

Das Wissenschaftsmagazin

Ausgabe 1 | September 2007

Technische Universität München

TUM

Faszination Forschung

Hightech- Spinnerei

Fäden hart wie Stahl,
weich wie Gummi

Protein-Design

Chancen für die Medizin

Kognitive Systeme

Denn Sie wissen, was sie tun

Unternehmen Baum · Zukunftscomputer · Ursprung der Welt

GE Global Research



At GE, the future is you.



General Electric, ein globales Unternehmen mit Präsenz in über hundert Ländern, ist ein diversifizierter Konzern mit einem klaren Fokus: großen Ideenreichtum in greifbare Konzepte und Produkte zu verwandeln.

GE Global Research ist das Technologie- und Innovationszentrum von GE – und so vielseitig wie keine andere industrielle Forschungseinrichtung der Welt. Forscher engagieren sich hier in der Entwicklung bahnbrechender Innovationen für die GE-Geschäftsbereiche. Das Spektrum reicht von Medizintechnik und Biotechnologie über Materialforschung bis zu Sicherheitstechnik, Energiesystemen und Flugtriebwerken. Der europäische Zweig von GE Global Research in München hat sich auf die Gebiete Energietechnik, Sensorik, Faserverbundwerkstoffe und medizinische Diagnostik spezialisiert. Mehr Informationen über unser Forschungszentrum finden Sie online unter: www.ge.com/researcheurope.

GE Global Research Europe freut sich auf Bewerbungen von Kandidaten (m/w) mit Promotion, Diplom oder Masterabschluss. Auf dem Gebiet der Energietechnik rekrutieren wir vor allem in den Bereichen Verdichtertechnologie, Aeroakustik sowie Wärme- und Stofftransport. In der Medizintechnik sprechen wir gezielt Kandidaten für die Bereiche Magnetresonanz-Bildgebung und -Spektroskopie in vivo sowie in vitro an.

Alle vakanten Positionen bei GE finden Sie unter: www.gecareers.com.
Bitte bewerben Sie sich ausschließlich online.



imagination at work



An Equal Opportunity Employer

Liebe Leserinnen und Leser,

TUM-Forschung fasziniert

„Wissenschaftler dringen in unkartiertes Neuland vor und legen neue Wege der Erkenntnis an. Die Faszination der Forschung treibt sie zu Spitzenleistungen an. Die Technische Universität München lädt alle Menschen ein, in das Abenteuer des Fortschritts einzutauchen.“



Es ist die Faszination am wissenschaftlichen Fortschritt, aus der sich in hohem Maße die Leistungsbilanz unserer Universität erklärt. In unkartiertes Neuland vorzudringen, neue Wege der Erkenntnis anzulegen – daraus nährt sich die forschende Faszination. Nun begleitet uns Forscher neben der Faszination auch die Präzision. Das macht bei wissenschaftlich komplexen Sachverhalten die allgemeinverständliche Beschreibung oft schwer. Umso mehr ist die professionelle Kommunikation gefragt. Es ist in unserem ureigenen Interesse, dass das Publikum unsere Forschungsansätze und -ergebnisse versteht. Dieser Durchblick ist die Voraussetzung dafür, dass wir die Menschen in das Abenteuer des Fortschritts mitnehmen. Die Sprachfähigkeit der Wissenschaft ist ebenso wichtig wie die Wissenschaft selbst.

Deshalb gibt die Technische Universität München das Wissenschaftsmagazin Faszination Forschung heraus. Es erscheint im Halbjahresturnus. Der Zeitpunkt für die vorliegende erste Ausgabe markiert die Exzellenzinitiative, in der wir mit etlichen Forschungsclustern, der TUM Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) und dem Zukunftskonzept „TUM. The Entrepreneurial University“ erfolgreich waren. Mit Faszination Forschung gewinnen Sie Einblicke in die wissenschaftliche Welt unserer Universität. Sie lernen unsere besten Forscher kennen, sie erleben, welche Leidenschaft der Wissenschaft gewidmet ist. Sie erfahren, was unsere Spitzenforscher inspiriert und welchen Herausforderungen sie sich stellen. Faszination Forschung richtet sich an alle Menschen mit Interesse an Wissenschaft und Technik, an Studierende und Alumni ebenso wie an Bürger, Wissenschaftler, Politiker und Unternehmer.

Aus dem vielfältigen Themenspektrum der Technischen Universität München präsentieren wir Ihnen eine Auswahl, die auch für die große Bandbreite unserer Wissenschaft spricht. Lässt sich einem Roboter gesunder Menschenverstand beibringen? Was haben ein Hochhaus und ein menschlicher Hüftknochen gemeinsam? Sprechen Bäume mit ihrer Umwelt? Wie sieht der Computer der Zukunft aus? Diese und viele weitere Fragen beantwortet Faszination Forschung.

Freilich werden Sie in der vorliegenden Erstausgabe viele laufende TUM-Projekte der Spitzenforschung vermissen. Eine qualitätsvolle Auswahl ist stets die Qual des Herausgebers, angesichts der Größe und der Exzellenz unserer Universität ganz besonders. Freuen Sie sich schon heute auf die nachfolgenden Ausgaben!

Viel Vergnügen und Faszination beim Lesen wünscht Ihnen
Ihr

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

Seite 6

Auf der Suche nach dem Ursprung der Welt

Foto: Max-Planck-Institut für Astrophysik

Seite 19

Bildgebende Verfahren: Blicke in den Körper

Foto: TUM

Seite 46

Protein-Design Chancen für die Medizin

Foto: Rainer Lehmann

Seite 24

Ein Schweizer Messer der Forschung

Foto: TUM

Zwischen Garching und Genf grübeln TUM-Forscher darüber, was am Anfang aller Zeiten wirklich geschah

Die **Forschungsneutronenquelle**: Heinz Maier-Leibnitz schreibt in Garching eine Erfolgsgeschichte

Titelgeschichten

Auf der Suche nach dem Ursprung der Welt Die Physiker der TUM erforschen die Materie	6
Die Hightech-Spinnerei Ein TUM-Forscher baut die Natur nach	38
Protein-Design Wie man maßgeschneidert Krankheiten bekämpft	46
Unternehmen Baum Welche Strategien Pflanzen verfolgen	56
Parallel geht's schnell Wie die Computer der Zukunft funktionieren	66
Wie Maschinen lernen Roboter decken den Kaffeetisch	71

Forschung und Technik

Die Heuschrecken-Dompteure Wie gefährlich sind private Finanzinvestoren?	16
Der gläserne Patient Bildgebende Verfahren helfen Kranken	19
Ein Schweizer Messer der Forschung Was Wissenschaftler am FRM II begeistert	24
Ährenrettung Neuer Weizen soll dem Klimawandel trotzen	32
Schlüssel für das 21. Jahrhundert Die Chancen der weißen Biotechnologie	45
Auf zu neuen Höhen TUM-Kooperation auf der Zugspitze	51

Seite 56

Unternehmen Baum

Foto: TUM

In dieser Ausgabe

Seite 38

Die Hightech-Spinnerei

Foto: Thorsten Naeser

Seite 71

Maschinen machen Zukunft

Foto: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Intelligente Roboter? Durch kognitive Fähigkeiten werden technische Systeme leistungsfähiger

Seite 32

Ährenrettung

Foto: Thorsten Naeser

Die Sorge um unser täglich Brot treibt Antje Kunert und Michael Schmolke zu ihren Forschungen an

Vom Hochhaus zum Hüftgelenk
Bauinformatiker helfen Medizinern. 52

Moore können Klima schützen
Was Forscher am Sumpf interessiert 70

Rubriken

Editorial
Was macht eine exzellente Universität aus? 3

Autoren 75

Impressum 75

Standpunkt: Rita Süsmuth
Forschung kann Menschen bilden. 76

Weise Worte der Wissenschaft

Max Planck (1858-1947)

Die Endlosigkeit des wissenschaftlichen Ringens sorgt unablässig dafür, dass dem forschenden Menschegeist seine beiden edelsten Antriebe erhalten bleiben und immer wieder von neuem angefaht werden: die Begeisterung und die Ehrfurcht.

Benjamin Franklin (1706-90),

Eine Investition in Wissen bringt immer noch die besten Zinsen.

Isaac Newton (1643-1727)

In der Wissenschaft gleichen wir alle nur den Kindern, die am Rande des Wissens hie und da einen Kiesel aufheben, während sich der weite Ozean des Unbekannten vor unseren Augen erstreckt.

**Teilnehmende Institutionen
und ihre Abkürzungen:**

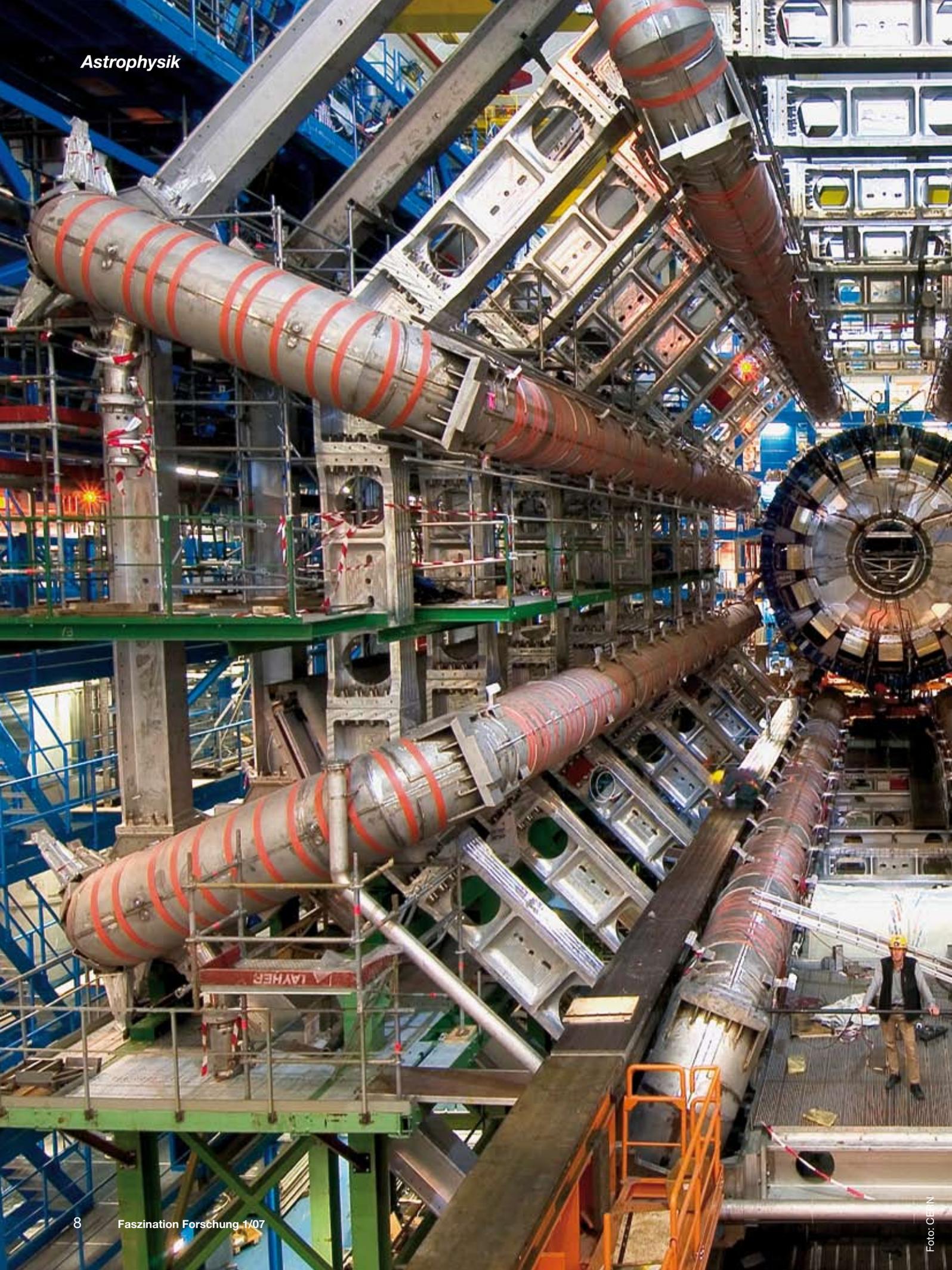
Technische Universität München	TUM
Ludwig-Maximilians-Universität	LMU
Max-Planck-Institut für Astrophysik	MPA
Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik	MPE
Max-Planck-Institut für Physik	MPP
European Southern Observatory	ESO

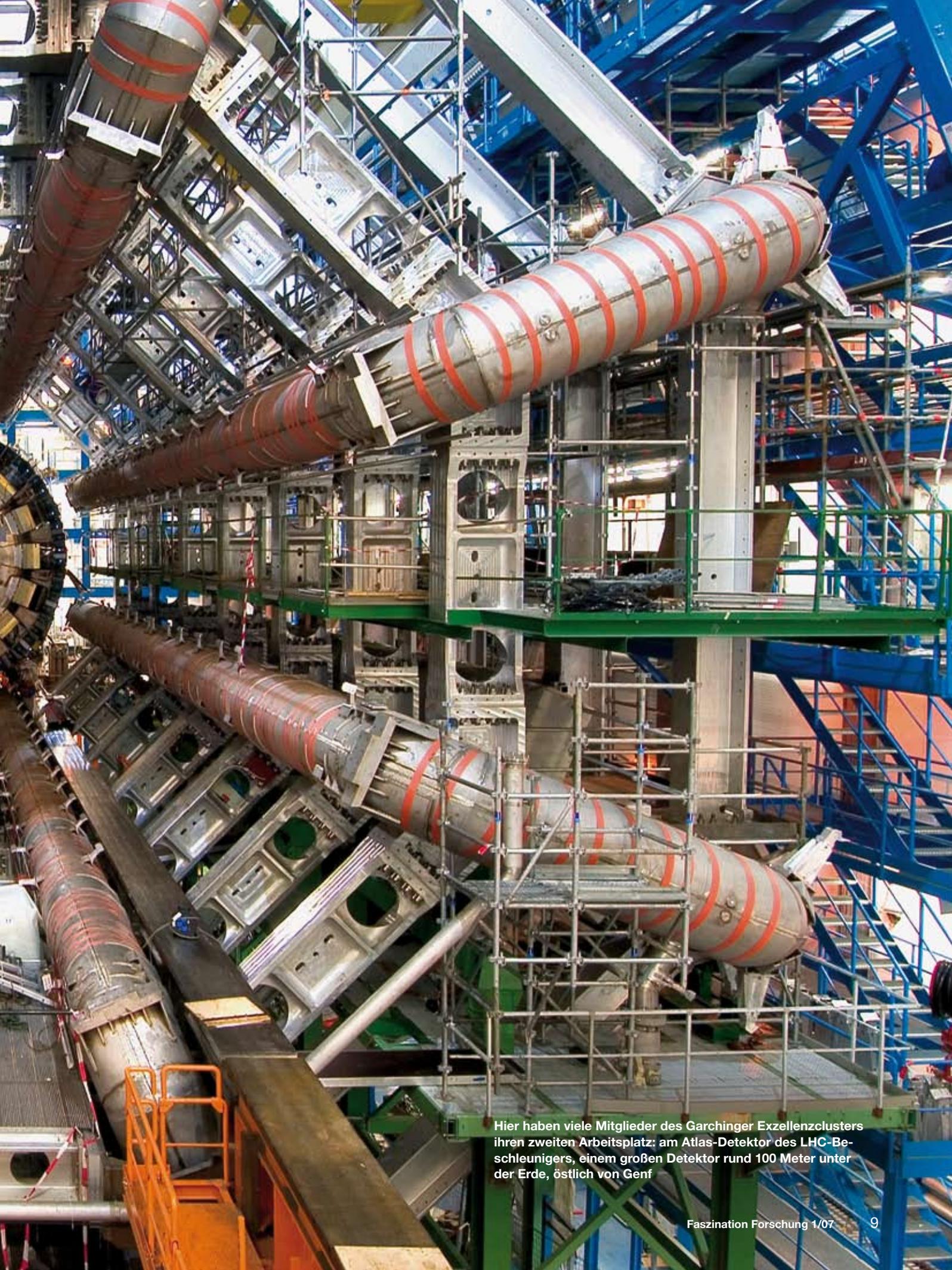
Links

www.universe-cluster.de
www.mpa-garching.mpg.de
www.atlasexperiment.org

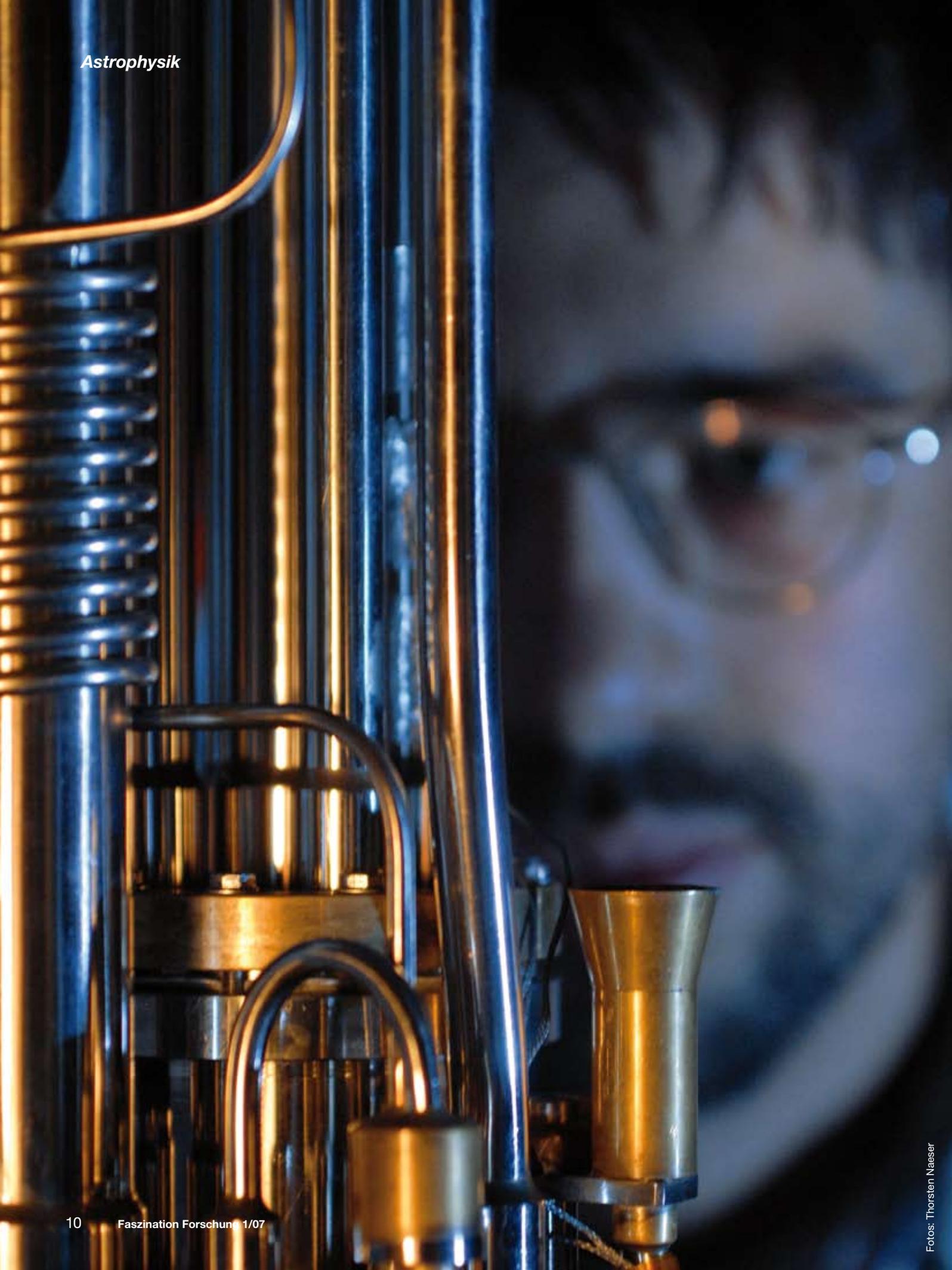


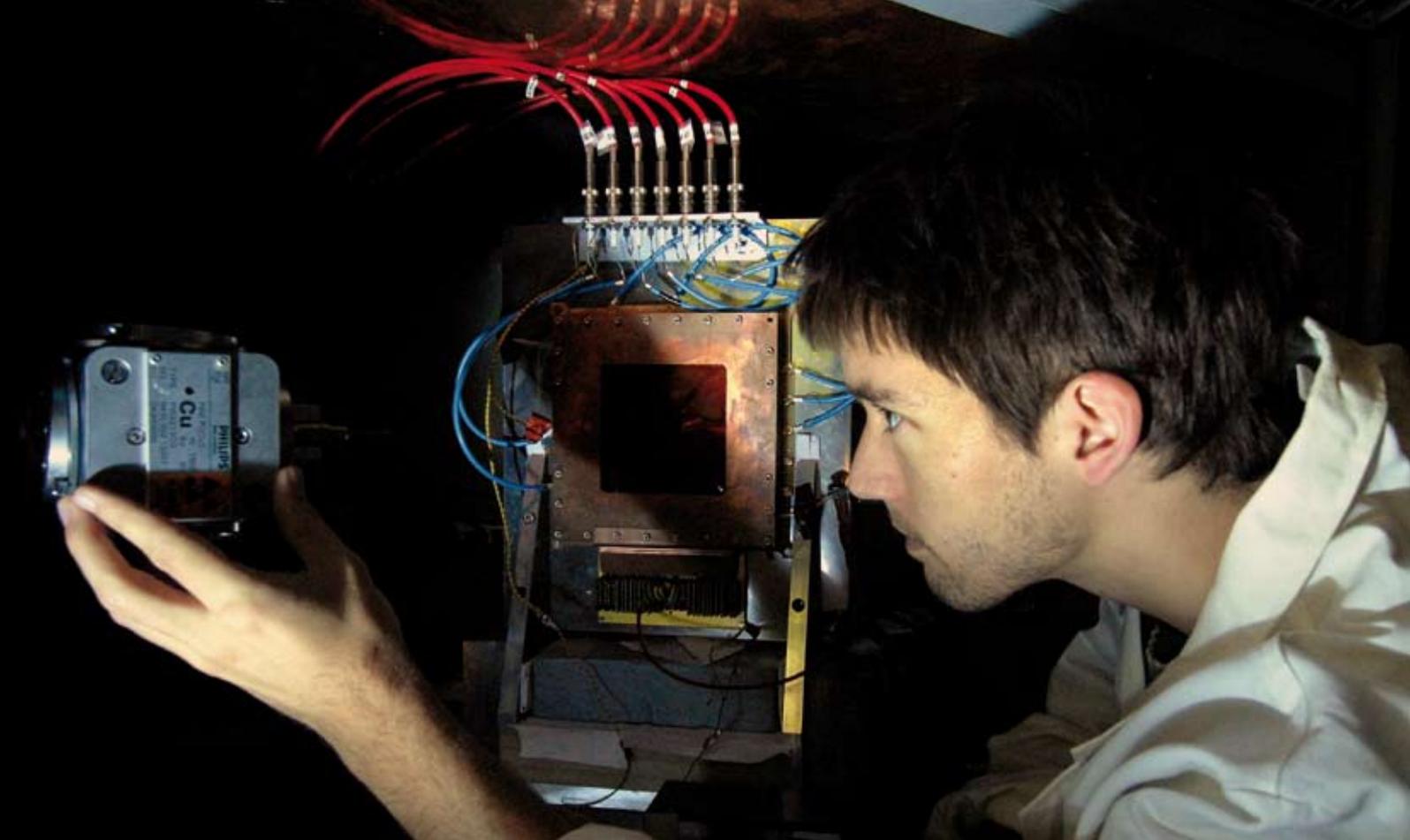
Zwischen Genf und Garching:
Auf der Suche nach dem
Ursprung der Welt





Hier haben viele Mitglieder des Garchinger Exzellenzclusters ihren zweiten Arbeitsplatz: am Atlas-Detektor des LHC-Beschleunigers, einem großen Detektor rund 100 Meter unter der Erde, östlich von Genf





Der LHC-Beschleuniger am CERN soll das Verständnis des frühen Universums verbessern. Deshalb arbeiten auch die TUM-Forscher

Quirin Weitzel (oben) und Sebastian Pfister (links) intensiv an den Vorbereitungen für den Atlas-Detektor

Teilchenforscher, Astronomen und Kosmologen ergänzen sich ideal. Sie alle sind auf der Suche nach den letzten Geheimnissen der Welt: Wo kommt sie her und was hält sie zusammen? Rund um die TU München entsteht nun ein Zentrum für derartige Fragen

Die Liste ist ganz beiläufig im Anhang des Proposals versteckt, aber sie liest sich wie ein Who's who der besten Physiker-Köpfe: „25 Qualifikationsnachweise von Wissenschaftlern in diesem Cluster“, heißt sie bescheiden. Hier sind Leibniz-Preisträger, Träger des Max-Planck-Forschungspreises, der Stern-Gerlach-Medaille und anderer herausragender Auszeichnungen unter sich, dazu die Sprecher, Gründer oder Direktoren wichtiger internationaler Kollaborationen. Was sie alle gemeinsam haben, ist ihr Standort: München und Garching sind seit vergangenem Herbst die Heimat des Exzellenzclusters „Ursprung und Struktur des Universums“. Hier werden Astrophysiker, Kern- und Teilchenphysiker gemeinsam einigen der größten Fragen nachgehen, die der Mensch überhaupt stellen kann: Wie ist unsere Welt entstanden und wie hat sie ihre heutige Form erhalten?

Dass der bayerische Forschungsstandort traditionell viele große Physiker angezogen hat und immer noch anzieht, ist bekannt; weltberühmte Namen wie Som- ▶

Die 7 Fragen, die der Cluster bearbeiten will	
1	Wie verhält sich Materie bei extrem hohen Energien und auf kleinstem Raum?
2	Gibt es Symmetrie zwischen Materie und Kräften?
3	Wo liegt der Ursprung für die Masse der Teilchen und was ist der Grund für ihre Hierarchie?
4	Was sind kosmische Phasenübergänge und wie kommt die Materie ins Universum?
5	Was sind die dunklen Anteile des Universums?
6	Wie entstanden Schwarze Löcher, und wie haben sie sich entwickelt?
7	Wie wurde das Universum mit schweren Elementen angereichert?



Grafik: CERN, Bearbeitung: edlundsepp

Je weiter man ins Weltall hinausblickt, desto größer werden die Rätsel. Um diese Rätsel zu lösen, gehen die TUM-Wissenschaftler unter die Erde: in die unterirdische Anlage des Atlas-Detektors des LHC-Beschleunigers

merfeld, Gerlach, Heisenberg oder Mößbauer sprechen dafür. Aber das Potenzial dieser dichten Versammlung von Experten der aktuellen Teilchen- und Astrophysik haben die Beteiligten im Grunde erst jetzt entdeckt. Jeder der Forscher arbeitete zwar bisher erfolgreich in seinem ganz persönlichen Umfeld und hielt natürlich Kontakt zur internationalen Community, aber „von den jeweils anderen haben wir nicht übermäßig Notiz genommen“, erzählt TUM-Ordinarius Stephan Paul, der Mann, der den Exzellenzcluster erst auf den Weg brachte und heute sein Sprecher ist. „Als die Deutsche Forschungsgemeinschaft 2006 zur Bewerbung aufrief, haben wir uns in der Fakultät zusammengesetzt und überlegt, wo wir weltweit führend sind.“

Spezialität: die Frage nach den ersten Dingen

Und siehe da: Schnell fanden die Professoren heraus, dass sich in und um München eine Ansammlung von hoch angesehenen Spezialisten für kosmologische Fragen angesiedelt hatte, die in Europa einzigartig ist. Da gibt es Astronomen, die den Blick ins Weltall richten und aus den Eigenschaften der Sterne Rückschlüsse auf die Vergangenheit ziehen; Teilchenforscher, die in großen Beschleunigern Verhältnisse wie kurz nach dem Urknall erzeugen und beobachten, wie sich Materie und Kräfte dort verhalten; Kosmologen, die in gewaltigen Computersimulationen die Vorgänge in und zwischen den Sternen nachstellen und Theoretiker, die mit Hilfe

komplizierter Gedankengebäude den Grundregeln der Welt auf die Spur kommen wollen.

Die Forscher finden im Cluster zusammen

Sie zusammenzuführen, entspricht einem Trend, der sich seit einigen Jahren in der Grundlagenforschung abzeichnet: Auf den ersten Blick weit voneinander entfernte Fachgebiete wie Teilchen-, Kern-, Astrophysik und Kosmologie finden nun den Weg zueinander. Beschäftigen sie sich doch mit Fragen, die jede für sich einen wichtigen Baustein für ein geschlossenes physikalisches Weltbild darstellt. Grundlage dafür ist die Tatsache, dass die Themengebiete in ihrem theoretischen Gefüge sehr eng zusammenhängen. So ermöglichten erst die Erkenntnisse aus der Teilchenphysik das heutige Verständnis des frühen Universums, andererseits bringt die Astrophysik neue Einsichten für die Teilchenphysik gerade dort, wo die irdischen Beschleuniger an ihre Grenzen stoßen.

Die Annäherung ist bisher noch ganz vorsichtig, aber mit dem Exzellenzcluster soll in München nun ein weltweit angesehenes Zentrum für derart interdisziplinäre Forschung entstehen. „Ähnliche Bestrebungen gibt es bisher in Berkeley und Chicago“, weiß Andreas Burkert, Lehrstuhlinhaber für Astronomie an der LMU und stellvertretender Koordinator des Clusters. „Wir wollen München zu einem Thinktank machen, den jeder ein-

Forschungsgeschichte der Astrophysik – einige Meilensteine

1054 v. Chr.	Chinesische Astronomen beobachten eine Supernova im Krebsnebel.
1543 n. Chr.	Nikolaus Kopernikus veröffentlicht sein Werk <i>De Revolutionibus Orbium Coelestium</i> , in dem er die mathematischen Grundlagen für ein heliozentrisches Weltbild legt.
1609	Galileo Galilei benutzt zum ersten Mal ein Teleskop zur Beobachtung des Himmels. Er entdeckt damit vier Jupitermonde, viele Mondkrater sowie die Milchstraße.
1609-19	Johannes Kepler veröffentlicht die drei Kepler'schen Gesetze.
1632	Galileo Galilei veröffentlicht seine Arbeit über die Gezeiten, welche davon ausgeht, dass die Erde um die Sonne kreist.
1633	Galileo Galilei wird von der katholischen Kirche zum Widerruf seiner Theorien gezwungen.
1687	Isaac Newton veröffentlicht sein Werk <i>Philosophiae Naturalis Principia Mathematica</i> , das sich mit der Natur der Gravitation auseinandersetzt und einen Wendepunkt in der Naturphilosophie darstellt.
1842	Entdeckung des Dopplereffekts. Damit wird nun die Bestimmung der Geschwindigkeit von Sternen möglich.
1860-63	Beginn der Spektralanalyse von Sternenlicht
1940	Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung
1972	Vermutliche Entdeckung eines Schwarzen Loches im Sternbild des Schwans
1990	Das Spaceshuttle Discovery bringt das Weltraumteleskop Hubble in eine Umlaufbahn, das unvergleichliche Bilder von fernen Himmelsregionen zur Erde sendet.
1992	Der Vatikan gibt zu, dass er sich bei der Verurteilung Galileis geirrt hat.

schlägige Forscher auf der Welt kennt.“ Eine Liste der Kollegen, die man zu Forschungsaufenthalten einladen will, ist jedenfalls schon vorhanden.

Masse, Raum, Zeit – und keine weichen Knie

Eigentlich hätte Stephan Paul von Anfang an weiche Knie haben müssen, denn anspruchsvollere Fragen als in diesem Exzellenzcluster kann man wohl kaum mehr formulieren: Woraus bestehen Masse, Raum und Zeit? Wie entstanden die Kräfte? Und welche Struktur hat unser Universum überhaupt? Aber die positive Resonanz bei seinen Kollegen bestärkte ihn: „Wir stellten bei unseren Gesprächen in den ersten Wochen fest, dass jeder von einer engen Zusammenarbeit seinen Nutzen haben würde. Die einen, weil sie neue Forschungsprojekte erhalten, andere, weil ihr Nachwuchs intensiv gefördert wird, und wieder andere, weil sie zusätzliche Doktoranden einstellen können.“ So schweißte Paul innerhalb kurzer Zeit ein Expertenteam zusammen, das sich mit Engagement an der Bewerbung um den Exzellenzcluster beteiligte.

