall zum Lieblingswerkstoff von Designern, Architekten und Konstrukteuren entwickelt. Warum das so ist? Es ist leicht, korrosionsbeständig, lässt sich gut verarbeiten und sieht auch noch edel aus. Vor allem die Baubranche, der

Maschinenbau und die Verpackungsindustrie setzen auf Aluminiumprodukte. Doch der höchste Marktanteil entfällt nach Angaben des Gesamtverbands der Aluminiumindustrie (GDA) mit 44 Prozent auf den Verkehrssektor. Kein Wunder, denn angesichts knapper Ressourcen und steigender Ansprüche an den Umweltschutz ist Leichtbau gefragt. Ob es um die Innenausstattung, Karosserien oder die Rohbauten moderner Züge, Flugzeuge, Autos oder Nutzfahrzeuge geht oder deren Innenleben mit Motorblöcken oder Zylinderköpfen, überall ist der Werkstoff verbaut.

Eigentlich ist das Leichtgewicht im Motorraum schon weit vorgedrungen. Trotzdem ist sein Potenzial noch



**Das eKart ist ein studentisches Projekt** am Lehrstuhl für Produktentwicklung zum Bau eines vollständig elektrifizierten Gokarts. Das Fahrzeug dient als Demonstratorobjekt und Entwicklungsplattform für die verschiedenen Module – darunter auch das Hochvoltbordnetz

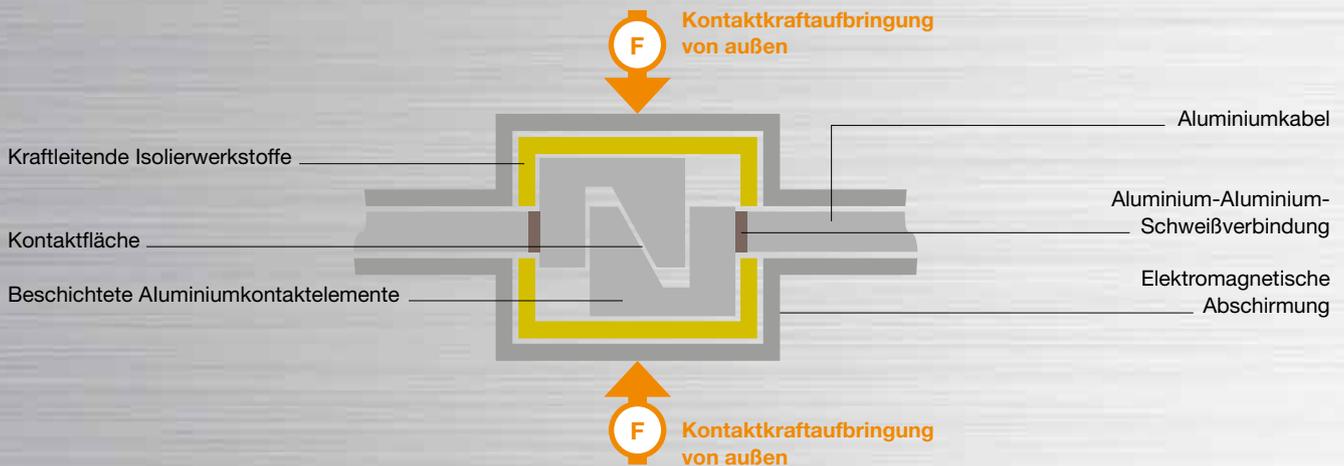
nicht ausgereizt. Allein bei Automobilen ließen sich laut GDA bei konsequentem Einsatz von Aluminium aufgrund des geringeren Gewichts mehr als 1,3 Liter Kraftstoff auf 100 Kilometer sparen. Nun da Elektrofahrzeuge auf dem Vormarsch sind, kommt es auf jedes Gramm an, denn je leichter ein E-Mobil ist, desto größer die Reichweite.

### **Hohe elektrische Spannungen**

Eine weitere Aufgabe für die Konstrukteure besteht darin, die erforderlichen hohen elektrischen Spannungen zur Verfügung zu stellen und zu beherrschen. Bei Autos mit Verbrennungsmotor reicht das gängige

Bordnetz mit seinen 12 Volt aus. Aber Hybrid- bzw. Elektrofahrzeuge benötigen zusätzlich ein Hochvoltbordnetz. So treten bei Hybridfahrzeugen Spannungen von 100 Volt auf, bei Nutzfahrzeugen sogar bis zu 1000 Volt. Diese hohen Spannungen sind notwendig, um den Elektromotor und Nebenaggregate wie Klimakompressor, elektrische Lenkung oder Heizung ausreichend mit Strom zu versorgen.

Für die Versorgungsleitungen zwischen Hochvoltbatterie, Leistungselektronik und Elektromotor setzen die Entwickler bislang Kupferkabel ein. Doch Kupfer ist teuer und schwer, eine preiswertere und auch leichtere Alternative wäre Aluminium. Des- ▶



Das Schaubild zeigt den Aufbau des Steckers mit den ineinandergreifenden Kontaktstellen aus Aluminium. Ein Stahlblechkäfig, aus Gründen der elektromagnetischen Verträglichkeit ohnehin notwendig, übernimmt die mechanische Stabilisierung des Steckers

halb beschäftigen sich die Ingenieure damit, das verzweigte Elektrobordnetz zu optimieren und das Kupfer in der Kabelseele durch Aluminium zu ersetzen. Letzteres weist eine um zwei Drittel geringere Dichte im Vergleich zu Kupfer auf, allerdings ist auch seine Leitfähigkeit um 40 Prozent geringer. Deshalb müssen Aluminiumleiter (bei gleichem elektrischem Widerstand) einen rund 67 Prozent höheren Querschnitt aufweisen. Das bedeutet auch, dass mehr Bauraum dafür eingeplant werden muss.

Während beim üblichen Bordnetz standardisierte und geprüfte Komponenten vorhanden sind, müssen die Entwickler beim Hochvoltnetz praktisch von vorn anfangen, einheitliche Standards existieren nicht. Eine der größten Hürden für den Einsatz des Leichtmetalls liegt in der Verbindungstechnik beziehungsweise den elektrischen Kontakten. Aluminium bildet an der Luft eine Oxidationsschicht, eigentlich ein Vorteil, da diese den Werkstoff vor Korrosion schützt. Der Nachteil dabei ist, dass an den Kontaktstellen der Übergangswiderstand sehr hoch ist – ein Ausschlusskriterium für elektrische Verbindungen. Zudem neigt Aluminium dazu, bei höheren Temperaturen zu „kriechen“, also sich wie ein Kuchenteig zu verformen, mit der Folge, dass die Kontaktierung locker wird und der Verbindungswiderstand zunimmt.

### Kabelstecker mit Aluminiumkontakten

Diese Probleme lassen sich lösen, das beweisen TUM Forscher, die im Gemeinschaftsprojekt LEIKO mit Partnern aus der Industrie ein innovatives Kontaktierungs-konzept auf Basis von Aluminium entwickelt haben. Dabei handelt es sich um einen Kabelstecker, dessen keilförmige Kontaktstellen wie Haken ineinandergreifen. Damit die Verbindung hält, befindet sich auf der Oberseite des Steckers eine Blattfeder. „Nicht nur, dass wir mit der Blattfeder eine ausreichende Kontaktkraft sichern. Das Kriechverhalten von Aluminium ist sogar sehr vorteilhaft, denn im Laufe der Zeit schmiegen sich die Kontakte weiter an. Dadurch wird die elektrische Verbindung noch besser“, erläutert Prof. Hartmut Hoffmann, dessen Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen an LEIKO beteiligt ist.

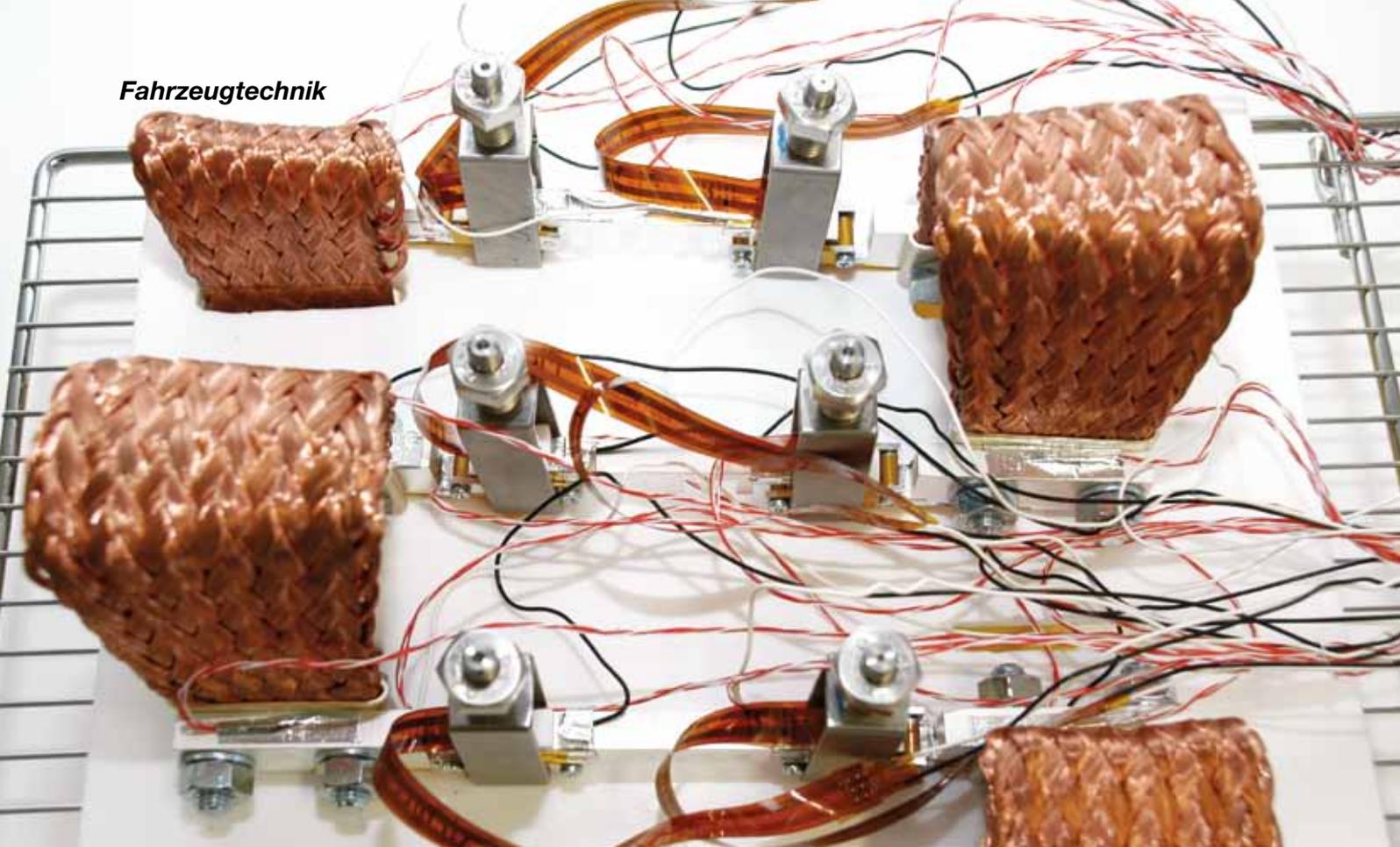
Damit die Kontaktstellen nicht korrodieren, beschichten die Wissenschaftler den Aluminiumwerkstoff mit edleren Metallen. Eine Hülle aus Kunststoff sorgt für den notwendigen Berührschutz. „Dieser verhindert, dass der Fahrer einen Stromschlag abbekommt, falls er sich unter der Motorhaube zu schaffen macht“, erklärt Prof. Udo Lindemann. Sein Lehrstuhl für Produktentwicklung ist für das Konzept des Kabelsteckers verantwortlich. Eine dritte Umhüllung bildet ein Stahlblechkäfig, der aus Gründen der elektromagnetischen Verträglichkeit >



**Die keilförmigen Kontaktstellen greifen wie Haken ineinander.** Besonderes Augenmerk legen die Forscher auf die Verbindung zwischen Aluminiumkabel und Kontaktelement. Um sicheren Halt zu gewährleisten, wenden sie unter anderem Ultraschall-Schweißverfahren an

**Zu Demonstrationszwecken an der Batterie des eKart** hat der Stecker hier ein Gehäuse aus Plexiglas. So sind die Kontaktteile von außen sichtbar, aber geschützt