Mitte Oktober 2006 war es dann so weit: Das Auswahlkomitee hatte den ehrgeizigen Münchner Vorschlag angenommen, der Exzellenzcluster war genehmigt. „Die Gutachter haben uns damit eine internationale Spitzenstellung bescheinigt“, so TUM-Präsident Wolfgang A. Herrmann zur Entscheidung des gemeinsamen

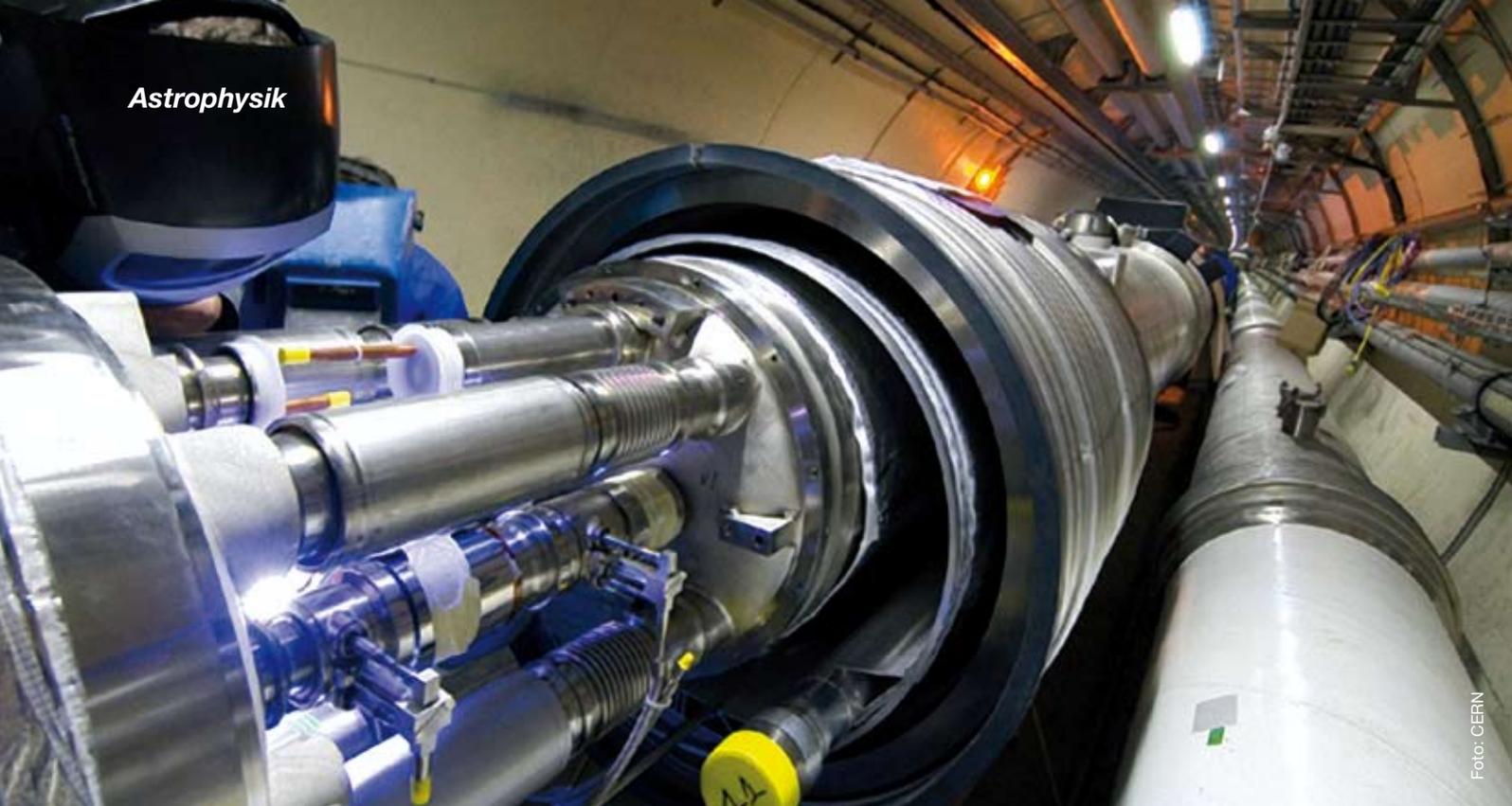
Bewilligungsausschusses der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des Wissenschaftsrats. Fünf Jahre lang läuft nun das Projekt, zehn neue Arbeitsgruppen werden installiert und rund 40 Millionen Euro steckt das Forschungsministerium in den Cluster. Etwa 60 neue Stellen für wissenschaftliche Mitarbeiter sollen im Laufe des Projektes entstehen.

„Wir wollen nicht bereits bestehende, meist internationale Projekte stärker fördern“, so Stephan Paul, „sondern das Geld für lokale Investitionen verwenden.“

So wird beispielsweise die LMU ihre Sternwarte auf dem Wendelstein modernisieren. Zum Teleskop, das kürzlich angeschafft wurde, erhalten die Forscher dort moderne Instrumente. „Damit wird es möglich, Teile des Himmels nach Ereignissen zu durchmustern, die Hinweise geben auf die Natur der dunklen Materie“, erklärt Andreas Burkert.

Dem Urknall auf der Spur

Dieser zählt zu den großen physikalischen Rätseln, die heute noch nicht einmal ansatzweise gelöst sind. Zwar haben es eine Vielzahl von Messungen mit erstaunlicher Genauigkeit in den letzten Jahren ermöglicht, dass man heute Aussagen über die Teilchenreaktionen machen kann, die kurz nach dem Urknall stattfanden, dass man die Masse entfernter Galaxien bestimmen, die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums ▶



Zurzeit laufen am CERN bei Genf die letzten Arbeiten zum Aufbau des LHC-Beschleunigers. Hier werden ab 2008 Protonen aufein-

ander geschossen, um Bedingungen zu schaffen, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben

Cocktailparty à la Higgs

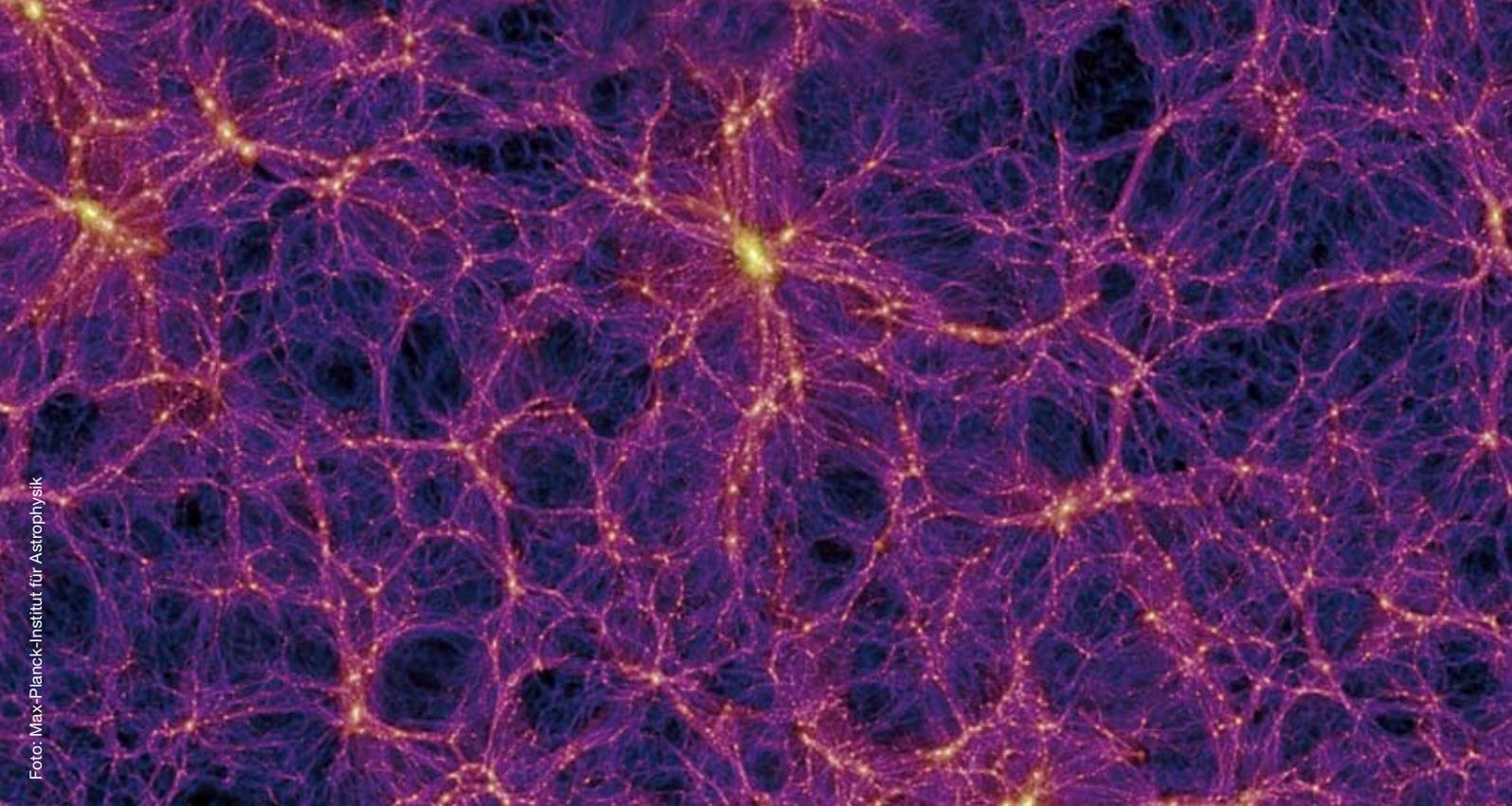
Der englische Forschungsminister William Waldegrave schrieb 1993 einen Wettbewerb aus: Er versprach demjenigen einen Preis, der es verstünde, auf einem einzigen DIN-A4-Blatt verständlich zu erklären, was das Higgs-Boson sei. Der Minister erhielt 125 Einsendungen, den ersten Preis (eine Flasche Champagner) vergab er an den Londoner Professor David Miller. Dessen Erklärung, kurz zusammengefasst: Stellen Sie sich eine Cocktailparty vor, bei der die Menschen gleichmäßig verteilt herumstehen und sich mit ihren jeweiligen Nachbarn unterhalten. Nun betritt die Ex-Premierministerin Thatcher den Raum. Während sie sich durch das Zimmer bewegt, zieht sie Leute an, die auf sie zukommen und danach wieder zu ihren ursprünglichen Gruppen zurückkehren. Durch die Zusammenballung von Menschen, die sich um sie herum bildet, hat sie eine größere Masse als normalerweise. Übertragen in drei Dimensionen entspricht dieses Phänomen dem Higgs-Mechanismus. Man stellt sich ein Feld vor, das lokal verändert wird, wenn ein Teilchen hindurchfliegt. Die Veränderung des Feldes ist das, was wir als Masse bezeichnen. Auf unserer Cocktailparty könnte man aber auch ohne Frau Thatcher eine Zusammenballung von Leuten erzeugen, die sich durch den Raum hindurch fortpflanzt, beispielsweise durch ein Gerücht, das von einem zum anderen Gast weitergegeben wird. Es würde ebensolche Menschengröppchen erzeugen, die sich danach wieder auflösen. So stellen sich die Physiker das Higgs-Teilchen selbst vor. Der Minister hat die Erklärung offenbar aufmerksam gelesen. Denn wenig später sagte er auf einer Pressekonferenz: „Das Higgs-Feld ist ein alles durchdringendes Feld, das andere Teilchen durchlaufen und dabei Masse gewinnen. Ich fange nun an, zu verstehen, warum dies wichtig ist.“

messen und die kleinen Schwankungen in der Intensität der kosmischen Hintergrundstrahlung registrieren kann. Aber sie haben auch neue Fragen aufgeworfen: So weiß man heute, dass der größte Teil der Masse des Universums nicht aus Sternen besteht, sondern dunkel ist und sich nur durch seine Gravitationswirkung offenbart.

Wahrscheinlich bestehen nur etwa vier Prozent der gesamten Masse aus „normaler“ Materie, aus der auch wir sind. Der Rest setzt sich möglicherweise aus exotischen Elementarteilchen zusammen, die noch aus den allerersten Sekunden nach dem Urknall stammen. Eine Zeitlang glaubte man, in den Neutrinos die fehlende Masse gefunden zu haben, aber inzwischen weiß man, dass sie nur „eine Prise Salz“ im kosmischen Gefüge sein können, maximal ein halbes Prozent dazu beitragen. So sind hier noch große Fragen offen und der Münchner Exzellenzcluster könnte eine Menge zu ihrer Erhellung beitragen.

Stimmt das Modell der Physik noch?

Ein anderes noch ungelöstes Problem ist die Frage, warum das heute allgemein anerkannte Standardmodell der Physik etliche Phänomene der modernen Teilchen- und Astrophysik nicht befriedigend erklären kann. Außerdem enthält es eine ganze Reihe experimentell festgelegter Parameter, die sich nicht stringent aus der Theorie ableiten lassen. Viele Theoretiker liebäugeln deshalb mit einer revolutionären Erweiterung



In aufwändigen Computersimulationen versuchen Astrophysiker zu ergründen, wie sich nach dem Urknall das Universum

entwickelt hat. Hier sieht man, wie sich Materie zu schaumartigen Strukturen zusammenballt

des Modells, genannt „Supersymmetrie“, abgekürzt SUSY. Sie geht von der faszinierenden Idee aus, dass zu jedem Fermion ein entsprechendes Boson existiert und umgekehrt. Fermionen sind die Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$, aus denen sich – vereinfacht gesagt – die Materie zusammensetzt. Die Bosonen besitzen den Spin 1 und stellen die Austauschteilchen der Kräfte dar. SUSY sagt also im Grunde eine Verdoppelung aller Teilchentypen voraus, da jedes Materieteilchen noch ein korrespondierendes Kraftteilchen erhält und umgekehrt. Diese bisher unbekanntes Teilchen könnten auch ein interessanter Kandidat sein für die dunkle Materie.

Neue Erkenntnisse am FRM II

Hinweise darauf, ob eine solche Supersymmetrie existiert, sollen auch Neutronenexperimente geben, die Stephan Paul und sein Team mit Cluster-Unterstützung an der Garchingener Forschungsneutronenquelle FRM II planen: Sie wollen die neutralen Teilchen extrem stark abbremsen, sie in Fallen einschließen und mit weit höherer Genauigkeit als bisher messen, ob sie ein elektrisches Dipolmoment besitzen, sich also wie winzige Antennen verhalten. Sollte dies der Fall sein, könnte dies nicht mehr durch die heutigen Modelle erklärt werden – neue Theorien würden nötig. Relevant für das Verständnis der Teilchenphysik ist auch die Lebensdauer der Neutronen, die das Team präzise messen will.

Die Frage, warum es überhaupt Materie gibt, wird vielleicht schon bald beantwortet werden, und zwar durch

die Arbeiten am 27 Kilometer langen Ringbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider), der im Jahr 2008 bei Genf in Betrieb gehen soll. Er wird Energien erreichen, bei denen man hofft, etwa das Higgs-Teilchen zu finden.

Es spielt heute bereits eine wichtige Rolle in der Theorie, konnte aber bisher noch nicht einwandfrei experimentell nachgewiesen werden. Mit seiner Hilfe soll die grundlegende Frage geklärt werden, wie Masse entsteht. Auch hier sind eine Vielzahl Münchner und Garchingener Physiker beteiligt.

Die Vorhaben der Cluster-Physiker sind also extrem anspruchsvoll. Zudem ist der Zusammenschluss ein mutiges Unterfangen, prallen doch hier nicht nur extreme Forschungsansätze aufeinander, sondern auch unterschiedliche Sprachen und zwei „Hochschul-Kulturen“, nämlich die der LMU und der TUM.

Zwei Kulturen, ein Forschergeist

Aber es reizt die Herausforderung, Extreme auszuloten: Auf der einen Seite die Beschäftigung mit den allerwinzigsten Bausteinen der Materie, die so klein sind, dass man bei vielen noch nicht einmal weiß, ob sie überhaupt eine räumliche Ausdehnung besitzen, auf der anderen Seite die Betrachtung der kosmologischen Zusammenhänge, die sich mit Signalen von Galaxienhaufen am äußersten Rand des Universums beschäftigen, Milliarden von Lichtjahren von uns entfernt. Weiter kann man die Maßstäbe wohl nicht mehr spannen.

Brigitte Röthlein

Die Heuschrecken-Dompteure

Bedrohen private Finanzinvestoren die deutsche Wirtschaft? Müssen sich Arbeitnehmer vor „Heuschrecken“ fürchten? Die Wahrheit ist verblüffend – wie ein Wissenschaftlerteam der TUM beweist. Und damit zugleich die Politik auffordert, bessere Gesetze zu machen

Was war nicht alles in letzter Zeit über Finanzinvestoren, sogenannte „Private Equity“-Unternehmen, zu lesen und zu hören? Den biblischen Plagen der Heuschreckenschwärme gleich zögen die Firmenkäufer, die mit privatem Beteiligungskapital arbeiten, durch deutsche Lande, um Unternehmen aufzukaufen, nach kapitalistischer Manier auszulutschen und wieder zu verkaufen, nachdem Arbeitnehmer gefeuert und die Rendite in erkleckliche Höhen getrieben worden sei. So weit die öffentliche Meinung, angefeuert vor allem durch die Investorendebatte im letzten Bundestagswahlkampf.

Doch was ist wirklich dran an den Ängsten vor Private Equity (PE)? Welche Rolle spielt privates Beteiligungskapital bei der wirtschaftlichen Entwicklung von Unternehmen, ja der gesamten Volkswirtschaft? Und welche Rahmenbedingungen sollte die Politik für solche Investoren setzen? Diese Fragen sind der Ausgangspunkt eines umfangreichen wissenschaftlichen Gutachtens, das unter der Leitung von Professor Christoph Kaserer und einer Wissenschaftlergruppe (siehe Kasten) im Auftrag des Bundesministeriums der Finanzen erstellt und im Mai 2007 veröffentlicht wurde.

Zusammen mit seiner Kollegin Ann-Kristin Achleitner, mit der er das Münchner „Center for Entrepreneurial and Financial Studies“ (CEFS) an der TUM leitet, kommt Kaserer zu einem überraschenden Fazit: „Die Heuschrecken-Debatte beschäftigt zwar die Öffentlichkeit. Im Gegensatz dazu aber gibt es viele gute Gründe, anzu-

nehmen, dass private Finanzinvestoren einen positiven Einfluss auf die Unternehmen ausüben, die sie kaufen!“

Es ist nicht das erste Mal, dass die Wirtschaftswissenschaftler von der TU München heilig geglaubte Kühe schlachten: Die Meinung der CEFS-Forscher und ihrer Partner wird immer häufiger eingeholt. So auch im Falle der PE-Debatte. „Viel zu lange wurde das Thema von der europäischen Forschung vernachlässigt“, sagt Kaserer und seine Kollegin Achleitner ergänzt: „Im Rahmen des PE-Themas können sich interdisziplinäre Forschergruppen gut positionieren. Es zeugt für den Innovationsmut der TUM, frühzeitig ein Institut aufzubauen, das konsequent über die Fächer- und Ländergrenzen hinweg arbeitet!“ Die Wissenschaftlerin weiß, wovon sie spricht: 2001 wurde sie auf den ersten Lehrstuhl für Entrepreneurial Finance in Deutschland an der TU München berufen; seitdem versuchen auch andere Universitäten, dem Münchner Modell nachzueifern.

Das Gutachten, das die Forschergruppe in zehnmonatiger Arbeit erstellt hat, scheut sich nicht, gleich mehrere lieb gewordene Klischees über private Finanzinvestoren akribisch zu zerlegen. Die drei wichtigsten in Kürze:

Klischee Nummer 1: Finanzinvestoren kaufen Schrottfirmen und zerschlagen sie möglichst rasch, um vor allem daran zu verdienen, die Einzelteile zu verhökern. Falsch, sagen die Münchner Wissenschaftler. „Die uns vorliegenden Studien zeigen, dass die übernommenen Unternehmen sich nach dem Einstieg von privaten Fi-



Links

www.cefs.de
www.ebs.de
www.whitecase.de

Forschung gegen Vorurteile: Christoph Kaserer und Ann-Kristin Achleitner vom Center for Entrepreneurial and Financial Studies

finanzinvestoren meist besser entwickeln als in der Phase vor der Übernahme“, sagt Professor Kaserer.

Klischee Nummer 2: Finanzinvestoren schminken die Firmen, die sie kaufen, kurzfristig, um sie attraktiv zu machen – es fehle ihnen also die Nachhaltigkeit. Falsch, sagen die Münchner Wissenschaftler. „Es reicht ja ein bisschen gesunder Menschenverstand, um sich klarzumachen, dass die einfache Rechnung, ‚billig kaufen – teuer verkaufen‘ nicht funktioniert, wenn keine Qualität dahintersteht“, sagt Professorin Achleitner. „Da sie als Firmenaufkäufer nicht unbedingt einen Dummen finden, der ihnen eine miese Firma wieder abnimmt, müssen Finanzinvestoren halt eine dauerhaft gute Firma daraus machen! Nur dann funktioniert das Verkaufsmodell.“

Und schließlich Klischee Nummer 3: Wenn Finanzinvestoren einsteigen, sind die Arbeitnehmer stets die Verlierer. Denn als Allererstes würden aus Profit-Interesse Stellen gestrichen oder Jobs ins Ausland verlagert. Falsch, sagen die Münchner Wissenschaftler auch hier. „Natürlich kommt Arbeitsplatzabbau in Sanierungsphasen vor“, sagt Professor Kaserer. „Aber das liegt häufig daran, dass die Unternehmen vorher versäumt haben, rechtzeitig auf die Kosten und Erträge zu schauen.“ Die Experten nennen das Beispiel eines Armaturenbauers: „Es kann auch hier überhaupt nicht davon geredet werden, dass das Unternehmen ausgesaugt wurde“, erzählt Kaserer. „Global betrachtet hat es durch den Einstieg des Finanzinvestors kaum Arbeitsplatzabbau gegeben. Heute ist das Unternehmen wieder gesund – es wurden

also von den Investoren nur diejenigen Dinge getan, die wirtschaftlich nötig waren, um es zu retten!“

Das Fazit der Forschergruppe lautet folgerichtig: „Das Gutachten kommt zu dem Ergebnis, dass privates Beteiligungskapital durch strategische und operative Maßnahmen deutlich profitablere Unternehmen schafft und die Wettbewerbsfähigkeit der so finanzierten Unternehmen in Deutschland nachhaltig stärkt.“

So weit, so gut. Doch wie steht es um die Rolle von PE in der deutschen Wirtschaft? Gerade angesichts neuer Finanzierungsregeln für Banken durch Basel II und den Kapitalhunger von Neugründungen, technologischen Vorreitern und des Mittelstands wird die Finanzierung durch Finanzinvestoren immer bedeutsamer, soll ►

Die Autoren der Studie

Die Autoren der Studie „Private Equity in Deutschland“ sind neben den beiden TU-Professoren und Leitern des Münchner „Centers for Entrepreneurial and Financial Studies“ (CEFS) Christoph Kaserer und Ann-Kristin Achleitner, Professor Dirk Schierek von der European Business School sowie Rechtsanwalt Dr. Christoph von Einem von der Anwaltssozietät White & Case in München. Mitgewirkt haben weiterhin Markus Ampenberger, Marko Bender, Annabell Geidner, Henry Lahr, Dr. Eva Nathusius (alle TU München), Mark Mietzner (EBS) und Rechtsanwältin Dr. Ines Buermeyer (White & Case).

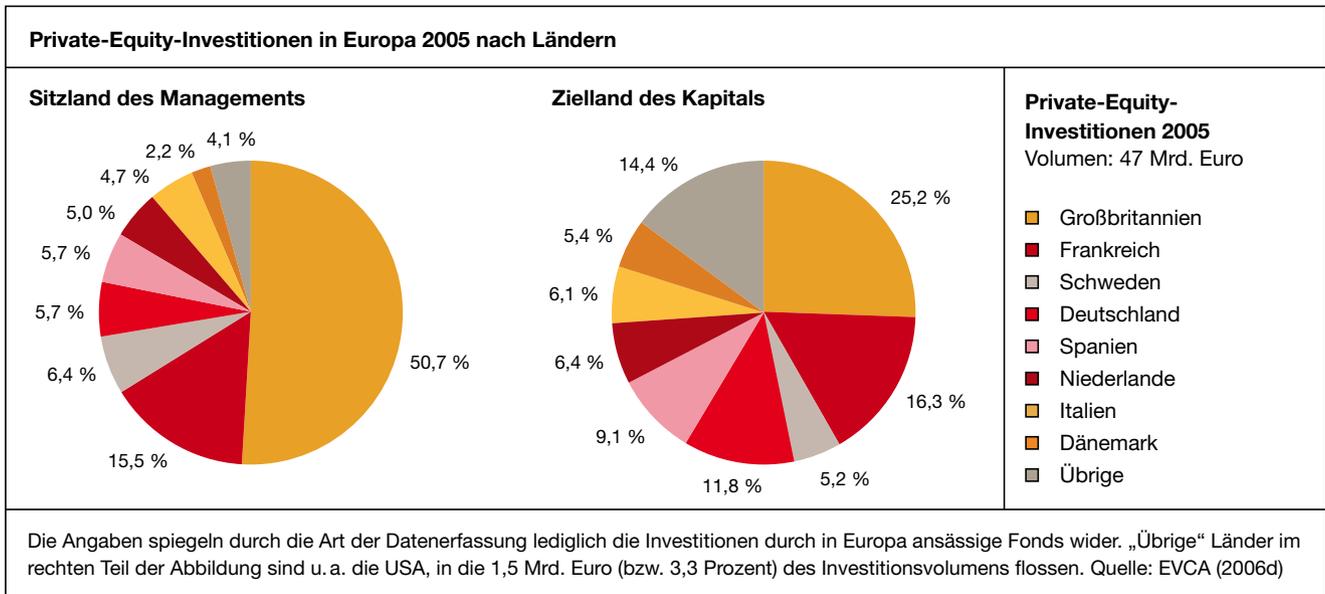


Diagramm: edlundsepp nach Daten TUM

sich eine Volkswirtschaft entwickeln. Doch auf diesem Gebiet ist Deutschland noch Entwicklungsland, meinen die Wissenschaftler und verweisen auf Vergleichszahlen aus dem Ausland: Privates Beteiligungskapital hatte in Deutschland im Jahr 2005 mit 11,8 Prozent bei den Investitionen einen deutlich geringeren Anteil als in Großbritannien (25,2 Prozent) oder in Frankreich (16,3 Prozent). Auf der Basis der Münchner Forschungen kommen nun auch die Berliner Ministerien zu der Erkenntnis, dass die Finanzierung über privates Beteiligungskapital „weltweit an Bedeutung“ gewinnt.

Nur: Wie steht es um die Rahmenbedingungen? Was muss die Politik tun, um die nötigen Spielregeln auf dem Markt der privaten Beteiligungen durchzusetzen? Auch da haben die Münchner Forscher eine klare Ansage: „Der gesetzliche Rahmen für PE ist in Deutschland nicht wettbewerbsfähig!“ stellt Kaserer fest. „Wir müssen endlich zu einer klaren Regelung der politischen, steuerlichen und juristischen Fragen kommen!“ Nötig sind nach Ansicht des Forscherteams vor allem vier Schritte, die die Politiker tun müssen:

1. Die Finanzinvestoren sollten zukünftig **steuerlich genauso behandelt werden** wie andere Investmentfonds. „Das würde endlich Rechtssicherheit und Steuertransparenz für die Investoren schaffen“, sagt Professorin Achleitner.
2. Die Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht sollte, ähnlich wie bei Banken, Versicherungen und bei Wertpapiergeschäften, eine gewisse **Kontrolle über die Fonds und ihre Manager ausüben**; schwarze Schafe unter den Investoren ließen sich dann von vornherein leichter erkennen und aus dem PE-Geschäft aussortieren, bevor sie Schaden anrichten können.

3. „Hilfreich wäre es zudem, eine Art Selbstverpflichtung der Branche aufzusetzen und alle Beteiligten unterschreiben zu lassen“, regt Professor Kaserer an. Das könnte dann etwa so sein wie ein hippokratischer Eid für Finanzinvestoren.

4. „Ganz wichtig ist es, die Arbeitnehmer in den Prozess der privaten Finanzinvestition einzubeziehen“, sagt Professorin Achleitner. „Dann können sie die Veränderungen in den Unternehmen aktiv mitgestalten – und wo sie das tun, zeigt das gute Wirkung für alle Beteiligten.“

Bis es so weit ist, wird es noch manche Debatte im Parlament und in den Ausschüssen geben. Von den ersten aktuellen Überlegungen der Politiker zeigen sich die Münchner Forscher nicht begeistert: Die Vorschläge blieben „weit hinter dem zurück“, was das Gutachterteam belegt und gefordert habe. Und so komme ein sachgerechtes Arrangement mit dem Thema der privaten Finanzinvestoren nicht voran, obwohl es mehr als überfällig sei. Aber die Zeit läuft. Und die Heuschrecken-Angst steht spätestens bei der nächsten großen Übernahme wieder auf der Agenda einer aufgeregten Öffentlichkeit.

Deshalb setzen Kaserer und Achleitner auf die Macht des Diskurses: „Die Heuschrecken-Debatte ist ja auch ein Kommunikationsproblem. Bisher war diese Kommunikation immer investorengetrieben. Das geht in Zukunft nicht mehr!“ Die Einschätzung der Wissenschaftler ist klar: „Heute muss man an alle Zielgruppen bei der Kommunikation gleichermaßen denken – zum Beispiel dadurch, dass man nicht nur von den Chancen für Renditen, sondern auch von den Chancen für Arbeitsplätze spricht!“

Christoph Fasel

Der gläserne Patient

Durch die Kombination von bildgebenden Verfahren können Mediziner Krankheiten immer besser verstehen – und gezielter behandeln

Link

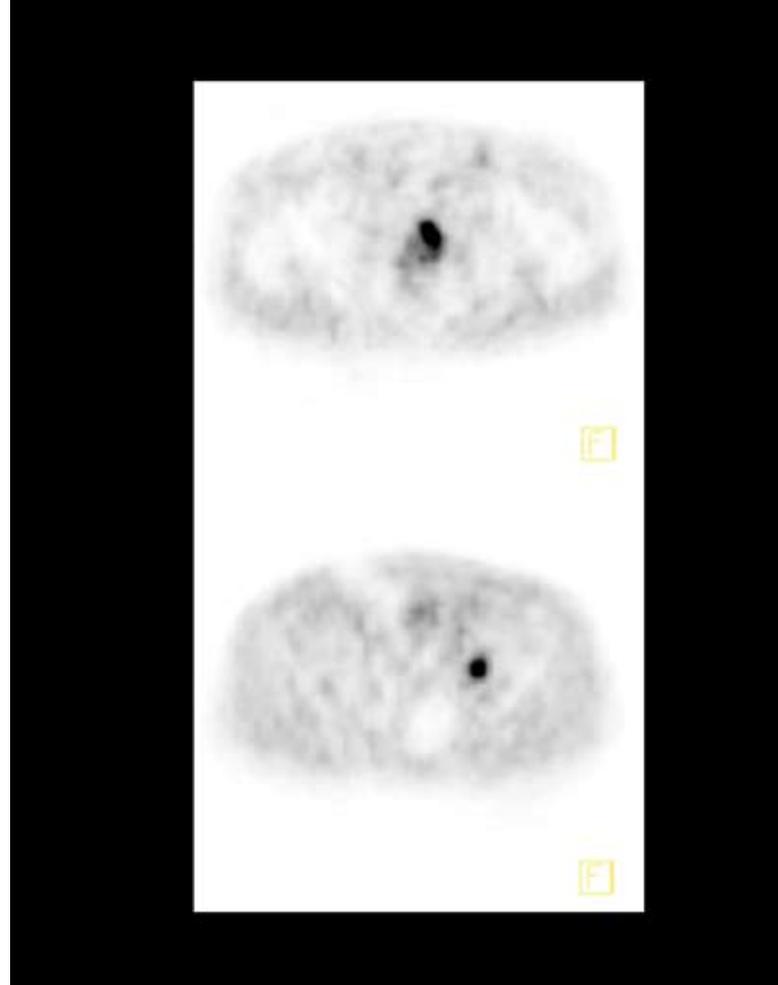
www.nuk.med.tu-muenchen.de

Der Mann mit dem grauen Stoppel-Haarschnitt verschränkt die Arme hinter dem Kopf, starrt gegen das blendende Weiß der Zimmerdecke, dann schließt er die Augen. Er liegt auf einer Liege aus hellem Kunststoff, die schwarzen Polster sind mit Frotteetüchern ausgelegt. Im Protokoll-Buch der technischen Assistentin auf Seite 261 steht das Wichtigste in Kürze: Größe – 193 Zentimeter. Gewicht – 90 Kilo. Außerdem ist vermerkt, wie Patient 261 zuletzt auf das radioaktiv markierte Kontrastmittel reagierte, das ihm vor der Untersuchung in die Vene gespritzt wurde. Die technische Assistentin nickt, „ist alles o.k.“, und drückt einen Knopf am Fußende der Liege. „Das wird jetzt a bissl eng“, sagt sie. Es brummt und surrt, als die Liege ins Innere einer mannshohen Röhre fährt. Es ist, als würde Patient 261 langsam von ihr verschluckt: Erst Kopf und Arme, dann Brust, Unterleib und Beine. Danach ist es still. Nur die Klimaanlage rauscht leise.

Menschenbilder scheinchenweise

Im Nebenraum, der durch eine daumendicke Glaswand vom Untersuchungszimmer getrennt ist, sitzt eine weitere technische Assistentin vor einem Computermonitor. Während in der Röhre ein Röntgenscanner den Körper des Patienten abtastet, fügt ein Computerprogramm sein Abbild auf dem Display zusammen. Die kalziumhaltigen Knochen der Wirbelsäule sind mit zart hellen Strichen umrissen, die Organe dunkel- bis hellgrau gekörnt. Eine klassische Computertomographie (CT), mit deren Hilfe die Ärzte den Körper als Querschnitt rekonstruieren können, um Tumore im Gewebe zu erkennen. Die Methode ist simpel: Eine Röntgenröhre dreht sich in dem ringförmigen Gehäuse um den Patienten herum, Detektoren fangen die kontinuierlich abgegebenen Röntgenstrahlen auf. Aus diesen Messdaten errechnet ein Computer mit Hilfe einer komplexen Software die Bilder. Ein großer Nachteil: Tumore werden lediglich als Abschwächung der Strahlung aufgrund ihrer Dichte dargestellt – es bleibt unklar, ob es sich dabei um ein bösartiges Krebsgeschwür oder eine ungefährliche Zyste handelt.

Hier kommt der zweite Scanner ins Spiel: Er wird zur Positronen-Emissions-Tomographie (PET) eingesetzt, einem Verfahren, mit dem Stoffwechselforgänge sichtbar gemacht werden können. Das Prinzip: 90 Minuten vor der Untersuchung bekommt der Patient ein radio-

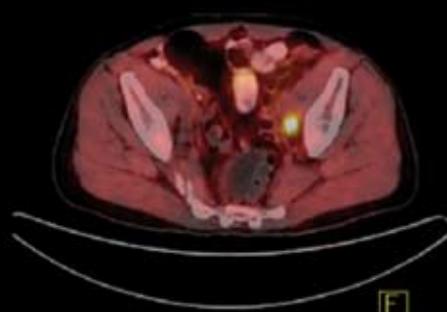
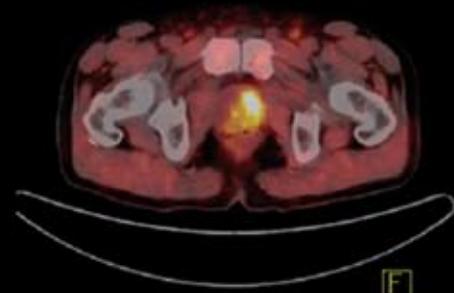
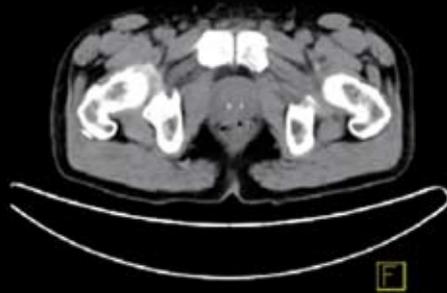


aktiv markiertes Präparat in die Vene gespritzt, das instabile Atomkerne enthält. Beim Patienten 261 ist es ein mit Fluor-18 markierter Zucker. Ein Krebsgeschwür beispielsweise verstoffwechselt besonders viel Zucker: Bei einer Lunge, auf deren Röntgenbild ein weißer Fleck (Verschattung) sichtbar ist, entdeckt der PET-Scanner im bösartigen Tumor größere Mengen der – auf dem Abbild farblich markierten – Signalstoffe. Bei einer gutartigen Veränderung zeigt das Kontrastmittel keine Anreicherung. „Das Besondere ist, dass wir die verschiedenen Verfahren in einem Apparat zusammenbringen“, sagt Markus Schwaiger, Direktor der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin am Klinikum rechts der Isar.

PET- und CT-Bilder werden übereinandergelegt: „Als ob man ein Radarbild auf eine Landkarte projiziert“, erklärt der Wissenschaftler. Der Vorteil: Während die Röntgenstrahlung von außen den Körper durchdringt und das Knochengestüt – wie ein Schatten – Bilder wirft, kommt die Strahlung beim PET-Verfahren aus dem Körperinneren, wo sich biochemische Prozesse abspielen.

Zwei Einblicke zum gleichen Zeitpunkt

Beide Methoden zusammen ergänzen sich hervorragend: „Durch die präzise Bildgebung wissen wir nicht



Die dreiteilige Bildfolge (links PET, Mitte CT, rechts fusioniertes C-11-Colin) zeigt die Befunde eines 62-jährigen Patienten mit Prostatakarzinom. Die obere Bildreihe stellt den Primärtumor dar, die untere eine Lymphknotenmetastase.

nur, ob der Patient gesund oder krank ist: Wir wissen, wo die Erkrankung liegt, wie schwerwiegend sie ist, wie schnell sie fortschreitet“, sagt Schwaiger. Die räumliche Auflösung der PET-Scanner ist inzwischen hoch genug, um Veränderungen des Stoffwechsels – zum Beispiel das Heranwachsen oder Schrumpfen eines Tumors – zu berechnen. Eingriffe wie die Biopsie werden dadurch weniger häufig eingesetzt: „Das wäre bislang das Standardverfahren, um einen unbekanntes Rundherd in der Lunge zu untersuchen“, so Schwaiger. „Eine Nadel muss durch die Atemwege geführt, Gewebeprobe müssen entnommen werden.“ Das ist zwar auch präzise – es ist aber unangenehmer für den Patienten, als nur 20 Minuten in der Röhre zu liegen. Denn länger dauert die Untersuchung nicht.

Nachdem der PET-CT-Tomograph Patient 261 gescannt und unversehrt wieder entlassen hat, gehen die Ergebnisse zur Bildauswertung. Ein verdunkelter Raum, der aussieht wie die Schaltzentrale in einem intergalaktischen Raumschiff. An den Computermonitoren unter gedimmten Deckenleuchten sitzen fünf bis sechs Ärzte, Experten aus den Fachbereichen Radiologie und Nuklearmedizin. 15 Auswertungen pro Tag erledigen sie gemeinsam. Jens Stollfuß, Radiologe in grünem Kittel,

fährt mit dem Cursor über einen Fleck, der über einem der 257 CT-Bilder des Patienten liegt. „Könnte die Schilddrüse sein.“

Um eine exakte Diagnose zu treffen, muss Stollfuß nicht nur sein Handwerk beherrschen – er muss auch mit den neuesten Studienergebnissen vertraut sein. „Insbesondere zu den Kontrastmitteln werden unzählige Beiträge publiziert“, sagt er. „Da muss man eine Auswahl treffen, um nicht die Übersicht zu verlieren.“ Das CT-Bild klickt er beiseite – erst mit Hilfe des PET-Materials kann er das Geschwür sicher zuordnen. Dabei geht es den Nuklearmedizinern nicht allein um die schnellstmögliche Diagnose: „Mit dem PET-CT-Verfahren können wir außerdem die Therapie überwachen“, sagt Klinikdirektor Schwaiger. Denn auch Medikamente lassen sich radioaktiv markieren: Auf dem PET-Bild würde zum Beispiel sichtbar, wenn eine Substanz nicht wirkt und das wachstumshemmende Medikament nicht an die Rezeptoren der Krebszellen andockt.

„Wenn wir das Nichtansprechen auf ein Medikament rechtzeitig erkennen, können wir innerhalb kürzester Zeit ein anderes Medikament ansetzen“, sagt Schwaiger. Das ermöglicht nicht nur eine schnellere Behand- ▶



Foto: TUM

20 Minuten dauert die Untersuchung in der PET-CT-Röhre. Während der Scanner Bilder einfängt, werden die Daten im Kontrollraum auf Computern zusammengefügt. Die Ergebnisse werden von Nuklearmedizinern und Radiologen ausgewertet.

**3D-Bilder von PET-CT-Daten:
„Wie ein Flug durch den Patienten“**

Mit Computerprogrammen lassen sich PET-CT-Daten nicht nur als Schnittbilder, sondern auch 3D-Animationen auswerten: Fahrten durch das Körperinnere werden plastisch, als wenn sich eine Kamera durch den Körper schlängelt. Für eine bessere räumliche Detaillierbarkeit und z. B. die Lehre können diese 3D-Darstellungen nützlich sein. „Doch für eine Diagnosestellung zieht der Kliniker zumeist die Schichtbilder heran“, sagt Bernd Joachim Krause, Oberarzt an der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin in München. Ein klinisches Beispiel für 3D-Bilder sind z.B. die Darstellung von Herzkranzgefäßen und die zeitgleiche Visualisierung von Ablagerungen (Plaques) in den Herzkranzgefäßen mit der PET, die einen Herzinfarkt auslösen können“, so der Experte.

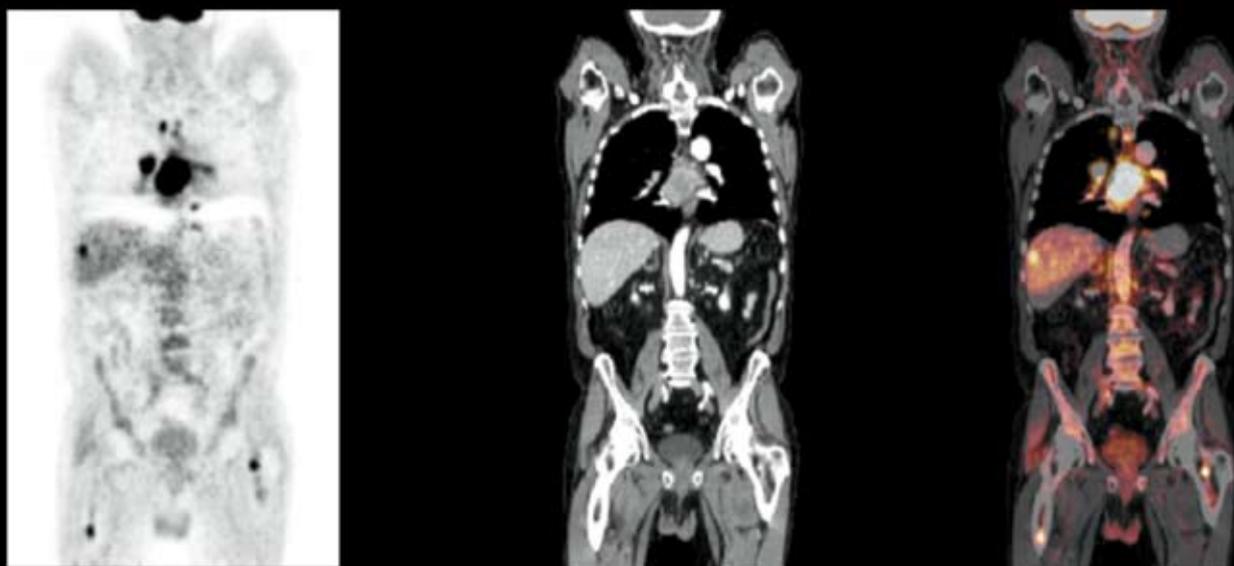
Die Zukunft der PET-CT sieht Krause dagegen nicht in immer aufwändigeren dreidimensionalen Darstellungen, sondern in der Entwicklung neuer Radiopharmaka – also Stoffen, die über die Darstellung spezifischer Stoffwechselfvorgänge den Tumor noch genauer und kontrastreicher im Vergleich zum Normalgewebe darstellen. Das ermöglicht zukünftig eine noch individualisiertere und patientenzentrierte Behandlung bei vielen Krankheitsbildern. „Dazu kommt, dass PET-CT-Tomographen zunehmend fester Bestandteil klinischer Routinediagnostik werden“, sagt Krause „Das wird in den nächsten Jahren insbesondere bei Krebserkrankungen gelingen.“

lung, es spart auch eine Menge Geld: Mehrere tausend Euro kostet der Einsatz seltener Krebs-Medikamente – und zwar innerhalb kurzer Zeit.

Der Methodenmix gibt Patienten neue Chancen

„Die Medizin wird immer spezieller, immer aufwändiger – aber auch immer teurer“, sagt Schwaiger. „Wenn wir früher diagnostizieren, gezielter behandeln und den Prozess besser überwachen, können wir die Kosten in den Griff bekommen.“ Die Kombination aus PET und CT ist nicht das einzige Forschungsfeld an der nuklearmedizinischen Klinik: Die Wissenschaftler arbeiten ebenfalls an einer Verbindung von PET und der Magnetresonanztomographie (MRT), auch Kernspintomographie genannt. Eine Methode, die sich besonders zur Untersuchung des Gehirns eignet: Ein kräftiger Magnet, dessen Feld etwa 30.000-mal stärker ist als das Erdmagnetfeld, richtet die Kerne von Wasserstoffatomen im Körper aus, wie bei einer Kompassnadel. Anschließend werden Radiowellen ins Gewebe gesendet, die Wasserstoffatome schwingen in ihre Ausgangsposition zurück und setzen elektromagnetische Signale frei – Informationen, die ein Computer in Bilder umwandeln kann.

„Durch eine Ergänzung der PET-Aufnahmen mit den MRT-Bildern können wir verschiedene Gehirnzentren



Fotos: TUM

Das PET-, CT- und das fusionierte FDG-PET-CT-Bild (v.l.) zeigen einen 80-jährigen Patienten mit Lymphdrüsenkrebs. Zu sehen sind Tumore in den Lymphknoten sowie Metastasen in Lunge und Leber.

darstellen, sogar deren Durchblutung“, sagt Schwaiger. Das hilft Ärzten z. B. bei der Vorbereitung von Eingriffen bei Hirntumoren, aber auch in der Schmerzforschung: Zentren, die chronische Schmerzen auslösen, können bei Patienten mit Hilfe von radioaktiv markierten Kontrastmitteln im Gehirn lokalisiert werden. Während die MRT kaum Risiken mit sich bringt, wird bei einer CT Röntgenstrahlung freigesetzt. Das gilt auch für die radioaktiven Kontrastmittel bei der PET-Analyse, allerdings ist die Strahlenbelastung dabei geringer als durch die CT. Doch: Durch die Kombination der Verfahren erhöht sich auch die Strahlenbelastung insgesamt. „Gerade bei Kindern versuchen wir, auf solche Untersuchungen zu verzichten“, sagt Schwaiger. „Sie befinden sich noch im Wachstum, die Strahlung ist für sie besonders schädlich.“

Die Zukunft: Tumore erkennen, ehe sie wachsen

Bei einer Krebserkrankung gilt jedoch: Die Ergebnisse der PET und CT nutzen weitaus mehr, als sie Schaden anrichten können. Außerdem ist die Forschung bemüht, die Nebenwirkungen der radioaktiv markierten Kontrastmittel zu minimieren. Diese sind bereits heute weitgehend ungefährlich: „Die Halbwertszeit eines Signalmittels beträgt ungefähr zwei Stunden“, so der Experte.

„Das bedeutet: Nach zwölf Stunden sind praktisch keine radioaktiven Stoffe mehr im Körper.“

Vor dem radioaktiven „Cocktail“ fürchten sich die meisten Patienten seltener als vor der engen Röhre: Brigitte Dzewas, eine der technischen Assistentinnen, kennt die Ängste der Menschen gut. Ihr Job ist es, sie über die Strahlenbelastung von Kontrastmittel und Röntgenscanner aufzuklären – und ihnen die Angst vor der Untersuchung zu nehmen. „Etwa zwei Patienten pro Monat weigern sich, in die Röhre zu steigen“, sagt Dzewas. „Sie wollen auf keinen Fall die Enge ertragen.“ Die Ärzte verabreichen dann leichte Beruhigungsmittel, obwohl die Sorge oftmals unbegründet ist: Die PET-CT-Röhre ist an Kopf- und Fußende geöffnet, Mund und Nase liegen frei. „Bei älteren Geräten war das anders“, erinnert sich ein Patient, der vor dem Untersuchungszimmer wartet. „Dort hatte ich die Röhre unmittelbar vor dem Gesicht und bekam richtige Platzangst.“ Ob es in Zukunft PET-CT-Scanner ohne Röhren gibt, sei dahingestellt: „Auf jeden Fall arbeiten wir an noch detaillierteren Darstellungen, um immer besser zu begreifen, wie Krankheiten entstehen“, sagt Schwaiger. Denn: Tumore beginnen im Submillimeterbereich zu wachsen – und mit detaillierten Mikroskopbildern könnte man Geschwülste vielleicht schon erkennen, bevor es sie gibt. *Philipp Eins*

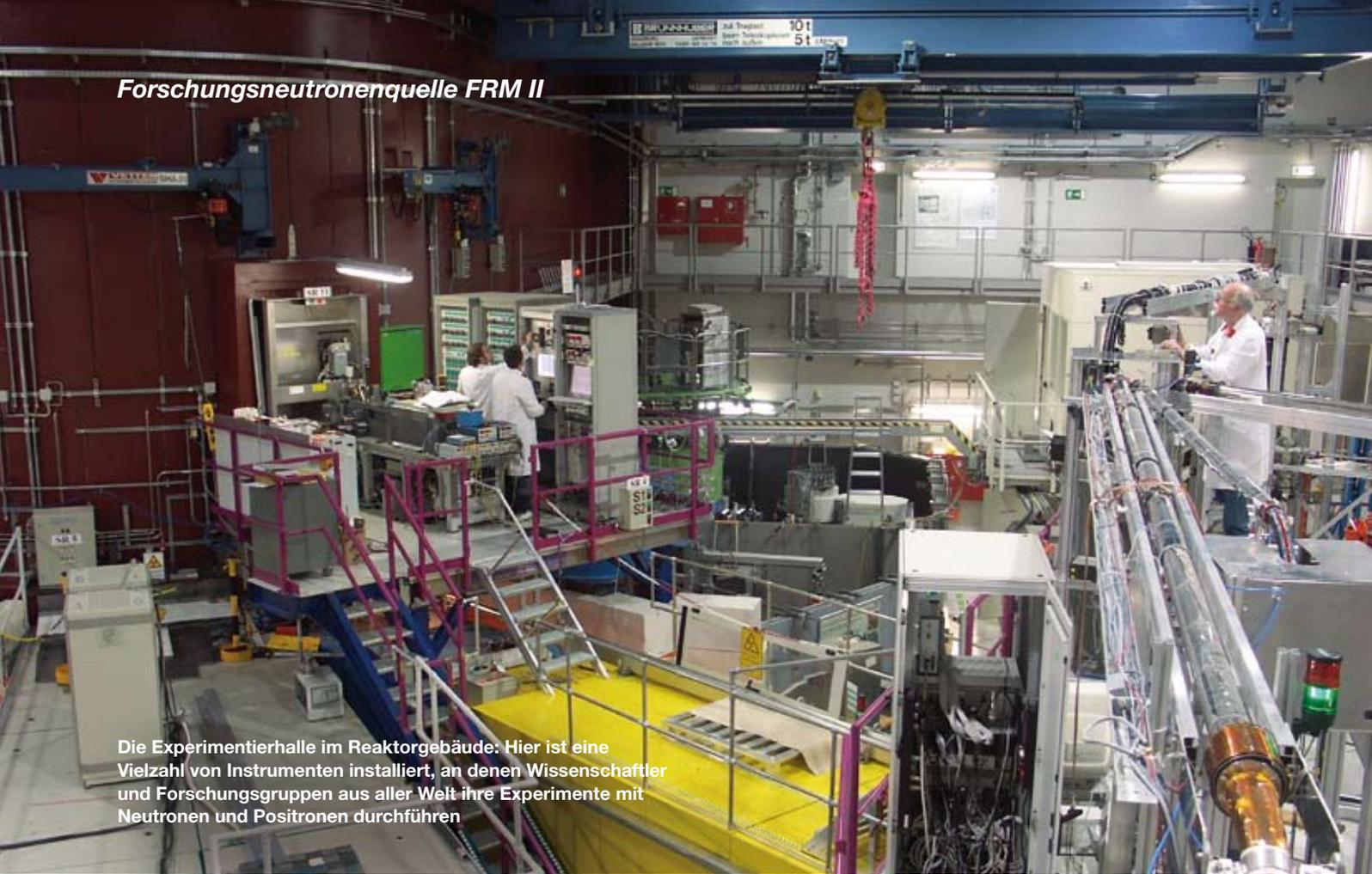
Links

www.frm2.tum.de
www.fz-juelich.de

Ein Schweizer Messer der Forschung

**Messzeiten ausgebucht, alle Erwartungen übertroffen:
Die Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) in Garching
begeistert seit drei Jahren die Wissenschaftler. Trägt sie nun dazu bei,
dass bald die Lehrbücher der Physik umgeschrieben werden müssen?**

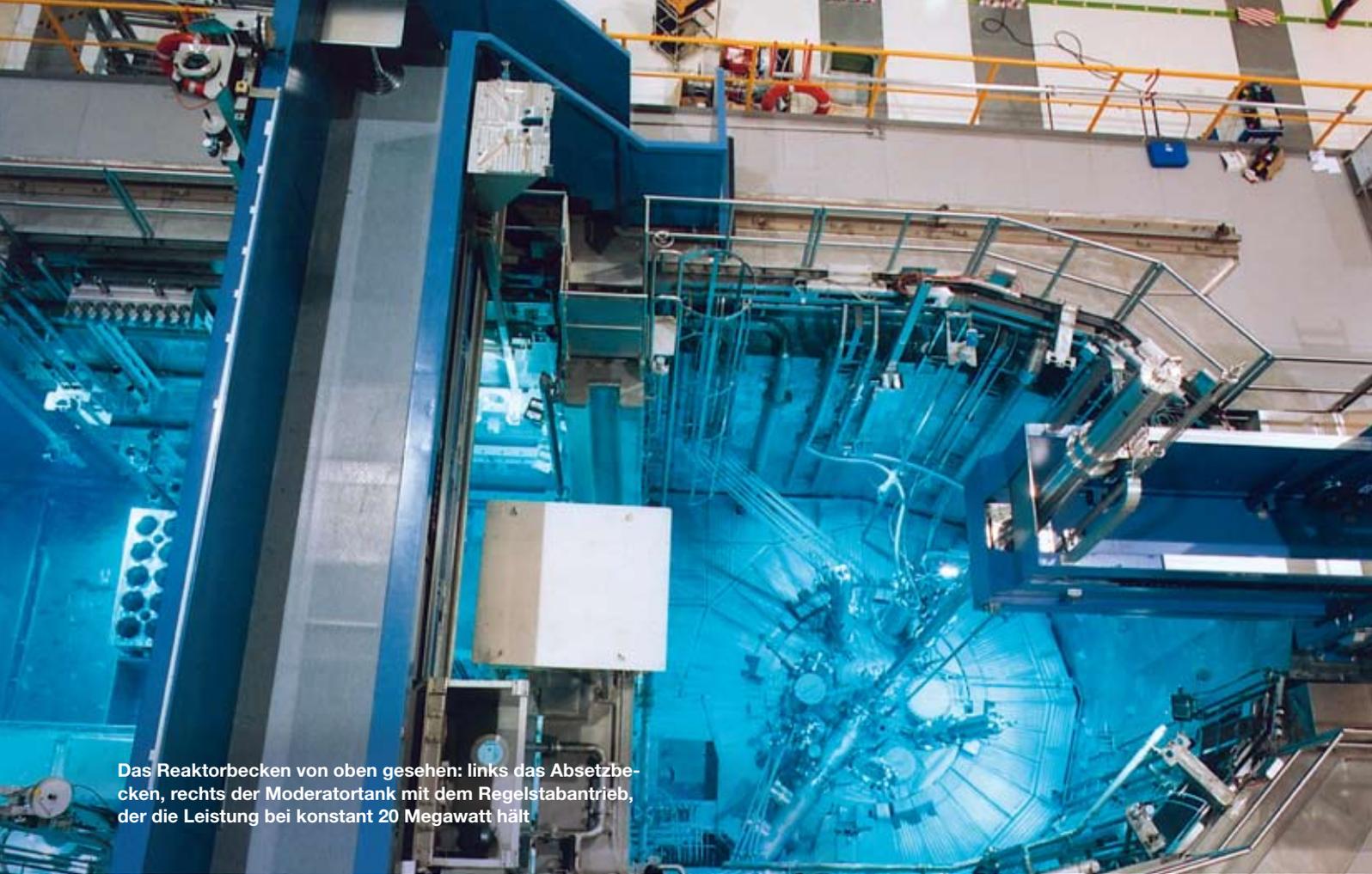
Forschungsneutronenquelle FRM II



Die Experimentierhalle im Reaktorgebäude: Hier ist eine Vielzahl von Instrumenten installiert, an denen Wissenschaftler und Forschungsgruppen aus aller Welt ihre Experimente mit Neutronen und Positronen durchführen



Blick auf die sechs Neutronenleiter, die den Neutronenstrahl aus dem Reaktor (im Bild hinten) direkt in die Neutronenleithalle führen



Das Reaktorbecken von oben gesehen: links das Absetzbecken, rechts der Moderatorontank mit dem Regelstabantrieb, der die Leistung bei konstant 20 Megawatt hält



Montagearbeiten im Reaktorbecken während der Bauphase der Forschungsneutronenquelle

Forschungsneutronenquelle FRM II

Wartungsarbeiten im Moderatorbecken. Im Zentrum des Moderatorreaktors befindet sich der Reaktorkern mit dem Brennelement



Das Absetzbecken dient als Zwischenlager für die verbrauchten Brennelemente, die nach 53 Tagen im Reaktor ausgetauscht werden



Einstmals war das Atom-Ei im Norden Münchens eine weithin sichtbare Landmarke: ein ästhetisch gelungenes Bauwerk, im Inneren der erste deutsche Kernreaktor, dessen silbern schimmernde Außenhaut weithin über die Landschaft leuchtete und täglich den Vorbeifahrenden auf der nahen Autobahn den Beginn einer neuen Epoche verkündete: des Atomzeitalters. Was im Inneren der eiförmigen Kuppel vorging, verstand allerdings kaum jemand. Hier verwirklichte ein Physiker der TU München zusammen mit seinen Mitarbeitern eine Vision. Sie hatten sich in den Kopf gesetzt, die elektrisch neutralen Bausteine des Atomkerns, die Neutronen, als Messsonden für die Forschung zu erschließen. Und Prof. Heinz Maier-Leibnitz hatte mit seinem Team durchschlagenden Erfolg. Erstens gab es den Nobelpreis für einen von ihnen, nämlich für Prof. Rudolf Mößbauer (siehe Kasten Folgeseite). Und zweitens sind Neutronen heute aus der Erforschung der lebenden und toten Materie nicht mehr wegzudenken. Große Forschungszentren entstanden, die auf den Arbeiten in Garching aufbauten.

Experimente an der Grenze des Wissens

Das war vor rund 50 Jahren. Heute sind zwar die Einrichtungen des alten Kuppelbaus nicht mehr zeitgemäß. Direkt nebenan aber arbeitet seit drei Jahren als Nachfolger die Forschungsneutronenquelle, benannt nach dem Pionier Heinz Maier-Leibnitz, und ermöglicht neue Experimente an den Grenzen des Wissens. Die Ergebnisse machen auch heute kaum Schlagzeilen in den Medien – in der Welt der Wissenschaft aber sorgen sie immer wieder für Aufsehen. Einer der schönsten Erfolge, die Forscher mit ihren Arbeiten erzielen konnten, ist die Veröffentlichung einer kurzen Mitteilung im

weltweit angesehenen amerikanischen Forschungsmagazin „Science“. Der TUM-Physiker Prof. Christian Pfleiderer publizierte vor wenigen Wochen sogar einen vier Seiten langen Artikel. Inhalt sind die Ergebnisse seiner Forschungen an der Garching Neutronenquelle, die geeignet sind, gängige wissenschaftliche Vorstellungen über den Haufen zu werfen, wie Elektronen sich in Metallen bewegen. Prof. Pfleiderer erforscht, wie Magnetismus in kleinsten Dimensionen funktioniert – ein Feld, das etwa für Festplatten in Computern von großer praktischer Bedeutung ist. „Ohne die Möglichkeit in Garching, unsere Experimente unter extremen Versuchsbedingungen durchzuführen – bei tiefen Temperaturen und 20.000 Atmosphären Druck –, hätten wir unsere Ergebnisse nie gewinnen können“, schwärmt der Physiker von den Möglichkeiten der neuen Forschungsneutronenquelle.

So konnte er zeigen, dass sich Elektronen beim Fließen in Metallen bewegen wie Honig, der zäh von einem Löffel tropft – in einer viskosen „Elektronensuppe“. Bislang galten sie eher als Einzelprojekte, die sich recht unabhängig voneinander durch die Kristallgitter der Metalle bewegen. Am Garching Forschungreaktor geht es um Neutronen. Sie zählen zu den schweren Atombausteinen und bilden normalerweise zusammen mit den elektrisch positiv geladenen Protonen den Atomkern. Durch die Spaltung von Atomkernen in Reaktoren werden Neutronen frei.

Viele Teilchen auf engem Raum

In Garching sind es besonders viele auf kleinem Raum, die Physiker sprechen von einer hohen Flussdichte. Die Physiker benutzen diese Neutronen wie Licht, mit ▶

Forschungsräume	Grundriss
<ul style="list-style-type: none"> 01 Atom-Ei 02 Neutronenleiterhalle West 03 Neutronenleitertunnel 04 Experimentierhalle im Reaktorgebäude 05 Neutronenleiterhalle Ost 	

Grafik: edlundsepp nach Vorlagen TUM

„Ohne die Möglichkeit in Garching, unsere Experimente unter extremen Versuchsbedingungen durchzuführen – bei tiefen Temperaturen und 20.000 Atmosphären Druck –, hätten wir unsere Ergebnisse nie gewinnen können“,

schwärmt Prof. Pfeleiderer von den Möglichkeiten der Forschungsneutronenquelle

dem sie nicht nur die Oberfläche, sondern auch das Innere von Dingen sehen können. Die hohe Flussdichte des Garchinger Reaktors lässt dieses Licht besonders hell leuchten. Weshalb dieses Licht bei den Forschern so beliebt ist, versteht man, wenn man einen Blick in die Atomphysik wirft: Atome sind ja keineswegs soli-

de Körper, sondern in ihrem Inneren vor allem leer. Ein Neutron ist etwa 10.000-mal kleiner als das ganze Atom. Um sich das bildhaft vorzustellen: Hätte das Atom einen Durchmesser von einem Meter, wäre das Neutron gerade einmal einen Zehntelmillimeter groß. Während Protonen und Neutronen sich gegenseitig elektrisch anziehen und abstoßen, fliegen die neutralen Neutronen meist ungehindert durch Atome: Eine zehn Zentimeter dicke Bleiplatte lässt 80 Prozent eines Neutronenstrahls durch. Neutronen sind nicht nur Teilchen, sondern zugleich auch Welle, verhalten sich also wie Licht, und werden auch an Oberflächen reflektiert. Die Wellenlänge von Neutronen bei Raumtemperatur ist etwa 5.000-mal kürzer als die des sichtbaren Lichts – gerade die richtige Dimension, um durch Beugungsmuster Informationen über atomare Strukturen und über die inneren Bewegungen in Kristallen, Kunststoffen und anderen Molekülen zu gewinnen. Doch dabei bleibt es nicht. Neutronen können Materie nicht nur ablichten, sie können sie auch gezielt verändern.

Rudolf Mößbauer	Kurzbiografie
<p>Geboren 1929 in München, begann Rudolf Mößbauer 1949 sein Physikstudium an der damaligen Technischen Hochschule München, das er 1955 bei Prof. Heinz Maier-Leibnitz abschloss. Unter seiner Obhut machte Mößbauer im Rahmen seiner Doktorarbeit die entscheidenden Entdeckungen, die 1961 mit dem Nobelpreis gewürdigt wurden: Am Max-Planck-Institut für Medizinische Forschung in Heidelberg gelangen ihm die ersten Beobachtungen der rückstoßfreien Kernresonanz-Absorption. Der nach ihm benannte „Mößbauer-Effekt“ ermöglicht feinste Energiedifferenz- und Frequenzmessungen energiereicherer elektromagnetischer Strahlung.</p> <p>Praktische Bedeutung gewann der Effekt in sogenannten Mößbauer-Spektrometern, mit denen die genaue chemische Umgebung bestimmter Elemente ermittelt werden kann. Etwa 40 Elemente besitzen die für die Beobachtung des Mößbauer-Effektes nötigen niederenergetischen Gammaübergänge. Ursprünglich auf rein kernphysikalische Anwendungen beschränkt, erlangte die MBS eine herausragende Bedeutung für viele Forschungsgebiete: von der Physik über die Chemie, Geologie, Mineralogie, Archäologie bis hin zur Medizin.</p>	

Neutronen untersuchen, ohne zu zerstören

Von der Zahl der Neutronen in einem Atomkern hängt ab, ob bestimmte Elemente radioaktiv sind. In Garching werden durch Neutronenbestrahlung gezielt radioaktive Isotope erzeugt. Ein eindrucksvolles Beispiel ist das Element Rhenium 188, ein radioaktives Isotop, das in der Natur nicht vorkommt, aber in der Medizin erfolgreich bei der Behandlung von peripheren arteriellen Verschlusskrankheiten (Raucherbein) genutzt wird. Neutronen mit



Foto: TUM

Die Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz mit dem zentralen Reaktorgebäude, der Neutronenleiterhalle Ost (links) und dem stillgelegten Atom-Ei (rechts). Die Neutronenleiterhalle West verbindet die beiden Reaktoren

hoher Energie können auch zur direkten Bestrahlung von Tumoren eingesetzt werden. Dazu arbeiten die Physiker in Garching mit Medizinern vom TU-Klinikum Rechts der Isar in München zusammen. Neutronen sind also ein geniales Instrument, um Werkstoffe, neue Materialien und biologische Proben zu untersuchen, ohne sie dabei zu zerstören. Für die Gewinnung der freien Neutronen allerdings muss man einen gehörigen Aufwand betreiben.