In diesem Versuchsaufbau werden die Kontaktelemente Langzeittests unterworfen. Dazu werden sie im Wärmeofen Temperaturen von bis zu 140 Grad ausgesetzt. So überprüfen die Wissenschaftler die elektrische Leitfähigkeit und Alterungseffekte

#### Das Elektroauto MUTE

Die TUM geht neue Wege: 20 Lehrstühle haben sich zusammengeschlossen, um das Elektromobil MUTE zu entwickeln. Es soll bezahlbar und für die Massenproduktion geeignet sein. Derzeit arbeiten zahlreiche Forscher am Wissenschaftszentrum Elektromobilität an einem serienreifen Prototyp. Die größte Herausforderung stellt die im Vergleich zu Benzin wesentlich geringere Energiedichte elektrischer Energiespeicher dar. Abgesehen davon ist bei Elektrofahrzeugen der Akkumulator der größte Kostenfaktor. Bei MUTE will man das Gesamtfahrzeuggewicht reduzieren und damit die Kosten bei gleichbleibender Reichweite. Mehr zum Thema Elektromobilität lesen Sie im Artikel „Neue Speicher braucht das Land“ ab S. 26 in dieser Faszination Forschung.

notwendig ist. Gleichzeitig stabilisiert er den Stecker und hält die Kontaktkraftfeder an ihrem Platz. Wie stabil sind sie und vor allem: Ab wann altern die beschichteten Aluminiumkontakte? Das wollen die LEIKO-Partner mit Langzeittests herausfinden. Der Stecker muss unter Bedingungen bestehen, wie sie im normalen Fahrbetrieb herrschen. Deshalb haben die TUM Forscher im Keller des Lehrstuhls für Hochspannungs- und Anlagentechnik in der Münchner Theresienstraße einen

entsprechenden Versuchsstand aufgebaut: Das neue Kontaktelement steckt in einem herdgroßen Ofen, der auf 140 Grad Celsius aufgeheizt wird. Mehr als 100 angeschlossene Sensoren geben unter anderem Aufschluss darüber, wie sich der elektrische Verbindungs-widerstand, die Kraft und die Temperatur entwickeln und welche Alterungseffekte möglicherweise auftreten. Die Hitzeprüfung wird einige Monate dauern, danach folgen weitere Tests in der Salznebelkammer, um die korrosive Beanspruchung bei winterlichen Straßenbedingungen nachzubilden. „Uns geht es darum, die Wirkung grundlegender Alterungsmechanismen auf Aluminiumverbindungen, wie sie im Fahrbetrieb auftreten, zu bewerten“, sagt der Leiter des Lehrstuhls für Hochspannungs- und Anlagentechnik Prof. Josef Kindersberger. Die LEIKO-Partner versprechen sich durch die Materialsubstitution erhebliche Gewichtsvorteile, was letztlich in Kosteneinsparungen und verringerte Kohlendioxid-Emissionen münden soll. Wenn alle Experimente klappen, können Interessierte und Fachwelt die neuen Alustecker auf der Internationalen Automobil-Ausstellung in Frankfurt (15. – 25. September 2011) bewundern. Sie werden Teil des Hochvoltbordnetzes von MUTE sein, dem neuen Elektroauto-Konzept der Technischen Universität München für urbane und ländliche Regionen.

*Evdoxia Tsakiridou*

# world of cabling systems

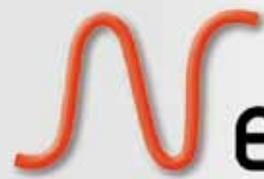
BORDNETZE | KOMPONENTEN | ENGINEERING



FASZINIERENDE TECHNIK,  
**DIE MOBILISIERT.**

Im MINI-E wie im Rolls-Royce, im Klein-  
transporter wie im East-West Truck.



 **nexans**  
autoelectric

Nexans autoelectric GmbH  
Vohenstraußer Straße 20  
D-92685 Floß

info@autoelectric.de  
[www.autoelectric.de](http://www.autoelectric.de)



Link

[www.biochemie.ch.tum.de/eisenreich/weisenreich2010.html](http://www.biochemie.ch.tum.de/eisenreich/weisenreich2010.html)

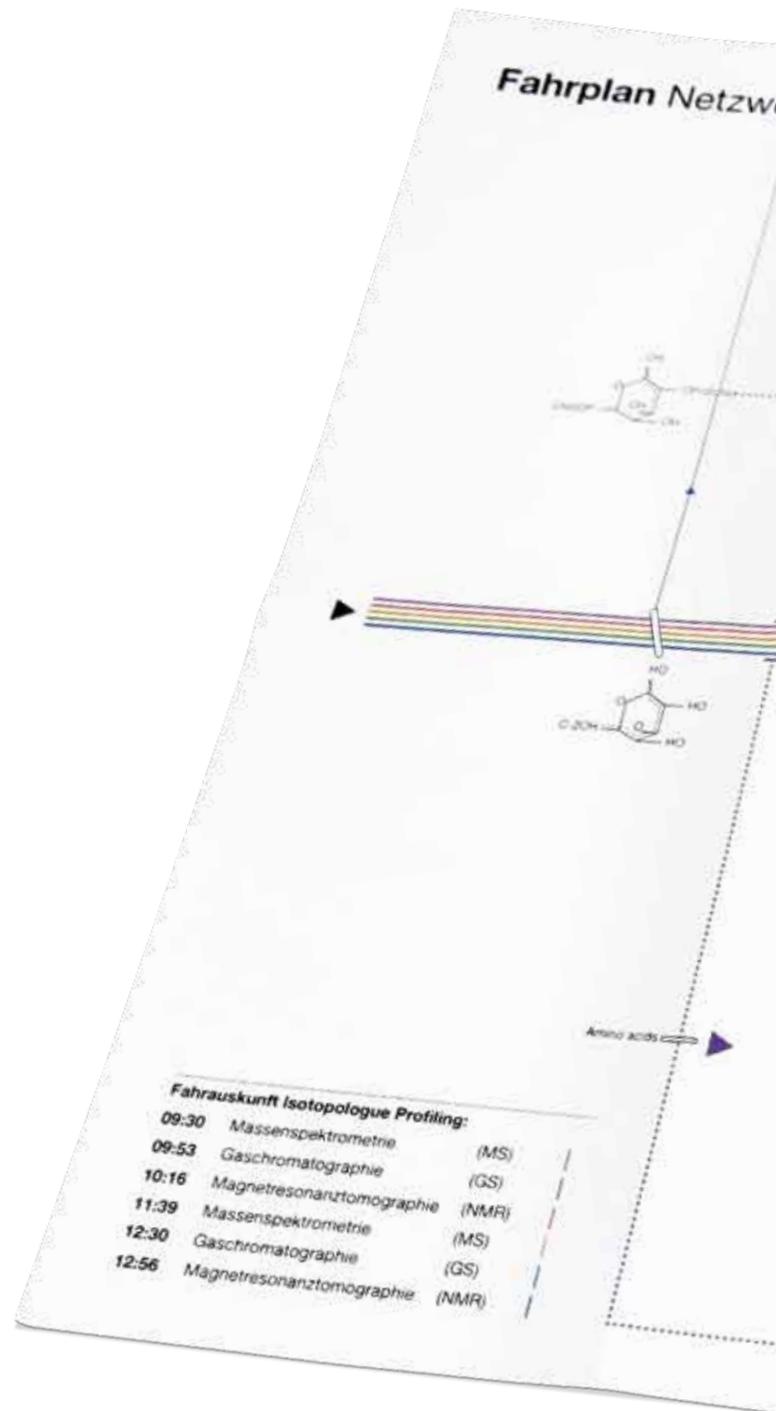


# Nächster Halt: Aminosäure

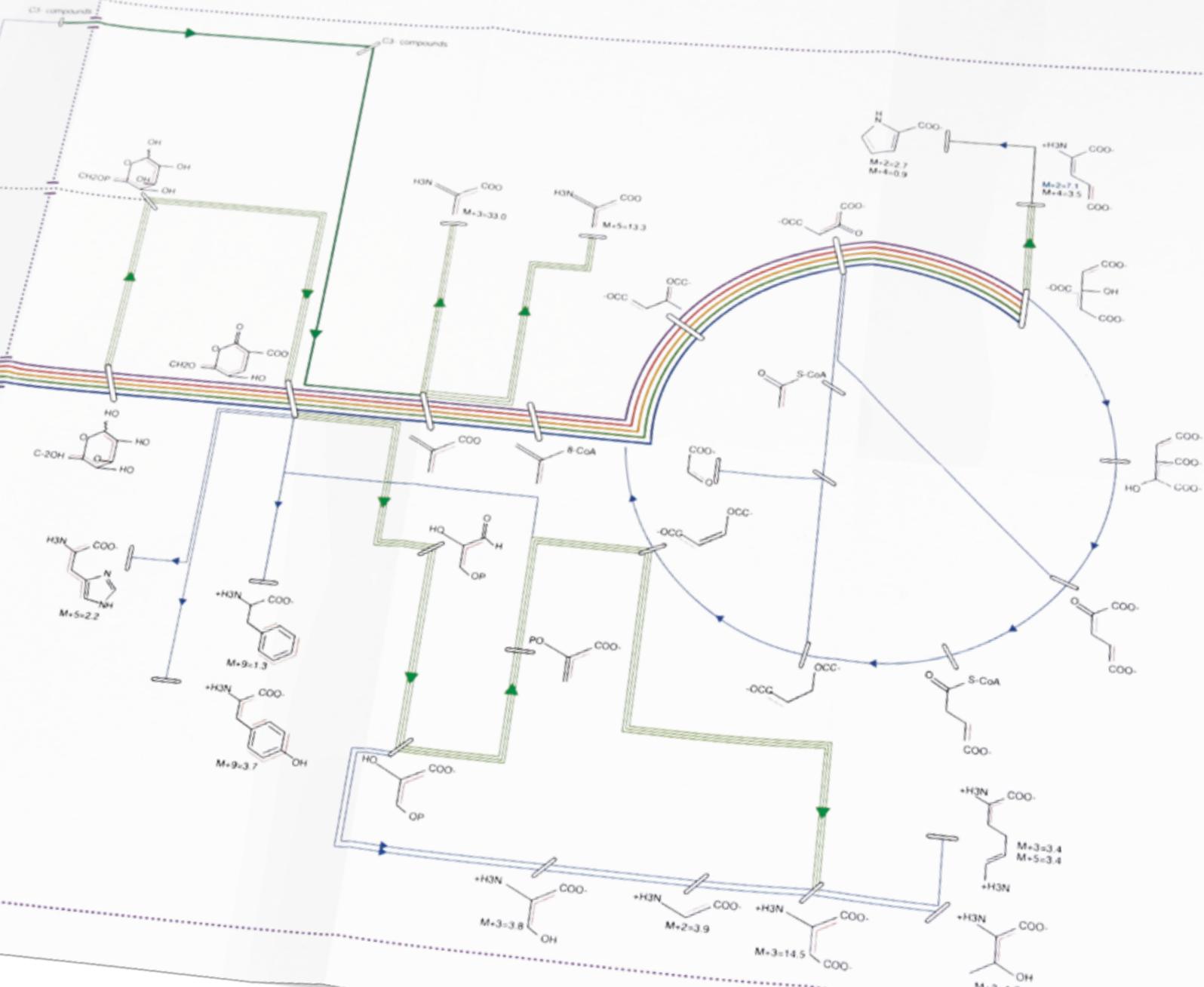
Der Chemiker Wolfgang Eisenreich liest in den verschlungenen Wegen des Stoffwechsels wie in einem Fahrplan. Sein Fahrziel: die dort ablaufenden Reaktionen aufklären und die Stammstrecke in einzelnen Stoffwechselsystemen aufspüren