Rund 435 Millionen Euro wurden in den Forschungsreaktor gesteckt, bevor er in Betrieb gehen konnte. Sein mit acht Kilogramm hochangereichertem Uran äußerst kompakt beladenes Brennelement liefert 52 Tage lang kontinuierlich Neutronen, bevor es ausgetauscht wird. Das Brennelement ist von schwerem Wasser umgeben, das die Neutronen abbremst. Strahlrohre mit Superbespiegelung bringen die Neutronen aus dem inneren Reaktorbereich zu den Experimentierplätzen. Durch die besondere Konstruktion dieser Neutronenlichtleiter kann am FRM II ein sehr helles Neutronenlicht die Probe beleuchten, oft heller als an vergleichbaren Anlagen.

Inzwischen hat sich die Forschungs-Neutronenquelle in Garching zu einem führenden Zentrum der Neutronenforschung in Europa entwickelt. Prof. Winfried Petry, der wissenschaftliche Direktor des FRM II, hebt stolz hervor: „Wir haben hier in Garching nicht nur eine leistungsstarke, sondern sicherlich die Forschungsneutronenquelle mit dem breitesten Anwendungsspektrum erbaut.“ An den Experimentierplätzen können die fundamentalen

Kräfte der Materie ebenso untersucht werden wie biologische weiche Materie. Die Neutronen produzieren homogen dotiertes Silizium, sie lassen sich aber auch für die gezielte Bestrahlung von Tumoren nutzen oder zur Erzeugung von Antimaterieteilchen für die Metallforschung. Neben der Grundlagenforschung stehen 30 Prozent der Nutzung für die Industrie offen.

Die Forschungsmöglichkeiten in Garching sind vielseitig wie ein Schweizer Taschenmesser zur Erforschung der Materie. Im Frühjahr 2007 wurde der erste Erweiterungsbau eingeweiht: eine weitere Experimentierhalle. Ihr Betrieb zeigt, wie eng Garching mit Disziplinen und Instituten in Deutschland und Europa vernetzt ist. Hier arbeiten Materialwissenschaftler und Teilchenphysiker von der TUM und der Bundeswehrhochschule München, aus dem Forschungszentrum Jülich, das eine eigene Außenstelle eingerichtet hat, von der RWTH Aachen, vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung und den Universitäten Göttingen und Bayreuth.

Was vor rund 50 Jahren mit der Vision des Physikers Maier-Leibnitz begann, hat sich zum internationalen Treffpunkt der Neutronenforscher entwickelt: Neben Wissenschaftlern aus Deutschland, die etwa 60 Prozent der Strahlzeit beantragen, kommen ein Drittel der Forscher aus dem übrigen Europa, sechs Prozent aus anderen Kontinenten. Auch wenn die Forschungsneutronenquelle in ihrer Architektur weniger spektakulär ist als das Atom-Ei – sie setzt weiterhin Landmarken, jetzt für die Wissenschaft weltweit. *Reiner Korbmann*



Ährenrettung

Wie schafft man es, den Winterweizen vor der zunehmenden Trockenheit zu schützen?
Ein Forschungsprojekt der TU München versucht, darauf eine Antwort zu finden



Albert Grandl ist seit 29 Jahren Bauer auf dem Riedhof. Ein stattliches Anwesen: ein weißes Wohnhaus, eingebettet zwischen Maisfeldern und Kuhweiden. Geranien leuchten am Balkon, eine Katze schleicht über die Terrasse. Hinterm Haus, neben Scheunen und Schuppen, steht der Kuhstall mit den 60 Schwarzbunten. Albert Grandls rote Haare sind verschwitzt, doch das ist eben so im Sommer. „Viel schlechter wäre jetzt Regen“, erzählt er, „so kurz vor der Weizenernte.“ Im Oktober hat Grandl gesät und gedüngt, jetzt steht der Weizen goldgelb in der Sonne. „Na, da schauen wir mal, ob er schon kracht!“

Reifer Weizen muss es krachen lassen

Grandl nimmt einen Halm zwischen die Finger und streift die Körner einer Ähre ab. Die Körner reibt er zwischen den Händen, bis sich die Spreu vom Weizen trennt. Dann bläst er in seine Handfläche, die Spreu fliegt in den Wind, die blanken, vollen Körner liegen in seiner großen Hand. Es ist Mitte Juli und der Weizen kracht noch nicht – beim Draufbeißen. Er schmeckt eher etwas bitter. „Ende Juli ist er reif“, erzählt Grandl, „jetzt darf’s nur keinen Regen mehr geben.“ Denn zu viel Regen führt kurz vor der Reife zum Nachschuss, den die Landwirte fürchten: Am Halm treibt der Weizen dann eine zweite, kleinere Ähre – und die große Ähre wird nicht mehr reif. Kurz vor der Blüte hingegen, im Mai, darf es nur eines nicht geben: zu ▶

Link

www.wzw.tum.de/pbpz

viel Sonne. Das Getreide ist also durchaus wählerisch. In diesem Jahr war die Winterweizenernte von Bauer Grandl schon einmal in Gefahr: Im Mai regnete es vier Wochen gar nicht – und der Weizen stand doch kurz vor der Blüte. Diese vier Wochen hat die Saat gerade noch ausgehalten, nach spätestens sechs Wochen wären die Pollen steril geworden, die Pflanzen hätten keine Frucht getrieben. Für Bauer Grandl bedeutet das Ernteeinbußen von 196 Tonnen Weizen; 14 Euro gibt es für 100 Kilo – die ganze Arbeit wäre umsonst gewesen. „Es hat schon immer heiße Frühsommer gegeben, verregnete Hochsommer und auch mal einen warmen Winter, aber das Wetter wird schon immer anstrengender. Ob das der Klimawandel ist?“

Wetterkapriole oder Klimawandel?

Diese Frage stellt sich nicht nur Bauer Grandl. Und er kann wenig tun: Die Winterweizenfelder müsste er in der Blütezeit bewässern, doch das ist viel zu teuer. Aber wie könnten sich Bauern an das veränderte Wetter anpassen? Dr. Antje Kunert stellt sich genau dieser Frage, die Bauer Grandl beschäftigt. Sie ist Mitarbeiterin bei Professor Gerhard Wenzel am Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung des Wissenschaftszentrums Weihenstephan. Ihr Ziel ist es, eine Winterweizensorte zu züchten, die zwei Wochen früher blüht und so der immer trockener

werdenden Frühsommerzeit ausweicht. Sie forscht im Rahmen des Verbundprojektes „Anpassung an den Klimawandel durch pflanzenzüchterische Maßnahmen in der Weizenproduktion in Deutschland“. Fakt ist: Es gibt in Deutschland kaum noch Ertragssteigerungen bei Winterweizen, weil die Frühsommer zunehmend trockener werden. Früher gab es jedes Jahr Ertragszuwächse, seit zehn Jahren stagniert der Ertrag in Bayern bei etwa sieben Tonnen Weizen pro Hektar Anbaufläche.

Das Verbundprojekt läuft von Juli 2006 bis Juni 2009 und soll zwei Fragen klären: Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die Weizenproduktion? Und könnten sich die Bauern mit einer neuen Weizensorte an diesen Klimawandel anpassen? Die Projektpartner errechnen mit Klimamodellen Prognosen für die Landwirtschaft in Deutschland und bewerten die Auswirkungen auf die Weizenproduktion. Danach kann eine Aussage zu den volkswirtschaftlichen Einbußen auf dem Winterweizenmarkt gemacht werden.

Die Projektleitung hat Dr. Michael Schmolke. Sein Team will das Anpassungspotenzial durch die Züchtung untersuchen. Sprich: Die Forscher versuchen eine Winterweizensorte zu züchten, die zwei Wochen früher blüht, also schon Ende Mai. Nach drei Jahren können die Pro-

„Es hat schon immer heiße Frühsommer gegeben, verregnete Hochsommer und auch mal einen warmen Winter, aber das Wetter wird schon immer anstrengender. Ob das der Klimawandel ist?“

Albert Grandl



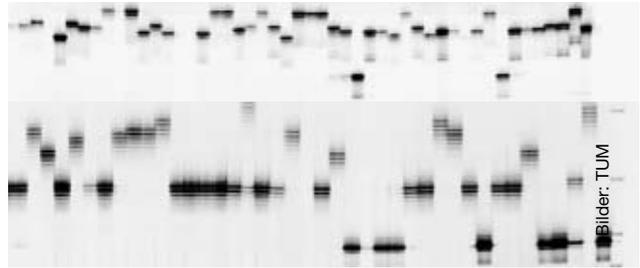
jektpartner der TUM eine Kostenschätzung abgeben für die komplette Neuzüchtung einer solchen Sorte. Denn die Züchtung einer neuen Sorte dauert, einschließlich der Vorarbeiten an der Universität, insgesamt 15 bis 20 Jahre. Diese Kosten sollen im Rahmen der Forschung mit dem wirtschaftlichen Nutzen verglichen werden. Erst dann kann eine Empfehlung an die Züchter erfolgen. Das Projekt wird finanziert vom Bundesforschungsministerium im Rahmen des klimazwei-Programms. Das Wissenschaftszentrum Weihenstephan erhält den Hauptteil der Fördermittel, insgesamt 170.000 Euro.

Der Hauptteil der praktischen Arbeit liegt bei Antje Kunert. Ihr Arbeitstag beginnt um halb acht im Gewächshaus. Die Eisentür zur Halle mit den Gewächshäusern lässt sich nur mühsam öffnen, feuchtwarme Luft dringt ins Freie. 490 Weizenpflanzen stehen hier in Reih und Glied geordnet. Ziel ist es, eine neue deutsche Sorte zu züchten. Das heißt, die Mutter eines neuen Winterweizen-Typus muss deutsch sein. Denn nur so ist gewährleistet, dass die Pflanze sich im heimischen Klima erfolgreich entwickelt. Die Väter dieser Weizenpflänzchen kommen hingegen aus der ganzen Welt: aus Mexiko, Afghanistan, Italien oder Australien. Mütter und Väter – das klingt eigenartig bei Weizen. Denn Weizenpflanzen sind ja Selbstbefruchter. Sie bilden Pollen und haben gleichzeitig eine Blütennarbe. Doch die Züchter greifen in die Natur ein. Im letzten Jahr haben sie die deutschen Sorten vor der Blüte kastriert und dann mit den ausländischen Vätern fremdbestäubt. Natürlich wurden nur vielversprechende Väter ausgewählt: solche mit der Eigenschaft, besonders früh zu blühen. Zunächst wird mit Sommerweizensorten geforscht, denn da gibt es schon Sorten, die besonders früh blühen. Später soll die neue Kreuzung dann in Winterweizensorten eingebracht werden.

Beobachten, Analysieren, Ausprobieren

Jetzt stehen die Nachkömmlinge der Pflanzen auf dem Feld, die im letzten Jahr im Gewächshaus gepflegt wurden. Die Blüten sind fremdbestäubt. Zum Schutz der offenen Blüte tragen die Ähren kleine Tütchen, so kann kein unerwünschter Pollen unbemerkt mitbefruchten. Jeden Tag beobachtet Antje Kunert die Pflanzen. Sie notiert den Zeitpunkt der Blüte für jede Pflanzensorte, die Wuchshöhe, die Ähren- und Körneranzahl. Diese Daten trägt sie in ihrem Büro in eine Tabelle ein, in der alle Merkmale für jede Pflanzensorte vermerkt sind. Doch wie nähert sie sich züchterisch dem früheren Blühzeitpunkt? Nur durch Beobachten und Ausprobieren?

Antwort auf diese Frage gibt das Labor, neben Feld und Gewächshaus der dritte Arbeitsplatz von Antje Kunert. In diesem Labor untersucht sie nachmittags die Erb- ▶



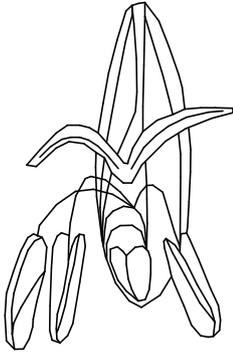
Bandenmuster verschiedener Sommerweizen-Genotypen, untersucht mit Mikrosatelliten (molekularen Markern)



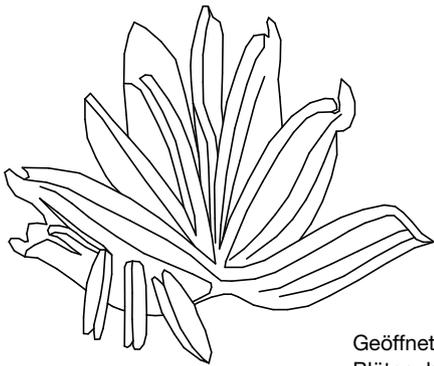
Dr. Antje Kunert trägt PCR-Produkte auf einen LiCor-DNA-Analyser zur elektrophoretischen Auftrennung

Markergestützte Selektion

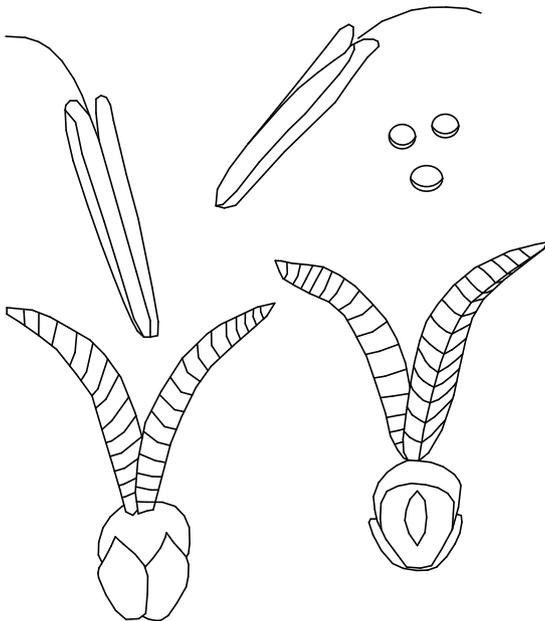
Die Arbeiten am Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung mit dem Ziel, eine frühere Blühzeit zu erreichen, werden mittels markergestützter Selektion durchgeführt. Dabei werden zum einen die Pflanzen im Feld bzw. Gewächshaus angebaut und auf das Merkmal Blühzeitpunkt hin untersucht. Zum anderen werden DNA-Proben aus dem Blattmaterial der Pflanzen entnommen und im Labor mit Mikrosatelliten (molekularen Markern) analysiert. Dadurch erhält man Informationen zu den Allelen der einzelnen Sommerweizen-Genotypen an spezifischen Stellen im Genom. Sichtbar gemacht werden die unterschiedlichen Allele in einem Polyacrylamid-Gel durch eine Elektrophorese. Hierzu wird das Gel in eine Elektrophorese-Kammer (z. B. LiCor-DNA-Analyser) eingehängt, an die ein Stromkreis angeschlossen wird. Die negativ geladene DNA wandert so vom Minuspol zum Pluspol durch das Gel. Je kleiner die DNA-Fragmente, desto schneller laufen sie durch die Gelmatrix. Am Ende der Elektrophorese befinden sich deshalb die DNA-Fragmente in unterschiedlicher Höhe im Gel (siehe Abb. oben). Um schließlich Weizen-Genotypen selektieren zu können, die einen genetisch bedingt früheren Blühzeitpunkt haben, werden die Daten aus dem Feld/Gewächshaus mit den Daten aus dem Labor statistisch verrechnet. So können Assoziationen zwischen einer frühen Blüte und einer spezifischen Stelle im Genom identifiziert werden, d. h., es lassen sich Rückschlüsse zwischen bestimmten Allelen der Pflanzen und ihrem Blühverhalten ziehen. Aufgrund dieser Informationen können dann Weizenpflanzen für die Züchtung auf eine Blühzeitverfrühung selektiert werden.



Schematische Darstellung einer Weizenblüte. Vorne sichtbar sind drei Staubblätter (Stamina), bestehend aus jeweils einem Stiel (Filament) und einem Pollen tragenden, zweiteiligen Staubbeutel (Anthere). Dahinter abgebildet sieht man den Fruchtknoten (Ovarium), an dessen Spitze sich ein Stempel (Pistillum) befindet und daran zwei fedrige Narbenäste (Stigmae)



Geöffnetes Ährchen mit fünf Blüten, bei der linken Blüte sind die Staubbeutel (Antheren) sichtbar



Im oberen Teil der Abbildung sind zwei Staubblätter mit Stielen und Staubbeuteln dargestellt. Rechts daneben Pollenkörner. Im unteren Teil der Abbildung sieht man den weiblichen Blütenanteil, den runden, aus zwei oder drei Fruchtblättern verwachsenen Fruchtknoten mit zwei fedrigen Narbenästen

Grafiken: edlundsepp

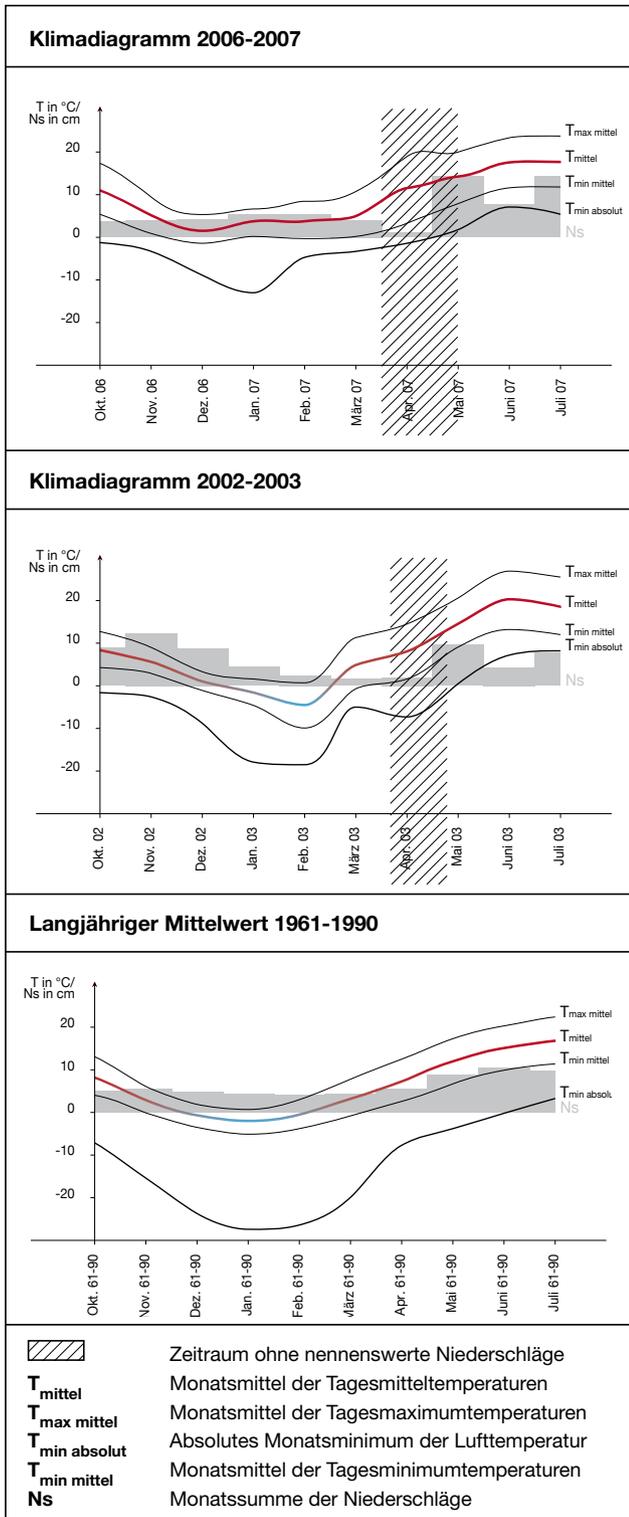
anlagen aller Weizensorten auf dem Feld. Dazu hat sie von jeder Sorte zehn Blätter entnommen. Diese Blätter trocknet sie und friert sie mit flüssigem Stickstoff ein. Dann werden sie zu einem Pulver vermörsert, ein Cocktail löst die DNA heraus. Antje Kunert holt eine kleine Palette mit Plastikröhrchen aus dem Kühlschrank, in denen jeweils DNA schwimmt, mit dem bloßen Auge zu erkennen. Wie die weißen Hagelschnüre im Hühnerei sehen die DNA-Fäden aus, sie sind nur viel kleiner, etwa einen Zentimeter lang. Die Forscherin trägt die Palette behutsam ins Labor, morgen wird sie diese Sorten untersuchen.

Schon vor ein paar Stunden hat sie andere DNA-Proben weiterverarbeitet. Zur Lösung kommt der Polymerase-Kettenreaktions-Mix. Dieser PCR-Mix enthält die molekularen Marker. Diese Marker haben die Eigenschaft, sich an ganz bestimmte Abschnitte der Erbinformationen zu heften. Das Weizengenom ist noch nicht vollständig entschlüsselt, es gibt also noch nicht für jede Gensequenz einen Marker. Doch zwei Gruppen von Genen sind bekannt, alle haben einen Einfluss auf den Zeitpunkt der Blüte. Das sind die Gene für Photoperiodismus, sie bewirken, dass die Pflanze auf Lichtreize mit Wachstum reagiert. Die zweite Gruppe sind die Vernalisationsgene. Sie sorgen für die Reaktion auf einen Kältereiz, was bedeutet: Die Pflanzen wachsen im Winter nicht weiter – das schützt sie vor dem Erfrieren.

Welche Gene lassen Weizen früher blühen?

Antje Kunert untersucht die Erbinformationen der Weizensorten auf die oben genannten Gene. Die DNA-Marker stellen ein Hilfsmittel für diese Untersuchungen dar. Die Genabschnitte werden stark vermehrt und auf ein Gel aufgetragen. Doch wie kann die DNA sichtbar und vergleichbar gemacht werden? Die Methode heißt Elektrophorese. Dazu werden die einzelnen DNA-Proben der verschiedenen Sorten nebeneinander oben auf eine Gelplatte aufgetragen. Diese ist auf der einen Seite positiv und auf der anderen Seite negativ geladen. Die DNA selbst ist negativ geladen und wandert deshalb in eine Richtung durch das Gel. Dazu hängt Antje Kunert die Gelplatte in den DNA-Analyser. Er sieht aus wie ein Kopierer. Neben dem Gerät steht ein Schreibtisch mit einem Monitor, die Platte ist blank und aufgeräumt. Im Raum ist es kühl und dunkel, die Geräte summen.

Im Analyser liest ein Laser die Bewegungen der DNA. Jetzt kann man sie auf dem Monitor sehen als verschwommene Bündel von schwarzen Strichen. Die DNA der einzelnen Sorten läuft von oben nach unten durch das Gel. Sie unterscheiden sich in ihrer Größe, also in der Anzahl ihrer Basenpaare. Insgesamt 170 verschiedene Sorten werden untersucht, je 48 pro Gel. Auf dem



Bildschirm wird die untersuchte Gensequenz der Sorten so vergleichbar. Nach einer Stunde ist die Analyse beendet: Die kleineren DNA-Fragmente sind schneller durch das Gel gelaufen und schon unten angekommen, die großen hängen weiter oben. Antje Kunert schaut konzentriert auf den Bildschirm. Die Geninformationen der einzelnen Pflanzen wird sie später in ihrem Büro mit den

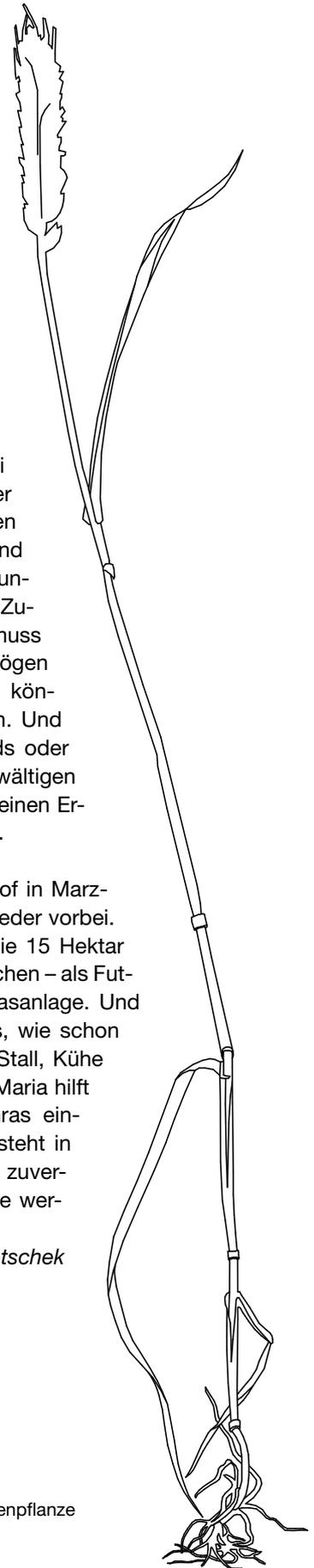
Daten aus den Feldversuchen vergleichen. „Wenn ich herausfinden würde, dass eine Kreuzung, die auf dem Feld besonders früh blüht, eine bestimmte Gensequenz hat, die sich im Vergleich von den anderen Sorten unterscheidet, das wäre toll!“ sagt sie und lächelt. „Dann wüssten wir, wo die genetische Information für eine frühe Blüte liegen könnte!“

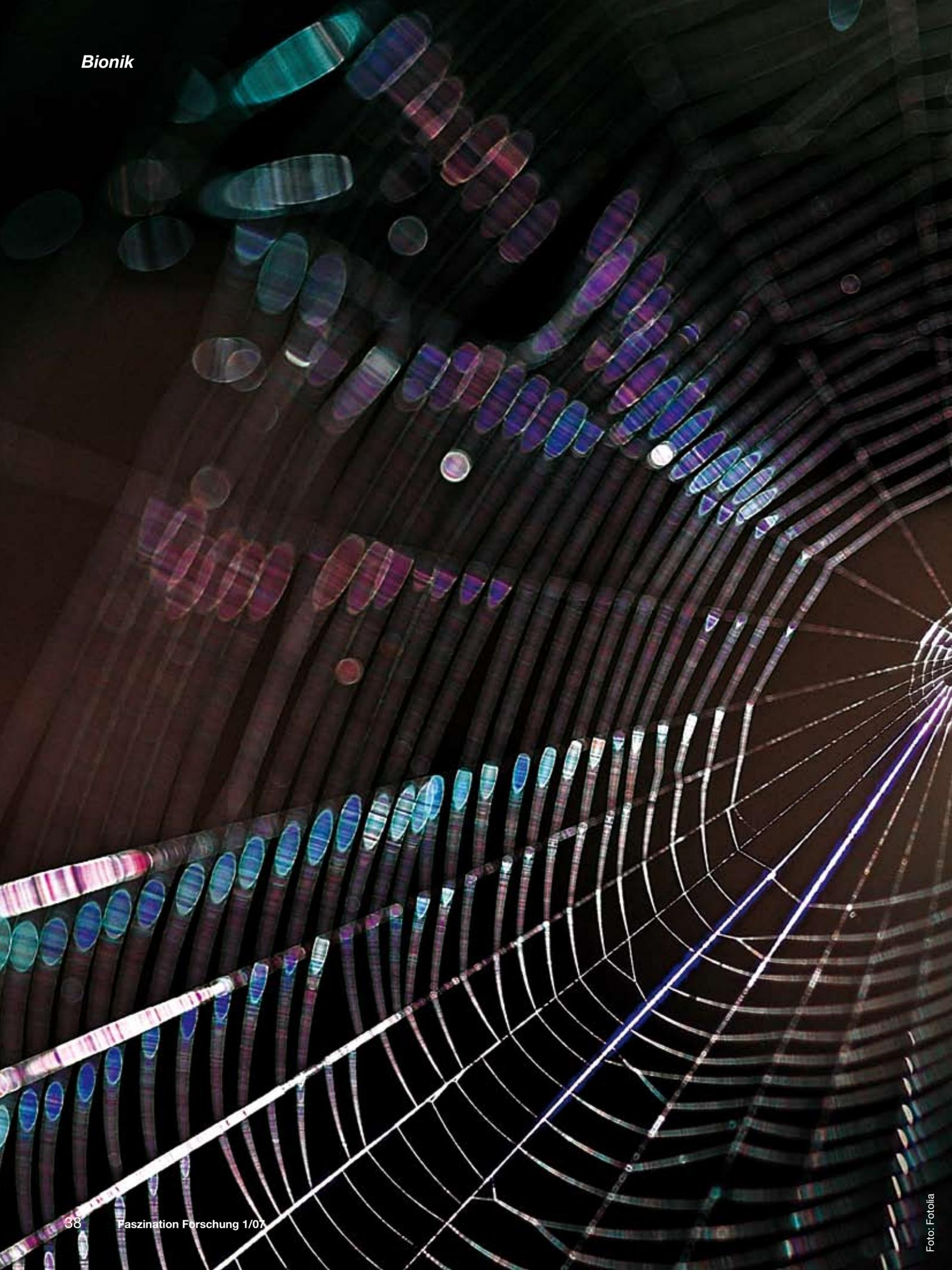
Doch bis dahin ist es noch ein weiter Weg. Die nächsten zwei Jahre wird Antje Kunert weiter Ähren befruchten, die Pflanzen im Gewächshaus beobachten und gießen, die DNA am Bildschirm untersuchen und hoffen, auf einen Zusammenhang zu stoßen. „Man muss als Forscher Durchhaltevermögen haben und gut allein arbeiten können“, sagt die Wissenschaftlerin. Und auch mal Phasen des Stillstands oder die Sorge vor Misserfolgen bewältigen können. Denn eine Garantie für einen Erfolg in der Forschung gibt es nie.

Bei den Grandls auf dem Riedhof in Marzling ist die Nachmittagsruhe wieder vorbei. Albert Grandl will heute noch die 15 Hektar Weide fertig mähen und Heu machen – als Futter für die Rinder und die Biogasanlage. Und um fünf Uhr nachmittags geht's, wie schon morgens, zwei Stunden in den Stall, Kühe melken und füttern. Seine Frau Maria hilft ihm. Heute Abend wird das Gras eingeholt sein; der Winterweizen steht in voller Kraft. Albert Grandl ist zuversichtlich. Es wird eine gute Ernte werden – wenn es nicht regnet.

Julia Nemetschek

Ausgewachsene Weizenpflanze







Die Hightech- Spinnerei

**Fünfmal zugfester als Stahl.
Dreimal druckfester als Eichenholz.
Ein Geflecht daraus hält ein ganzes Flugzeug fest:
Wie TUM-Forscher Spinnenseide machen**

Link

www.fiberlab.de



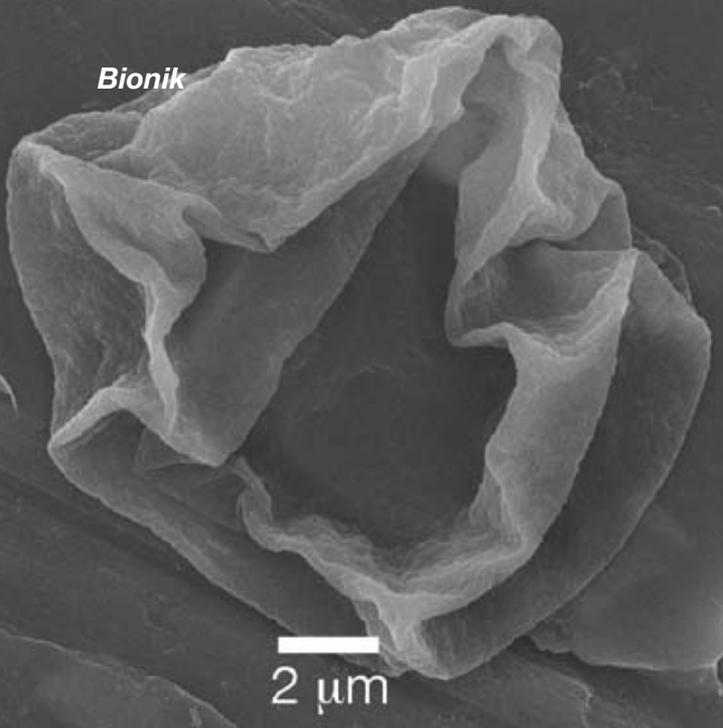
Thomas Scheibel stellt mit seiner Forschungsgruppe Fiberlab an der TU München künstliche Spinnenseide her. Von dem Biomaterial verspricht sich die Industrie seit langem Wunderdinge. Doch für kommerzielle Anwendungen gab es bislang nicht genug von dem Stoff. Das ändert sich jetzt

Thomas Scheibel ist einer der erfolgreichsten Wissenschaftler auf dem Gebiet der Proteinfasern. Er und seine Kollegen lernen von der Natur, entschlüsseln gleichsam deren Erfindungen und setzen sie in technische Anwendungen um. Zu Scheibels Metier gehören Spinnen, genauer gesagt: die Seide, die sie produzieren. Es ist ein ganz besonderer Stoff – zugleich fester als Stahl und elastischer als Gummi. Nur so kann ein Spinnennetz die Wucht abfangen, mit der etwa ein Käfer im Flug aufprallt. Spinnenseide ist leicht und wasserfest, kann aber auch viel Wasser aufnehmen, ähnlich wie Wolle. Sie widersteht mikrobiologischen Angriffen und ist doch biologisch abbaubar. Mit diesen Eigenschaften ist der Spinnenfaden jeder Hightechfaser überlegen, die sich Menschen bisher ausgedacht haben. Stoffe wie Nylon oder Kevlar sind entweder stabil oder elastisch und in der Herstellung alles andere als umweltfreundlich.

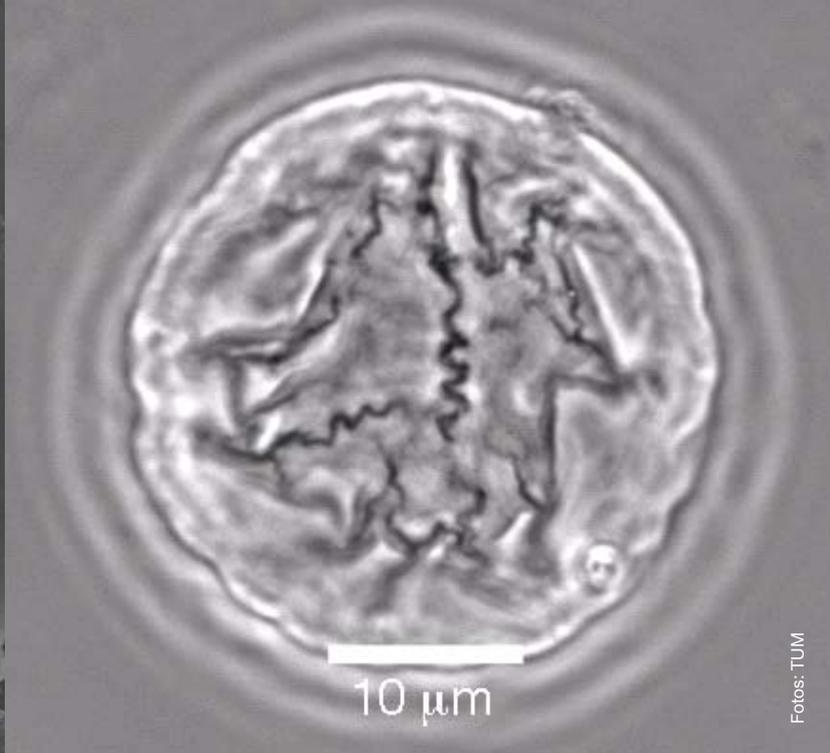
„Wir machen's, weil es kein anderer kann!“

Kein Wunder also, dass die einzigartige Naturfaser Forschung und Industrie keine Ruhe lässt. Man träumt davon, aus ihr die Stoffe der Zukunft zu weben: feuerfeste Kleidung, kugelsichere Westen, Fallschirmschnüre. Gelingt es, den Baustoff in großen Mengen herzustellen, sind diese und viele weitere Anwendungen denkbar. Eine Herausforderung nach dem Geschmack von Scheibel. Danach gefragt, warum er sich in den Kopf gesetzt hat, synthetische Spinnenseide herzustellen ▶

Die künstlich hergestellte Spinnenseide liegt nach der Produktion in Pulverform vor. Um den begehrten Seidenfaden oder andere Formen aus Seide zu erhalten, sind weitere Schritte notwendig



Elektronenmikroskopische Aufnahme einer getrockneten leeren Mikrokapsel aus Spinnenseide

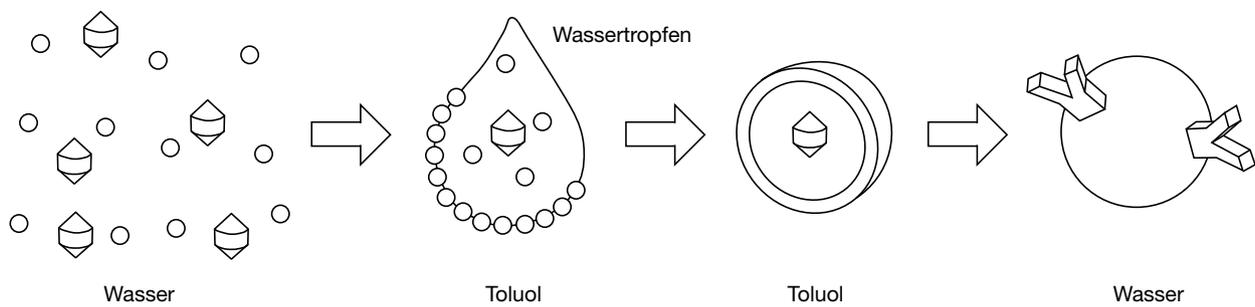


Elektronenmikroskopisches Bild einer gelösten Mikrokapsel: Die Kapseloberfläche verhält sich wie ein hauchdünner Seidenfilm

Fotos: TUM

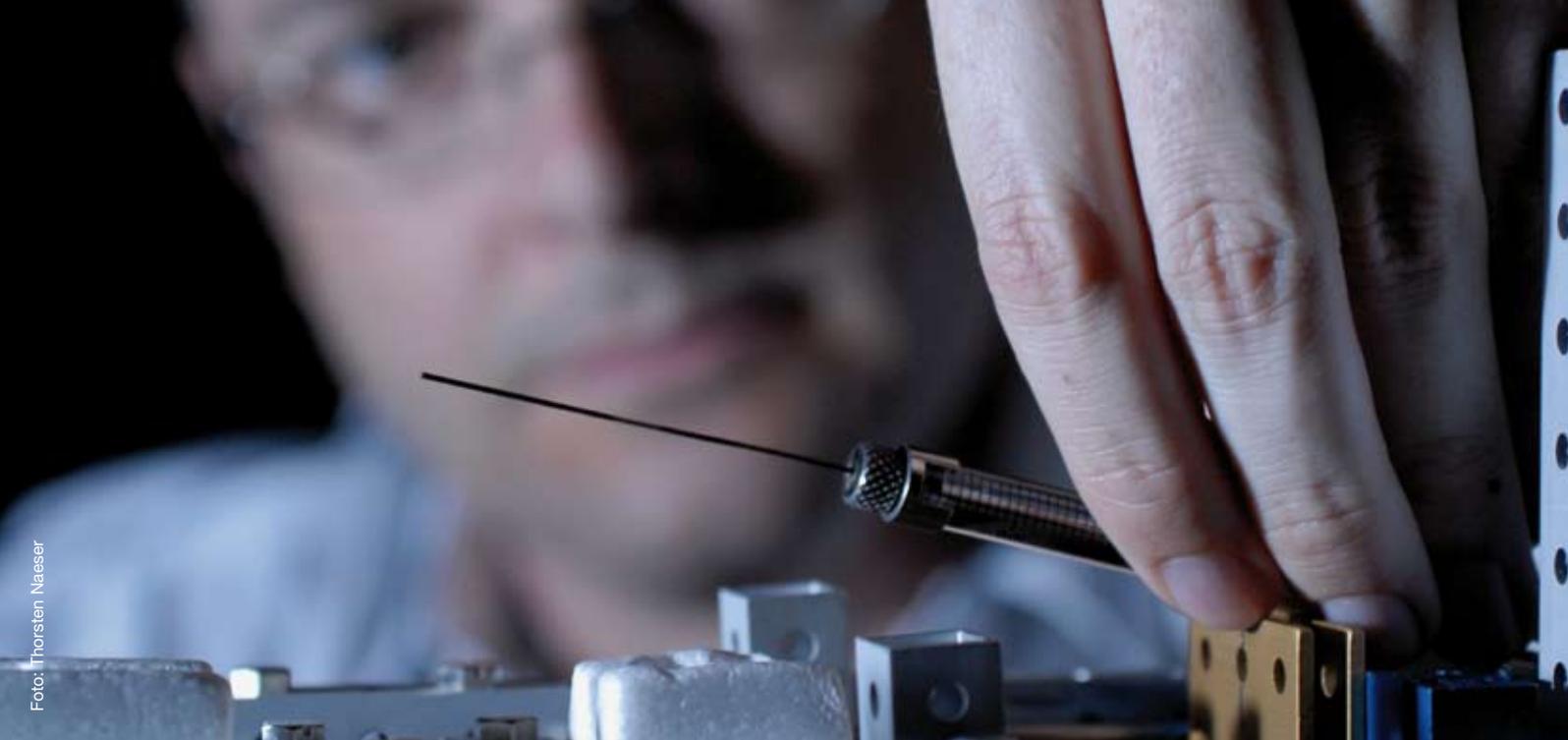
len, sagt er knapp: „Weil es kein anderer kann.“ Die Süddeutsche Zeitung nannte den 38-jährigen gebürtigen Regensburger den „Spinn-Doktor“ und verglich ihn mit Spider-Man – dem einzigen Menschen außer ihm, der Spinnenfäden herzustellen vermag. Scheibel teilt sich mit seinem Team ein bescheidenes Büro auf dem Campus der TU München in Garching. An der Wand hängt ein Eishockeytrikot, auf dem ein großes Spinnennetz prangt. „Das sind die Spiders Regensburg. Die spielen,

glaube ich, in der fünften Liga“, sagt Scheibel. Er selbst gehört zur Weltspitze: Bereits im Forscherparadies USA angekommen, nahm er 2001 einen Ruf aus der Heimat an und wechselte von der University of Chicago an die TU München. „Ich will mit Spinnenseide arbeiten, habe ich damals gesagt, und bin damit bei den Kollegen auf eine Mischung aus Begeisterung und Skepsis gestoßen“, erzählt er. „Gemeinsam mit einem Doktoranden habe ich im Fiberlab angefangen. Inzwischen haben wir



○	Spinnenseide	⬡	Wirkstoff	Y	z.B. Antikörper
<p>Die Spinnenseidenproteine werden gemeinsam mit Wirkstoffmolekülen in Wasser gelöst. Werden nun Tropfen einer solchen Lösung in ein organisches Lösungsmittel wie z. B. Toluol gegeben, bildet sich an der Phasengrenze zwischen den beiden Lösungsmitteln umgehend ein dünner Film aus Spinnenseide. Anschließend kann die nun geschlossene Mikrokapsel wieder in ein</p>			<p>wässriges Milieu gegeben werden, denn die Kapsel ist jetzt stabil und die Seidenproteine lösen sich nicht wieder auf. In weiteren Verarbeitungsschritten kann die Kapseloberfläche mit verschiedenen Antikörpern oder Signalmolekülen verbunden werden, die einen gerichteten Transport des verkapselten Wirkstoffs an den gewünschten Ort ermöglichen.</p>		

Grafik: edlundsepp nach Vorgaben TUM



Mit dem an der TU München entwickelten Spinnapparat-Prototyp können meterlange Seidenfäden gesponnen werden. Er verarbeitet das Material, das sich nach einer Gefriertrocknung in Pulverform aufbewahren lässt und zur Verarbeitung aufgelöst werden kann

elf Patentanmeldungen und genauso viele Mitarbeiter.“ Weg von der Grundlagenforschung im Elfenbeinturm, strikt anwendungsorientiert und industrienah arbeiten – das ist die Maxime seines Teams. Seit seine Erfolge Schlagzeilen machen, wird Scheibels Gruppe mit Anfragen aus der Wirtschaft überhäuft. Wenn er nicht gerade um die Welt reist, um seine bahnbrechenden Ideen vorzustellen, sitzt er in dem Garchingener Büro fast Rücken an Rücken mit einem seiner Postdocs Lin Römer.

Bakterien ersetzen Spinnen

Der Biochemiker ist inzwischen auch so etwas wie Scheibels Pressesprecher. Sein eigentlicher Job ist es aber, über die mit der TU München geplante Ausgründung AMSilk die Spinnenseidentechnologie in Produkte umzusetzen, während Scheibel die Technologie weiterentwickelt. Römer sagt: „Wir sind in der komfortablen Situation, dass wir uns von Industrieprodukten inspirieren lassen können.“ Angefangen hat alles mit dem künstlichen Spinnenfäden.

Spinnen sind Kannibalen, also für die Haltung in größeren Gruppen ungeeignet. Außerdem müsste man schon sehr viele Spinnen haben, um für den Menschen verwertbare Mengen ihrer Seide zu gewinnen. Es bleibt nur eins: den Stoff künstlich herzustellen. Scheibel untersuchte das Erbgut unserer heimischen Gartenkreuzspinne und das der mittelamerikanischen Goldenen Radnetzspinne und lüftete so 2001 das Geheimnis wichtiger Seidenbausteine. Dem Fiberlab ge-

Bionik	Definition
<p>Bioniker lernen von der Natur. Die Forscher an der Grenzlinie zwischen Technik und Biologie wollen mit gezieltem Design erreichen, wozu die Evolution Jahrmillionen benötigte. Griff die Bionik bisher lediglich einzelne Phänomene aus der Natur heraus und ahmte sie technisch nach, geht es heute vor allem darum, die Natur zu verstehen, ihre „Erfindungen“ zu entschlüsseln und in technische Anwendungen umzusetzen. Dieser Ansatz wird Biomimetik genannt.</p>	

lang es, aus den entschlüsselten Grundbausteinen der Seidenproteine Gensequenzen zu kombinieren, die sich in Kolibakterien einpflanzen lassen. Als weltweit erster Wissenschaftler kann Scheibel damit Spinnenseide in größeren Mengen künstlich herstellen. Ähnlich der Insulingewinnung lässt sich nun mit Bakterien eine Produktionslinie aufbauen. „Die Kolibakterien sind leicht zu kultivieren und lassen sich mit verschiedenen Seidengenen ausstatten, je nach den gewünschten Eigenschaften des Endprodukts“, sagt Scheibel.

Ein Gramm in zwei Tagen

Zwei Liter der Bakterien erzeugen in zwei Tagen ein Gramm Seidenproteine. Die Seidenproteine werden zur Weiterverarbeitung von den übrigen Bestandteilen der Bakterien getrennt. Das Material lässt sich nach einer Gefriertrocknung in Pulverform aufbewahren und kann bei Bedarf wieder aufgelöst werden. Die Forscher ▶



Ein Wunderwerk der Natur: Die einzigartigen Eigenschaften der Spinnenseide ermöglichen es, Kunstwerke von ungeahnter Zartheit und gleichzeitig Robustheit herzustellen. Noch blicken Konstrukteure neidisch auf die physikalischen Fähigkeiten, die Spinnennetze bieten

haben im Fiberlab einen Spinnapparat gebaut, mit dem aus dieser Seidenlösung meterlange Fäden hergestellt werden können. Für seine Leistungen bekam Scheibel zahlreiche Auszeichnungen und Preise, unter anderem 2006 den Innovations-Anerkennungspreis des Bayerischen Ministerpräsidenten. Kürzlich gehörte Scheibel zu den Siegern des hochdotierten Ideenwettbewerbs „Bionik – Innovationen aus der Natur“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

Arzneikapseln aus Spinnenseide

Auch Scheibels jüngstes Experiment ist ein Erfolg. Gemeinsam mit Biophysikern um Professor Andreas Bausch ist es an der TU München gelungen, Spinnenseidenproteine als Material zur Verkapselung von Wirkstoffen einzusetzen. Scheibel erklärt: „Einkapselungsprozesse nutzt man, wenn zum Beispiel Medikamente im menschlichen Körper präzise an ein Ziel gesteuert werden sollen. Die Spinnenseidenproteine sind hervorragend als Schutzhülle geeignet, denn sie sind immunologisch unsichtbar, lösen also im Körper keine Abwehrreaktionen aus.“

Das von den Münchener Forschern entdeckte Prinzip ist einfach: Die Proteinmoleküle werden mit dem zu verpackenden Wirkstoff in einem Wassertröpfchen gelöst. Dann emulgiert man die Tröpfchen, zum Beispiel in Toluol. Zwischen den beiden Phasen entsteht eine Grenzfläche. Weil sie sowohl in Wasser als auch in Toluol löslich sind, wandern die Seidenproteine an diese Phasengrenze und bilden dort einen hauchdünnen Film, nur wenige Nanometer dick. Fertig ist die Mikrokapsel. Römer sagt: „Die gesamte Reaktionszeit beträgt nur wenige Sekunden. Aus Spinnenseidenproteinen bestehende Mikrokapseln sind hochelastisch und können kaum osmotisch schwellen. So platzen die Kügelchen nicht an ungewollter Stelle mitten im Körper und setzen ihren Wirkstoff frei.“ Ihr Ziel finden die Kapseln, indem

an sie Signalmoleküle, etwa Antikörper, angebunden werden, die zum Beispiel Krebszellen erkennen. Das Freisetzen der transportierten Substanz erfolgt durch natürliche Enzyme, die die Schutzhülle abbauen.

Viele Möglichkeiten mit dem Stoff der Zukunft

Die biomimetischen Seidenmaterialien aus dem Fiberlab eröffnen viele Einsatzmöglichkeiten – nicht nur zum Medikamententransport, sondern auch für den Zusatz von Vitaminen, Geschmacksstoffen und Düften in Lebensmitteln. Neben den Spinnenfäden und Mikrokapseln können die Biotechniker der TU München auch weitere Zustandsformen erzeugen, etwa transparente Folien für Oberflächenbeschichtungen, die nur wenige hundert Nanometer dick sind, oder Hydrogele für die Kosmetik. Für die Medizintechnik bieten sich unter anderem Membranen zur sauerstoffdurchlässigen Wundabdeckung und besonders kleine chirurgische Fäden an, die bei Augenoperationen und in der Neurochirurgie benötigt werden.

Bevor die Produkte aus Scheibels Labor einsatzreif und kommerziell nutzbar sind, braucht es noch weitere Forschungsarbeit. Auch bis tatsächlich Wirkstoffe in Mikrokapseln durch unsere Körper fließen, wird noch einige Zeit vergehen, sagen die Forscher aus dem Fiberlab – nicht zuletzt wegen der langwierigen Zulassungsverfahren für medizintechnische Produkte. Die Biotechniker haben jedenfalls viel von der Natur gelernt. Inzwischen sind sie beinahe so gute Spinner wie die Spinnen selbst. Doch anders als ihre tierischen Vorbilder sind sie Teamarbeiter. Scheibel betont: „Unsere Erfolge beruhen auf der Zusammenarbeit zwischen Biochemikern, Physikern, Chemikern, Biologen und Ingenieuren. Wir müssen bei unserer Arbeit den Mut haben, uns zwischen den klassischen Wissenschaftsfeldern zu bewegen, über den Tellerrand des eigenen Fachs hinauszuschauen.“

Karsten Werth

Plastik vom Acker: „Schlüssel für das 21. Jahrhundert“

**Chemie aus bayerischen Pflanzen statt aus arabischem Erdöl?
Neue Kunststoffe aus nachwachsendem Rohstoff?
Das soll ein neues Exzellenzcluster der TU München möglich machen**

In diesem Cluster wird unter dem Namen IBP – die Abkürzung für „Industrielle Prozesse mit Biogenen Building Blocks und Performance Proteinen“ – daran gearbeitet, Biomasse mit Hilfe eines neuen Verfahrens industriell zu nutzen. Durch die Behandlung mit speziellen Enzymen sollen sortenreine Grundstoffe gewonnen werden, die möglichst vollständig zu weiteren Produkten verarbeitet werden können. Die Vorteile dieses Konzepts sind günstigere Fertigungsverfahren sowie die Möglichkeit, Reststoffe anschließend zu Energie umzuwandeln. Eingesetzt werden zudem nur Rohstoffe, die nicht in Anbaukonkurrenz zu Nahrungsmitteln stehen.

Das Ziel der Forschung: Sie soll den Beweis erbringen, dass durch ein Bioraffinerie-Konzept der dritten Generation eine wirtschaftliche Herstellung bislang aus Erdöl produzierter Chemikalien sowie neuer Chemiestoffe aus biologischem Material möglich ist.

Bayern ist für das neue Cluster-Projekt gut vorbereitet: So werden etwa das Kompetenzzentrum für Biogene Rohstoffe in Straubing und das Bioingenieurwesen der TUM beteiligt sein. Die TUM verfügt zudem mit starken Kräften der Chemie, Biotechnologie und Verfahrenstechnik über die Voraussetzungen zur Formierung des fakultätsübergreifenden Zentrums für weiße Biotechnologie, das unter Führung der Professoren Dirk Weuster-Botz in Garching und Arne Skerra in Weihenstephan im Entstehen begriffen ist.



Groß und klein: Bevor biotechnologische Prozesse im industriellen Maßstab eingeführt werden können (Bild oben), ist die Vorarbeit im Millimetermaßstab nötig – wie hier an der TUM in Garching

Partner aus Politik und Industrie ziehen mit: Im neuen Förderprogramm „BioIndustrie 2021“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) wurden dem Cluster für die erste Projektphase fünf Millionen Euro bewilligt. Das Projekt wird von der BioM Biotech Cluster Development GmbH in Martinsried koordiniert. TUM-Präsident Prof. Wolfgang A. Herrmann: „Von allen führenden Unternehmen der Welt wird diese weiße Biotechnologie als eine Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert gesehen.“ □

„Weiße Biotechnologie“: So wird der Wald zur Erdölquelle

Für Dr. Hans Seidl, den Vorsitzenden der Bayerischen Chemieverbände, ist die Sache klar: Die sogenannte weiße Biotechnologie ist für ihn der „wichtigste Innovationsmotor der chemischen Industrie“. Denn das neue Forschungscluster IBP entwickelt mit Hilfe moderner Biotechnologie neue Wege, um die heutige Petrochemie, die auf Erdöl als Rohstoff beruht, durch eine auf biologischen Prozessen aufgebaute Chemie aus nachwachsenden Rohstoffen zu ergänzen und teilweise ganz zu ersetzen. Einer der wichtigsten Erfolgsfaktoren ist für Seidl dabei der enge Schulterschluss zwischen der interdisziplinären akademischen Forschung auf der

einen und der Industrie auf der anderen Seite. Immerhin hat schon im Jahr 2006 die Beratungsgesellschaft Boston Consulting Group der deutschen chemischen Industrie bestätigt, in der weißen Biotechnologie „weltweit führend“ zu sein.

Mit der Gründung des Bayerischen Kompetenzzentrums für weiße Biotechnologie auf dem Forschungscampus Garching werden die Forschungen von Hochschule und Industrie aufeinander abgestimmt; ein neuer spezieller Studiengang des Bioingenieurwesens macht das Thema zudem für exzellente Nachwuchswissenschaftler interessant.

Links

www.wzw.tum.de/bc
www.pieris-ag.com

Ausschnitt der im Labor von Prof. Skerra erst kürzlich aufgeklärten Raumstruktur des Proteins Langerin im Komplex mit einem verzweigten Kohlenhydrat, wie es unter anderem auf der Oberfläche des HI-Virus vorkommt. Langerin ist ein essenzieller Rezeptor auf der Oberfläche der Langerhans'schen Zellen unseres Immunsystems, welcher nach neuen Erkenntnissen in den menschlichen Schleimhäuten eine hemmende Wirkung auf das HI-Virus ausübt

Protein-Design

Anticaline, eine neue Klasse maßgeschneiderter Bindungsproteine, können ähnlich wie Antikörper krankheitsrelevante biomolekulare Strukturen erkennen und eröffnen vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten in der Medizin.

Eine aufsehenerregende Entdeckung gelang 1975 den beiden Immunologen César Milstein und Georges Köhler am Laboratory for Molecular Biology (LMB) des Medical Research Council (MRC) in Cambridge: Sie stellten erstmals aus Mäusezellen sogenannte monoklonale Antikörper her. Antikörper sind Proteine des Immunsystems von Säugetieren, die hoch spezifisch an Eindringlinge wie Bakterien und körperfremde Giftstoffe binden und diese bekämpfen. Die neue Technik erlaubte es jetzt, Antikörper mit vorbestimmten Bindungseigenschaften in praktisch beliebiger Menge und vor allem einheitlicher Form herzustellen. Neun Jahre später erhielten die Forscher für ihre Entdeckung den Nobelpreis.

Seither werden monoklonale Antikörper in der biowissenschaftlichen Forschung und der medizinischen Diagnostik eingesetzt, beispielsweise um Erreger oder auch bestimmte Hormone im Blut von Patienten nachzuweisen. Darüber hinaus sind gentechnisch produzierte Antikörper mittlerweile zu vielversprechenden Werkzeugen der Tumorthherapie entwickelt worden: Sie binden spezifisch an die Oberfläche von Krebszellen und markieren diese zur Bekämpfung durch das Immunsystem. Zudem können sie Zellgifte dorthin bringen oder sie blockieren Signale, die das Krebswachstum fördern. 1990 kam ▶



Foto: Rainer Lehmann

Professor Arne Skerra, Leiter des Lehrstuhls für Biologische Chemie und Geschäftsführer des Departments für Biowissenschaftliche Grundlagen am Wissenschaftszentrum Weihenstephan

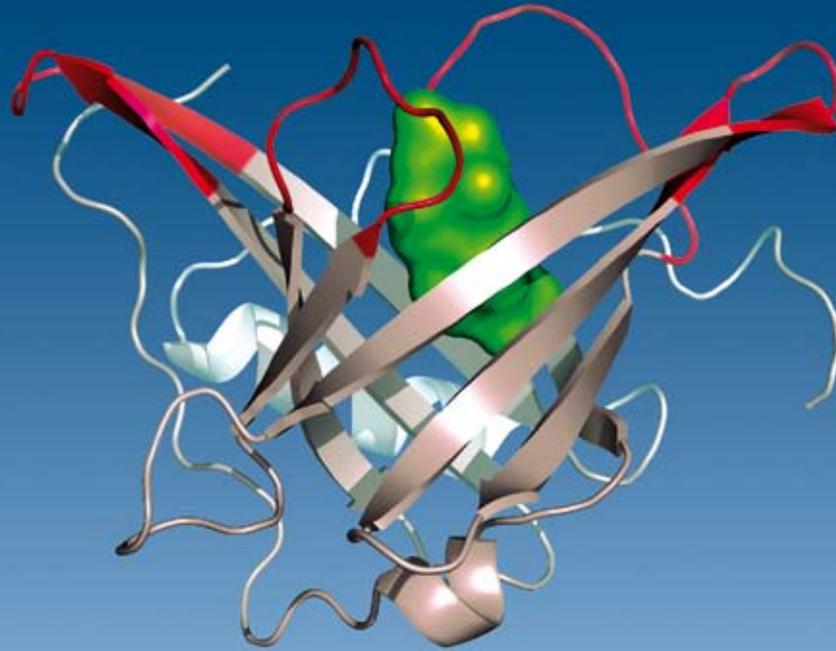
ein junger Postdoc in das MRC-Labor von Milstein, der eine brandneue Methode in seinem wissenschaftlichen Gepäck hatte: Ihm war es in seiner Doktorarbeit gelungen, Antikörper in leicht zu vermehrenden Laborbakterien herzustellen und damit eine vorteilhafte Alternative zu den anspruchsvollen Mäusezellkulturen zu schaffen.

Die Karriere begann im Keller

Arne Skerra hatte aus langjähriger Begeisterung – „Als Schüler habe ich schon angefangen, im Keller zu experimentieren“ – Chemie studiert, war jedoch Mitte der 80er-Jahre von der biotechnologischen Aufbruchstimmung der Wissenschaft in Deutschland erfasst worden und hatte sich am neu gegründeten Münchener Genzentrum in seiner Doktorarbeit der Erforschung von Antikörpern zugewandt. „Das Jahr in Cambridge hat mich stark geprägt“, erinnert sich Skerra. Denn das LMB war ein Ort von historischer Bedeutung: Francis Crick und James Watson hatten hier die Doppelhelix-Struktur der DNS entschlüsselt, Max Perutz ermittelte aus dem Beugungsmuster von Röntgenstrahlen den molekularen Aufbau des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin. Zwar waren 1990 diese Pionierjahre vorbei, doch der Geist jener Zeit war noch lebendig, und die Kultur

des wissenschaftlichen Streitgesprächs wurde nach wie vor gepflegt. „Das ist in England ganz unkonventionell: Man trifft die Nobelpreisträger in den regelmäßigen Tee-pausen“, erklärt Skerra. „Dort wird intensiv diskutiert, und so entstehen die neuen Ideen – weniger dadurch, dass ein einsamer Mensch irgendwo an einem Apparat sitzt und etwas misst.“ Auch Watson und Crick hatten das Modell der Doppelhelix mehr durch intensives Nachdenken und auf der Basis nur weniger experimenteller Daten gefunden.

Zurück in Deutschland wählte Skerra als Gruppenleiter am Frankfurter Max-Planck-Institut für Biophysik ein neues Forschungsthema, das sich bald als noch spannender herausstellen sollte als die Antikörper: die Lipocalin-Proteinfamilie. Das sind kelchförmige (gr. Calyx) Proteine, die schlecht wasserlösliche (d. h. lipophile) oder chemisch empfindliche Substanzen wie Vitamin A oder Hormone durch das Blut zu den Organen transportieren, wo sie gebraucht werden. Ein anderes Lipocalin, das wortwörtlich mit der Tränenflüssigkeit vergossen wird, nimmt bioverfügbares Eisen in seiner kelchförmigen Bindungstasche auf, ohne das schädliche Bakterien und Pilze sich nicht vermehren können.



Molekülstruktur des menschlichen Apolipoproteins D, die im Labor von Prof. Skerra ermittelt wurde

Abgesehen von seiner wichtigen Rolle für den Lipid- und Hormonstoffwechsel (hier gezeigt mit dem natürlichen Liganden Progesteron, grün), eignet sich dieses Lipocalin zur Konstruktion von „Anticalinen“. Indem die strukturell flexiblen Peptidschleifen am Eingang zur Bindungstasche (dunkelrot) in ihrer Aminosäuresequenz variiert werden, entstehen anders geformte Bindungsstellen für neue Zielstrukturen

Wie Schloss und Schlüssel zusammenpassen

Als Skerra die Struktur der Lipocaline untersuchte, machte er eine Entdeckung: Vier Schleifen des Proteins, die am offenen Ende der Bindungstasche angebracht sind und mit denen es an sein Zielmolekül bindet, sehen der Erkennungsregion von Antikörpern sehr ähnlich. Sollten sich, überlegte Skerra, Lipocaline nicht gentechnisch so verändern lassen, dass sie auf praktisch beliebige Strukturen so passen wie ein Schloss auf einen Schlüssel? Lipocaline könnten in der Medizin ähnliche therapeutische Funktionen wie Antikörper ausüben. Sie würden mit nur einem Achtel von deren Größe jedoch viel leichter in die Zwischenräume von Zellen dringen und besser wirken können. Außerdem ließen sich die Lipocaline wegen ihres vergleichsweise simplen Aufbaus mit viel höherer Ausbeute in Laborbakterien herstellen und man könnte sie durch Fusion mit anderen Polypeptidketten (z. B. von Enzymen) leicht mit zusätzlichen hilfreichen Funktionen ausstatten.

An der TU Darmstadt – Skerra war dort mittlerweile Professor für Proteinchemie – begann der Biochemiker erstmals, ein Lipocalin durch Protein-Design zu verändern. Dieses stammte aus dem Großen Kohlweißling, einem

Schmetterling, der wissenschaftlich als *Pieris brassicae* bezeichnet wird. Vor den Experimenten stand die Diskussion: „Wir haben erst einmal überlegt, welche einzelnen Aminosäuren in den Schleifen wohl für die genaue Gestalt der Bindungstasche eine Rolle spielen könnten. Denn schließlich sollte die Kelchstruktur an sich und damit die korrekte Faltung des Proteins nicht verändert werden“, erläutert der Wissenschaftler. Der Pilotversuch gelang, und das gentechnisch veränderte *Pieris*-Lipocalin nahm nun ein vorgegebenes fluoreszierendes Farbmolekül spezifisch in seiner Bindungstasche auf. Skerra: „Das war absolut spannend. Meinen Mitarbeitern und mir war klar: Wir stehen am Anfang eines neuen Forschungsgebiets!“

Neue Hoffnung für die Krebsbehandlung

Seit seinem Ruf an die TU München als Ordinarius für Biologische Chemie hat Skerra die Eigenschaften der maßgeschneiderten Lipocaline, die er in Anlehnung an die Antikörper als „Anticaline“ bezeichnet hat, weiter verbessert: Mit Hilfe von Röntgenstrahlen bestimmt er deren Struktur und kann sie sich dann im dreidimensionalen Computerbild ansehen. „Jetzt lernen wir viel schneller, was wir wie verändern müssen, um die ▶

gewünschte Funktion zu erreichen“, meint Skerra. Denn trotz aller Erfahrung lässt sich die optimale Form der Bindungstaschen noch nicht exakt vorhersagen. Und die Anticaline sollen heute nicht mehr bloß an Farbstoffe passen, sondern unter anderem an Zielstrukturen, die beim Tumorwachstum eine Rolle spielen. Für die medizinischen Einsatzgebiete werden inzwischen vor allem die menschlichen Lipocalin-Proteine herangezogen, deren Molekülstrukturen Skerra derzeit systematisch analysiert. „Ich wollte diese Grundkenntnisse bis zur Anwendungsreife entwickeln“, sagt Skerra. Da das im Rahmen der universitären Forschung nicht allein möglich ist, gründete er die Pieris AG. Seinen Namen hat das Biotech-Start-up-Unternehmen vom Schmetterling des ersten Experiments erhalten.