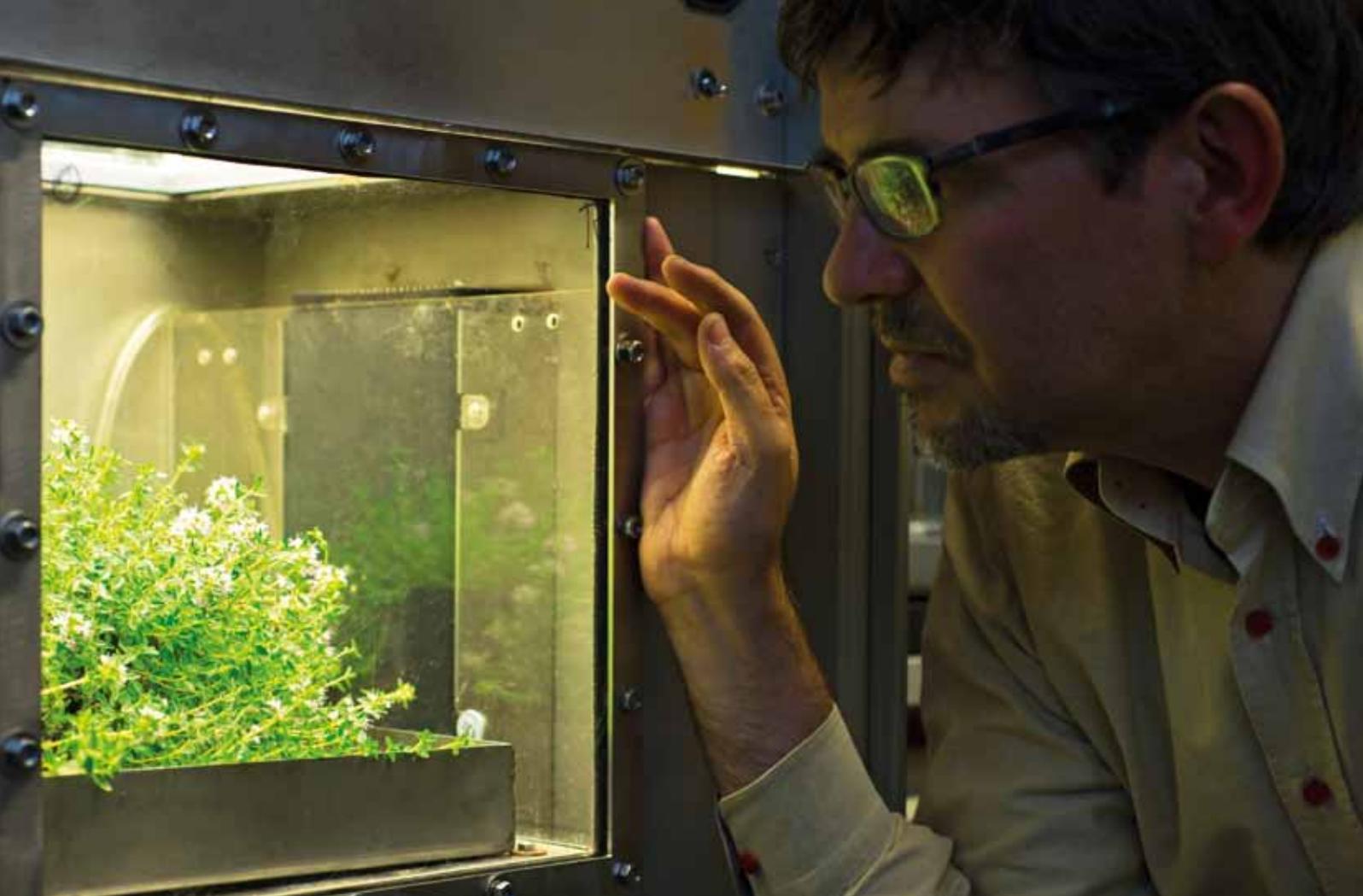
**E**s geht um die Stammstrecke. Die Strecke, auf der am meisten los ist. Diese Strecke will er finden: Dr. Wolfgang Eisenreich. Der Wissenschaftler vom Lehrstuhl für Biochemie der TUM in Garching untersucht allerdings keine Streckennetze öffentlicher Verkehrsmittel, sondern das recht ähnlich gestrickte Netzwerk des Stoffwechsels. Seine Trassen sind Reaktionswege, auf denen biochemische Produkte entstehen.

Wie im Linienplan von Bus und Bahn verläuft auch im Metabolismus der Verkehr kreuz und quer, aber immer strikt geregelt und nach Plan. Ständig wird Materie auf-, um- und abgebaut, Neues zusammengefügt und wieder in Einzelteile zerlegt. Zudem zeichnet sich der Stoffwechsel durch äußerste Dynamik aus und passt sich rasch an veränderte Bedingungen an – was ihn vom öffentlichen Nahverkehr unterscheidet. Je nach Ernährungssituation, Temperatur oder verfügbarer Energie ändern sich die Stoffflüsse und es entstehen anders zusammengesetzte Zwischenprodukte (Metaboliten) in anderen Mengenverhältnissen. ▶



# erk des Stoffwechsels





**Dr. Wolfgang Eisenreich untersucht die metabolen Netzwerke** in seltenen kaukasischen Pflanzen (hier: *Thymus transcaucasicus*). Zunächst werden die Pflanzen in einer Kammer mit  $^{13}\text{C}$ -markiertem Kohlendioxid kultiviert. Dann bereitet der Wissenschaftler die Proben für Isotopologue Profiling vor



„Die Metaboliten bilden zu jedem Zeitpunkt die jeweiligen Lebensvorgänge des betreffenden Organismus ab“, erklärt Wolfgang Eisenreich. Der Chemiker kennt sich mit den verschlungenen Wegen des Stoffwechsels bestens aus. Er liest in ihnen wie in einem Fahrplan. Und sein Ziel ist es, im Metabolismus ganz verschiedener Organismen viel benutzte „Trampelpfade“ zu finden und die dort ablaufenden Reaktionen aufzuklären. „Wir suchen sozusagen die Stammstrecken in einzelnen Stoffwechselsystemen und zu unterschiedlichen Bedingungen. Sind die bekannt, kann man manipulierend eingreifen und so Abläufe in den Organismen steuern. Entweder fördern – bei gewünschten Reaktionen – oder aber hemmen. Im Fall infektiöser Bakterien hätte man damit beispielsweise ein neues Antibiotikum.“

#### **Markierte Moleküle**

Einzelne Reaktionsabläufe im Dickicht des Stoffwechsels zu verfolgen, ist jedoch kompliziert. Es braucht Marker, die man immer wiederfindet im Gewirr. Was im Verkehr etwa auffällige Sonderwagen der Tram sind,

In einer Kooperation mit Dr. Artur Manukyan vom Wissenschaftszentrum Weihenstephan untersucht der Lehrstuhl für Biochemie kaukasischen Thymian. Im Labor werden die  $^{13}\text{C}$ -markierten Pflanzen präpariert. Im Anschluss wollen die Wissenschaftler mittels Gaschromatografie und Massenspektrometrie Metabolite isolieren

sind im Metabolismus stabile Isotope. Ganz exakt sind es Isotopologe, auf denen die Analysen beruhen: Moleküle, in denen der natürlich vorkommende Kohlenstoff mit der Massenzahl 12 ( $^{12}\text{C}$ ) ganz oder teilweise durch den ein winziges bisschen schwereren Kohlenstoff mit der Massenzahl 13 ( $^{13}\text{C}$ ) ersetzt ist. Mittlerweile kann man solche markierten Verbindungen kaufen: Glucose etwa, Glycerin oder Acetat, die an einer, an mehreren oder allen C-Positionen  $^{13}\text{C}$ -markiert sind. Organismen verwenden in ihrem Stoffwechsel beide Kohlenstoffarten ohne wesentliche Unterschiede. So dienen die  $^{13}\text{C}$ -Verbindungen als auffallende Tram-Sonderwagen, die sich im metabolischen Streckennetz als Ganzes oder in Teilen wiederfinden lassen – sofern man die passende Methode dafür hat.

Die TUM Wissenschaftler haben sie: Isotopologue Profiling heißt das Verfahren, mit dem sie das Schicksal der mit  $^{13}\text{C}$ -Atomen bestückten Moleküle nachverfolgen. Es verbindet zwei höchst empfindliche Analysemethoden: einerseits Massenspektrometrie (MS), meist direkt gekoppelt mit Gaschromatografie (GC), andererseits Ma-

gnetransonanzspektroskopie (NMR). Das GC/MS-System trennt die im Stoffwechsel entstandenen Moleküle nach ihren Massen auf und unterscheidet dabei zwischen  $^{13}\text{C}$ -markierten Molekülen und solchen mit normalen  $^{12}\text{C}$ -Atomen. Die NMR erfasst über spezifische Frequenzsignale in einem starken Magnetfeld exakt, welche Positionen in den Molekülen  $^{13}\text{C}$ -besetzt sind. Es entsteht ein typisches Muster, das zeigt, an welchen Stellen welcher Metaboliten  $^{13}\text{C}$ -Atome eingebaut wurden und auch, über welche Schritte es dazu kam. Die Wissenschaftler können zum Beispiel nachvollziehen, an welchem Atom ein Enzym wie ansetzt.

#### Meilenstein für die Stoffwechselforschung

So machen die modernen Hightech-Geräte die Dynamik des metabolischen Netzwerks und seine Reaktionen mit der jeweiligen Umwelt sichtbar. Man erkennt, wie aus den markierten Vorläufersubstanzen über Stoffwechselwege wie den Citratzyklus, die Glykolyse oder den Pentosephosphatzyklus metabolische Produkte entstehen. „Die Möglichkeit, metabolische Flüsse unter natürlichen ▶

Bedingungen und am lebenden Objekt zu charakterisieren, ist ein Meilenstein für die Stoffwechselforschung“, schwärmt Eisenreich. Noch steht die Grundlagenforschung im Mittelpunkt der Arbeiten, doch fallen dem Chemiker auf Anhieb jede Menge Anwendungsmöglichkeiten ein, sei es für medizinische, landwirtschaftliche oder lebensmitteltechnische Zwecke.

### Wie ernähren sich Bakterien?

Ein derzeitiger Schwerpunkt ist die Arbeit an infektiösen Bakterien mit dem mittelfristigen Ziel, neue Antibiotika zu entwickeln. Denn bakterielle Infektionen durch Krankenhauskeime wie den berühmten *Staphylococcus aureus* fordern viele Opfer; mehrere Hunderttausend Patienten infizieren sich jährlich in deutschen Krankenhäusern, Tausende sterben daran. Grund: Immer mehr Bakterien sind mittlerweile gegen Antibiotika resistent. Vor diesem Hintergrund startete die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) 2009 das Schwerpunktprogramm „Wirtsadaptierter Metabolismus von bakteriellen Infektionserregern“. 15 Forscherteams an Universitäten in Deutschland und der Schweiz sind daran beteiligt, darunter die Gruppe um Eisenreich.

Eigentlich ist der Stoffwechsel von Bakterien längst erforscht – aber nur unter Laborbedingungen. Dieses Wissen ist wichtig; wichtiger aber ist es, zu erkennen, wie Bakterien sich in ihren natürlichen Lebensräumen verhalten. Will man wirksam in den Stoffwechsel im Infektionsverlauf eingreifen, muss man das metabolische Geschehen an oder in der Wirtszelle kennen, das Wechselspiel von bakteriellem und zellulärem Stoffwechsel. Wie ernähren und vermehren sich die Erreger im Wirtsorganismus, wie verhalten sie sich dort, wo sie eine ganz andere Umwelt als in Petrischalen oder Fermentern vorfinden? Mit welchen Tricks schaffen sie es, ihren Metabolismus rasch und flexibel auf die Abwehrreaktionen des Wirts antworten zu lassen? Zum richtigen Zeitpunkt die richtigen Metaboliten herzustellen – diese Fähigkeiten sind ausschlaggebend für die Pathogenität und den Verlauf der Infektion. Hier möchte der DFG-Schwerpunkt einhaken. Finden die Wissenschaftler

Durch Einfrieren („Quenchen“) mit flüssigem Stickstoff stoppen die Wissenschaftler die Stoffwechselforgänge in den Pflanzen. So können Sie die zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhandenen Stoffwechselprodukte untersuchen

spezifische, für die Infektion relevante Stoffwechselreaktionen und dagegen gerichtete Hemmsubstanzen, kann die Infektion gestoppt oder gar verhindert werden.