Der Name wurde zum Glücksbringer. Gerade noch vor dem Zusammenbruch des privaten Risikokapitalmarktes für junge Unternehmen glückte die Finanzierung. Heute beschäftigt die Pieris Aktiengesellschaft ca. 30 Mitarbeiter und hat eine Reihe vielversprechender Anticalin-Produktkandidaten gegen Krebs und entzündliche Krankheiten in der Entwicklung. Eines dieser neuen Anticaline zum Beispiel fängt das Signalmolekül VEGF ein, das wachsende Tumoren aussenden, um Anschluss an das Blutgefäßsystem des Körpers zu erhalten. Ers-

te Untersuchungen an tumortragenden Ratten haben gezeigt, dass der Wirkstoff das Krebswachstum noch besser als ein bereits klinisch zugelassener Antikörper unterdrückt.

Während es kommerziell bei Pieris interessant wird, richtet Skerra sein Augenmerk schon auf neue Ziele: „Die Frage ist: Will man sein wissenschaftliches Leben damit bestreiten, eine Sache bis ins allerletzte Detail zu erforschen, oder versucht man mit der Avantgarde wieder Neuland zu betreten?“ So versucht er in jüngster Zeit, Kontakte mit den Pflanzenforschern zu intensivieren, die am TUM-Standort Weihenstephan in direkter Nachbarschaft arbeiten. „Ich könnte mir gut vorstellen, dass wir in Zukunft in diese Richtung gehen werden, da die Proteine der Pflanzen noch weit weniger untersucht sind als bei Tieren oder Bakterien“, meint der Biochemiker.

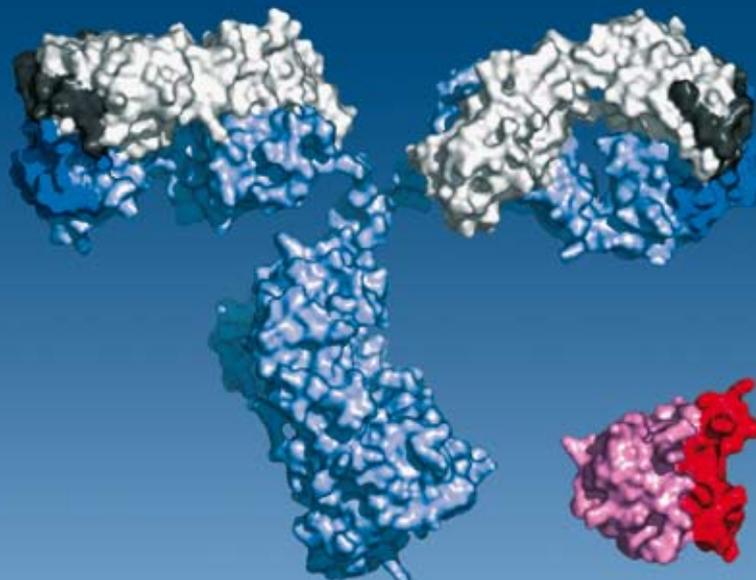
Forschung braucht Zeit zum Nachdenken

Dafür wünscht sich Arne Skerra vor allem etwas mehr Zeit neben seinen Verpflichtungen durch Lehre und Verwaltung. Denn sein Erfolgsrezept lautet: „Gründliche Recherche und intensives Nachdenken und Diskutieren sind die Voraussetzung, bevor es an das Experimentieren geht.“ Ganz in der Tradition von Cambridge.

Markus Bernards

Der Antikörper mit seiner Y-artigen Struktur ist links dargestellt. Seine leichten und schweren Polypeptidketten sind hellgrau bzw. bläulich wiedergegeben, wobei die zwei identischen Antigen-Bindungsstellen oben links und rechts in dunkleren Farben zu sehen sind. Das kleinere und einfachere aufgebaute Lipocalin ist (im gleichen Maßstab) unten rechts abgebildet. Seine Liganden-Bindungsstelle ist rot gefärbt

Vergleich zwischen einem Antikörper (Immunglobulin) und einem Lipocalin/Anticalin



Graphik: TUM



Foto: Ludwig Bittes

2.650 Meter hoch liegt das Schneefernerhaus unter dem Gipfel der Zugspitze. Spitze ist hier auch die Forschung zum Klimawandel

Eine neue Kooperation erforscht den Klimawandel: **Auf zu neuen Höhen**

Das Klima beschäftigt endlich auch die Politik – die Wissenschaftler an der TU München aber schon bei weitem länger. Angesichts der großen gesellschaftlichen Bedeutung des Themas mehr als zuvor. Denn jetzt verstärken TUM-Forscher in Garmisch-Partenkirchen und am Wissenschaftszentrum Weihenstephan nochmals die Anstrengungen in der Klima- und Atmosphärenforschung, und das an prominentem Platz, mit prominenten Partnern. In Kooperation mit dem Forschungszentrum Karlsruhe hat die TUM zwei renommierte Klimaforscher berufen und damit den neuen Forschungsschwerpunkt Klimawandel ins Leben gerufen.

Das ist im besten Sinne Spitzenforschung mit Hilfe des Freistaates Bayern. Denn die Wissenschaftler nutzen für ihre Untersuchungen auch das 2.650 Meter hoch gelegene Schneefernerhaus auf Deutschlands höchstem Berg, der Zugspitze.

Zum Leiter des Garmischer Institutes Atmosphärische Umweltforschung mit Sitz in Garmisch und zugleich zum Ordinarius der TU München berufen wurde Prof. Dr. Hans Peter E. Schmid, der zehn Jahre lang in den USA forschte und lehrte. Intensiv beschäftigte sich der Forscher unter anderem mit der Frage, welche Rolle Ökosysteme im Kohlenstoff-Haushalt der Erdatmosphäre spielen. Seine Kollegin ist Prof. Dr. Annette Menzel. Sie besetzt nun den Lehrstuhl für Ökologiklimatologie der TU München in Weihenstephan. Sie ist Mit-

autorin des IPCC-Reports über den Klimawandel, (Intergovernmental Panel on Climate Change), der in den letzten Monaten Politik und Öffentlichkeit zum ernstesten Nachdenken über die Zukunft des Weltklimas veranlasst hat. Auch in diesem Projekt arbeiten die Forscher über das eigene Fachgebiet hinaus: Beteiligt ist auch die Fakultät für Medizin der TUM. Die Forscher wollen herausfinden, warum sich das Hochgebirgsklima so günstig auf Entzündungen von Haut und Atemwegen auswirkt. □

Forschungsstation Zugspitze: Die Partner des Projektes

Die Technische Universität München und das Forschungszentrum Karlsruhe sind Kooperationspartner der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus. Es wird zurzeit vom Freistaat Bayern in Form eines „virtuellen Institutes“ zu einem international vernetzten Zentrum für Höhen- und Klimaforschung ausgebaut. Der Standort knapp unter dem Gipfel der Zugspitze, 2.650 Meter hoch gelegen, ist ideal für die Atmosphärenforschung geeignet.

Er vereint derzeit neben den Forschergruppen der TUM auch Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft – explizit des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und des Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit (GSF) – und des Deutschen Wetterdienstes. Die Kooperation verbindet aus der Sicht der TUM „höchste wissenschaftliche Ansprüche mit größter gesellschaftspolitischer Bedeutung“.

Vom Hochhaus

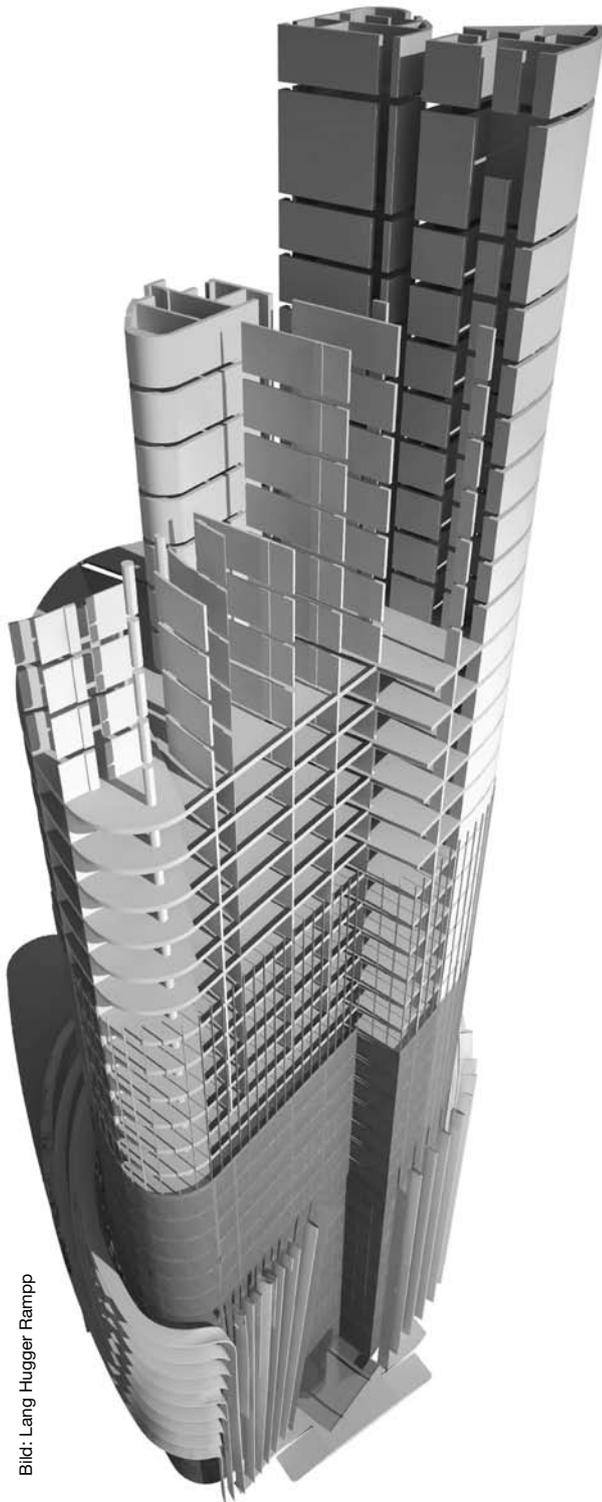


Bild: Lang Hugger Rampp

Bauinformatiker helfen eigentlich Ingenieuren, Schwachstellen ihrer Bauten zu erkennen. Der Lehrstuhl für Bauinformatik an der TUM stößt nun für die Medizin neue Türen auf: Nicht nur Hausbauten, sondern auch Hüftoperationen sollen dank Computersimulationen deutlich präziser werden

Knallrot, tiefblau und dazwischen ein sattes Grün: Ist das wirklich ein Oberschenkelknochen da auf dem Bildschirm? Was im ersten Moment wie eine psychedelische Reise in die Zeit des Flower-Power wirkt, ist eine Spannungsanalyse des menschlichen Beins mit einer Hüftprothese. Die grellen Farben zeigen sogenannte Kraftströme, die im Inneren des Knochens wirken: Rot steht für Belastung, in den blauen Zonen wirkt weniger Druck. Das Bild ist ein Blick in die Zukunft der Medizin – möglich durch interdisziplinär angewandtes Fachwissen aus den Ingenieurwissenschaften.

Probleme schon früh erkennen

Solche bisweilen ungewöhnlichen Fächerkooperationen sind für Professor Ernst Rank von der TUM nichts Besonderes. Der 53-jährige Vizepräsident der TU steht mit seinem Forschungsansatz für fächerübergreifendes Arbeiten. Schon allein sein Lehrstuhl, die Bauinformatik, ist eine Synthese zweier Disziplinen: des Bauingenieurwesens und der Computerwissenschaften. Das Fach soll dazu dienen, den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks am Computer zu simulieren und Probleme, etwa bei der Statik oder beim Energieverbrauch, schon in der Planungsphase zu erkennen und zu beheben. Die Informatik ist eine sehr bewegliche Disziplin, die sich alle zehn Jahre neu erfindet. Rank: „Wir arbei-

Entschichtete Schemadarstellung eines Hochhauses

zum Hüftgelenk

Link

www.inf.bv.tum.de

ten an der TUM heute mit Höchstleistungscomputern, um das vorwegnehmen zu können, was in zehn Jahren in jedem Ingenieurbüro möglich sein wird.“ Im Klartext: Superrechner, die heute einen Tanzsaal füllen, passen in zehn Jahren unter jeden Schreibtisch. Und damit rücken Anwendungen in greifbare Nähe, die früher nur wenigen spezialisierten Rechenzentren vorbehalten waren.

Von dieser Entwicklung profitiert auch das Forscherteam um Rank. Denn Rechenleistung war bisher die Hürde, an der effizientes Arbeiten im Computational Engineering oftmals scheiterte. Der Alltag in vielen Ingenieurbüros ließ sich in drei Kapitel einteilen: Eingabe eines Simulationsszenarios in den Rechner, stundenlanges Warten auf die Ergebnisse – und schließlich die Auswertung und Modellkorrektur. Dann begann das Spiel von neuem. Damit ist nun in absehbarer Zeit Schluss. Heutige Rechnetze und Höchstleistungscomputer sind erstmals so leistungsstark, dass sich die Zeit zwischen Eingabe neuer Daten und der Ausgabe der Ergebnisse selbst bei sehr aufwendigen Berechnungen nur noch in Sekundenbruchteilen misst. Jeder Arbeitsschritt ist nun ineinander verzahnt, die Grenzen zwischen Dateneingabe, Berechnung und Auswertung verschwimmen.

Das verändert nicht nur den Umgang mit dem Computer, sondern erfordert auch neue Programme. Unter dem Stichwort „Computational Steering“ – zu Deutsch: computergesteuertes Arbeiten – entsteht nun eine ▶



Bild: TUM und edlundsepp

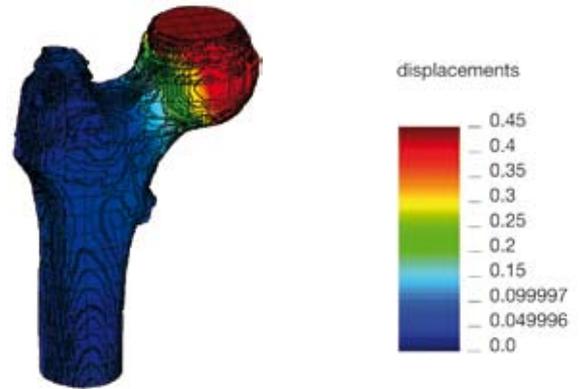
Entschichtete Schemadarstellung eines Knochens

Kräfte, die im Knochen wirken

Für die im Bauwesen beobachteten Kraftwirkungen sind, soweit die Statik und Dynamik der Tragwerke betroffen sind, vorab die **Gravitation** und daneben **Bewegungsänderungen**, welche durch **Wind-, Erdbeben-, Brems- und Fliehkräfte** erzeugt werden, verantwortlich. Die Materialfestigkeiten und Verformungseigenschaften aller metallischen, mineralischen sowie organischen Baustoffe werden durch deren molekularen Aufbau bestimmt.

Jede auf einen Körper einwirkende Kraft erzeugt zwingend eine Gegenkraft (3. Newton'sches Gesetz). Sobald diese Kraft nicht in eine Bewegung umgesetzt werden kann, wirkt die Kraft auf den Körper und beansprucht diesen durch **Druck-, Zug-, Spannungs- oder Torsionskräfte**.

Diese Erkenntnisse sind auf alle Disziplinen, Materialien und Bausteine übertragbar.



Berechnete Verformungen eines Oberschenkelknochens

Generation von Programmen, die Veränderungen an bisweilen sehr komplizierten Modellen sofort sichtbar machen. Diese Möglichkeit will nun das Team um Ernst Rank für ein ganz anderes Forschungsfeld als das Ingenieurwesen ausnutzen – nämlich für das der Medizin. Die Grundidee, die die Forscher leitet, heißt: Eine der Kernaufgaben der Bauinformatik, die Berechnung von Belastungen in Gebäuden, könnte auch bei Operationen an menschlichen Knochen helfen, präziser zu arbeiten.

Erprobung im OP rückt näher

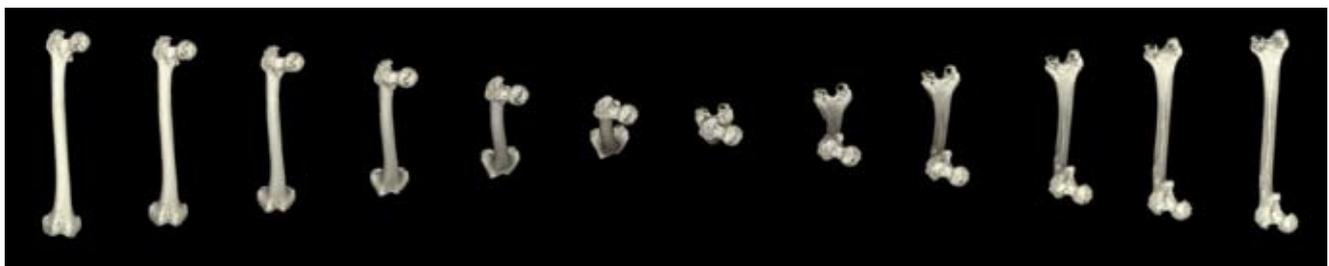
Denn im Grunde ist das menschliche Knochenskelett nichts anderes als ein Baugerüst. Mit dem Alter nutzen sich einige seiner Bauteile stärker ab als andere – etwa Hüftgelenke. Wird nun ein künstliches Gelenk eingesetzt, kann wortwörtlich viel schiefgehen: „Laufen die Kraftströme im Körper falsch, kann sich Knochengewebe zurückbilden“, sagt Rank. „Dann muss nachoperiert werden.“ Mit Ranks neuer Technik können die Leiden für Patienten und die Kosten für Krankenkassen verringert werden. Mit ihrem Wissen aus dem Ingenieurwesen wollen Ernst Rank und seine Forscher eine Methode entwickeln, die anhand von Bildern aus der Computertomographie, kurz CT, schon während der Operation quasi in Echtzeit simuliert, wie der Körper des Patienten auf das neue Hüftgelenk reagieren wird. Dabei

reichen unterschiedliche Grautöne auf dem CT-Bild, um die Belastungsfähigkeit des Knochenmaterials vorherzusagen.

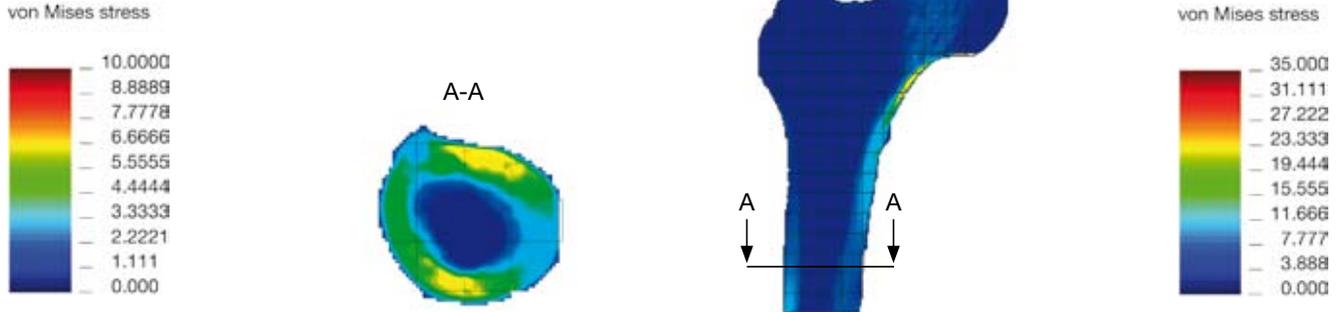
Da Knochen nicht unbedingt ein Fachgebiet der Bauinformatiker von der TUM sind, haben Rank und sein Team für die Realisierung des Projekts Partner in der Medizin gewonnen. Professor Reiner Gradinger vom Klinikum „Rechts der Isar“ in München liefert die medizinische Seite zu: Wie sehen Hüftprothesen aus? Welche Hürden gilt es bei einer Operation zu nehmen? Der Sportorthopäde hat alle Antworten auf medizinische Fragen parat. Zudem soll das Klinikum später das Versuchsfeld für das neue Programm stellen.

Bei der Analyse der Materialeigenschaften von Knochengewebe hingegen greifen die Münchner Wissenschaftler auf Ergebnisse des Biomechanikers Zohar Yoshibash von der Universität Beer Sheva zurück. Der israelische Forscher testet Knochenmaterial auf sein Verhalten unter Belastung – und liefert auf diese Weise wichtige Ergebnisse für die Simulationen am Bildschirm. So wird, einem Puzzle gleich, in enger Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen die Vision vom Computer als idealem Prognostiker zusammengesetzt.

Versteckt hinter einer weißen Eisentür und den Büros des Lehrstuhls hat ein Teil dieser Zukunftsvision schon



3D-Simulation eines Knochens



Berechnete Von-Mises-Spannung eines Oberschenkelknochens

**Virtual-Reality-Umgebung:
Grafiken zum Greifen nah**

Manch einer kennt es aus dem Kino: Mit speziellen Brillen erwachen Filme und Bilder zum Leben und scheinen dreidimensional durch den Raum zu schweben – als ob man die dargestellten Objekte anfassen könnte.

Hinter der Produktion von 3D-Bildern steht eine Technik, die eine physiologische Besonderheit des menschlichen Sehvermögens ausnutzt. Zwei Projektoren werfen perspektivisch unterschiedliche, sich ergänzende Bilder auf eine Leinwand. Jedes der Bilder wird durch Folien vor den Projektoren auf unterschiedliche Weise polarisiert.

Wer eine Leinwand ohne Polarisationsbrille betrachtet, auf die ein solches 3D-Bild geworfen wird, erkennt nicht viel mehr als eine sehr unscharfe zweidimensionale Projektion. Denn in den Brillengläsern werden die polarisierten Bilder wieder getrennt: Jedes Brillenglas lässt nur eines der beiden Bilder durch. Sobald die zwei Bilder im Gehirn zusammengefügt werden, entsteht die Illusion eines dreidimensionalen Objektes, das zwischen Leinwand und Betrachter schwebt. *jf*

Wirklichkeit erlangt. Denn das Team von Ernst Rank hat in den vergangenen Jahren gemeinsam mit Wissenschaftlern um Prof. Westermann aus der Fakultät für Informatik Methoden entwickelt, die ein wichtiger Baustein für die Anwendung im OP sein werden. Hier, im ehemaligen Windkanal der Technischen Universität, werden zwar noch immer Strömungsverläufe der Luft simuliert – aber nur noch rein virtuell. Zwei Rückwandprojektoren und eine schnelle Netzwerkverbindung zum Bundeshöchstleistungsrechner im Leibniz-Rechenzentrum genügen, um den Lebenszyklus eines Gebäudes – oder eines Schenkelknochens – unter definierten Bedingungen in Echtzeit vorherzusagen. Die komplexen Berechnungen können schon heute mit den richtigen Programmen blitzschnell auf dem Bildschirm visualisiert werden, und das in drei Dimensionen. Das Ergebnis sind

nicht nur Bilder mit dreidimensionalen Perspektiven und Fluchten. Mit polarisierten Brillengläsern und zwei sich ergänzenden Projektionen, wie man sie aus 3D-Filmen kennt, wird das Bild zum Greifen nah. Es entsteht ein Raum im Raum: Virtuelle Objekte füllen scheinbar das Zimmer zwischen Betrachter und Leinwand (Kasten).

Eine beispielhafte Software – übrigens eine der ersten, die die Möglichkeiten der Virtual-Reality-Umgebung nutzen – erregte in den vergangenen Jahren das Interesse von Forschern und Unternehmen. Die Software, die aus mehreren Doktorarbeiten entstand, kann nicht nur Luftströmungen in Gebäuden berechnen, vielmehr können ganz im Sinne des „Computational Steering“ Geometrie oder Randbedingungen für die Strömung verändert werden – mit sofort sichtbarer Visualisierung der Ergebnisse. Blaue, grüne, gelbe, rote Fäden durchziehen den virtuellen Raum, zeigen die Strömungsgeschwindigkeit und ändern Farbe und Richtung mit jedem Mausklick. Genau mit Hilfe solcher Programme könnte in Zukunft auch die Knochensimulation für Orthopäden laufen. Die Anlage der TUM kostete vor zwei Jahren 20.000 Euro, und die Preise für die benötigte Technik fallen deutlich. „Zudem handelt es sich um eine einmalige Investition. Dem stehen die Kosten von Nachoperationen gegenüber. Volkswirtschaftlich gesehen wären Virtual-Reality-Umgebungen in OPs sehr rentabel“, sagt Rank und prognostiziert: „Wir werden ähnliche Systeme in zehn Jahren für alle möglichen Anwendungen in so manchen Operationssälen sehen.“

Computer und Projektoren gibt es – und der Zeitplan für die Entwicklung der Software steht. In drei Jahren wird das System im Klinikum „Rechts der Isar“ erprobt. Sechs Jahre von heute an könnte es bis zur Serienreife dauern. „Wir wissen, wie es geht und was zu tun ist. Jetzt“, so Rank weiter, „müssen wir es nur noch machen.“

Jonathan Fasel

Link

www.sfb607.de



Unternehmen Baum

**Kann ein Baum planen?
Hat ein Baum ein Gedächtnis?
Fühlt ein Baum?
Denkt er für die Zukunft?**

Bäume faszinieren nicht nur romantische Gemüter. Der Biologe verwirft solche Überlegungen – doch die Fragen, die der Wissenschaftler an den Baum stellt, sind umso spannender.



Im Kranzberger Forst bei Freising steht dem Sonderforschungsbereich 607 eine einzigartige Versuchsfläche zur Verfügung. Mitten im Wald wird an einem Mischbestand rund 60-jähriger Fichten und Buchen das Konkurrenzverhalten der Bäume untersucht







In den Baumgipfeln wurde die neue CO₂-Begasungsanlage installiert.



Freigelegtes Grobwurzelgeflecht von Buche und Fichte in einer Tiefe von etwa 5-20 cm. Die Wurzeln wurden mit Hilfe der neuen Technik „Air-spade“ freigeblasen



Experimentell erzeugte Lücke im Bestand. Ein Baum wurde hierfür entfernt. Nun wird beobachtet, wie die Lücke von den noch stehenden Nachbarbäumen geschlossen wird



Die klimatisierte Messkuvette dient zur Messung der Photosynthese der Pflanzen, hier an Buchenblättern



Die Gastwissenschaftlerinnen Prof. Dr. Nancy Grulke (USA) und Prof. Dr. Elena Paoletti (Italien) führen Messungen zur Empfindlichkeit von Buchenblättern auf Ozon durch

Ozon verursacht Interkostalnekrosen an Blättern von besonders empfindlichen Buchen-Individuen (Absterben des Gewebes durch plötzlichen Zelltod in Mikroaderbezirken des Blattes)

Wäre der Baum ein Mensch, könnte ihn ein Mediziner auf einen Untersuchungstisch legen, mit Messleitungen verkabeln und an Sensoren anschließen, um herauszufinden, wie er funktioniert. Doch der Baum ist kein Mensch, sondern ein Riese der Natur. Und für ihn ist nicht die Medizin oder die Psychologie, sondern die Forstwissenschaft zuständig: „Natürlich passt ein Baum nicht unter ein Mikroskop“, sagt Rainer Matyssek, Professor für Ökophysiologie der Pflanzen an der forstwissenschaftlichen Fakultät der TU München auf dem Campus in Weihenstephan/Freising. Deshalb rückt die Wissenschaft dem Baum eben im Wald zu Leibe. Da, wo er immer schon steht. Wo der Proband auch nicht weglaufen kann.

Zum Beispiel im Kranzberger Forst, einige Kilometer entfernt von Weihenstephan. Der Forst ist mit dem Fahrrad gut zu erreichen, über ein paar Hügel, durch reife Weizenfelder und auf einem Feldweg hinein in den Wald. 60 Jahre alte Buchen und Fichten wachsen hier, es rauscht in den Kronen. Ihr Blätterdach spendet an diesem Sommertag den ersehnten Schatten. Mächtig ragen hier etwa 30 Meter hohe Riesen in den Himmel, flüstern von vergangenen Zeiten: als Bäume für den Menschen wie Wesen aus Urzeiten waren, Schutz boten und zu heiligen Orten wurden. Als Bäume dem Menschen der Romantik wie verwandte Seelen schienen – von Stürmen gebeutelt und zum Licht hinstrebend. Der Baum gehört zu jenen Pflanzen, die über ein Menschenalter hinauswachsen. Die Faszination war immer schon groß.

Hightech trifft auf Erde, Holz und Laub

Doch wer sich dem Versuchsgelände im Kranzberger Forst nähert, merkt schnell: Hier wird kein Baum umarmt und nicht dem Raunen der Blätter gelauscht. Hier wird geforscht: Da der Baum an seinem Standort fest verwurzelt ist, kommt das Labor eben zum Baum. So wurde vor neun Jahren ein halber Hektar Mischwald mit Maschendraht umzäunt. Und wer heute durch die Eingangstür mitten im Wald das Versuchsgelände betritt, befindet sich in einer anderen Welt: Hier trifft Forschungs-Hightech auf Erde, Holz und Laub. Ein Brettersteig führt über den Waldboden, an Kabelbündeln und Schläuchen ▶



Foto: TUM

Thomas Feuerbach setzt mehrere Buchenblätter in die klimatisierte Messküvette ein

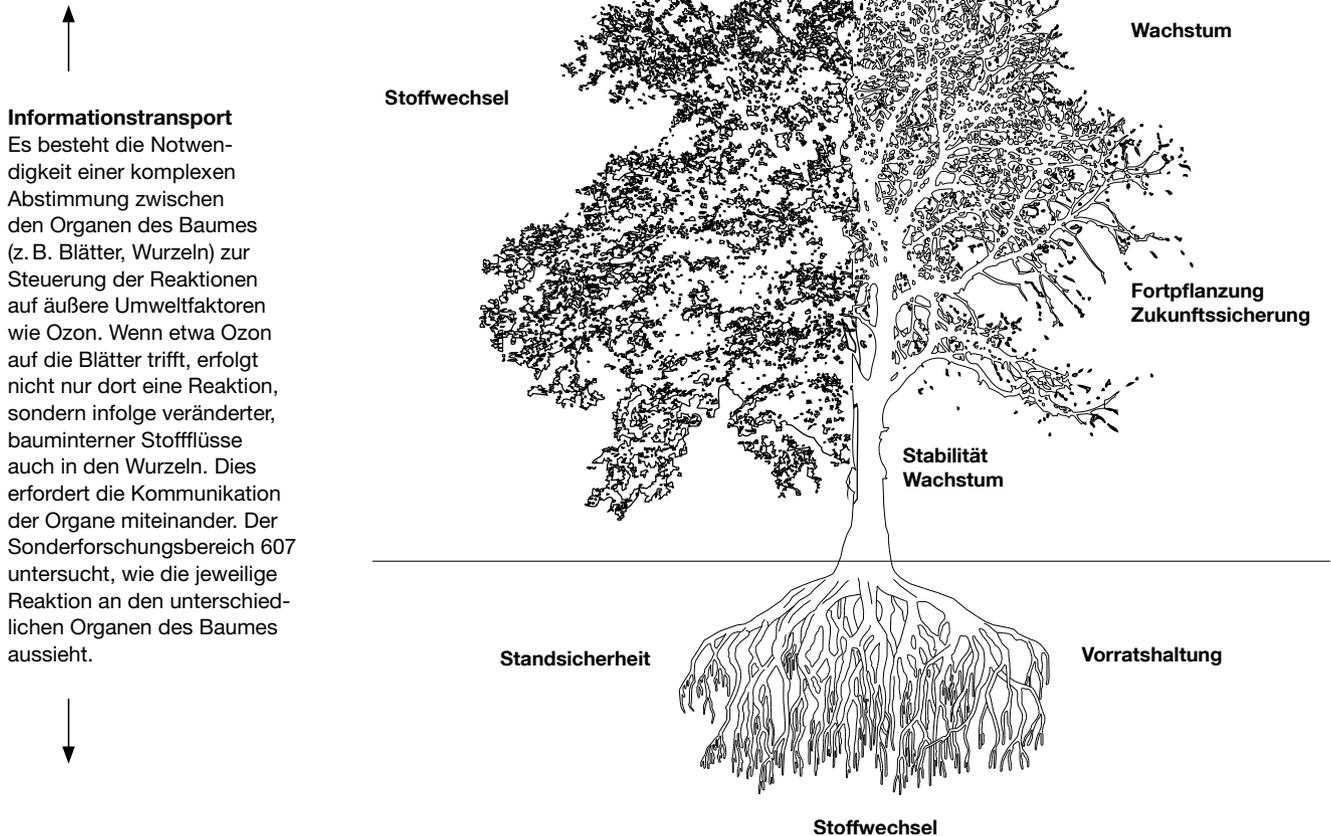
entlang. Zwischen den Fichten steht eine Holzhütte, ein laut brummender ehemaliger Straßenbau-Wagen und weiter hinten ein ausgedienter Camping-Wohnwagen, den ein Dutzend Bündel aus Messleitungen fast völlig bedecken. Aus einem grünen mobilen Feldlabor surrt es wie aus einem Rechenzentrum. Überall lehnen Gerüste und Leitern zwischen den Zweigen, aus den Blätterkronen hängen über hundert Schläuche. Der Weg führt vorbei an mit rot-weißem Baustellenband umzäunten Bodenquadraten, in denen Messgeräte stecken, und um Erdaushebungen herum, aus denen Messleitungen führen, die mit anderen zusammengebracht schließlich unterm Laub verschwinden.

Was auf den ersten Blick aussieht wie das Labor aus einer Science-Fiction-Welt, wie man es aus 007-Agentenfilmen kennt, ist in Wirklichkeit eine der Versuchsflächen eines umfangreichen Sonderforschungsbereichs, der sich insgesamt zwölf Jahre der Untersuchung von landwirtschaftlichen und forstlichen Nutzpflanzen widmet: Seit 1998 arbeiten in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereich 607 die Technische Universität München zusammen mit der Ludwig-Maximilians-Universität München und der GSF an diesem interdisziplinären Projekt. Arbeitsgruppen aus den Forst- und Agrarwissenschaften wie

Bodenökologen und Waldwachstumskundler und Wissenschaftler aus der biologischen Grundlagenforschung wie Molekularbiologen, Biochemiker oder Ökophysiologen forschen zusammen mit Kollegen aus der Physik, Informatik und Biomathematik.

Ein Forschungskonzept, weltweit einzigartig

Dabei ist der Kranzberger Forst Teil eines weltweit einzigartigen Forschungskonzeptes, in dem es darüber hinaus auch um Obstbäume, Ackerfrüchte, Getreide und Wiesenpflanzen geht. Von der Genregulation und biochemischen Prozessen, quasi im innersten Steuerungszentrum der Pflanze bis zu ihrem Zusammenleben mit Parasiten, Wurzelpilzen und Nachbarpflanzen, quasi im äußeren Raum des Pflanzenbestandes, reicht der Blick der Wissenschaftler des SFB 607. Die neun Jahre lange Phase der Experimente und Datensammlung ist nun gerade vollendet. Im Juli hat die Phase der Integration der Forschungsergebnisse sowie die Überprüfung und Neuentwicklung wissenschaftlicher Theorien begonnen. Mathematische Modellierungen, deren Konzepte ebenfalls im Sonderforschungsbereich erarbeitet wurden, begleiten das Projekt. In drei Jahren werden die Integration der unterschiedlichen Forschungsergebnisse und damit der Sonderforschungsbereich beendet sein. Eines der zentralen Themen der Wissenschaftler



Informationstransport
 Es besteht die Notwendigkeit einer komplexen Abstimmung zwischen den Organen des Baumes (z. B. Blätter, Wurzeln) zur Steuerung der Reaktionen auf äußere Umweltfaktoren wie Ozon. Wenn etwa Ozon auf die Blätter trifft, erfolgt nicht nur dort eine Reaktion, sondern infolge veränderter, bauminterner Stoffflüsse auch in den Wurzeln. Dies erfordert die Kommunikation der Organe miteinander. Der Sonderforschungsbereich 607 untersucht, wie die jeweilige Reaktion an den unterschiedlichen Organen des Baumes aussieht.

in diesem Projekt ist die Frage nach den Mechanismen der Ressourcenverteilung: Wie effizient gestaltet die Pflanze solche Mechanismen? Wie steuert die Pflanze die Verteilung ihrer Ressourcen dorthin, wo es nötig ist: auf Wachstum, Konkurrenzverhalten gegenüber Nachbarpflanzen und Schädlingsabwehr? Und welchem Aufwand-Nutzen-Verhältnis folgt diese Steuerung?

Denn eines ist klar: Auch im Wald herrscht Darwins Prinzip des „survival of the fittest“. Aber was bedeutet hier Fitness? Fit ist nicht unbedingt der höchste und dickste Baum, sondern jener, der am effizientesten seine Ressourcen zwischen seinen physiologischen Bedürfnissen verteilt. Ähnlich einem Wirtschaftsunternehmen muss ein Baum bei der Verteilung seiner mehr oder weniger begrenzten Ressourcen nachhaltig wirtschaften. Setzt er sie für Wachstum ein, erhält er über der Erde mehr Raum und Licht gegenüber dem konkurrierenden Nachbarbaum und unter der Erde mehr Wurzelraum, um an Wasser und Nährelemente zu kommen. Setzt er die Ressourcen aber in der Abwehr von Schädlingen ein oder investiert er in die Interaktion mit der Pilzwelt an seinen Wurzeln? Dann muss er vom Wachstum Ressourcen abziehen: „No lunch for free“ – so heißt es in der Wirtschaft. Kosten-Nutzen-Bilanzierungen spielen also auch für den Baum eine zentrale Rolle. Die Frage lautet also:

Für welche Strategie entscheidet er sich? Und dann ist da auch noch die Notwendigkeit, Reservestoffe zu bilden und an die Nachkommen zu denken. Also denkt ein Baum? „Nein. Er betreibt Informationsverarbeitung“, sagt Professor Matyssek. Und schon sind wir wieder im Waldlabor. Da, wo er mit seinen Mitarbeitern dieser Informationsverarbeitung auf der Spur ist. Der Baum steht hier im Kranzberger Forst unter totaler Beobachtung, ganz und gar, von der Wurzel über den Stamm bis zur Blätterkrone.

Forschung von der Wurzel bis zur Krone

Sensoren sind im Stamm implantiert, die den Wasserstrom messen. Elektrische Maßbänder spannen sich um den Baum, um sein Wachstum zu verfolgen. Plexiglasbehälter mit Andockstellen für Vakuumspritzen zur Gasentnahme sind an die Rinde angeflanscht, um Daten über die Atmung des Baumes zu sammeln. Sogenannte Wurzelkäfige messen das Wachstum unter der Erde. Ein ganzes Bündel von Messleitungen vom Stamm und aus der Erde trägt im Minutentakt Informationen und Daten zu jenem surrenden grünen Wagen, in dem das Rechenzentrum des Waldlabors untergebracht ist. Und die Baumkrone? Die Blätter?

Um auch an diese Stellen des Baumkörpers zu gelangen, haben die Forstwissenschaftler der TU Mün- ▶

Grafik: ecludnsepp

SFB 607: Seine Bedeutung für die angewandte Forschung und Praxis

Nach neun Jahren der Methodenentwicklung und experimentellen Analysen in 20 Teilprojekten geht der Sonderforschungsbereich 607 in die vierte und letzte Phase. Jetzt folgt die übergreifende Datenintegration, Modellierung und Szenariosimulation. Ziel der Wissenschaftler ist es, die Empfindlichkeit von Nutzpflanzen gegenüber Umwelteinflüssen gesichert beurteilen zu können. Daraus ergeben sich wichtige Hinweise für die land- und forstwirtschaftliche Praxis. Beispielsweise über die Produktivität von Buche und Fichte, inwiefern bei Steigerung der Abwehrkraft eine Minderung der Ertragsleistung zu erwarten ist und welche Effekte Ozon und CO₂, die verfügbare Menge von Licht und Stickstoff sowie Pilzbefall bei verschiedenen Pflanzenarten auslösen. Es werden nämlich nicht nur Waldbäume, sondern auf weiteren Versuchsflächen auch agrarische Nutzpflanzen untersucht.

Potenzielle Zielkonflikte zwischen Wachstum (Ertragspotenzial) und Abwehr (Krankheitsresistenz) sind für die Züchtungsforschung von erstrangigem Interesse. Die Wissenschaftler stützen sich bei ihren Analysen auf die umfangreiche SFB-

Datenbank, die in der Experimentierphase angelegt und von den Teilprojekten mit Daten gefüllt wurde. Die Datenbank wird auch nach dem Abschluss der Phase IV und damit dem Ende des Sonderforschungsbereiches fortbestehen und Dritten zur Nutzung offenstehen.

Dabei wird es in der abschließenden Phase möglich sein, übergeordnete Leitfragen zu klären, die die Ergebnisse verschiedener Teilprojekte zusammenführen. Mit Hilfe von Computersimulationen können in der Agrar- und Forstwirtschaft Langzeitwirkungen hinsichtlich Ertrag, Nährstoffbilanz oder Bestandesstabilität prognostiziert werden. Für die Forstwirtschaft sind aus dem SFB 607 die Waldwachstumssimulatoren PLATHO und BALANCE hervorgegangen. Zusammen mit dem erweiterten SILVA-Modell lässt sich die Entwicklung von Waldbeständen für unterschiedliche Rahmenbedingungen über einen längeren Zeitraum prognostizieren. Mit SILVA kann die Forstwirtschaft auf ein modernes und flexibles Planungsinstrument zurückgreifen. Das System wird erfolgreich in der Praxis angewendet.

chen ein Gerüst aufgebaut, das in seiner Größe und Funktion einzigartig ist: Vier 27 Meter hohe Gerüsttürme, die durch Plattformen miteinander verbunden sind, geben Einblick in die Kronen der 30 Meter hohen Fichten und Buchen. In den letzten Jahren musste ein neues Stockwerk aufgesetzt werden, schließlich wachsen die Bäume, Waldlabor hin oder her. Auf den fünf Stockwerken können die Mitarbeiter zum Beispiel die Photosynthese messen und quasi online mitverfolgen, wie deren Produkte schließlich bis in den Wurzelraum transportiert werden. Überall sind Leitungen und Geräte angebracht. Mit einem Zugentlastungssystem ist eine Klimakammer für etwa fünf Liter Luft um einen Zweig so angebracht, dass der Ast nicht merkt, dass er in einem Kasten sitzt. Andere Messgeräte erfassen das Bestands-Mikroklima.

4,5 Kilometer Schlauch befördern das Ozon

Die Ingenieure und Forstwissenschaftler mit Erfindertalent standen in der Anfangszeit des Sonderforschungsbereiches 607 vor großen Herausforderungen. Eine ihrer Lösungen ist an dem Gerüst zu bewundern: eine Ozon-Begasungsanlage mit insgesamt 4,5 Kilometer Schläuchen, die etwa 2.000 Kubikmeter Luftraum, der Bäume kontinuierlich mit Ozon anreichert. Hergestellt wird der Störstoff eigens mit einer Art Ozonfabrik. Die aufwendige Anlage und ein großer Tank sind in einem Feldlabor, jenem brummenden orangefarbenen Wagen untergebracht. 150 fein perforierte Schläuche hängen von Antennen ähnelnden Stangen und Stahlseilen, die

die obersten Plattformen überspannen, 30 Meter lang zwischen den Bäumen herab. Über kleinste Löcher entlassen sie erhöhte Ozonkonzentrationen in die Baumkronen. „Ein Jahr lang haben die Kollegen an diesem Begasungssystem getüftelt“, berichtet Matyssek. Die erhöhte Ozonkonzentration ist am Geruch erkennbar. Dennoch, das betont Matyssek, hinterlässt das Experimentieren mit Ozon gesichert keine Rückstände in der Umwelt wie andere Schadstoffe – schließlich ist Ozon eine instabile Variante des Luftsauerstoffs. Die Reaktion des Baumes auf diese Störsubstanz aber gibt Auskunft über die Empfindlichkeit der Stoffwechselregulation und deren Mechanismen. Bäume in unveränderter Luft außerhalb der Anlage dienen als Kontrolle. Auch diese Begasungsanlage ist weltweit einzigartig. Wertvolle Erkenntnisse nicht nur für die Forstwissenschaft im Zusammenhang mit „global change“ werden dadurch ermöglicht. Zu Hochzeiten der Versuchsphasen waren insgesamt mehr als 20 Arbeitsgruppen beteiligt.

Für die Mitarbeiter ist das Waldlabor nicht nur aus wissenschaftlichen Gründen spannend. Wer in solch luftigen Höhen stundenlang auf dem Gerüst steht oder, mit Klettergurten versehen, noch näher an den Bäumen arbeitet, muss wirklich schwindelfrei sein. Das Gerüst schwankt, ein schwacher Wind weht hier oben. Doch der Schein trügt. Es sind die Bäume, die mehrere Dezimeter hin und her ausschlagen. Gegen Zusammenstöße mit dem Gerüst sind sie durch dicke Schaumstoffpols-



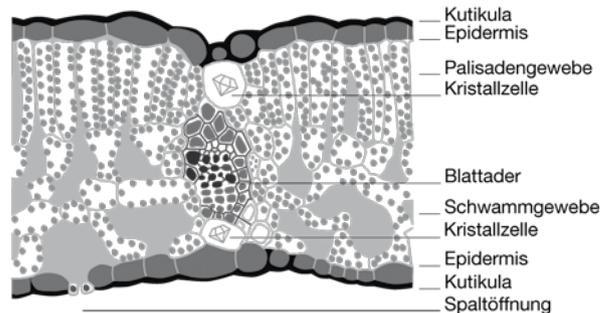
In rund 25 Meter Höhe hängen die Schläuche der Begasungsanlage. In der Versuchsstation im Kranzberger Forst werden Untersuchungen mit Ozon und CO₂ durchgeführt

ter geschützt. Das Gerüst selbst ist so stabil im Boden verankert, dass selbst die Stürme „Kyrill“ und „Lothar“, Schnee und Gewitter ihm in den letzten neun Jahren nichts anhaben konnten. Etwas Glück kam den Forschern auch zugute: „Ein Blitz in die Anlage und alles wäre umsonst gewesen!“ Für Matyssek ist dieses Forschungsprojekt ein Lebenswerk.

Zum Abschluss des Besuches im Kranzberger Forst geht es noch höher hinauf. Mit Hilfe eines Krans fahren wir in einer offenen Gondel am Seil geschwind nach oben. Der Kran mit einem Aktionsradius von 50 Metern wurde von Magdeburg vor sechs Jahren mit großem Aufwand in den Kranzberger Forst gebracht, der Weg durch den Wald musste extra befestigt werden. Von hier, 45 Meter über dem Waldboden, lassen sich die Bäume auch noch von oben beobachten. Die Kronen der untersuchten Fichten und Buchen schließen an die anderen Bäume des Forstes an, nur die Spitzen des Gerüsts ragen heraus. Die Perspektive ist auch für die Forscher immer mal wieder in jedem Sinne gut: Sieht man einmal vor lauter Bäumen den Wald nicht mehr – hier oben gewinnt man eine Übersicht. Der Blick kann über den Wald, über die Felder und Hügel bis nach Weihenstephan schweifen. Dort, wo in den kommenden drei Jahren die Forscher der Technischen Universität München anhand von Millionen von Daten zu erklären versuchen, wie das „Unternehmen Baum“ funktioniert.

Kathrin Kommerell

Stoffwechselfunktion des Blattes



Für den Stoffwechsel der Bäume haben Blätter und Nadeln große Bedeutung: In ihnen findet die Photosynthese zum Aufbau der Biomasse statt. In den Chloroplasten des Blattes befindet sich grüner Farbstoff, das Chlorophyll, das als „Energieumwandler“ mit Hilfe der auf das Blatt einwirkenden Sonnenenergie werden Kohlenhydrate – unter Freisetzung von Sauerstoff – aus Kohlendioxid aufgebaut.

Durch Spaltöffnungen an den Unterseiten nehmen die Blätter Kohlendioxid aus der Luft auf. Aus den gebildeten Kohlenhydraten entsteht Baustoff für den Biomassezuwachs der Pflanze, aber auch Reservestoffe (z.B. Stärke) werden abgezweigt und ein großer Teil wird „veratmet“, um mit der freigesetzten Atmungsenergie den Stoffwechsel aufrecht zu erhalten.

Grafik: edlundsepp



Foto: Kai Hamann; produced by gsiCom

Wie wird ein schneller Computer noch leistungsfähiger? Mit einer Revolution auf einem kleinen Teil des Geräts. Neue Rechner arbeiten mit mehr als zwei Prozessoren auf einem Chip. Doch heutige Programme können das Potenzial dieser sogenannten „Multicore-Architekturen“ nicht ausschöpfen. Ein TUM-Professor sucht die Lösung

Der Mensch sitzt am Computer, telefoniert nebenbei, tippt und beobachtet gelegentlich die Arbeitsschritte seiner Kollegen. Viele Aktionen gleichzeitig – das kann nicht nur der Mensch, auch der Computer sollte in der Lage sein, möglichst viele Aktionen gleichzeitig auszuführen.

Für immer komplexer werdende Aufgaben und Operationen benötigen die Geräte eine hohe und zuverlässige Prozessorenleistung. So können die Funktionen in Heimcomputern, Laptops, Navigationsgeräten oder Handys vielfältiger werden. Auch Spielekonsolen profitieren von immer leistungsfähigeren Chips: Statt grober Comicbilder erschaffen aktuelle Geräte fotorealistische Welten. „Lange Zeit war die Strategie der Prozessorenhersteller, die Arbeitsgeschwindigkeiten der Transistoren durch die Taktung der Prozessoren zu erhöhen“, erklärt Arndt Bode, Professor für Rechnerorganisation und Rechnertechnik an der Technischen Universität München. Die Taktfrequenz, gemessen in Megahertz, war für die Hersteller die Zahl des Erfolges – und diese steigerte sich exponentiell. Computerprogramme mussten für diese Entwicklung nicht neu geschrieben werden. Wurde der Prozessor schneller, konnte das Programm

weiterhin seine Abläufe in Sekundenbruchteilen, aber hintereinander abwickeln. Über Jahrzehnte konnten auf diese Weise alle eineinhalb Jahre nicht nur Supercomputer, sondern auch Heimcomputer mit doppelt so hoch getakteten Prozessoren ausgestattet werden.

Höher, schneller, weiter – das geht nicht mehr

Die Größe der Chips nahm dabei nur leicht zu: Heute haben die größten Chips eine Oberfläche von gerade mal 2,25 Quadratzentimetern – etwa so viel wie vier Daumennägel. Doch jetzt stoßen die Chip-Produzenten an technische Grenzen. Seit etwa fünf Jahren, so sagt der 58-jährige Bode, zeichne sich ab, dass ein weiterer Anstieg der Taktfrequenzen nicht mehr möglich ist. Denn die Transistoren in den Prozessoren können nicht mehr höher getaktet werden: Je höher die Megahertzzahl, desto höher die benötigte Spannung auf dem Mikrochip. Daraus entsteht Wärme, die schnell vom Chip weggeführt werden muss, denn die empfindliche Struktur des Prozessors zerstört sich ab einer gewissen Temperatur von selbst.

Doch sogar Luft- und Wasserkühlungen konnten die Schmelze der Chips auf Dauer nicht verhindern. Spätestens zu diesem Zeitpunkt war klar, dass mit dem bisher



Parallel geht's schnell

Der neue Bundeshöchstleistungsrechner (HLRBII) am LRZ in Garching beeindruckt mit enormem Leistungspotenzial: Der auf einer Silicon Graphics Inc. (SGI) ALTIX 4700 Plattform basierende Supercomputer arbeitet parallel mit 4864 Intel Itanium Dual Core Prozessoren, erreicht eine andauernde Geschwindigkeit von 56.5 TFlop/s, verfügt über einen Arbeitsspeicher von insgesamt 39 TByte und über 600 TByte Festplattenspeicher. Seine Grundfläche beträgt 24 m x 12 m, sein Gewicht 103 Tonnen. Er ist der derzeit zehntschnellste Rechner der Welt

gültigen Motto – „höher, schneller, weiter“ – kein Fortschritt erzielt werden konnte. Die neue Idee der Hersteller: Wir müssen die Prozessoren auf den Chips vervielfachen. Während der bisherige Mikrochip im üblichen Computer mit einem Kern alle Aufgaben schnellstmöglich hintereinander abarbeitet, erledigen nun mindestens zwei oder mehr Kerne diese Aufgaben gleichzeitig. Daraus erklärt sich der Begriff „Multicore“: „Multi“ steht für die fast schon beliebige Anzahl von „cores“. Dieser Terminus leitet sich aus dem Wort „processor“ ab, welches den Einzelprozessor auf einem Chip beschreibt. In wissenschaftlichen Texten oder Veröffentlichungen von Herstellern hat sich noch keine genaue Begrifflichkeit niedergeschlagen. „Man findet viele Begriffe, die das Gleiche meinen. Ich würde so einen Mikrochip als ‚Multicore-Architektur‘ bezeichnen“, sagt Bode.

80 Chips auf einem Prozessor

Damit sich die Transistoren auf dem Mehrfachkern-Mikrochip nicht zu sehr erhitzen, ist die Taktfrequenz auf dem einzelnen Kern leicht reduziert. Rein rechnerisch aber wird die Leistung des Computers doppelt so groß, weil mindestens zwei Prozessoren arbeiten. „Es gibt auch Labor-Architekturen, auf denen schon über 80

Prozessoren auf einen Mikrochip gebaut werden“, erzählt Bode. Der Vizepräsident der TU München prophezeit, dass bis 2015 mehr als 128 Prozessoren auf einem Multicore-Chip Platz finden.

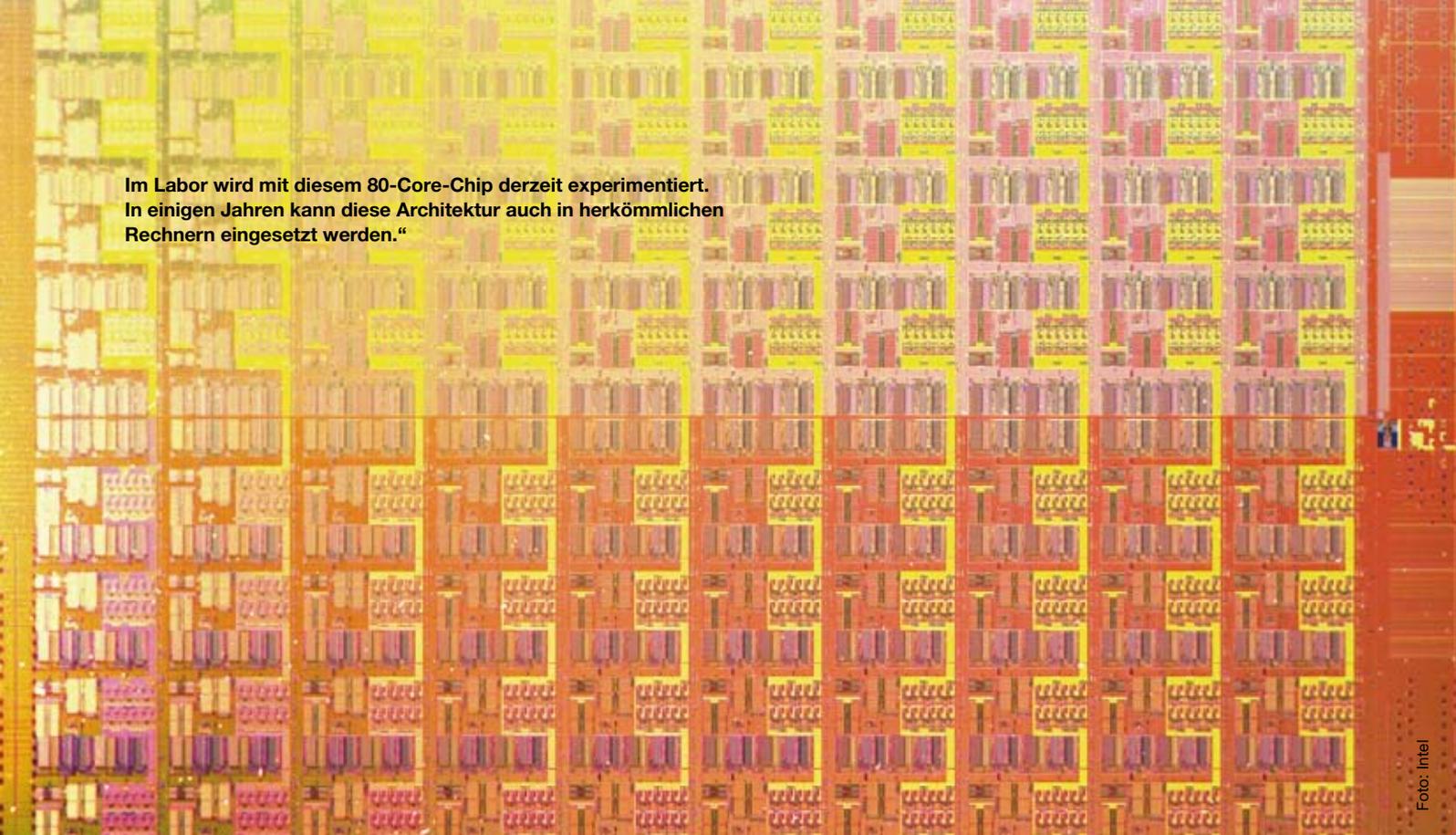
Das Problem: Die Software kommt nicht mit

Wirklich weit entfernt davon ist man heute nicht mehr. Zum Beispiel ist die aktuelle Spielekonsole von Sony, die „Playstation 3“, mit einem Chip von IBM ausgestattet, der mit neun parallel arbeitenden Prozessoren arbeitet. Auch einige Laptops und Computer haben heute

Link
www.lrr.in.tum.de

zwei oder vier Rechenkerne. Selbst auf Handys sollen in Zukunft mehrere Kerne gleichzeitig arbeiten, Ähnliches gilt für das ABS-System im Auto.

Die Entwicklung hört sich schön und gut an. Doch sie hat einen bedeutenden Haken: Heutige Computerprogramme können die neue, verdoppelte Rechner- ▶



Im Labor wird mit diesem 80-Core-Chip derzeit experimentiert. In einigen Jahren kann diese Architektur auch in herkömmlichen Rechnern eingesetzt werden.“

leistung mit mindestens zwei Prozessoren nicht bestmöglich ausnutzen. Die Arbeitsschritte in den neuen Mehrkernprozessoren verlaufen parallel, die bisherigen Programme denken in eindimensionalen Arbeitskettens. Damit nutzen sie nur einen der vielen Kerne aus.

Daher wäre es ideal, wenn der Prozessor auf die Programme nicht nacheinander, sondern gleichzeitig zugreifen könnte. Dieses Umdenken wäre fundamental für die Forschung. „Das ist ein Bruch in der Computerentwicklung“, sagt Bode. Dieser Bruch ist ein Grund dafür, warum er die Münchner Multicore-Initiative 2006 am Institut für Informatik gegründet hat.

Nun kann sich Bode zwei Entwicklungen vorstellen: Da Mehrkernsysteme eine parallele Programmiersprache benötigen, muss die Sprache der aktuellen Programme neu erfunden werden. Dahinter steckt ein ganz neues Gedankengerüst, das für normale Heimcomputer, Handys, Spielekonsolen und Digitalkameras noch nicht angewendet worden ist. „Man kennt zwar parallele Programmiersprachen schon von den Supercomputern. Doch die müssen nun auf Multicore-Prozessoren für reguläre Anwendungen eingesetzt werden“, erklärt Bode.

Bode kann sich auch vorstellen, dass die alten Programme beibehalten und durch automatisch parallelisierende Software ergänzt werden. Diese würde alte Programme in der Zusammenarbeit mit den schnellen Prozessoren unterstützen. Unsichtbar für Nutzer und Programmierer arbeiten sie im Hintergrund. Vorteil: Es

müssten nicht sämtliche Programme in eine neue Sprache übersetzt werden. Nachteil: Der automatische Parallelisierer erkennt nicht alle Optimierungsmöglichkeiten, die die neue Konstellation von Hardware und Software bietet.

Diese Entwicklung der Prozessoren zieht ein weiteres Problem im Innenleben eines Rechners nach sich. Ganz gleich ob Handy, Spielekonsole oder Heimcomputer, alle Geräte benötigen einen Speicher, auf dem Programme und Dateien gelagert sind. Darauf greift der Prozessor zu und verarbeitet die Daten – in einer so hohen Geschwindigkeit, dass die Rechnerleistung auch stark von der Geschwindigkeit des Arbeitsspeicher-Moduls abhängt. Durch Multicore-Architekturen müssen nun auch Speicherplätze so angelegt werden, dass Programme parallel auf den Arbeitsspeicher zugreifen können. „Man kann sich das in heutigen Rechnern wie einen Flaschenhals vorstellen, durch den alle Daten gleichzeitig durchmüssen“, erläutert Bode. Der wird nun ziemlich eng. „Wir müssen daran arbeiten, den Hals zu erweitern.“ Diese Beinahe-Revolution ist für Bode aus unerklärlichen Gründen von der Computerindustrie verschlafen worden. Inzwischen aber sind die Hardware- und Prozessorenhersteller, allen voran die amerikanischen Konzerne IBM und Intel, aufgewacht und sehr am Wissen der Universitäten interessiert.

Daher will Bode in seiner Forschung an der TU München am Institut für Informatik die Entwicklung in den

Das Moore'sche Gesetz

Seit 40 Jahren ist das einflussreichste Gesetz in der Informatik eine Faustregel:
 Die von Gordon Moore aufgeschriebene Beobachtung, dass sich in integrierten Schaltkreisen die Komplexität alle zwei Jahre verdoppelt, wurde zum Arbeitsgesetz für alle nachfolgenden Computerchiphersteller. Unter Komplexität auf den Chips verstand Moore die Anzahl der Schaltkreiskomponenten, die einen Chip – und damit den ganzen Computer – zum Laufen bringen. Diese empirische Beobachtung von Moore ist eine der Grundlagen für die digitale Revolution.

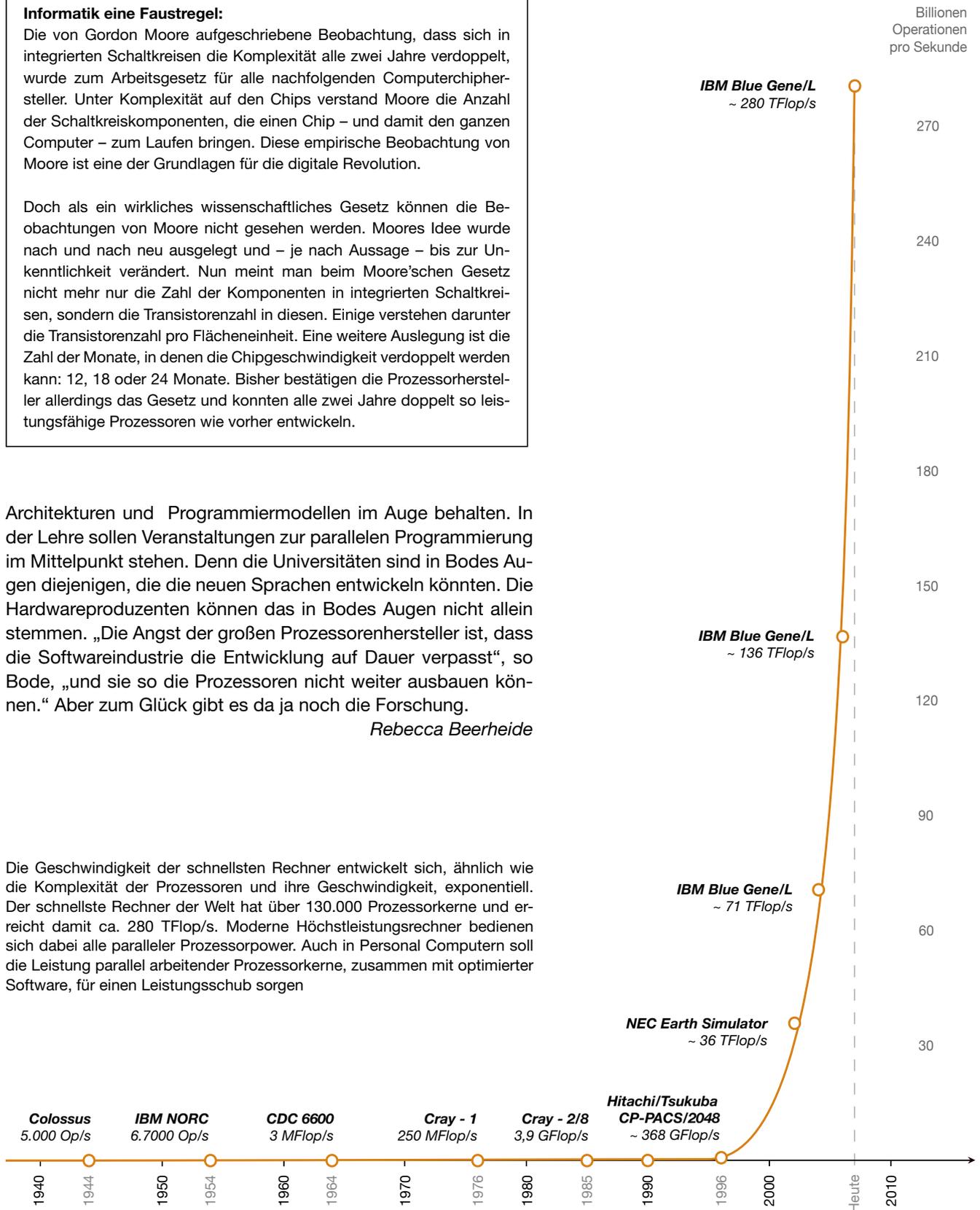
Doch als ein wirkliches wissenschaftliches Gesetz können die Beobachtungen von Moore nicht gesehen werden. Moores Idee wurde nach und nach neu ausgelegt und – je nach Aussage – bis zur Unkenntlichkeit verändert. Nun meint man beim Moore'schen Gesetz nicht mehr nur die Zahl der Komponenten in integrierten Schaltkreisen, sondern die Transistorenzahl in diesen. Einige verstehen darunter die Transistorenzahl pro Flächeneinheit. Eine weitere Auslegung ist die Zahl der Monate, in denen die Chipgeschwindigkeit verdoppelt werden kann: 12, 18 oder 24 Monate. Bisher bestätigen die Prozessorhersteller allerdings das Gesetz und konnten alle zwei Jahre doppelt so leistungsfähige Prozessoren wie vorher entwickeln.