### Stoffwechselforgänge nachvollziehbar machen

Die Garchingler sind für die Schlüsseltechnologie im Forschungsverbund zuständig, das Isotopologie Profiling. In den Hochsicherheitslaboratorien der Partnergruppen werden pathogene Bakterien unter relevanten Bedingungen mit Isotop-markierten Vorstufen gefüttert, aus denen die Mikroben anschließend Zucker, Fette und Proteine aufbauen. Häufig verwendet wird  $^{13}\text{C}$ -markierte Glucose, weil Bakterien wie die meisten Lebewesen diesen Zucker als Kohlenstoff-Quelle nutzen. Zur Untersuchung von intrazellulär lebenden Mikroben stehen Wissenschaftlern zwei Versuchsdesigns zur Verfügung: Einmal werden dem Kulturmedium der Wirtszellen, menschlichen Immun- oder Epithelzellen, unmarkierte Bakterien und  $^{13}\text{C}$ -markierte Glucose gleichzeitig zugesetzt. In diesem Fall wird der Zucker sowohl in den Wirts- wie in den bakteriellen Stoffwechsel eingeschleust. Finden sich später in den Mikroben  $^{13}\text{C}$ -markierte essenzielle Aminosäuren, die der Wirt nicht selbst herstellen kann, müssen diese vom bakteriellen Stoffwechsel stammen. Über welche Routen sie aus der  $^{13}\text{C}$ -Glucose zusammengebaut werden, zeigt das Isotopologie Profiling. Oder: Das Medium der Wirtszellen enthält zunächst nur  $^{13}\text{C}$ -markierte Glucose, die die Zellen aufnehmen. Dann tauscht man das Medium gegen ein  $^{13}\text{C}$ -freies und fügt Bakterien hinzu. So lässt sich der Transfer von Substanzen aus dem Wirt in die Bakterien verfolgen.

### Bahnbrechende Arbeiten als Grundlage

In jedem Fall stoppen die Forscher die Reaktion nach rund sechs Stunden, trennen Wirtszellen und Bakterien voneinander und gewinnen stabile Metaboliten, beispielsweise Aminosäuren. Aus ganz Deutschland wandern diese Proben anschließend nach Garching zur Bioanalyse. „In dem Bereich der Isotope war die TUM immer stark“, betont Eisenreich. „Vor allem die Arbei- ▷





100% (low)

100%

100%

100%

LINE

Mein

AD

SDX

**Gelöste Metabolite in NMR-Röhrchen** zur Bestimmung der Isotopologieverteilung mittels Kernresonanzspektroskopie. Hier messen die Forscher die genauen Positionen der <sup>13</sup>C-Markierung

ten der Emeriti Helmut Simon, Hanns-Ludwig Schmidt und Adelbert Bacher waren bahnbrechend. Davon profitieren wir heute und bauen mit modernster Technik darauf auf. Gerade in der Analytik hat sich in den letzten zehn Jahren sehr viel getan. Die Empfindlichkeit heutiger Geräte ist enorm, wenige Bakterien reichen für die Messungen aus. Und unsere Ausstattung ist hervorragend; so hat uns die DFG für die Studien ein eigenes GC/MS-System gestellt, das rund um die Uhr Isotopologie vermisst. Daneben ist die NMR-Ausrüstung in Garching überragend.“

### **Stammstrecke der Metaboliten**

In den Daten des Isotopologue Profiling suchen die TUM Biochemiker nun nach den Reaktionen, die zu einem zentralen Metaboliten führen – zu einem Produkt, dessen Fehlen das Bakterium nicht überlebt. Die Isotopologen-Muster weisen den Weg aller Reaktionen, die zur Biosynthese des Metaboliten geführt haben. Da man zudem die Ausgangssubstanzen kennt, lässt sich aus den Ergebnissen ein Gesamtfahrplan für den Stoffwechsel des Organismus unter den gegebenen Bedingungen erstellen. Eisenreich vergleicht das gern mit dem Streckennetz der Münchener Verkehrsbetriebe: „Es gibt viele Linien – Reaktionen von A zu B – und Stationen, Metaboliten. Über Stationen wie den Marienplatz verlaufen mehrere Linien bzw. Stoffwechselwege. Wir schauen, welche Linien es gibt und wie viele Züge dort verkehren, wie wichtig also der Weg ist. Letztlich suchen wir nach der Stammstrecke für zentrale und hoch vernetzte Metaboliten. Fällt eine solche Stammstrecke aus, wirkt das bis in die Peripherie, das ganze System kollabiert. Genau das wollen wir bei der Entwicklung von Antibiotika erreichen.“

### **Spezifische Angriffspunkte für Antibiotika**

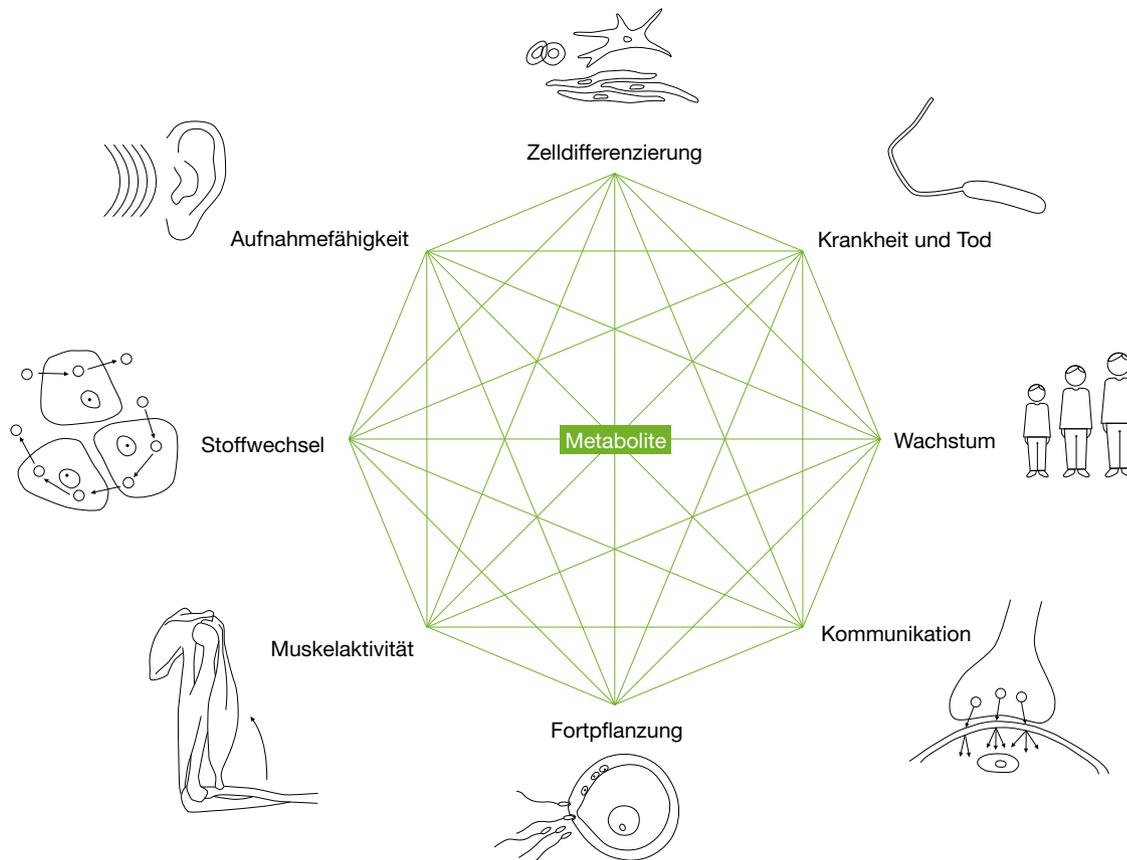
Jedoch die eine Stammstrecke, die alle Bakterien benutzen, gibt es nicht. Leider? Nein, widerspricht Eisenreich: „Denn dann hätte eine Resistenz besonders fatale Folgen. Gezielt auf Stoffwechselreaktionen der jeweiligen Pathogene wirkende Antibiotika sind besser als

unspezifische Breitband-Antibiotika. Außerdem werden nützliche Bakterien in unserem Darm geschont.“ Erste potenzielle Stammstrecken wurden bereits aufgespürt: Gemeinsam mit Kollegen vom TUM Wissenschaftszentrum Weihenstephan und dem Pettenkofer-Institut in München klärten die Garching Biochemiker auf, wie sich der Stoffwechsel von Listerien an den des Wirtsorganismus anpasst. Diese Bakterien rufen Lebensmittelvergiftungen hervor, die für geschwächte Personen tödlich sein können. Wesentlicher metaboler Prozess ist die Bildung von Oxalessigsäure durch die Pyruvatcarboxylase, ein Enzym, das CO<sub>2</sub> an Pyruvat anlagert; dieses Salz der Brenztraubensäure ist eine wichtige Schaltstelle im Stoffwechsel.

Untersuchungen an weiteren Krankheitserregern wie Salmonellen, Staphylokokken, Streptokokken, Yersinien, Legionellen oder Chlamydien belegen die erstaunliche Anpassungsfähigkeit des mikrobiellen Metabolismus an die wechselnden Bedingungen der jeweiligen Wirtszellen. „Es finden sich nur wenige Schwachstellen, wo man ansetzen kann“, weiß Eisenreich inzwischen. „Aber diese Achillesfersen kann und muss man nutzen und Medikamente entwickeln, die genau dort angreifen. Dafür liefern unsere Studien die Grundlage.“ Die tatsächliche Entwicklung neuer Medikamente aber sprengt den universitären Rahmen, dazu sind industrielle Partner nötig. „Leider gestaltet sich die Suche nach solchen Partnern schwierig“, bedauert Eisenreich. „An dem Gebiet der Anti-Infektiva sind Pharmafirmen in der Regel nicht sehr interessiert.“

### **Weiteres Forschungsthema: allergenfreier Latex**

Einen Schritt weiter ist das botanische Projekt „LaKa-Zell“, das die Deutsche Bundesstiftung Umwelt fördert. Ziel der Kooperation mit der Universität Münster und der Phytowelt GreenTechnologies GmbH ist ein biotechnologisches Verfahren zur Produktion von allergenfreiem Latex. Grundlage sind Zellkulturen des russischen Löwenzahns, der in den Wurzeln Latex bildet. Anders als aus Gummibäumen gewonnener Latex löst Löwenzahn-Latex keine Allergien aus, weil ihm be- ▷



Bei zahlreichen ganz unterschiedlichen Vorgängen des Lebens sind Metabolite – hochvernetzte Stoffwechselprodukte – an der Kontrolle und Steuerung der Abläufe beteiligt

stimmte Proteine fehlen. Da Gummibäume zudem, ökologisch ungünstig, in Monokultur gezogen werden und obendrein seit einiger Zeit ein Pilz die Plantagenbäume zerstört, scheint die Gewinnung von Latex aus Löwenzahn sinnvoll. Synthetischer Kautschuk kann wegen seiner chemischen Eigenschaften Latex nicht vollständig ersetzen. Wie die Pflanze den Latex-Saft produziert, woher sie ihren Kohlenstoff bezieht, soll erneut Isotopologue Profiling abklären. Schließlich will man durch Zufuhr notwendiger Bausteine die Zellen zu vermehrter Produktion anregen.

Im „LaKaZell“-Projekt kümmern sich die Garchinger nur um die analytische Aufarbeitung der Proben im Labor. Ab und zu reisen sie aber auch selbst zu den biologischen Objekten, beispielsweise in die Lüneburger Heide. Dort geht es um Ginseng und Ginsenoside, die wirksamen Inhaltsstoffe dieser traditionellen chinesischen Heilpflanze. Die Firma FloraFarm baut den bis zu 60 cm hohen Ginseng kommerziell auf großen mit Netzen überspannten Feldern an, und einzelne Pflanzen dienen nebenbei der Wissenschaft: Ihnen führen die

Biochemiker  $^{13}\text{C}$ -markiertes  $\text{CO}_2$  zu. Im Zuge der Photosynthese bauen die Pflanzen daraus  $^{13}\text{C}$ -Zucker auf. Das durch Isotopologue Profiling gemessene Mosaik aus  $^{12}\text{C}$  und  $^{13}\text{C}$  lässt erkennen, wie Ginsenoside in der Pflanze auf dem Feld zusammengebaut werden und wo man fördernd in die Bildung der wertvollen Substanzen eingreifen kann. Auch für zahlreiche andere moderne Fragestellungen der Pflanzenwissenschaften kann das Verfahren des Isotopologue Profiling Antworten geben. Aktuelle Forschungsobjekte sind Lavendel, Thymian und Tabak. Selbst Flechten werden damit unter die biochemische Lupe genommen. „Das Einsatzspektrum dieser höchst sensitiven Methode ist äußerst breit gefächert“, sagt Wolfgang Eisenreich. „Immer aber geht es darum, Katalysewege zu klären, metabolische Prozesse zu verfolgen, um dann produktive Schritte gezielt zu stärken und hemmende Barrieren abzubauen. Im Bereich der Pflanzenwissenschaften ist das Fernziel, eines Tages über diese neuen Kenntnisse landwirtschaftliche Erträge zu steigern oder Pflanzen tauglich zu machen für veränderte Umweltbedingungen.“ Sibylle Kettembeil

# Wie lange schwingt eine Stimmgabel?

**Für die Konstruktion mikromechanischer Bauteile ist die mechanische Dämpfung der Schwingungen eine essenzielle Größe. Doch bisher war es nicht möglich, Dämpfungen vorauszuberechnen, die durch die Aufhängung der Mechanik verursacht werden**

Musikinstrumente sind die bekanntesten Beispiele für Resonatoren. Die mechanischen Schwingungen etwa einer Gitarrensaite verursachen akustische Schwingungen, die wir als Ton hören. Die Reinheit des Klangs ist eng verknüpft mit dem Rückgang der Schwingungsamplitude durch die mechanische Dämpfung. Zur Beschreibung der mechanischen Verluste nutzen die Wissenschaftler den Qualitätsfaktor  $Q$ , der die Anzahl der Schwingungen beschreibt, bis die Amplitude der Schwingung auf einen Bruchteil des Ausgangswertes abgeklungen ist. Je größer der  $Q$ -Faktor, desto reiner klingt der Ton und umso länger schwingt das System. Auch in der Mikroelektronik gewinnen mechanische Resonatoren zunehmend an Bedeutung. Die Grundlagenforschung nutzt mikromechanische Resonatoren zur Entwicklung hochempfindlicher biologischer Sensoren, quantenelektronischer und optomechanischer Bauteile. Hierbei sind extrem reine Schwingungen erwünscht, um bestimmte Signale herauszufiltern oder kleinste Frequenzverschiebungen zu messen.

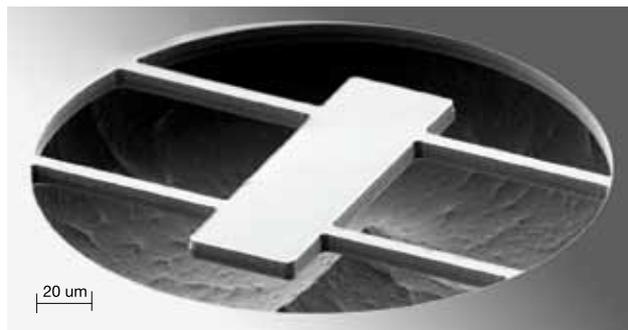
Allerdings war es selbst bei einfachen Geometrien bisher nahezu unmöglich, den erreichbaren Gütefaktor  $Q$  vorauszuberechnen. Diese Hürde hat ein Forscherteam von Physikern der TUM und der Universität Wien überwunden. Mit ihrem Berechnungsverfahren auf Basis der Finite-Elemente-Methode können die Wissenschaftler die designbedingte Dämpfung nahezu beliebiger Resonatorgeometrien vorausberechnen. „So wie man eine Lichtwelle auch als Teilchen beschreiben kann, können sich mechanische Schwingungen wie Teilchen verhalten, die Phononen. Wir berechnen nun, wie die von der Schwingung des Resonators ausgehenden Phononen in den Träger des Resonators abstrahlen“, erklärt Dr. Garrett Cole aus Wien. „Damit schaffen wir die Möglichkeit, diese Probleme berechnen zu können. Das ist ein Durchbruch für die gezielte Konstruktion solcher Bauteile.“

## Link

[einrichtungen.physik.tu-muenchen.de/T34/](http://einrichtungen.physik.tu-muenchen.de/T34/)

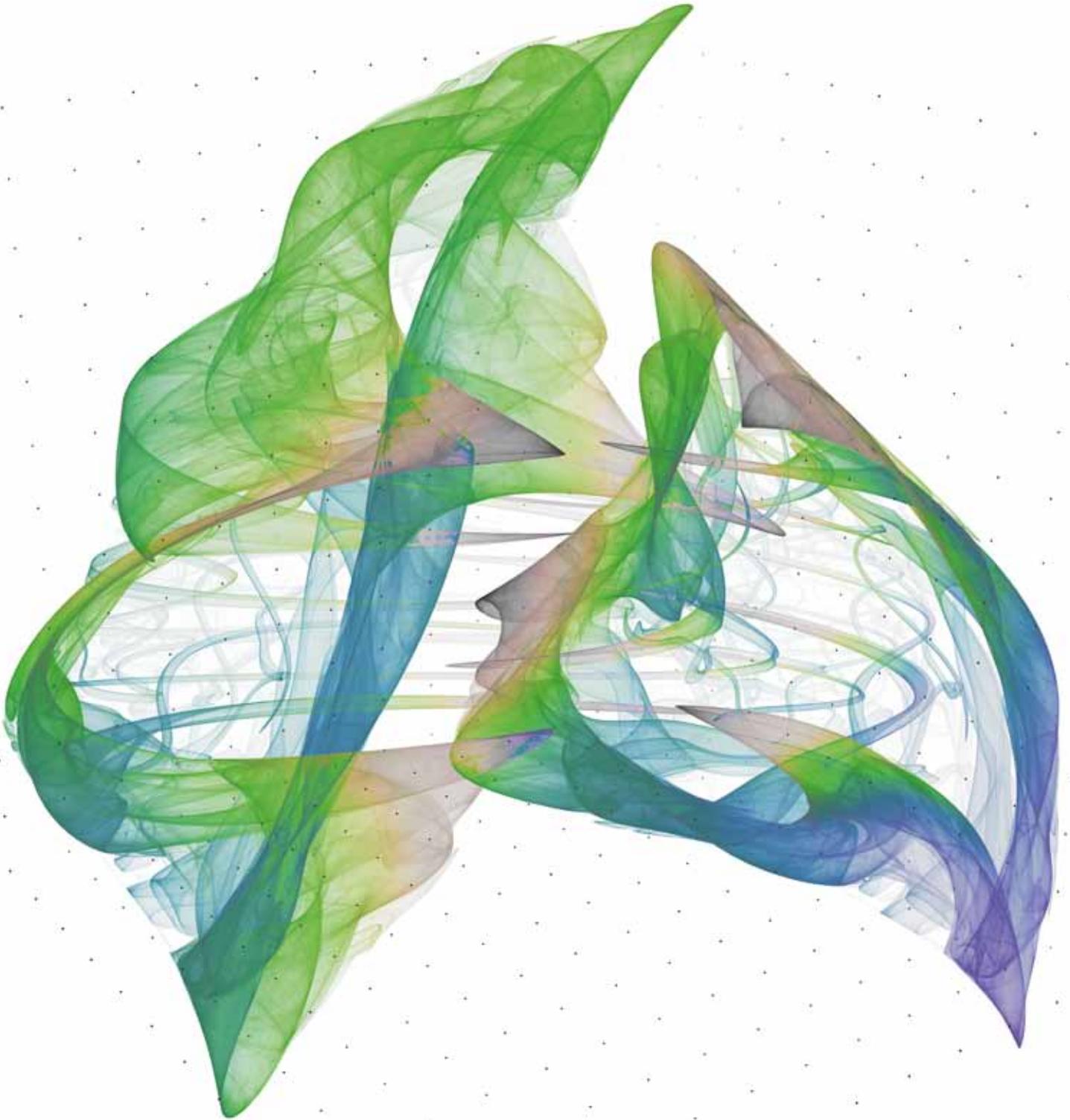
Die Idee geht zurück auf eine frühere Arbeit von Dr. Ignacio Wilson-Rae, Physiker an der Technischen Universität München und Mitglied des Exzellenzclusters Nanosystems Initiative Munich (NIM). In enger Zusammenarbeit haben die Teams in Garching und Wien nun eine einfache numerische Lösung entwickelt, die die Berechnung der mechanischen Verluste auf einem Standard-PC ermöglicht. Die Vorhersagekraft des numerischen „ $Q$ -Solver“ setzt dem gegenwärtigen Rätselfratat und Herumprobieren bei der Gestaltung von mechanischen Resonatoren ein Ende. Besonders stolz sind die Physiker darauf, dass ihr Verfahren maßstabsunabhängig ist und so auf eine breite Palette von Szenarien angewandt werden kann, von nanoskaligen Bauteilen bis hin zu makroskopischen Systemen. □

**Mit einer neuen Methode** können Wissenschaftler die mechanische Dämpfung von Schwingungen – hier eines Resonators – messen



Link

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



# Die Rechenbeschleuniger

**Der Weg zur wissenschaftlichen Erkenntnis führt heute häufig über den Computer. Simulationsrechnungen eröffnen neben Theorie und Experiment einen dritten Lösungsweg. Am Munich Centre of Advanced Computing entwickeln Wissenschaftler fachübergreifend Methoden, um komplexe Fragestellungen effizient am Computer zu lösen**

**M**itte 2012 wird am Leibniz-Rechenzentrum in Garching ein Kraftprotz einziehen: SuperMUC, einer der leistungsfähigsten Computer der Welt. Informatiker rattern seine Kennzahlen herunter wie Motorsportfans die PS von Rennautos: Weit über 100.000 Prozessorkerne werden bis zu drei Milliarden elementare Rechenoperationen in der Sekunde bewältigen. Simulationsrechnungen auf schnellen Computern ergänzen oder ersetzen immer öfter den Laborversuch. Das kann ein virtueller Windkanal sein, an dem Autobauer den  $c_w$ -Wert der Karosserien optimieren, ein Materialmodell, an dem Ideen für neue Werkstoffe durchgespielt werden, oder ein Klimamodell, das Prognosen für die Erderwärmung liefert. Doch die Nutzung von Supercomputern ist nicht einfach: Viele wissenschaftliche Programme wurden für einige wenige leistungsstarke Prozessoren geschrieben.

Nun müssen sich die Rechenaufgaben auf Hunderte oder Tausende gleichzeitig arbeitende Rechenkerne aufteilen. „Es ist, als hätte man bisher einen Handwerksbetrieb mit wenigen Mitarbeitern geführt und müsste nun einen Konzern steuern“, erklärt Prof. Dr. Hans-Joachim Bungartz. Er leitet am Institut für Informatik der Technischen Universität München den Lehrstuhl für Wissenschaftliches Rechnen. Die relativ junge Disziplin entwickelt Methoden, um wissenschaftliche Probleme effizient am Computer zu lösen. Ihre Anfänge liegen in den 90er-Jahren, als die Rechenleistung endlich ausreichte, um komplexe Systeme mit mehreren physikalischen Effekten zu modellieren. Beispielsweise, um in der Atmosphäre neben den Luftströmungen auch chemische Reaktionen mit zu berechnen. Es entstand Software mit damals Hunderttausenden Anweisungen oder Codezeilen, an denen über die Jahre zehn oder ▶



mehr Autoren beteiligt waren. Bungartz nennt sie die Diamanten der Forschungsinstitute. Nun sollen sie fit werden für moderne Technologien. Aber Wissenschaftler müssen neue Erkenntnisse in ihrer Disziplin produzieren und können nicht jahrelang und immer wieder ein Computerprogramm aktualisieren. Auch die klassische Forschungsförderung ist nicht auf die Finanzierung solcher Aufgaben ausgerichtet. Viele sprechen deshalb von einer Softwarekrise: Man habe Geld für Superrechner, aber keine Ressourcen, um passende Programme zu entwickeln.

### **Schnelle Software für schnelle Rechner**

Hier setzt das Munich Centre of Advanced Computing (MAC) an. Seit 2008 vereint das Zentrum Forscher der TUM, der Münchner Ludwig-Maximilians-Universität und mehrerer Max-Planck-Institute. Eng verzahnt ist das MAC mit dem Leibniz-Rechenzentrum, das von einem Professor der TUM, dem Informatiker Arndt Bode, geleitet wird. Die arabische King Abdullah University of Science and Technology (KAUST) ist ebenfalls beteiligt. Advanced Computing steht für Metho-

den, um komplexe Aufgaben effizient am Computer zu lösen. Hardware, wie schnelle oder viele Prozessoren und Leitungen für den schnellen Datenverkehr, reiche dafür nicht, sagt Bungartz: „Optimierte Algorithmen, die weniger Rechenschritte brauchen, machen Programme ebenfalls deutlich schneller.“ Ein weiterer Punkt sind Analysetechniken, denn viele Programme liefern derart komplexe und riesige Datenmengen, dass man die gesuchte Information nur schwer findet. An den zehn Forschungsprojekten am MAC beteiligen sich Informatiker, Mathematiker, Physiker, Ingenieure und Chemiker. Dieser Austausch ist wichtig, denn viele Fragestellungen sind ähnlich. Strömungsmodelle zum Beispiel benutzen Bauingenieure ebenso wie Geophysiker. Die breite Ausrichtung und das Ausbildungsangebot – es gibt eigene Studiengänge und ein Promotionsprogramm – machen das MAC zu einem in Europa einzigartigen Zentrum für Advanced Computing.