Architekturen und Programmiermodellen im Auge behalten. In der Lehre sollen Veranstaltungen zur parallelen Programmierung im Mittelpunkt stehen. Denn die Universitäten sind in Bodes Augen diejenigen, die die neuen Sprachen entwickeln könnten. Die Hardwareproduzenten können das in Bodes Augen nicht allein stemmen. „Die Angst der großen Prozessorenhersteller ist, dass die Softwareindustrie die Entwicklung auf Dauer verpasst“, so Bode, „und sie so die Prozessoren nicht weiter ausbauen können.“ Aber zum Glück gibt es da ja noch die Forschung.

Rebecca Beerheide

Die Geschwindigkeit der schnellsten Rechner entwickelt sich, ähnlich wie die Komplexität der Prozessoren und ihre Geschwindigkeit, exponentiell. Der schnellste Rechner der Welt hat über 130.000 Prozessorkerne und erreicht damit ca. 280 TFlop/s. Moderne Höchstleistungsrechner bedienen sich dabei alle paralleler Prozessorpower. Auch in Personal Computern soll die Leistung parallel arbeitender Prozessorkerne, zusammen mit optimierter Software, für einen Leistungsschub sorgen

Gratik: edlundsepp



Moore können Klima schützen



Sonderform eines Moores:
Das Hochmoor – hier ein Hochmoorage im Alpenvorland

Foto: Hugger

Schaurig ist's, übers Moor zu gehen – doch unter Klimagesichtspunkten betrachtet sind Moore durchaus kein schauerlicher Ort

Wenn der Mensch sie in Frieden lässt, sind Moore nämlich die einzigen Ökosystemtypen, die kontinuierlich und dauerhaft Kohlenstoff in bedeutenden Mengen aufnehmen. Weltweit speichern sie bis zu 550 Milliarden Tonnen des Klimakillers – das sind 20 bis 30 Prozent des gesamten Bodenkohlenstoffs.

Allerdings gefährden natürliche Austrocknung und künstliche Entwässerung diesen Effekt – sie setzen den in den Mooren gebundenen Kohlenstoff frei. Und dazu noch weitere Klimaschädlinge wie Methan oder Lachgas. Das hat die Forschung in der jüngsten Zeit erkannt und die Nutzung von Mooren als Ackerland mittlerweile als klimaschädlich identifiziert. Doch wie kann man unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes Mooregebiete nutzen? Was bringt der Anbau nachwachsender Rohstoffe oder schlicht die Renaturierung eines Mooregebietes?

Diese Fragen greift das Forschungs-Verbundprojekt „Klimaschutz durch Moorschutz“ auf, in dem die TU München und fünf weitere Forschungspartner zusammenarbeiten. Von TU-Seite aus beteiligt sind der Lehrstuhl für Vegetationsökologie, der das Projekt leitet, sowie der Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues am Wissenschaftszentrum Weihenstephan. Das Ziel des Projektes: Es soll einen wesentlichen Beitrag zur Abschätzung sowohl der Klimaentlastungseffekte als auch der ökonomischen Effekte unterschiedlicher Nutzungsstrategien und Umsetzungsszenarien von Moorschutzprogrammen liefern.

Mehr noch: Die Forschungsergebnisse sollen der Politik bei der Schaffung von Moorschutzprogrammen und bei zukünftigen Klimaschutzmaßnahmen Entschei-

dungshilfen an die Hand geben. Damit das gelingt, sorgt ein eigener Projektteil „Politikberatung“ frühzeitig für die Wahrnehmung der Forschungsergebnisse bei den angestrebten Adressaten. □

Hochmoor

Ein Hochmoor ist ein Moor, das nicht durch Grundwasser, sondern durch Regenwasser gespeist wird. Das Wachstum des Torfmooses hat die Vegetationsoberfläche des Moores vom Grundwasser abgehoben, das tote Pflanzenmaterial liegt im Wasser und wird nicht zersetzt. Nährstoffeintrag findet kaum statt. Deshalb wachsen alle Pflanzen sehr langsam, die Fauna ist mit der hochalpiner oder subarktischer Zonen vergleichbar.

Hochmoorage

Ein Hochmoorage ist ein Gewässer. Der Name steht für seine besondere Entstehung:

Das Torfmoos sorgt für das Wachstum eines Moores. In der Mitte des Hochmoores kann das Sphagnum durch das saure Milieu und die gespeicherte Nässe Konkurrenten am effektivsten vermeiden. Deshalb wächst hier ein Moor am stärksten. Es wölbt sich in der Mitte auf. Die Vegetationsdecke wird durch das Wachstum immer weiter überdehnt, bis sie an einer zentralen Stelle einen Riss bekommt: Sie öffnet sich, die Seiten werden auseinandergezogen. Im Riss sammelt sich das Moorwasser. Ein durch den Torf dunkel und durch die moorspezifischen Huminsäuren rotbraun gefärbtes Wasser lassen Hochmooraugen als besonders dunkle Gewässer erscheinen. Sie haben zwar sehr saures, aber extrem sauberes, also nährstoffarmes Wasser.

Maschinen machen Zukunft: **Denn sie wissen, was sie tun**



Links

www.cotesys.org

Was Menschen leisten können, ist beeindruckend“, sagt Prof. Dr. Michael Beetz vom Lehrstuhl Bildverstehen und wissensbasierte Systeme der TUM. Dabei sind es gar nicht die geistigen und körperlichen Höchstleistungen, die ihn interessieren. Er spricht vielmehr von alltäglichen Dingen wie zum Beispiel dem Tischdecken. Das Interesse des Professors an der Küchenarbeit ist vornehmlich wissenschaftlicher Natur. Gemeinsam mit anderen Forschern unterschiedlicher Disziplinen entwickelt er eine besondere Küche: In einer speziell ausgestatteten Küchenzeile soll ein Roboter Menschen bei der Arbeit assistieren. Die „unterstützende Küche (the assistive kitchen)“ ist ein Projekt des Exzellenzclusters Cognition for technical Systems (CoTeSys). „Ziel ist es, technische Systeme zu entwickeln, die wissen, was sie tun“, sagt Michael Beetz. „Die Systeme sollen ihr Tun bewerten und ihr Handeln aufgrund dieser Bewertungen ständig verbessern.“ Man spricht dann von kognitiven technischen Systemen. Ein solches System zeigt überlegtes und gewohnheitsmäßiges Verhalten, das langfristige Ziele

Roboter Johnnie wurde am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der TU München entwickelt. Das Laufen auf ebenem und unebenem Boden sowie um Kurven zu gehen hat er schon gelernt. Ziel der Forscher ist nun, Johnnie mit kognitiven Fähigkeiten auszustatten



Foto: TUM

Kognition	Definition
	Unter Kognition versteht man die mentalen Strukturen und Prozesse eines Individuums. Kognitive Fähigkeiten sind zum Beispiel Wahrnehmung, Überlegung, Lernen und Planen. Kognitives Handeln bedeutet, dass ein Individuum überlegtes und gewohnheitsmäßiges Verhalten zeigt, das langfristige Ziele verfolgt.

verfolgt. Dazu sind kognitive Fähigkeiten nötig: Die Systeme müssen Situationen wahrnehmen, erkennen und einordnen, sie müssen lernen und planen. Diese Fähigkeiten hat jeder Mensch – für technische Systeme wie Roboter müssen sie entwickelt werden. Und das ist nicht einfach.

Der gesunde Menschenverstand hilft

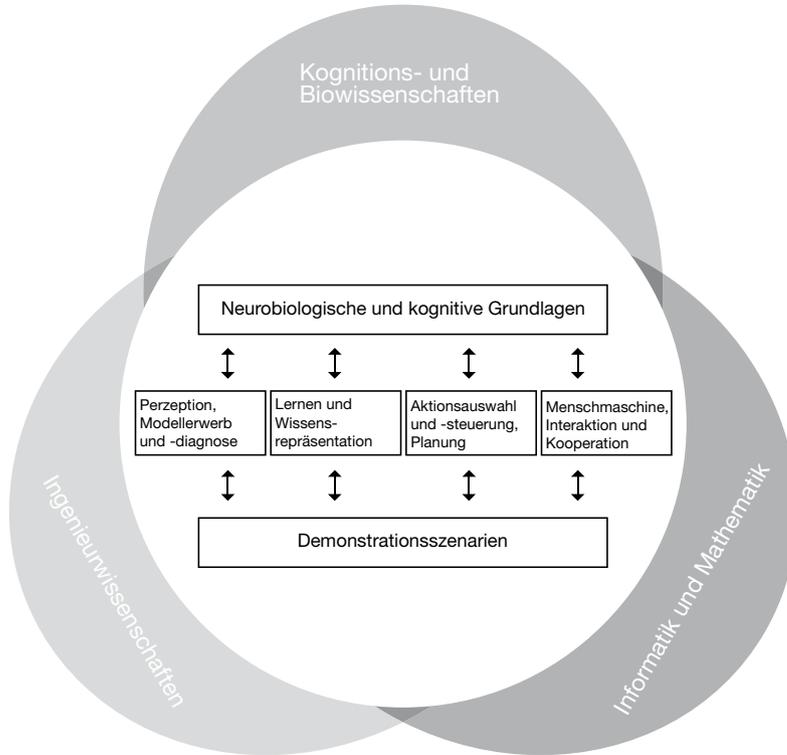
Wenn wir den Frühstückstisch decken, führen wir viele Einzelhandlungen aus: zum Schrank gehen, Schranktür öffnen, Teller herausnehmen, Teller abstellen, Schranktür schließen, Teller wieder aufnehmen und zum Tisch bringen. Sind nicht genügend Teller im Schrank, sehen wir im Geschirrspüler nach und waschen schnell einen ab, wenn die Teller im Geschirrspüler noch nicht gespült sind. Über all das machen wir uns wenig Gedanken, wir können uns nebenbei unterhalten oder Radio hören. Für die ungeplante Situation, nicht genügend Teller im Schrank zu finden, haben wir schnell eine Lösung. Wir wissen auch, dass man besser Tassen mit Henkel statt dünnwandiger Gläser auf den Tisch stellt, wenn man heißen Tee servieren will. All das sagt uns der gesunde Menschenverstand – eine saloppe Umschreibung für unsere kognitiven Fähigkeiten und unser kognitives Handeln, das die menschliche Intelligenz auszeichnet.

Übergreifender Forschungsansatz

An der Forschung zur Kognition für technische Systeme sind Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen beteiligt: Grundlagenforschung in der Neurobiologie und den kognitiven Wissenschaften bildeten die Basis für die Ansätze der Ingenieure und Informatiker. Die theoretischen Erkenntnisse der Forscher werden bei CoTeSys in drei praktischen Anwendungen umgesetzt: kognitive Fahrzeuge, kognitive Fabriken und kognitive Roboter. Ein solcher Roboter wird auch in der unterstützenden Küche eingesetzt: RWI B21 ist etwa anderthalb Meter hoch. An seinem runden, blauen Körper sind verschiedene Sensoren angebracht, mit denen er seine Position im Raum berechnen kann. Er kann mit

CoTeSys: Die Forschungsbereiche	Zusatzinformationen zum Exzellenzcluster
CoTeSys ist ein interdisziplinärer Forschungsverbund, der in vielen kleinen Projekten kognitive Fähigkeiten des Menschen erforscht und in technische Systeme implementiert.	

Grafik: edlundsepp nach Vorlage TUM



diesen Lasersensoren auch feststellen, ob ein Mensch in seiner Nähe ist. Zwei Arme mit Gelenken, die sich in unterschiedliche Richtungen bewegen lassen, tragen je eine Greifzange. Wo beim Menschen die Augen sitzen, ist bei RWI B21 eine Stereokamera angebracht.

Datensammeln in der Küche

Sein Reich ist eine Küche, die sich auf den ersten Blick kaum von einer ganz normalen Küchenzeile mit Esstisch unterscheidet. Wer genauer hinsieht, entdeckt Kameras an den Wänden und der Decke. Über Lasersensoren, die in die Wände eingelassen sind, werden die Position des Roboters und die Positionen von Menschen, die sich in der Küche bewegen, bestimmt. An den Schranktüren geben Magnetsensoren an, ob die Tür geöffnet oder geschlossen ist. An allen Gegenständen wie Teller, Tassen, Müslikartons und Milchtüten sind RFID-Transponder befestigt. Diese scheckkartengroßen Sender sehen wie kleine Aufkleber mit Metallfäden aus. Auf dem Tisch und den Schrankböden liegen die flachen Lesegeräte für die RFID-Transponder. RFID steht für Radio Frequency Identification (Identifizierung über Radiowellen). Mit dieser Technik kann man

jederzeit feststellen, wo sich ein Gegenstand gerade befindet, wie oft, wohin und wann er bewegt wurde. „In einem ersten Schritt versuchen wir hier, ein Modell der Alltagsaktivitäten eines Menschen in der Küche zu erstellen“, erklärt Michael Beetz. Dazu haben die Forscher einen Handschuh entwickelt, der die Signale der RFID-Sender auswerten kann. So können sie genau aufzeichnen, welches Küchenutensil wie oft benutzt wurde. Außerdem werten Mikrosensoren die Arm- und Beinbewegungen der Küchenbenutzer aus. So entstehen Bewegungsprofile, und die Interaktion mit dem Roboter kann analysiert werden.

Informationshappen für intelligente Roboter

Mit den gesammelten Daten lassen sich nun Programme für den Roboter schreiben. Die Informatiker können zum Beispiel dem Befehl, eine Kanne vom Tisch zu nehmen und sie auf der Arbeitsplatte der Küche abzustellen, verschiedene Parameter zuordnen. „Wenn wir nicht sehen, ob in einer Kanne noch Kaffee ist und deshalb ihr Gewicht nicht kennen, heben wir sie zunächst vorsichtig an. Erst dann entscheiden wir, mit wie viel Kraft und Schwung wir die Kanne anhe- ▶

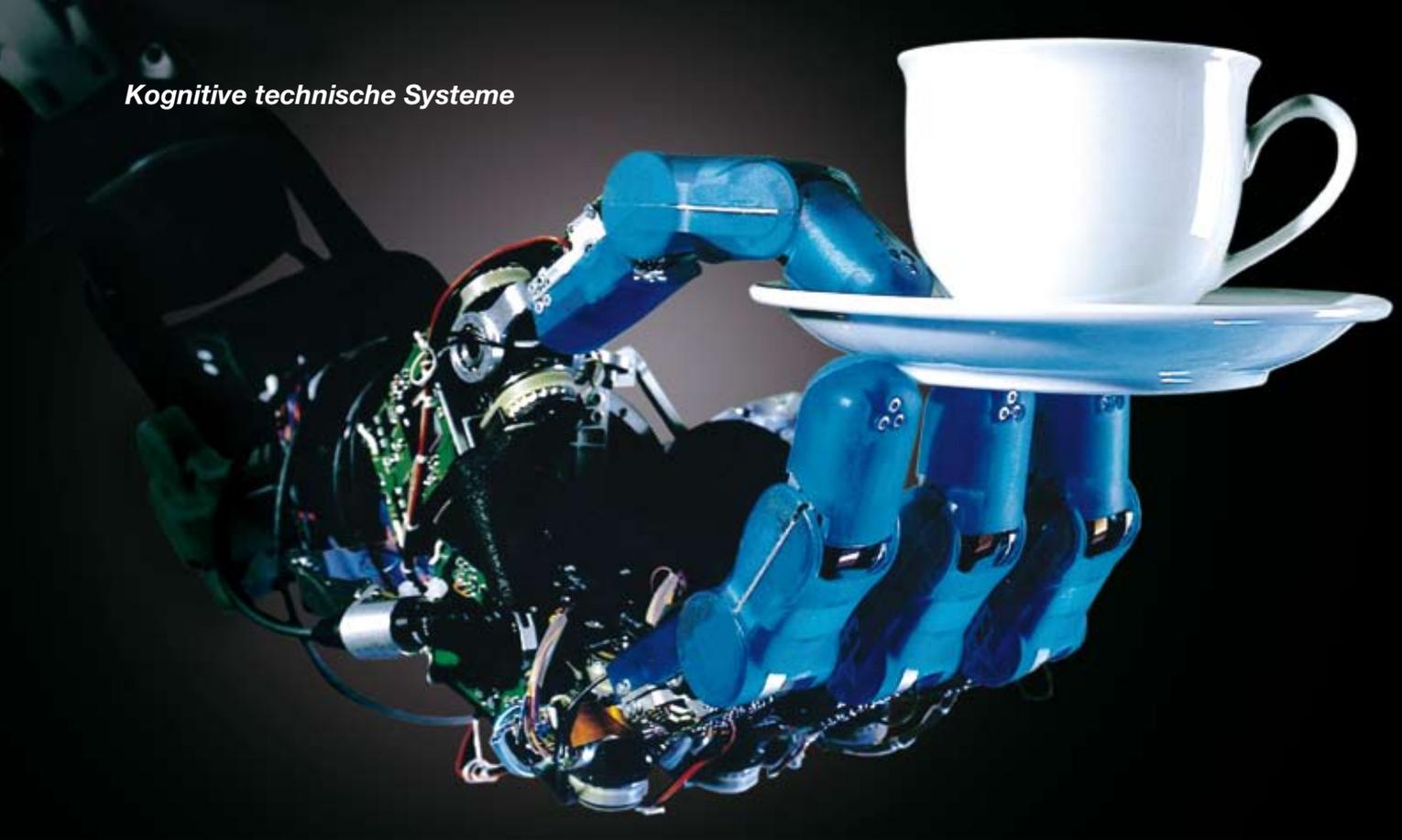


Foto: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Die Realisierung kognitiver Fähigkeiten in technischen Systemen stellt große Anforderungen an die Roboter. Mit einer Vielzahl von

ben – ausschlaggebend sind dabei unsere Erfahrungswerte, mit deren Hilfe wir eine Art Wahrscheinlichkeitsannahme machen“, erklärt Michael Beetz. Manchmal schlägt dieser Prozess fehl, und wer schon einmal eine halb volle Kaffeekanne mit zu viel Schwung vom Tisch genommen hat, kennt das Ergebnis: Flecken auf dem Tischtuch.

Ein Küchenroboter ohne kognitive Fähigkeiten würde die Kanne immer mit derselben Kraft vom Tisch heben, da er nicht auf sich verändernde Situationen vorbereitet ist. Der intelligente Roboter RWI B21 geht ähnlich wie der Mensch vor: Über seine Sensoren erfährt er, wie viel die Kanne wiegt – und wie viel Kaffee noch darin ist. Aus einer Auswahl an Parametern wählt er nun einen Wert, der zu dem gemessenen passt: Er nimmt die Kanne weder zu schnell noch zu langsam vom Tisch. „Menschen können gut mit Situationen umgehen, die sich verändern und die nur zum Teil bekannt sind“, sagt Michael Beetz. „Über unsere Sinne nehmen wir Situationen wahr, schätzen sie ein, blenden Unwichtiges aus und wägen die Konsequenzen unseres Handelns ab.“

Können Roboter aus Erfahrung lernen?

Um mit neuen Situationen zurechtzukommen und Lösungen zu finden, muss der Roboter lernen können. „Lernen bedeutet, dass Informationen gesammelt und gegebenenfalls neu geordnet und bewertet werden“,

Gelenken und Sensoren muss die menschliche Fingerfertigkeit und Feinfühligkeit nachgebildet werden

erklärt Prof. Dr. Beetz. Deckt ein Küchenroboter mit kognitiven Fähigkeiten den Tisch für vier statt für eine Person, bringt er beim ersten Mal die vier Teller einzeln zum Tisch, stellt dann aber fest, dass sein Handeln nicht effizient ist. Also nimmt er beim nächsten Mal einen Stapel von vier Tellern mit. Genauso wird er mit den Gläsern verfahren – und dabei feststellen, dass sich Gläser nicht wie Teller aufeinander gestellt transportieren lassen.

Förderungswürdiges Projekt

„Durch die Entwicklung von kognitiven Fähigkeiten werden technische Systeme zuverlässiger, flexibler, anpassbar und leistungsfähiger“, beschreibt Michael Beetz die Vorteile. „Unsere Küche erfüllt einerseits eine wichtige soziale Aufgabe, indem sie alte oder behinderte Menschen im Alltag unterstützt. Andererseits sind gerade diese vermeintlich simplen Aufgaben eine große Herausforderung für uns.“ Die Arbeit von Prof. Dr. Beetz und seinen Kollegen von der TU München, der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU), der Universität der Bundeswehr (UBM), des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) und des Max-Planck-Instituts für Neurobiologie (MPI) hat auch die Kommission für die Exzellenzinitiative überzeugt. CoTeSys wurde im Rahmen der ersten Runde der Exzellenzinitiative des Bundes als eines von 17 Exzellenzclustern gefördert.

Andrea Veyhle



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 TU München

Chefredakteur: Prof. Dr. Christoph Fasel, WortFreunde Kommunikation, Stuttgart/München

Chef vom Dienst: Tina Heun, Presse & Kommunikation Technische Universität München

Redaktionskoordinator: Kathrin Schmidt, WortFreunde Kommunikation, Stuttgart/München

Schlussredaktion: Marianne Waas-Frey

Gestaltung: Florian Hugger, Susanne Schmid

edivundsepp Gestaltungsgesellschaft, München
Infografik: Kiril Damyanov, Florian Hugger, Nina Hürlimann, Klaus Puchta, Thomas Rampp, Susanne Schmid, edivundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Autoren dieser Ausgabe: Rebecca Beerheide, Dr. Markus Bernards, Philip Eins, Jonathan Fasel, Kathrin Kommerell, Reiner Korbmann, Julia Nemetschek, Dr. Brigitte Röthlein, Andrea Veyhle, Dr. Karsten Werth

Redaktionsanschrift: Presse & Kommunikation Technische Universität München, 80290 München, E-Mail: faszination-forschung@zv.tum.de

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

Auflage: 30.000

ISSN: 1865-3022

Erscheinungsweise: zweimal jährlich

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt: Prof. Dr. Christoph Fasel

Verantwortlich für die Anzeigen: Tina Heun

Titelbild: Fotolia

© 2007 für alle Beiträge Technische Universität München, Presse & Kommunikation, 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 TU 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

Rebecca Beerheide studiert an der Universität Leipzig und der Universität Ljubljana/Slowenien Diplom-Journalistik und Politikwissenschaft. Sie volontierte beim Main-Echo in Aschaffenburg, arbeitete davor für die Deutsche Universitätszeitung (duz). Ehrenamtlich leitete sie eineinhalb Jahre politikorange, das Jugendmagazin der Jugendpresse Deutschland. Arbeit unter anderem für tagesschau.de, dpa, MDR Sputnik und Nordwest-Zeitung.

Dr. Markus Bernards, 38, wurde im Fach Genetik promoviert und ist seit neun Jahren Wissenschaftsjournalist. Er schreibt für Magazine, Tageszeitungen und Internetseiten vorwiegend über biotechnologische und medizinische Themen. Seit 2004 arbeitet er als Redakteur und Projektleiter für Forschungsmagazine im Büro für Wissenschafts- und Technikkommunikation Science&Media in Unterföhring bei München.

Philipp Eins ist freier Journalist für Magazine und Zeitungen, Schwerpunkt Bildung und Beruf. Auftraggeber sind Stern, Der Tagesspiegel, Deutsche Universitätszeitung und andere. Er ist Absolvent der Zeitenspiegel-Reportageschule und Mitglied im Journalistenbüro Pressesyndikat.

Jonathan Fasel studiert in Leipzig und Grenoble Journalistik und Politikwissenschaft. Arbeit für das Schwäbische Tagblatt, die Bundeszentrale für politische Bildung und die Jugendpresse Deutschland sowie für tagesschau.de, Berliner Zeitung und Kölner Stadtanzeiger.

Kathrin Kommerell studierte in London, Melbourne und Alexandria Arabische Politik und Literatur und lernte an der Berliner Journalistenschule. Veröffentlichungen: Berliner Morgenpost, Abendzeitung München, Deutschlandradio, Die Woche, Lenz, Stern und Süddeutsche Zeitung. Sie ist Lehrbeauftragte an der Akademie der bayerischen Presse in München.

Reiner Korbmann ist seit 35 Jahren Wissenschaftsjournalist. Seit 2001 betreibt er das Büro für Wissenschafts- und Technikkommunikation Science&Media in München. Zuvor war er elf Jahre Chefredakteur von bild der wissenschaft, sechs Jahre Chefredakteur des Computermagazins Chip, drei Jahre Chefredakteur des Magazins Umschau in Wissenschaft und Technik, sowie Wissenschaftsredakteur beim Stern und bei der Deutschen Presse-Agentur (dpa). Vor seiner journalistischen Ausbildung an der Deutschen Journalistenschule in München studierte er Physik an der Universität München.

Julia Nemetschek, Studium der Politikwissenschaft und der Volkswirtschaftslehre in Mainz und Heidelberg. Redaktionelle freie Mitarbeit bei Tageszeitungen: u. a. Allgemeine Zeitung Mainz, Rhein-Neckar-Zeitung Heidelberg. Langjährige freie Mitarbeit an Studio- und Außenproduktionen beim ZDF. Seit August 2005 Redakteurin bei WortFreunde Kommunikation.

Dr. Brigitte Röthlein, Studium der Physik, 1973-75 Leiterin der Öffentlichkeitsarbeit am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching, 1975-81 als Wissenschaftsredakteurin bei der Zeitschrift Quick, 1981-91 als Redakteurin bei P.M., 1986 Entwicklung der Hefreihe P.M.-Perspektiven und stellvertretende Chefredakteurin. Seither als freie Wissenschaftsautorin für eine Vielzahl von Zeitungen und Zeitschriften tätig, gleichzeitig Autorin populärwissenschaftlicher Bücher, 1993-95 als Chefredakteurin des Geschichtsmagazins Damals, 2004 und 2005 als Redaktionsleiterin des Forschungs- und Technologiema-gazins Innovate tätig.

Andrea Veyhle, Studium der Germanistik und Anglistik in Stuttgart. Praktika und langjährige freie Mitarbeit bei einer Tageszeitung und einem Veranstaltungsmagazin. Während und nach Abschluss des Studiums Aufbau und Leitung eines Online-Musikmagazins. Seit September 2004 Redakteurin bei WortFreunde Kommunikation.

Dr. Karsten Werth ist Redakteur bei WortFreunde Kommunikation. Er studierte Zeitgeschichte und Amerikanistik in Tübingen und Newcastle, promovierte in Zeitgeschichte. Vor seiner Zeit bei den WortFreunden sammelte er Erfahrung in Wirtschaft und Journalismus, unter anderem bei JBI Localization in Los Angeles, VW Canada in Toronto, Deutsche Welle-TV in Berlin, Deutsche Fernsachrichten Agentur in Düsseldorf und als freier Mitarbeiter beim Schwäbischen Tagblatt in Tübingen.

Rita Süßmuth

Forschung kann Menschen bilden!

Neugierde ist der erste Antrieb des Menschen, die Welt, die ihn umgibt, zu begreifen. Neugierde ist es, die den Forscher beflügelt, Erkenntnis zu suchen. Das heißt zugleich: Der Mensch muss forschen, um zu wissen, was er vermag. Was seine Verantwortung ist. Und um Grenzen und ihre Erweiterung zu erfahren. Er forscht, um seine Humanität zu finden.



Es darf nichts so bleiben, wie es war. Denn der denkende Mensch sollte sich immer wieder die Frage stellen: Wie funktioniert die Welt? Wie könnte sie besser werden? Was ist zu tun, um Leid, Gleichgültigkeit, Unwissen und Krankheit zu überwinden?

Ein Mensch, der sich diese Fragen nicht stellt, hat drei Probleme. Erstens vergibt er die Chance, sein Bild von der Welt zu prüfen, zu befragen und zu verändern – vor allem da, wo es angeraten wäre. Zweitens verpasst er das Wagnis des Denkens: Anstatt sich auf die Reise des Fragens, Staunens und Suchens zu machen, begnügt er sich, ohne Forscherdrang ausgestattet, damit, ein vorgekauftes Repertoire angeblich sicherer Fakten und Meinungen nachzubeten. Und drittens kann er damit der ganzen Spezies gefährlich werden: Dann nämlich, wenn die angeblichen Sicherheiten zur Ideologie, ihre Wahrheiten ungeprüft zur Handlungsanweisung („Tötet alle Feinde!“) werden.

Sehen wir einer Tatsache ins Auge: Es gibt in allen Ländern dieser Erde viele Menschen, die nie gelernt oder aufgehört haben, Fragen zu stellen. Aus unterschiedlichen Gründen: Sie erlebten vielleicht niemals ein Gegenüber, das ihr Staunen und Wissenwollen mit Verständnis beantwortet hätte. Oder sie wurden in einem System von Politik, Ideologie oder religiösem Fanatismus erzogen, das Neugierde als Bedrohung, Denken und Forscherdrang als Abweichung denunzierte.

Es sind jene zu vielen Menschen, denen immer noch beigebracht wird, kritiklos

zu glauben, anstatt kritisch zu denken. Diesen Menschen haben die Systeme, in denen sie aufwuchsen oder in die sie gepresst wurden, einen Teil ihrer Humanität vorenthalten. Dieser Teil der Humanität ist der Ruf der Aufklärung „Sapere aude!“, „Wage zu wissen!“

Wer Wissen wagt, der beginnt zu forschen. Wer forscht, setzt sich mit den Grenzen des Wissens auseinander. Wer sich mit Grenzen auseinandersetzt, wird sie überschreiten und zu neuen Einsichten kommen, die vielleicht die Welt verändern. Oder die sie ein Stück glücklicher und lebenswerter machen. Jede Erkenntnis ist mit neuen Fragen verbunden. Das schützt vor Arroganz und Selbstüberschätzung.

Forschung vermag Menschen zu bilden. Teilhabe an Neugierde, die Freude, am Experiment dabei zu sein: Sie fördert nicht nur das Fachwissen, sondern auch jene menschliche Gabe, die aus Wissenschaftlern Weisheit machen kann: im ethischen Umgang mit Forschungen, im Umgang mit den Ergebnissen, weise im Umgang mit der Vermittlung.

Weisheit kann durch Forschung befördert werden. Und das ist wichtig. Denn wir wissen – Forschung ohne ethisches Rückgrat, ohne Blick auf Konsequenzen und möglichen Missbrauch kann in eine Katastrophe führen. Mit der Freiheit des Fragens und Erkennens ist zugleich die Verantwortung der Forscher gegenüber dem Kosmos, gegenüber Mensch und Natur verbunden. Gut, wenn eine Gesellschaft weiß, dass sie die Forschung und ihre Forscher so nötig braucht wie die Luft zum Atmen. □

Prof. Dr. Rita Süßmuth: Professorin für Erziehungswissenschaft, Institutsleiterin, Familienministerin; 1988 wurde sie zur Bundestagspräsidentin gewählt. Sie hat zahlreiche Funktionen und Ämter in der wissenschaftlichen Beratung, zu politischen Fragen sowie in der Aus- und Weiterbildung inne. In ihrem neuesten Buch mit dem Titel „Dennoch: Der Mensch geht vor“ beschäftigt sich die Politikerin mit der Frage, wie der Mensch als Individuum in das Zentrum der Gesellschaft zurückkehren kann.



Einfachheit bedeutet, dass er so wenig wie möglich abbekommt.

Der **Philips Brilliance Computertomograph** verwendet dank spezieller Software wenig Röntgenstrahlung und erzeugt gleichzeitig 3D Bilder mit höchstmöglicher Auflösung.

Wollen Sie mehr über Gesundheit & Wohlbefinden wissen? Besuchen Sie:

www.philips.de/einfachheit

PHILIPS
sense and simplicity

Exzellenz

in Lehre und Forschung

21000 Studierende
4000 Wissenschaftler
420 Professoren

leben sie.

Die Technische Universität München ist stolz auf die Menschen, die sie machen.