### **Das virtuelle Chemielabor**

Die theoretischen Chemiker Prof. Dr. Notker Rösch und Dr. Sven Krüger modernisieren am MAC ihr Programm



Foto: Wenzel Schürmann, TUM

**Höchstleistungsrechner:** Noch verrichtet am Leibniz-Rechenzentrum der SGI Altix 4700 seine Dienste für die Forschung. Mitte 2012 wird mit SuperMUC ein Kraftprotz einziehen, der völlig neue Perspektiven für das Supercomputing eröffnet

ParaGauss. Die Software simuliert die quantenmechanischen Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Atomkernen und kann so Moleküle und die Reaktionen zwischen ihnen berechnen. Rösch ist Experte für Katalysatoren, das sind Substanzen, typischerweise feinverteilte Metall-Nanoteilchen, die chemische Reaktionen beschleunigen. Unter anderem sucht er nach besseren Katalysatoren zu Optimierung von Diesel, zur Gewinnung von Kraftstoffen aus Biomasse und für die Herstellung von Kunststoffen aus Kohlendioxid. Simulationsrechnungen sollen ein genaues Verständnis des Ablaufs der Reaktionen liefern und so helfen, Katalysatoren für möglichst effiziente Reaktionen zu finden. Rösch entwickelt ParaGauss seit 1994. Er arbeitet bereits mit parallelen Rechenkernen und soll nun noch schneller werden: „Damals waren zehn Prozessoren schon viel. Heute rechnet das Programm mit viel mehr Prozessoren effizient, kann aber die Aufgaben noch nicht optimal auf wirklich große Prozessorzahlen verteilen.“ Außerdem steigt der Rechenaufwand enorm mit der Zahl der betrachteten Atome – im Schnitt verachtfacht sich die Rechenzeit, wenn man die Zahl der Atome verdoppelt.

### **Rechenarbeit auf viele Prozessoren verteilen**

Das Programm ist eine Herausforderung für die Informatiker am MAC: Während zum Beispiel Windkanalmodelle immer die gleichen Strömungsgleichungen lösen, verwendet ParaGauss je nach Fragestellung und Rechenvariante bis zu einem Dutzend verschiedene Algorithmen, die sehr oft wiederholt durchlaufen werden. Dazu kommen spezielle Effekte für schwere Atome und Umgebungseffekte, wenn die Moleküle in Flüssigkeiten gelöst oder in Kontakt mit Oberflächen sind. Derzeit durchleuchten MAC-Informatiker die etwa 500.000 Codezeilen von ParaGauss mit ausgefeilten Analysewerkzeugen. Sie fahnden nach Leerläufen, denn das Programm wickelt so viele verschiedene Aufgaben ab, dass manchmal ein Rechenschritt auf ein Zwischenergebnis warten muss. Nun sollen die Algorithmen so verbessert oder neu geschrieben werden, dass sich die Arbeit effizient auf möglichst viele Prozessoren verteilt. Manche Programmvarianten laufen mittlerweile schon auf doppelt oder viermal so vielen Kernen. Außerdem soll der Rechenaufwand bei mehr Atomen in Zukunft weniger stark ansteigen. ▶



Bild: TUM

**Anhand der Terraindaten**, die von einem Satelliten gemessen wurden, haben die Wissenschaftler die Infrastrukturdaten (wie zum Beispiel Straßen und Flüsse) extrahiert und über das Satellitenbild gelegt

Noch schneller wird ParaGauss, wenn nicht nur einzelne Rechnungen, sondern ganze Pakete parallel laufen. Das können zum Beispiel Serien von Simulationen mit verschiedenen Reaktionsparametern sein. Verteilen sich solche Aufgaben auf 500 oder 1000 Prozessoren, schrumpft die Rechenzeit auf etwa ein Zehntel, schätzt Krüger. Dazu muss das Programm die Rechenpakete eigenständig effizient auf die Prozessoren verteilen. In einigen Fällen gelingt das bereits. Rösch ist gespannt: „Der Ansatz ist völlig neu. Das MAC gibt uns die Gelegenheit, ihn umzusetzen. Auf lange Sicht wären 1000 effizient genutzte Prozessoren eine tolle Sache. Das wird uns auf jeden Fall helfen, Antworten auf bisher sehr schwierige Fragen zu finden.“

### **Schneller und besser analysieren**

Das schnellste Programm hilft nichts, wenn sich vor der Erkenntnis riesige Datenmengen auftürmen. Die Informatikerin Prof. Dr. Gudrun Klinker will die oft mühsame Analyse vereinfachen. Sie entwickelt Techniken, mit denen Anwender ähnlich wie in einem Computerspiel schnell die wichtigen Aspekte ihrer Daten erfassen

und verschiedene Lösungsansätze durchspielen können. Klinker ist am MAC-Projekt Virtual Arabia beteiligt, an dem sie gemeinsam mit Kollegen von KAUST arbeitet. Ziel ist ein dreidimensionales ComputermodeLL von Saudi-Arabien – eine Art interaktives Google Earth für Oberfläche, Himmel und Untergrund. Am fertigen Modell will man zum Beispiel den Verlauf des Sonnenstands an geplanten Gebäuden simulieren, um sie möglichst energieeffizient zu bauen, oder vor einem Bauvorhaben die Auswirkungen eines Erdölfördergebiets auf die Stabilität des Untergrunds studieren.

Ein zweites KAUST-Projekt simuliert die Einlagerung von Kohlendioxid in Erdölquellen. Dort ist das Gas klimafreundlich weggesperrt und gleichzeitig drückt es das restliche Öl aus der Quelle. Mit dem Modell wollen die Wissenschaftler diese Verbindung aus Klimaschutz und Ölförderung optimieren.

### **Genaueres Bild vom Inneren der Ölquelle**

Um zu berechnen, wie sich das Gas in der Quelle ausbreitet, müssen sie die Gesteinsstruktur mit tausendstel Millimeter kleinen Poren für ein kilometerweit ausge-



**Mit Datenhandschuhen durch die virtuelle Welt:** die wissenschaftliche Mitarbeiterin Amal Benzina bewegt sich durch das dreidimensionale Computermodell von Saudi-Arabien, das Wissenschaftler am Munich Center of Advanced Computing entwickelt haben

dehntes Ölfeld abbilden. „Selbst Supercomputer können nicht das ganze Gebiet in so hoher Auflösung bearbeiten“, sagt Dr. Tobias Weinzierl, der wissenschaftliche Leiter der beiden KAUST-Projekte. Stattdessen rechnet man einzelne Stellen genau und überträgt die Ergebnisse auf das ganze Modell. Integriert in Virtual Arabia, veranschaulichen diese Simulationsdaten die Vorgänge in der Ölquelle direkt in der realen Umgebung und die Forscher erkennen zum Beispiel sofort, ob eine berechnete Stelle für die Einleitung des Gases wirklich zugänglich ist.

Solche Betrachtungen kann man sehr gut in einer CAVE (Computer Aided Virtual Environment) anstellen. Das ist ein kleiner Raum, der an Wänden, Boden und Decke die dreidimensionalen Daten eines Computermodells zeigt. Mit 3-D-Brillen ausgerüstet, können mehrere Personen sich zum Beispiel virtuell in eine Erdölquelle stellen und ausprobieren, unter welchen Bedingungen sich Kohlendioxid am besten verteilt. Die Nutzer bedienen die CAVE mit Gesten. Dazu tragen sie spezielle Handschuhe oder halten Werkzeuge, deren Bewegungen von Sensoren erfasst werden. CAVEs brauchen extrem leistungsfähige

Programme und Computer, die die Daten fast in Echtzeit neu rechnen und darstellen, damit das Modell mit dem Nutzer unmittelbar interagieren kann. Klinker testet in einer CAVE unterschiedliche Darstellungs- und Bedientechniken und beobachtet, wie schnell die Nutzer jeweils zu Ergebnissen kommen: „Je intuitiver das System reagiert und beispielsweise eine intensiv betrachtete Stelle automatisch vergrößert, desto schneller werden Computer und Mensch zusammen das Problem lösen können“. Das Modell soll auch mögliche Ansätze, beispielsweise ungewöhnliche Daten, aufzeigen, denn oft ist der Datenwust so groß oder sind die Einflussparameter so vielfältig, dass der Nutzer kaum sieht, an welcher Schraube er zuerst drehen soll. Bungartz erwartet ohnehin, dass Simulationsrechnungen den Wissenschaftlern eher die passenden Fragen statt fertiger Antworten geben: „Wenn Modelle immer komplexere Systeme beschreiben, sind die Ergebnisse oft so unerwartet, dass sie die eigentlich richtigen Fragen erst aufwerfen, indem sie uns falsche Annahmen aufzeigen.“

*Christine Rüth*



#### Kurzbiografie

Christoph Lütge

Der Philosoph und Wirtschaftsinformatiker Christoph Lütge leitet den Peter Löscher-Lehrstuhl für Wirtschaftsethik der TUM. Er bringt seine Expertise in vielen Fachbereichen der Universität ein: Wirtschaftswissenschaftler, Ingenieure, Naturwissenschaftler, Mediziner und künftige Lehrer werden seine Vorlesungen besuchen. Prof. Dr. Christoph Lütge studierte und promovierte an der TU Berlin und der TU Braunschweig und habilitierte sich im Fach Philosophie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Nach seiner dortigen Assistentenzeit übernahm er 2007 die Vertretung des Reinhard-Mohn-Stiftungslehrstuhls für Unternehmensführung, Wirtschaftsethik und gesellschaftlichen Wandel an der Universität Witten/Herdecke, bevor der Heisenberg-Stipendiat 2008 nach Braunschweig wechselte. Dort hatte er die Vertretung des Lehrstuhls für Philosophie inne. Lütges Forschungsschwerpunkt liegt auf der Ordnungsethik, wobei er die Technikphilosophie einbezieht.

Foto: Heddergott, TUM

# Die Moral in der Marktwirtschaft

**Die Geschichten vom bösen Kapitalismus, der unsere Gesellschaft herunterwirtschaftet, kann Christoph Lütge, Inhaber des Peter Löscher-Stiftungslehrstuhls für Wirtschaftsethik der TUM, langsam nicht mehr hören. Für ihn als Philosophen und Ökonomen gehören Moral und Marktwirtschaft sehr wohl zusammen**

**Das Verhältnis von Kapitalismus und Moral ist ein populäres Thema. Nicht nur in der Wirtschaftsethik, sondern auf breiter gesellschaftlicher Basis wird diskutiert. Wie erklären Sie sich das Interesse?**

Das Interesse an dem Thema ist sehr alt. Es lässt sich mindestens bis Aristoteles zurückverfolgen. Es gewinnt in der Moderne aber an Bedeutung, weil Gesellschaft und Moral zunehmend auseinanderfallen. Vor allem deswegen, weil unsere Gesellschaft komplexer geworden ist. Es sind gesellschaftliche Veränderungen, die das verstärkte Bedürfnis nach Wirtschaftsethik hervorgebracht haben. In jüngster Zeit hat sich die Diskussion mit Blick auf die Globalisierung verstärkt. In der Globalisierung sehen Menschen die unterschiedlichen Erfordernisse, von denen sie meinen, diesen nicht gerecht zu werden. Und sie sehen bei Unternehmen die vermeintlichen oder tatsächlichen Skandale. Die Finanzkrise hat dazu beigetragen, dass man zunächst sehr misstrauisch geworden ist gegenüber allem, was mit Wirtschaft und vor allem mit Banken zu tun hat. Aber das Interesse an der Wirtschaftsethik als akademischer Disziplin war vorher schon da – und ist geblieben.

**Für manche ist Kapitalismus ja der Untergang des Abendlandes – zumindest in moralischer Hinsicht. Wie wird da argumentiert?**

Da wird gerne ein Dualismus aufgemacht: auf der einen Seite die – wenn man es böse sagt – Gutmenschen, die nach Altruismus rufen, und auf der anderen die egoistischen Vertreter des Kapitalismus. Diese Sicht herrschte gerade nach der Finanzkrise vor und steht in vielen Büchern, die jetzt die Gier der Banker und Manager anprangern und den Kapitalismus am Ende sehen.

Link
<a href="http://www.wirtschaftsethik.edu.tum.de">www.wirtschaftsethik.edu.tum.de</a>

**Was halten Sie davon?**

Aus meiner Sicht ist der größte Teil davon keine seriöse Wirtschaftsethik. Das Grundproblem der Wirtschaftsethik beginnt eigentlich damit, wie man Ökonomik und Ethik zusammendenken kann. Aber dann muss man versuchen – und das ist mein Ansatz –, es aus einer gemeinsamen Wurzel heraus abzuleiten und nicht als diese zwei Pole, wie es heutzutage in der Regel gesehen wird: auf der einen Seite die ethischen, auf der anderen die ökonomischen Anforderungen. Das hat schon der Moralphilosoph und Begründer der klassischen Nationalökonomie Adam Smith getan. Er sagte, der Wettbewerb und die Marktwirtschaft haben einen ethischen Sinn. Dieser kommt nicht von außen durch die Zählung der Marktwirtschaft hinzu, sondern im gesamten System der Marktwirtschaft liegt etwas Moralisches. Indem der Markt etwas leistet, das uns allen nützt, vollbringt er eine ethische Leistung.

**Sie werfen den Kritikern des Kapitalismus vor, 30 Jahre Diskussionen in der Wirtschaftsethik zu ignorieren, die bei allen Disputen im Detail zumindest zu dem Ergebnis kamen, dass Marktwirtschaft und Moral grundsätzlich kompatibel sind. Gibt es dafür konkrete Indizien?**

Es gibt sehr viele Beispiele. Großunternehmen geben Millionenbeträge aus, um bei Projekten Umweltschutzelange zu berücksichtigen, obwohl das gesetzlich ▶



nicht verlangt wäre. Ein Beispiel, das ich in meinen Vorlesungen immer gerne bringe, ist das Malampaya-Projekt auf den Philippinen, bei dem Shell im Jahr 2000 beim Bau einer Pipeline aus Rücksicht auf die Ökologie und Ansprüche der Ureinwohner dieser Region unter anderem höhere Kosten in zweistelliger Millionenhöhe in Kauf genommen hat, um zu zeigen, dass man seitens des Unternehmens diese moralischen Belange ernst nimmt.

**Doch wenn gute Taten für Mensch und Umwelt dem Image eines Unternehmens nützen, dann sind sie für viele auch wieder nicht moralisch. Wie ist das zu verstehen?**

Das halte ich für besonders problematisch. Das ist auch etwas, das gerade in Deutschland verbreitet ist. Den Unternehmen dann vorzuwerfen: Ihr macht das ja nur aus Gewinninteresse. Das ist eine Argumentationsstrategie, die nur vor einem bestimmten philosophischen Hintergrund verstanden werden kann. Nur wer eine bestimmte Interpretation von Kant vertritt, wird auf diese Begründung kommen. Wenn man Kant so versteht, dass er sagt: Moral darf nichts mit Neigung, mit Eigeninteresse zu tun haben. Wenn man mal genau hinschaut, sagt er das gar nicht so. Aus meiner Sicht sagt Kant nur, wir müssen unsere Präferenzen durch einen Filter laufen lassen. Dabei muss der andere miteinbezogen sein; und es muss einer Regel folgen. Dann aber ist die Handlung moralisch.

**Sie setzen gegen diese rein altruistische Vorstellung von Moral ein viel älteres, abendländisches, ethisches Konzept. Wieso passt das Ihrer Meinung nach besser?**

Das Gebot „Liebe deinen Nächsten wie dich selbst“ meint keine Liebe in dem Sinne der Altruisten. Das ist eine Moral, die ganz klar auf den Grundsatz der Reziprozität abzielt. Diese Gegenseitigkeit halte ich nach wie vor für den Kern aller Moral. Eine Moral, von der ich nie etwas zurückbekomme, von der ich nie etwas habe, das ist letztlich keine sinnvolle Moral. Sie muss auch den Trägern nützen, sonst geht sie unter. Und das ist die Herausforderung, unsere Marktwirtschaft so einzurichten, dass Moral auch denjenigen nützt, die nach ihren Grundsätzen handeln. Das ist dann die Frage, an der Wissenschaftler in der Ordnungsethik arbeiten: die Moral der Ordnung.

Auch John Rawls – manchen gilt er als der bedeutendste Moralphilosoph des 20. Jahrhunderts – hat einen wichtigen Satz gesagt: dass die Gesellschaft eine Veranstaltung zum gegenseitigen Vorteil ist. Und eigentlich ist das, was wir hier in der Wirtschaftsethik machen, auch nichts anderes. Darum geht es: Eine Sache, die zum gegenseitigen Vorteil aller ist, kann man nicht von irgendeiner anderen Warte heraus für unmoralisch erklären. Wenn alle Betroffenen einverstanden sind, dann ist auch der Moral Genüge getan.

**„Im gesamten System der Marktwirtschaft liegt etwas Moralisches. Indem der Markt etwas leistet, das uns allen nützt, vollbringt er eine ethische Leistung“**

Christoph Lütge

**Moralisches Handeln beruht danach also auf dem Prinzip des gegenseitigen Nutzens. Dass dabei auch Gerechtigkeit eine große Rolle spielt, zeigen die Resultate der Gemeinwohlspiele, mit denen Verhaltensforscher die Spielräume zwischen Kooperation und Egoismus ausloten. Wie wichtig sind solche Resultate für die Wirtschaftsethik?**

Es wird häufig versucht, daraus zu konstruieren, dass die Menschen viel moralischer sind, als die ökonomische Theorie annimmt. Die Frage ist, ob wir damit im Normalbetrieb der modernen Marktwirtschaft arbeiten können. Denn hier wird nur gezeigt, dass es so etwas gibt wie moralisches Empfinden, Gerechtigkeitsgefühl. Aber ob das stabil bleibt, wenn Menschen immer wieder erfahren, dass sie damit Nachteile erleiden, ist die große Frage. In diesen Spielen geht es immer um relativ kleine Beträge. Ich will nicht sagen, dass dies nichts wert ist, aber für die Wirtschaftsethik kommt es ganz wesentlich darauf an, was passiert, wenn man auch signifikant verlieren kann – wenn es um die unternehmerische Existenz geht. Verlässt man sich dann auf ein Gerechtigkeitsgefühl?

**Sie sagen, der wahre Egoist kooperiert und handelt damit moralisch, wenn die Rahmenbedingungen stimmen. Wie kommen Sie zu der These?**

Ja, wenn ich davon ausgehen kann, dass mir mein moralisches Handeln auf Dauer nicht selber schadet – im Einzelfall lassen wir das alles mal zu, aber auf Dauer müssen wir etwas davon haben. Hier ist das klassische Beispiel des Filters auf dem Schornstein. Der Unternehmer, der die Kosten auf sich nimmt, etwas für die Umwelt zu tun, geht gewissermaßen in eine moralische Vorleistung. Wenn es keine Regel gibt, dass die anderen mitmachen sollen, riskiert er, auf seinen Kosten sitzen zu bleiben, einen Nachteil im Wettbewerb zu erleiden und möglicherweise aus dem Spiel ausscheiden zu müssen.

**Moralisches Handeln soll aber nicht nur nicht schaden, sondern idealerweise auch nützen. Wie lässt sich denn daraus Kapital schlagen?**

Nun muss man sagen, heute in Zeiten der Corporate Social Responsibility lässt sich schon vieles über den

**Das Gefangenens- und Schmarotzerdilemma**

Das Gefangenendilemma gehört zu den Klassikern der Spieltheorie. Mit diesem Szenario lässt sich darstellen, wie die rationale Entscheidung eines Einzelnen zu einem gemeinschaftlich ungünstigeren Resultat führen kann. Es geht um zwei Personen, die im Vorfeld einer Gerichtsverhandlung zu einem Vergehen verurteilt werden, das sie gemeinsam begangen haben sollen. Ihnen wird ein Deal vorgeschlagen: Derjenige, der gesteht, bekommt eine geringere Strafe und sein vermeintlicher Komplize das Höchstmaß. Allerdings gilt dies nur für den Fall, dass nur einer gesteht – im Sinne der klassischen Kronzeugenregelung. Wenn beide schweigen, dann erhalten beide die gleiche Strafe, die höher liegt als das Strafmaß für den Kronzeugen, aber unterhalb der Höchststrafe.

Da die beiden getrennt verurteilt werden, wissen sie nicht, wie sich der andere entscheidet. Und da schnappt gern die Rationalitätsfalle zu. Rein rational betrachtet, kommt derjenige besser davon, der mit einem Geständnis seinem Komplizen die Höchststrafe anhängt, aber wenn dieser auch gesteht, liegt die Strafe für beide höher, als wenn beide geschwiegen hätten. Gewöhnlich „singen“ beide, weil jeder für sich die geringste Strafe herausholen möchte. Da er nicht sicher weiß, ob sein Komplize redet, ist er mit seinem Geständnis in jedem Fall auf der sicheren Seite, weil er die Höchststrafe vermeidet. Letztlich führt dieses Verhalten jedoch dazu, dass beide höher verurteilt werden als bei einer kollektiven Aussageverweigerung. Somit handelt es sich um eine Situation, in der die optimale individuelle Strategie zu einem schlechteren Resultat für beide führt.

Als Modelle für diesen moralischen Verfallsprozess gelten auch die sogenannten Gemeinwohlspiele. Auch sie kreieren eine Art Schmarotzerdilemma, bei dem die Partner Übervorteilung vermeiden, indem sie ihre Kooperationsbereitschaft aufgeben. Die Teilnehmer in diesen wissenschaftlichen Experimenten erhalten einen Geldbetrag, den sie wahlweise in eine Kollektivkasse investieren oder für sich behalten können. In der Bank verdoppelt sich der Betrag, wobei die Gewinnausschüttung an alle Teilnehmer erfolgt – auch an jene, die nicht eingezahlt haben. Grundsätzlich ist für alle der Gewinn am höchsten, wenn alle Teilnehmer einzahlen, doch eigentlich kassieren die Schmarotzer am meisten, die nichts einzahlen und dafür auch noch an der Ausschüttung beteiligt sind. In Versuchen zeigte sich, dass Spieler anfangs noch die Hälfte ihres Vermögens einzahlten, später allerdings sukzessive damit aufhörten, wenn sie merkten, dass Schmarotzer im Spiel sind.

Wenn allerdings neue Regeln eingeführt wurden und die Schmarotzer abgestraft werden konnten, bestand die Kooperations- und Investitionsbereitschaft weiter. Dabei zeigten sich die Teamspieler sogar bereit, Teile ihres eigenen Gewinns auszugeben, um die Schmarotzer zu bestrafen. Bei Versuchen des österreichischen Forschers Ernst Fehr durften sie nach jeder Runde einen Franken zahlen, um drei Franken Bußgeld an die Trittbrettfahrer zu verhängen.

Markt zum Vorteil des Unternehmens ummünzen. Heute können Unternehmen Moral zu ihrem Vorteil werden lassen, mehr als vor 20 Jahren. Auch ist Nachhaltigkeit ein großes Thema geworden. Die Unternehmen kommen aus ökonomischen Gründen nicht mehr daran vorbei. Gerade die Frage Ökonomie und Ökologie, die in den 80er-, 90er-Jahren als großer Gegensatz aufgemacht ▶

## **„Ich glaube, dass darin auch der Sinn meiner Tätigkeit als Wirtschaftsethiker liegt, zu zeigen, wie profitabel Moral sein kann“**

Christoph Lütge

wurde, ist eigentlich heutzutage kein wesentliches Problem mehr. Das haben wir geschafft, den Umweltschutz in den Prozess der Ökonomie einzubinden und zu etwas Produktivem werden zu lassen. Ich glaube, darin liegt der Sinn meiner Tätigkeit als Wirtschaftsethiker, zu zeigen, wie profitabel Moral sein kann. Sich moralischen Anforderungen nicht nur nicht zu widersetzen oder sie passiv anzugehen, sondern sie aktiv und bewusst als Produktionsfaktor einzusetzen. Und da sind wir wieder bei Kant, wenn man ihn so versteht: Nur wenn die das wirklich wollen, dann ist es gut – also mir reicht es, wenn die Unternehmen das tun, aus was für Gründen auch immer. Da unterscheide ich mich vielleicht von anderen Ethikern: Hauptsache ist, was am Ende für die Umwelt oder nachkommende Generationen herauskommt.

**Sie vermissen in der aktuellen Diskussion die Differenzierung. „Man kann nicht über Moral sprechen, ohne die Rahmenbedingungen zu berücksichtigen“, haben Sie unlängst in einem Artikel geschrieben. Wieso ist der gesellschaftliche Hintergrund so wichtig?**

Auch hier unterscheide ich mich, glaube ich, von anderen Ethikern, die doch tendenziell der Meinung sind, Moral ist ein autonomes System, das ohne die sozialen, politischen oder ökonomischen Rahmenbedingungen funktioniert. Es geht ja auch darum, wie Moral in der Gesellschaft umgesetzt wird. Für mich als Wirtschaftsethiker ist die wesentliche Frage: Wie können wir das im Normalbetrieb einer Marktwirtschaft umsetzen? Und dann stellt man wie Adam Smith fest: Es ist doch schon eine ganze Menge Moral in einer Marktwirtschaft vorhanden. Wenn wir mal eine historische Perspektive einnehmen, merken wir, dass die größten moralischen Fortschritte durch das Wirtschaftswachstum ermöglicht worden sind. Man kann sehr schön an Statistiken zeigen, wie dieser enorme Aufschwung in den letzten 200 Jahren doch nicht nur ein ökonomisches Phänomen gewesen ist, sondern gewaltige ethische Fortschritte mit sich gebracht hat. Entwicklungen, wie eine deutliche Reduzierung der Kindersterblichkeit, hängen vor allem damit zusammen, dass die Leute mehr Geld haben und sich Medizin und Gesundheit und alles, was damit zusammenhängt, leisten können. Und jetzt kann

man sagen: Dafür haben wir auch Regeln entworfen. Regeln, die für mich als Ordnungsethiker im Wesentlichen Träger der Moral sind. Eine Marktwirtschaft allein kann sich verselbständigen und unmoralisch werden – Stichwort Vermachtung. Es können sich Monopole bilden, es können sich Kartelle bilden und alles Mögliche andere an unerwünschten Ereignissen. Dagegen haben wir die Regeln. Was die optimalen Regeln sind, mussten wir erst herausfinden. Wir sind im Moment dabei, für die globalisierte Welt die Regeln zu entwerfen, und es sind einige deutliche Veränderungen und Verbesserungen gegenüber der Zeit vor der Globalisierung festzustellen.

### **Zum Beispiel?**

Nehmen wir doch die Vorgänge in der arabischen Welt. Alles was dort passiert, wäre in der Zeit vor der Globalisierung so nicht möglich gewesen. Durch den Abbau von Kommunikationsschranken, aber auch durch wirtschaftliche Verbesserungen in diesen Ländern. In den sehr armen Ländern erleben wir nämlich nicht diese Umwälzungen, sondern erst, wenn es den Leuten ein bisschen besser geht.

### **Welche Rolle spielt dabei der Wettbewerb?**

Der Wettbewerb ist eigentlich das Herzstück der Marktwirtschaft. Er bringt wichtige ethische Leistungen. Zum Beispiel, indem er dafür sorgt, dass sich Problemlösungen schnell verteilen. Außerdem bewirkt er, dass Innovationen entstehen. Das ist übrigens etwas, das außerhalb der Ökonomik wenig wahrgenommen wird. Der Wettbewerb ist ein ganz entscheidender Mechanismus, aber er braucht Regeln: Wettbewerb, der ungeregelt ist, neigt dazu, unproduktiv zu werden. Wenn wir die ethischen Probleme der Marktwirtschaft lösen wollen – ob es um Managergehälter geht, Sozialversicherung oder Umweltskandale –, sollten wir daher eines nicht tun. Wir dürfen nicht rufen: weniger Wettbewerb. Sondern wir sollten versuchen, den Wettbewerb in die Richtung zu lenken, in die wir wollen.

### **Kann es dann überhaupt eine freie Marktwirtschaft geben?**

Ein Gedanke ist mir da sehr wichtig. Freiheit ist nicht nur Freiheit völlig ohne Zwang. Es können auch durch



Zwang Freiheiten entstehen. Das ist nicht nur der Kern der Marktwirtschaft, sondern der Demokratie überhaupt. Wenn man sich darauf versteift, Freiheit von jeglichen Zwängen in der Demokratie finden zu wollen, die finden Sie nicht. Sie finden eine bürgerliche Freiheit, die aber durchaus größer sein kann als die Freiheit eines Aussteigers, weil Sie viel mehr Optionen haben.

**Damit stehen Sie aber konträr zu der gängigen Auffassung von Kritikern, die meinen, Kapitalismus oder das freie Spiel des Marktes ist nicht nur zutiefst unmoralisch, sondern auch höchst undemokratisch. Liberalismus versus Demokratie – auch dieser Gegensatz existiert Ihrer Meinung nach nicht. Wieso?**

So ist es häufig aufgemacht worden, auch von Sozialphilosophen und Demokratietheoretikern. Das sind immer diese unproduktiven Dualismen. Wenn man das Problem so aufmacht, dann ist man automatisch in der Falle – dann kann man immer nur sagen: ein bisschen mehr Freiheit, ein bisschen mehr Gleichheit. Wir müssen aber beides zusammen verwirklichen können. Es ist möglich, den Gedanken zu denken, dass Freiheit auch zunehmen kann, wenn ich woanders ein paar Dinge verbiete – indem ich z. B. Unternehmen verbiete, sich zulasten der Kunden zusammenzuschließen. Strom- und Gasmarkt sind da zwei der größten Themen im Mo-

ment. Da verbieten wir ja auch etwas und gleichzeitig entsteht mehr Freiheit für die Kunden: Sie haben mehr Wahlmöglichkeiten. Aber wir müssen den Liberalismus denken als einen, der sich mit dem Gedanken an demokratische Steuerung anfreunden kann, an Regeln für die Marktwirtschaft.

**Wie sieht für Sie eine zeitgemäße Kapitalismuskritik aus?**

Hier sehe ich einen interessanten Gedanken: zwischen Kapitalismus und Wettbewerb zu trennen. Wenn Akteure auf Märkten versuchen, den Wettbewerb zu unterdrücken, dann halte ich das für ethisch nicht vertretbar. Ein System von Kapitalismus, das letztlich nur zu einer Monopol- oder Oligopol-situation führt und den Wettbewerb behindert, muss verändert werden. Und zwar über die Regeln und Institutionen.

**Und die Moral von der Geschichte: Also ist Kapitalismus doch böse, nur anders?**

Nein: Böse und gut liegen nicht in den Sachen selbst, sondern in der Weise, wie wir sie gebrauchen. Jedes Werkzeug kann missbraucht werden. Wir müssen den Kapitalismus nicht zähmen, wohl aber sein ethisches Potenzial in wechselseitig erwünschte und vorteilhafte Bahnen lenken. Dann leistet der Wettbewerb das, was er soll.

*Das Interview führte Birgit Fenzel*



## Herbert Henzler

### Forschung tut not!

In Erinnerung an den Ausspruch aus dem späten Mittelalter „Seefahrt tut not“ – wer zur See fuhr, trieb mehr Handel und wurde dadurch wohlhabender – möchte ich ein Petitum für eine größere Bedeutung der Forschung und Entwicklung abgeben und einige konkrete Vorschläge machen.

Mit ca. 2,5 Prozent vom Bruttosozialprodukt sind unsere Ausgaben für Forschung und Entwicklung (F+E) auch im internationalen Vergleich ordentlich – trotzdem müssten sie erheblich gesteigert werden. Ziel müsste ein Rahmen von 3,5 bis 4 Prozent sein. Dazu gehört eine weit stärkere „F+E-Mindedness“, als wir bisher haben. Die Öffentlichkeit muss vom Wirken der Forschung und Entwicklung überzeugt werden – sei es durch verstärkte Kommunikation (warum nicht unsere großen Forschungspersönlichkeiten im Fernsehen und in der Presse profilieren?) und durch glaubwürdige Rollenmodelle: Entwickler, die mit der Umsetzung ihrer Ideen Erfolg hatten (siehe die Einschaltquote beim jüngsten Fernsehfilm über Carl Benz).

Wir sollten dabei durchaus die Langfristigkeit der Forschungsbemühungen im Auge haben. Wir sind heute bei erneuerbaren Technologien Weltspitze, weil wir vor 15 Jahren mit der Entwicklung angingen, und viele der Automobilentwicklungen wurden Weltstandards, weil wir in den 1980er-Jahren damit begonnen haben. Folgende konkrete Handlungsfelder möchte ich aufzeigen:

1. Die Internationalisierung unserer Hochschulen muss vorangetrieben werden. Wir brauchen nicht nur mehr ausländische Hochschullehrer (nur 2 Prozent gegenüber 15 bis 20 Prozent an den Spitzenunis in den USA), sondern insbesondere auch Forscher und Entwickler, die bei uns arbeiten. 50 Prozent aller US-Nobelpreisträger stammen aus dem Ausland.
2. Wir müssen alles daran setzen, um deutsche Wissenschaftler aus dem Ausland zurückzuholen. Dieses Rückholprogramm – besonders fokussiert auf die USA – sollte personenbezogen aufgelegt werden und die Netzwerke unter den Deutschen in den USA sollten zu Referenzzwecken genutzt werden.
3. Wir müssen großflächiger denken lernen. Statt länderbezogener Institutionen bei der Gentechnik und Biosystemtechnik sollten wir bei ausgewählten Forschungsthemen deutschlandweit denken. Eine School of Genetics – statt gegenwärtig derer drei (Heidelberg, Berlin, München).

4. Wir müssen in Brüssel (und in Berlin) bei der Mittelvergabe und bei der Programmmentstehung präsenter sein. Österreich und Baden-Württemberg holen relativ mehr EU-Forschungsgelder als Bayern. Dazu bedarf es einer Bündelung der Kräfte.

5. Wir müssen die Kommerzialisierung von Forschungsergebnissen stärken – es dauert einfach noch zu lange, bis F+E-Ergebnisse in die Praxis finden.

Ich habe als Vorsitzender des Beirats der Bayerischen Forschungstiftung und des Bayerischen Innovationspreises immer wieder erlebt, dass die Umsetzung guter Entwicklungsideen sehr lange dauert und dass bei vielen kleinen Eigentümerunternehmen eine Beschäftigungsschwelle von 20 bis 25 Mitarbeitern nicht überschritten wird.

Es muss ein zentrales Anliegen der Forschungspolitik sein, zu verhindern, dass nach der Fertigung auch Forschung und Entwicklung ins Ausland abwandern. In den Forschungslabors von heute entstehen die Arbeitsplätze von morgen! □

### Prof. Dr. Herbert Henzler

Herbert Henzler absolvierte zunächst eine kaufmännische Lehre bei der Deutschen Shell AG in Stuttgart. Nach seinem Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Höheren Wirtschaftsfachschule in Siegen und danach an den Universitäten Saarbrücken und München und einem Postgraduate Studium an der University of California, Berkeley, promovierte er an der Ludwig-Maximilians-Universität in München.

Ab 1970 arbeitete Herbert Henzler bei McKinsey & Company, Inc., wo er 1983 in das Shareholders Committee gewählt wurde. Seit Januar 2002 gehört er dem McKinsey Advisory Board an. Darüber hinaus ist Herbert Henzler Chairman des Strategic German Advisory Boards der Credit Suisse sowie Senior Advisor to the Chairman der Credit Suisse Group.

Seit 1986 ist er Lehrbeauftragter an der Ludwig-Maximilians-Universität und seit 1992 Honorarprofessor der Fakultät für Betriebswirtschaft. Von 2004 bis 2009 war Herbert Henzler Vorsitzender des Wissenschaftlich-Technischen Beirats (WTB) der Bayerischen Staatsregierung. Seit 2010 ist er Vorsitzender des neu gegründeten Zukunftsrats der Bayerischen Staatsregierung.



---

## EIN ENERGY-DRINK FÜR TRIEBWERKE?

---

Ein Biotreibstoff auf Algenbasis zeichnet sich durch einen höheren Energiegehalt aus und reduziert den Kraftstoffverbrauch. EADS konnte das mit dem weltweit ersten Flugzeug demonstrieren, das diesen neuen Treibstoff im Flug verwendete. Lernen Sie unsere Ideen kennen und teilen Sie uns Ihre mit unter [eads.com/thinkbank](http://eads.com/thinkbank)

# Mein Job hat was. Zukunft.



Dimitri  
Meluaping  
Feyou ist  
Teil unseres  
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!

Sie suchen den Austausch,  
Tipps zur Bewerbung und  
alles rund um das Thema  
Karriere?  
Dann besuchen Sie uns auf

 [facebook.com/  
bmwkarriere](https://www.facebook.com/bmwkarriere)

Sie suchen eine spannende Herausforderung? Detaillierte Informationen,  
aktuelle Stellenangebote zu Themen wie Elektromobilität, CFK, Software-  
entwicklung und Business IT sowie die Möglichkeit zur Online-Bewerbung  
finden Sie auf **[www.bmwgroup.jobs](http://www.bmwgroup.jobs)**.

**BMW Group**

